



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DO
TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

MARCONE DE OLIVEIRA JUNIOR

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.

TESE DE DOUTORADO

PUBLICAÇÃO: G.TD-200/2024

BRASÍLIA, DF, JUNHO DE 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

**ANÁLISE NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DO TRINCAMENTO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS**

MARCONE DE OLIVEIRA JUNIOR

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA
AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D (UnB)
ORIENTADOR

LEANDRO LIMA RASMUSSEN, Ph.D (UnB)
EXAMINADOR INTERNO

FRANCISCO THIAGO SACRAMENTO ARAGÃO, Ph.D (COPPE/UFRJ)
EXAMINADOR EXTERNO

JORGE BARBOSA SOARES, Ph.D (UFC)
EXAMINADOR EXTERNO

BRASÍLIA, 28 DE JUNHO DE 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE OLIVEIRA JUNIOR, MARCONE

Análise numérica tridimensional do trincamento de misturas asfálticas. [Distrito Federal]
2024

xviii, 135 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2024)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- | | |
|---|------------------------|
| 1. Pavimentação | 2. Misturas Asfálticas |
| 3. Trincamento | 4. Partículas |
| 5. Método dos Elementos Finitos Estendido | |
| I. ENC/FT/UnB | II. Doutor |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE OLIVEIRA JUNIOR, M. (2024). Análise numérica tridimensional do trincamento de misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Marcone de Oliveira Junior

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Análise numérica tridimensional do trincamento de misturas asfálticas.

GRAU/ANO: Doutor/2024

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marcone de Oliveira Junior

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12,
Universidade de Brasília. CEP 70910-900 – Brasília, DF – Brasil

marcone@outlook.com

“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo.

Todos nós sabemos alguma coisa.

Todos nós ignoramos alguma coisa.

Por isso aprendemos sempre.”

Paulo Freire

AGRADECIMENTOS

Serei sempre grato aos meus pais, Marcone e Wanilda, pelo exemplo. Não houve um minuto sequer da minha trajetória que eu não pensasse o quanto desejo ser ao menos parecido em bondade e evolução. Agradeço imensamente por toda a confiança ao longo de todo o percurso acadêmico que decidi trilhar.

Ao meu orientador, professor Márcio Muniz, a quem devo muito amadurecimento profissional e a quem tenho muito a agradecer pelas portas abertas. É muito gratificante entender o quanto o senhor deposita sua confiança em seus alunos, e saiba que, de forma inspiradora, isso nos torna pessoas cientes de nossas virtudes e de nosso potencial.

Ao Felipe, que chegou no meio desse trabalho e que se fez morada em cada dia de ansiedade. Todo o seu apoio e o quanto você acreditou e acredita em mim me foram fundamentais para eu recuperar o fôlego e dar um passo adiante. Tudo ficou mais feliz com você.

À Universidade de Brasília, da qual tenho muito orgulho, e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, pelo ensino público de qualidade.

Aos professores Leandro Rasmussen, Thiago Aragão, Jorge Soares, Manoel Porfírio e Rafael Cerqueira pelas contribuições neste trabalho, na qualificação e na defesa da tese. Ao professor Carlos Recarey, peça chave no meu impulsionamento e no desenvolvimento de grande parte desse trabalho.

A todos que vivem e integram o INFRALAB, comemorando cada conquista individual e coletiva alcançada por quem busca nada menos que excelência. Em especial, às amigas Débora, Letícia e Andrea. Sempre foi mais leve por poder contar com vocês. Agradeço imensamente, ainda, aos técnicos Amanda, Everton e Sanderson.

Aos fiéis amigos, que sempre souberam me ajudar com o que eu mais precisava: momentos de descompressão ao lado dos meus. Obrigado Ana Rissoli, Ana Souto, Vinicius, Leonardo, Lana, Andreia, Bianca, Juliana, Marina, Pryscilla, Jessica, Bethania, Luciana, Amanda e Thais.

À CAPES, FAPDF e FURNAS/Eletrobras, que financiaram o desenvolvimento dessa pesquisa. Este trabalho faz parte do projeto de P&D "Otimização do modelo meteorológico

BRAMS, com validação experimental, para subsidiar aperfeiçoamentos de modelagens em sistemas eólicos" - PD-0394-1709/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS e UnB. Um grande país só se constrói com investimento robusto em geração de conhecimento e tecnologia.

Análise numérica do trincamento de misturas asfálticas

Marcone de Oliveira Junior

RESUMO

A presente tese de doutorado detalha uma nova abordagem para a simulação numérica do trincamento de misturas asfálticas em mesoescala. Para a construção do modelo, foram adotadas duas fases constituintes do material compósito, quais sejam a MAF (Matriz de Agregados Finos) e o ESG (Esqueleto Sólido Graúdo), que constituem o CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente). A fim de se simular o comportamento de forma verossímil, os materiais constituintes de cada fase foram estudados e caracterizados individualmente, de forma experimental, para suas representações numéricas, considerando características básicas, como tamanho e forma, bem como seus modelos constitutivos. Foram empregadas novas tecnologias para geração e empacotamento de partículas, com o objetivo de se construir um conjunto de agregados representativo que, uma vez envolto em um meio contínuo definido em um domínio pré-estabelecido, permitiu a construção de um modelo que simula um corpo de prova de concreto asfáltico. Com o objetivo de emular o trincamento de misturas asfálticas, foi definida uma geometria do modelo numérico que simulasse o ensaio de flexão em amostra semicircular, e essa foi ensaiada virtualmente, com o programa ABAQUS, sob as mesmas condições de contorno especificadas para o ensaio experimental. Uma vez calibrado o modelo, este mostrou-se validado uma vez comparado a resultados experimentais, o que o viabiliza para utilização em estudos paramétricos e valida a tecnologia empregada para a representação numérica de um problema complexo. Observou-se, finalmente, que o modelo construído representa de forma fidedigna a formação das trincas, embora não represente sua propagação.

Palavras-chave: Pavimentação; Misturas asfálticas; trincamento; partículas; Método dos Elementos Finitos Extendido.

Numerical analysis of Asphalt Hot Mixtures cracking

Marcone de Oliveira Junior

ABSTRACT

This doctoral dissertation details a new approach to the numerical simulation of cracking in asphalt mixtures on a mesoscale. To build the model, two constituent phases of the composite material were adopted, namely the FAM (Fine Aggregate Matrix) and the ESG (Coarse Solid Skeleton), which make up the FMA (Hot Mix Asphalt). In order to simulate the behaviour in a reliable way, the constituent materials of each phase were studied and characterized individually, experimentally, for their numerical representations, considering basic characteristics such as size and shape, as well as their constitutive models. New technologies for generating and packing particles were used in order to build a representative set of aggregates which, once surrounded by a continuous medium defined in a pre-established domain, allowed for the construction of a model that simulates an asphalt concrete specimen. To emulate the cracking of asphalt mixtures, a numerical model geometry was defined to simulate the bending test on a semicircular sample, which was then tested virtually using the ABAQUS program, under the same boundary conditions specified for the experimental test. Once the model had been calibrated, it proved to be validated when compared to experimental results, which makes it viable for use in parametric studies and validates the technology used to represent it.

Keywords: Paving; Asphalt mixtures; cracking; particles; Extended Finite Element Method.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	4
1.2	HIPÓTESE.....	4
1.3	JUSTIFICATIVA.....	4
1.4	OBJETIVOS	5
1.4.1	OBJETIVO GERAL	5
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	VISCOELASTICIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS	7
2.1.1	FUNÇÕES DE RESPOSTA VISCOELÁSTICA LINEAR	11
2.1.2	MODELAGEM DAS PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS	13
2.2	DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	15
2.3	MODELAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	18
2.3.1	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	18
2.3.2	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO.....	20
2.3.3	HISTÓRICO DE MODELAGENS NUMÉRICAS	21
2.3.4	MODELAGEM DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO	26
2.3.4.1	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS VIRTUAIS	28
2.4	TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	31
2.4.1	MECÂNICA DA FRATURA E O ENTENDIMENTO DO TRINCAMENTO.....	36
2.4.2	MODELAGEM NUMÉRICA DO TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	40
3.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	40
3.1.1.1	Caracterização dos agregados.....	40
3.1.1.2	Caracterização do ligante.....	44
3.1.2	ESTUDO DA DOSAGEM.....	45
3.1.2.1	Dosagem da Mistura Asfáltica Completa (CBUQ)	45
3.1.2.2	Dosagem da Matriz de Agregados Finos (MAF)	49
3.1.2.3	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	50
3.1.2.4	ENSAIOS MECÂNICOS.....	52

3.1.2.4.1	Curva mestra de módulo dinâmico	52
3.1.2.4.2	Ensaio de flexão em amostra semicircular (SCBT).....	55
3.2	ABORDAGEM NUMÉRICA.....	57
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO PROBLEMA.....	58
3.2.1	MODELAGEM CONSTITUTIVA DOS MATERIAIS.....	62
3.2.2	SIMULAÇÕES DE ENSAIOS DE FLEXÃO EM AMOSTRA SEMICIRCULAR (SCB)	64
3.2.2.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	64
3.2.2.2	ESTUDO DA MALHA DO MODELO	66
3.2.2.3	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO	68
4	ANÁLISES DOS RESULTADOS	70
4.1	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	70
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	70
4.1.1.1	AGREGADOS GRAÚDOS	71
4.1.1.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	75
4.1.1.2.1	Diagrama de Espaço <i>Black</i>	76
4.1.1.2.2	Curva mestra	77
4.1.2	DOSAGEM <i>SUPERPAVE</i>	78
4.1.3	DOSAGEM DA MAF.....	81
4.1.4	MÓDULO DINÂMICO DAS MISTURAS.....	83
4.1.5	FLEXÃO EM AMOSTRAS SEMICIRCULARES DAS MISTURAS.....	86
4.2	ABORDAGEM NUMÉRICA DO ENSAIO SCB.....	94
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
5.1	CONCLUSÕES	102
5.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	102
5.1.2	DOSAGEM EXPERIMENTAL DAS MISTURAS ESTUDADAS (MAF E MAC)	103
5.1.3	COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ESTUDADAS	103
5.1.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TRINCAMENTO DO CBUQ	104
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Tolerâncias recomendadas para sete fatores da ASTM D8044-16: SCB-Jc (modificado-Zhou <i>et al.</i> , 2022)	36
Tabela 3.1. Campanha experimental de caracterização do ligante.	44
Tabela 3.2. Temperaturas de mistura e compactação.....	47
Tabela 3.3. Teores dos materiais estudados para determinação do teor de ligante da mistura.	48
Tabela 3.4. Série de Prony ajustada à Curva de Relaxação da MAF.....	64
Tabela 3.5. Análise de refinamento de malha.	68
Tabela 4.1. Classificação da forma dos agregados segundo a ABNT NBR 7809 (1983).....	71
Tabela 4.2. Índices de classificação de forma resultantes da análise no AIMS2.....	73
Tabela 4.3. Exemplo de caracterização de partícula a partir do escaneamento 3D realizado..	74
Tabela 4.4. Caracterização experimental do ligante CAP 50/70 utilizado.....	76
Tabela 4.5. Propriedades de massa específica dos agregados da mistura.....	79
Tabela 4.6. Parâmetros do CBUQ com 4,3% de Teor de ligante.....	81
Tabela 4.7. Parâmetros da MAF com 6,5% de Teor de ligante.	83
Tabela 4.8. Coeficientes de ajuste das equações sigmoidais à Curva Mestre das misturas.	84
Tabela 4.9. Resultados do ensaio SCB das misturas.....	93
Tabela 4.10. Dados de entrada da série de Prony calculados pelo ABAQUS, em função da curva de Relaxação.....	94
Tabela 4.11. Resumo de energias de ruptura por trincamento	100
Tabela 4.12. Comparação de resultados de taxa de liberação crítica de energia de deformação.	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fases constituintes do CBUQ (Oliveira Junior, 2018 - adaptado).....	2
Figura 1.2. Simulações de ensaios de Fluência Estática em CBUQ a partir de suas fases constituintes ESG + MAF. a) Pacote de agregados; b) Corpo de prova com ESG + MAF; e c) CP ensaiado (Oliveira Junior e Farias, 2020).....	3
Figura 2.1. Componentes de deformação em material viscoelastoplástico (SIDES <i>et al.</i> , 1985, <i>apud</i> Mello, 2008).....	8
Figura 2.2. Plano complexo (Modificado – KIM, 2009)	8
Figura 2.3. Resposta da tensão e da deformação a um ensaio com solicitação harmônica (Mello, 2008 <i>apud</i> Oliveira Junior, 2018).....	9
Figura 2.4. Exemplo esquemático de curva mestra e <i>shift factors</i> (Bonaquist e Christensen, 2005).....	10
Figura 2.5. Conversão de E' em $E(t)$ para MAC (modificado – KIM, 2009)	13
Figura 2.6. Modelos mecânicos de (a) materiais viscoelásticos (b) Voight-Kelvin generalizado (c) Maxwell generalizado (modificado - Huang, 1993).....	14
Figura 2.7. Ajuste de Série de Prony para $E(t)$ com e sem pré-suavização (modificado – KIM, 2009).....	15
Figura 2.8. Exemplo de granulometria em gráfico com pontos de controle da Metodologia <i>Superpave</i> (Bernucci <i>et al.</i> , 2022).....	16
Figura 2.9. Esquema do molde e do giro do compactador giratório <i>Superpave</i> (DNIT, 2018).	17
Figura 2.10. Fluxograma de modelagem de problema físico. (modificado – RECAREY, 1999).....	18
Figura 2.11. Relação entre diferentes escalas e técnicas de modelagem numérica. (modificado – KIM, 2007 <i>apud</i> GARCÍA, 2017).	19
Figura 2.12. Cálculo da Função degrau para uma trinca.....	21
Figura 2.13. Compressão diametral simulada em corpos de prova heterogêneos (Soares <i>et al.</i> , 2003).....	22
Figura 2.14. Corpos de prova simulados para análise de concreto asfáltico sob o ensaio Brasileiro (modificado - Yue <i>et al.</i> , 2003)	22
Figura 2.15. Superfícies de trincamento depois de ruptura para ensaio de tração (modificado - Su <i>et al.</i> , 2010).	23
Figura 2.16. Simulação de ensaio de flexão em três pontos e formação de trinca em região enriquecida com Elementos de zona Coesiva (modificado - Aragão, 2011)	24
Figura 2.17. Propagação de trincas com modelo XFEM no ABAQUS (Lancaster <i>et al.</i> , 2013).	25

Figura 2.18. CP de CBUQ (MAF + ESG) ensaiado sob fluência estática (Oliveira Junior, 2018).....	25
Figura 2.19. Deformação e tensão normais na direção y, homogeneizadas no CP virtual de MAF (Pereira de Almeida <i>et al.</i> , 2019).....	26
Figura 2.20. Geração de modelo bidimensional para simulação em Elementos Finitos (Dai & You, 2007).....	27
Figura 2.21. Pacotes de partículas (agregados) gerados via: (a) tomografia de raios-X (You <i>et al.</i> , 2009), e (b) geração algorítmica randômica (Liu <i>et al.</i> , 2017).	28
Figura 2.22. Método de geração 3D. (a) seção transversal (x, y); (b) seção transversal (y, z); (c) seção transversal (x, z); (d) sólidos S1 a S4 obtidos na revolução das metades das seções transversais; (e) sólidos S1'a S4' obtidos por alongamento horizontal de S1 a S4; (f) sólido final (Valera <i>et al.</i> , 2022)	30
Figura 2.23. Exemplos de partículas de formas complexas simplificadas por <i>clusters</i> de esferas e pacotes gerados com as partículas simplificadas (Valera <i>et al.</i> , 2023).	31
Figura 2.24. Exemplos de trincas em pavimento flexível: a) trinca transversal; b) trinca longitudinal; c) trincas tipo “couro de jacaré”; e d) trincas tipo “bloco” (DNIT 005/2003 – TER).....	32
Figura 2.25. Esquema de preparação de corpos de prova e realização do ensaio SCBT (Saha e Biligiri, 2015 - modificado).	34
Figura 2.26. Exemplos de curvas carga × deslocamento para diferentes aberturas de pré-trincas (ASTM D8044 - 16)	35
Figura 2.27. Modos de fratura: I (abertura), II (deslizamento) e III (rasgamento) (Alshandah <i>et al.</i> , 2018).	37
Figura 2.28. Esquema de modelagem de propagação de trincas com elementos de ZC (esquerda) e XFEM (direita).	38
Figura 3.1. Fluxograma da metodologia do trabalho.	39
Figura 3.2. Composição granulométrica da MAF, a partir do Centro da Faixa C do DNIT....	41
Figura 3.3. Análise granulométrica da Faixa C e limites do DNIT e ADOT.....	42
Figura 3.4 Medidas realizadas no paquímetro em amostra de agregados para caracterização de forma. Fonte: Oliveira Junior (2018) e Oliveira Junior e Farias (2020)	42
Figura 3.5. Escaneamento 3D de agregado com utilização do Scanner DAVID-3D.....	43
Figura 3.6. a) Penetrômetro e b) Viscosímetro <i>Brookfield</i>	44
Figura 3.7. Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).	45
Figura 3.8. Compactador giratório utilizado para confecção dos corpos de prova.....	46
Figura 3.9. Determinação de temperaturas de mistura e compactação a partir do ensaio de viscosidade.	47
Figura 3.10. Misturador mecânico para homogeneização dos materiais	48

Figura 3.11. Conjunto de <i>Rice Test</i> utilizado para determinação de massa específica máxima da mistura.	49
Figura 3.12. Procedimentos de preparação do corpo de prova de mistura asfáltica: a) Mistura antes da compactação; b) CPs compactados ao molde do cilindro do compactador; c) corte transversal para definição da altura do CP; d) corte dos semicírculos necessários ao ensaio SCBT.	51
Figura 3.13. a) Corpos de prova cortados; b) CP para Ensaio MD; c) CP para ensaio SCBT.	52
Figura 3.14. Equipamento de ensaios modular do tipo eletromecânico servoatuador - <i>AsphaltQube</i>	53
Figura 3.15. Corpo de prova posicionado para realização do ensaio de Módulo Dinâmico....	53
Figura 3.16. Aparato para realização de ensaio de Flexão em Amostra Semicircular. Dimensões em milímetros.	56
Figura 3.17. Agregados cortados no domínio do CP do ensaio SCB.....	57
Figura 3.18. Corpo de prova com ESG (Esqueleto Sólido Graúdo) e MAF (Matriz de Agregados Finos).	58
Figura 3.19. Metodologia geral de modelagem de microestrutura de materiais (modificado - Recarey <i>et al.</i> , 2019)	60
Figura 3.20. Corpos de prova gerados com agregados de diferentes formas, quais sejam: a) tetraedros; b) cubos; c) octaedros; d) dodecaedros; e) icosaedros; e f) forma real.	61
Figura 3.21. Domínio cilíndrico de empacotamento de agregados com forma e granulometria reais.	62
Figura 3.22. Corte de agregados para geração de corpos de prova na geometria do ensaio simulado.	62
Figura 3.23. Materiais empregados nas simulações do ensaio SCB: aço, em verde; MAF, em vermelho; e Agregados Graúdos, em bege.....	64
Figura 3.24. Aparato do ensaio simulado e condições de contorno.....	65
Figura 3.25. Elemento C3D10: tetraedro de 10 nós.....	67
Figura 3.26. Exemplo de malha gerada para o corpo de prova gerado para o ensaio SCB.	67
Figura 3.27. Exemplo de propagação de trinca em corpo de prova de MAF, após ruptura.....	69
Figura 4.1 a) Distribuição de medidas de comprimento das partículas; b) distribuição das medidas de largura das partículas; e c) distribuição das medidas de espessura das partículas.....	72
Figura 4.2. Exemplos de partículas escaneadas entre peneiras de aberturas 4,8 mm e 19,1 mm.	73
Figura 4.3. Diagrama de <i>Black Space</i> do ligante CAP 50-70 nas condições Virgem e Pós-RTFOT.	77
Figura 4.4. Curvas mestras do ligante CAP 50-70 nas condições Virgem e Pós-RTFOT.....	78
Figura 4.5. Composição granulométrica de mistura para confecção de CP com 4,0% de teor de ligante.	79

Figura 4.6. Resultados de parâmetros de dosagem do CBUQ.	80
Figura 4.7. Porcentagem dos agregados correspondente à porção miúda, seguindo a Faixa C.	82
Figura 4.8. Granulometria dos agregados que compõem a MAF.	82
Figura 4.9. Curvas mestras de Módulo Dinâmico das misturas.....	84
Figura 4.10. Curvas de ângulo de fase das misturas.	85
Figura 4.11. Curva de Relaxação da MAF, ajustada por uma Série de Prony.....	86
Figura 4.12. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAF com 25 mm de pré-trinca.	87
Figura 4.13. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAF com 32 mm de pré-trinca.	87
Figura 4.14. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAF com 38 mm de pré-trinca.	88
Figura 4.15. Exemplos de trincas abertas em CPs de MAF rompidos no ensaio SCB.....	89
Figura 4.16. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAC com 25 mm de pré-trinca.	89
Figura 4.17. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAC com 32 mm de pré-trinca.	90
Figura 4.18. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAC com 38 mm de pré-trinca.	90
Figura 4.19. Exemplos de trincas abertas em CPs de MAC rompidos no ensaio SCB.....	91
Figura 4.20. Curvas Carga × Deslocamento de ensaios de flexão em amostra semicircular...	92
Figura 4.21. Gráfico de energia de deformação em função da abertura da trinca inicial das misturas.	93
Figura 4.22. Corpo de prova ensaiado e deformado ao final do ensaio, no momento da ruptura.	95
Figura 4.23. Visualização da concentração de tensões no interior do corpo de prova ensaiado.	96
Figura 4.24. Resultados de simulações numéricas com CPs com 25 mm de abertura de pré- trinca.....	97
Figura 4.25. Resultados de simulações numéricas com CPs com 32 mm de abertura de pré- trinca.....	97
Figura 4.26. Resultados de simulações numéricas com CPs com 38 mm de abertura de pré- trinca.....	98
Figura 4.27. Exemplos de microtrincas geradas antes ou até a ruptura do corpo de prova.	99
Figura 4.28. Energia de deformação em função da abertura da trinca inicial da MAC para resultados experimentais e numéricos.....	101

LISTA DE NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	Aggregate Image Measurement System
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
CP	Corpo de prova
DEM	Discrete Element Method
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESG	Esqueleto Sólido Graúdo
<i>et al.</i>	E outros
FEM	Finite Element Method
GB	Giga Bytes
GPa	Giga Pascal
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
MAC	Mistura Asfáltica Completa
MAF	Matriz de Agregados Finos
MED	Método dos Elementos Discretos
MEF	Método dos Elementos Finitos
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
MQL	Mínimos Quadrados Linear
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
R ²	Coefficiente de correlação linear
SCB	Semicircular Bending
SMA	Stone Matrix Asphalt
Superpave	Superior Performing Asphalt Pavements
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UMAT	User Material
UnB	Universidade de Brasília
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VAM-G	Vazios do Agregado Mineral Graúdo
XFEM	Extended Finite Element Method

LISTA DE SÍMBOLOS

$D(t)$	Função Fluência (ou <i>Creep Compliance</i>)
D_0	Termo independente do tempo na Série de Prony de Fluência
E	Módulo de Young
$E(t)$	Função Relaxação
E^*	Módulo complexo
$ E^* $	Módulo dinâmico
E_∞	Termo independente do tempo na Série de Prony de Relaxação
$G(t)$	Módulo de cisalhamento no tempo
G^*	Módulo cisalhante complexo
$ G^* $	Módulo cisalhante dinâmico
$K(t)$	Módulo volumétrico no tempo
t	Tempo
t_{360}	Tempo ao final do carregamento no ensaio de fluência estática
t_{450}	Tempo ao final do descarregamento no ensaio de fluência estática
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
ε	Deformação
ε_0	Amplitude de deformação
δ	Ângulo de fase
ω	Frequência angular
σ	Tensão
τ_i	Tempos de retardação
ρ_i	Tempos de relaxação
ν	Coefficiente de Poisson

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de transportes constituem elementos essenciais para o desenvolvimento econômico dos países. O pleno e eficaz escoamento de pessoas e mercadorias tem impacto direto sobre o crescimento econômico, visto que afetam a indústria, a agropecuária e os serviços. O Brasil possui uma malha rodoviária constituída, em grande parte, por estradas não-pavimentadas. Dentre os principais corredores de escoamento rodoviário, os quais são pavimentados, a absoluta maioria (cerca de 99%) é constituída por pavimentos flexíveis (CNT: SEST SENAT, 2021).

Pavimentos flexíveis são aqueles compostos por uma camada de concreto asfáltico (ou de tratamentos superficiais) no revestimento superficial, e pelo menos uma camada granular na infraestrutura. O CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), comumente conhecido como mistura asfáltica convencional, é o tipo de concreto asfáltico mais utilizado no país. O material tem a função de resistir a esforços diretos do tráfego sobre o pavimento, além de dar acabamento nivelado para as estradas e rodovias. É composto, basicamente, por agregados (gráudos, miúdos e de enchimento) e ligante asfáltico (CAP), contendo ainda vazios preenchidos por ar.

É comum dividir a mistura do CBUQ em duas fases complementares, mas de comportamentos distintos: o Esqueleto Sólido Graúdo (ESG), constituído pelos agregados gráudos e, neste trabalho, definidos com granulometria superior a 4,8 mm; e a Matriz de Agregados Finos (MAF), que os envolve e aglutina (Zeleeuw, 2008). Essa divisão mostra-se útil para a modelagem numérica de misturas asfálticas (García, 2017; Oliveira Junior, 2018; Oliveira Junior *et al.*, 2019; Oliveira Junior e Farias, 2020; Oliveira Junior *et al.*, 2022). Uma vez que a complexidade geométrica do pacote de agregados, principalmente dos miúdos, é muito relevante, convém à modelagem de misturas asfálticas representar a MAF como um material homogêneo. A Figura 1.1 apresenta as fases constituintes do CBUQ segundo essa interpretação.

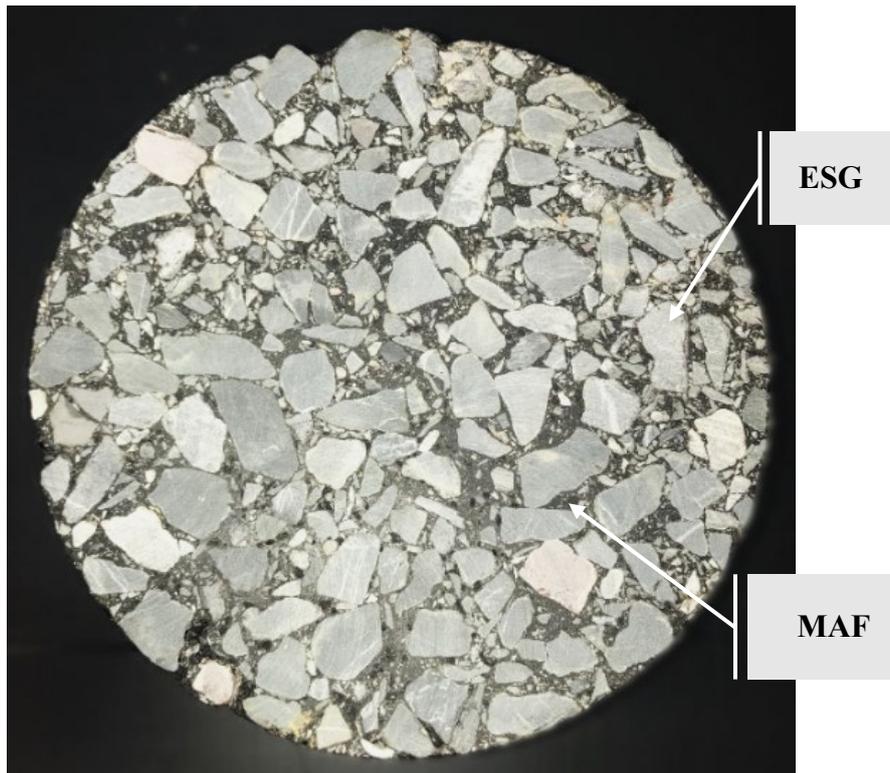


Figura 1.1. Fases constituintes do CBUQ (Oliveira Junior, 2018 - adaptado).

A Pesquisa CNT de Rodovias (CNT: SEST SENAT, 2021) identificou que melhorias de qualidade das rodovias brasileiras são urgentes, visto que são a base do sistema logístico do país. Mais da metade delas (52,2%) apresentam algum tipo de manifestação patológica no pavimento, com avaliação negativa. Segundo Kim (2009), o desempenho de um concreto asfáltico pode ser categorizado por dois principais tipos de danos: trincas e deformações permanentes. Estas últimas são causadas principalmente sob condições de altas temperaturas e/ou carregamentos lentos, enquanto as trincas podem ser causadas por cargas repetidas ou carregamentos térmicos. O comportamento e o desempenho quanto a esses danos são afetados por fatores como tempo e taxa de carregamento, temperatura, estado de tensões, tipo de carregamento, idade e umidade da amostra.

Numerosos são os ensaios experimentais existentes para mensuração do desempenho de misturas asfálticas quanto à formação dessas manifestações patológicas. Entretanto, em função de serem danos induzidos por carregamentos ao longo da vida útil do pavimento, os ensaios, mesmo que acelerados, em geral carecem de longo tempo de execução, além de apresentarem grandes dificuldades de preparação e conformação de corpos de prova. Nos últimos anos, novas tecnologias numéricas têm sido empregadas para a simulação computacional de desempenho

dessas misturas, seja para fins de replicabilidade e representatividade de ensaios, ou mesmo para subsidiar o dimensionamento de pavimentos.

Oliveira Junior (2018) abordou, em sua dissertação de mestrado, a simulação de ensaios de deformações permanentes em corpos de prova de CBUQ a partir de ensaios de fluência estática (*creep*). De posse de um modelo numérico representativo geométrica e constitutivamente, calibrado por ensaios experimentais, foi possível estabelecer correlações entre a geometria dos agregados graúdos e a resistência a deformações permanentes no compósito, conforme apresentado em Oliveira Junior e Farias (2020). As simulações numéricas mostraram boas correlações com os resultados experimentais e validaram a modelagem de misturas complexas a partir das propriedades de seus materiais constituintes (representados pelas duas fases: ESG e MAF). A Figura 1.2 exemplifica o modelo gerado.

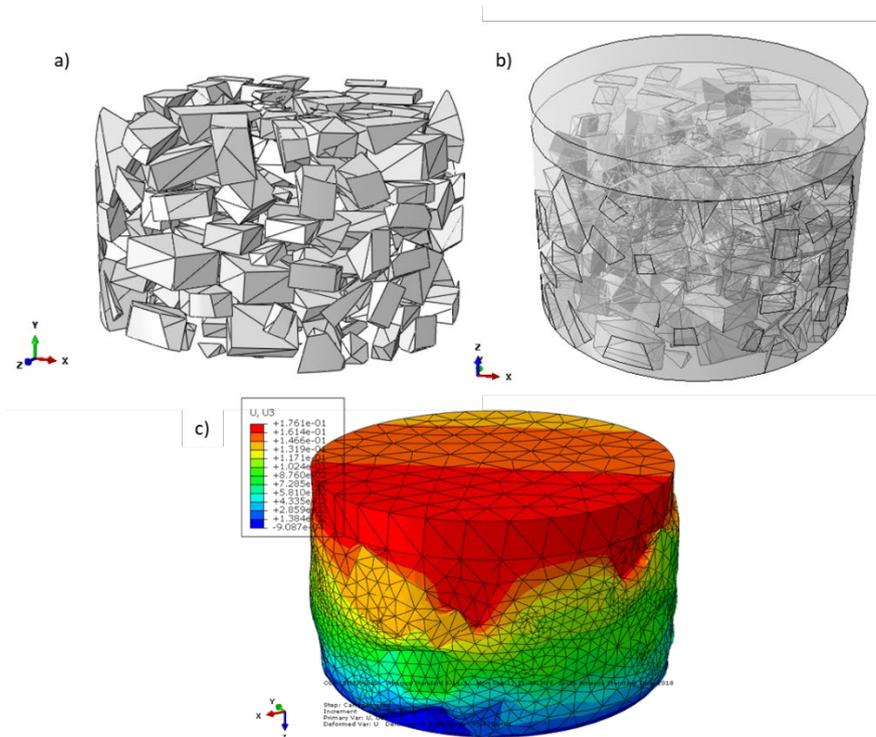


Figura 1.2. Simulações de ensaios de Fluência Estática em CBUQ a partir de suas fases constituintes ESG + MAF. a) Pacote de agregados; b) Corpo de prova com ESG + MAF; e c) CP ensaiado (Oliveira Junior e Farias, 2020).

O presente trabalho tem como abordagem principal a simulação numérico-computacional do segundo tipo de dano comum em pavimentos flexíveis, qual seja a formação de trincas, por meio da modelagem geométrica e constitutiva das fases constituintes, de forma contínua, utilizando-se do Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Elementos Finitos Estendido (XFEM). A representação de trincas consiste em um problema mais

complexo que a de deformações permanentes em ensaios tipo *creep*, visto que a modelagem numérica de descontinuidades necessita de formulações específicas. Ainda, foi necessário o desenvolvimento de um modelo geométrico tridimensional mais realista, uma vez que a formação e o caminho de trincas são altamente dependentes do posicionamento espacial dos agregados no domínio do revestimento. Dessa forma, foram empregadas novas tecnologias de geração e empacotamento de partículas virtuais representativas dos agregados graúdos, a fim de se obter um corpo de prova modelado mais representativo do real. O modelo completo foi simulado, então, a partir de dados de *input* de ensaios experimentais de suas fases constituintes, e foi, por fim, validado com resultados de ensaios no corpo de prova da mistura asfáltica completa (MAC).

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O problema científico investigado partiu do seguinte questionamento: É possível desenvolver um modelo computacional tridimensional que simule o trincamento de mistura asfáltica do tipo CBUQ, tomando em conta as propriedades básicas dos materiais componentes?

1.2 HIPÓTESE

A principal hipótese deste trabalho foi de que é possível simular o trincamento tridimensional de misturas asfálticas, a partir do comportamento básico de seus constituintes, quais sejam o Esqueleto Sólido Graúdo, e a Matriz de Agregados Finos, utilizando ferramentas computacionais como o Método dos Elementos Finitos Estendido (XFEM).

1.3 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa consiste no estudo com vistas à compreensão do trincamento de misturas asfálticas submetidas a esforços externos, como uma extensão de estudo anterior que abordou a evolução de deformações permanentes em CBUQ (Oliveira Junior, 2018). A fim de abordar os dois tipos de danos (deformações permanentes e trincas), buscou-se desenvolver um modelo numérico tridimensional que simule o ensaio de flexão em amostra semicircular. Há, atualmente, trabalhos que abordam o mesmo assunto, entretanto consideram, em geral, modelos bidimensionais, e/ou homogêneos (sem consideração geométrica de agregados), o que leva a erros consideráveis. O desenvolvimento de tecnologia para representação estocástica dos

agregados em sua forma e granulometria reais em modelos numéricos computacionais propicia uma nova vertente de simulações de desempenho mecânico de materiais como as misturas asfálticas. A construção do modelo tridimensional virtual bem calibrado propicia simulações menos demoradas e onerosas que ensaios reais, que demandariam uma campanha extensiva de dosagem e ensaios mecânicos. Além disso, o modelo numérico calibrado permite interpretações da influência de parâmetros geométricos e constitutivos dos materiais na resistência à formação de trincas do compósito.

1.4 OBJETIVOS

A seguir, são listados os objetivos da presente pesquisa.

1.4.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo desta pesquisa é confirmar a hipótese de que é possível simular o trincamento do concreto asfáltico considerando, principalmente, as propriedades viscoelásticas da matriz de agregados finos e a geometria tridimensional (e aleatória) dos agregados graúdos. Busca-se aprofundar o conhecimento fundamental do comportamento de misturas e propiciar o desenvolvimento de modelos mais realistas. Para tanto, objetiva-se desenvolver e aplicar tecnologias de modelagem numérica em nível de mesoescala para simulações de ensaio de trincamento por flexão em amostra semicircular.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar e caracterizar a forma dos agregados utilizados na região do Distrito Federal na composição de misturas asfálticas a partir de diferentes tecnologias, em 2D e 3D, a fim de se gerar um catálogo de partículas virtuais que sirva de repositório à simulação de diferentes materiais compósitos;
- Realizar a dosagem de uma mistura padrão de CBUQ para o INFRALAB/UnB, a partir da metodologia *Superpave*, considerando a granulometria de agregados correspondente à Faixa C do DNIT e um ligante CAP 50/70 distribuído na região do Distrito Federal;
- Avaliar a rigidez e resistência ao trincamento das duas misturas (MAC e MAF) com materiais pétreos típicos da região, por meio do ensaio de módulo dinâmico (MD) e de flexão em amostra semicircular, o SCB;

- Modelar numericamente o ensaio SCB, por meio da composição de duas fases: MAF + ESG, utilizando um *software* comercial de elementos finitos – ABAQUS (SIMULIA, 2021), considerando a geração da fase ESG de forma estocástica, a partir de propriedades morfológicas e granulométricas dos agregados. Espera-se, com isso, validar um modelo numérico para simulação do ensaio SCB.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo faz-se uma revisão da bibliografia acerca dos assuntos pertinentes ao pleno desenvolvimento e entendimento da pesquisa realizada. Inicialmente, são abordados assuntos relativos à composição e ao comportamento viscoelástico de misturas asfálticas. Em seguida, aborda-se o trincamento como sendo um dos principais tipos de defeitos em pavimentos e foco do presente estudo.

Por fim, os aspectos da modelagem numérica de misturas asfálticas são tratados. São apresentados os modelos já concebidos e seus avanços e limitações, além de ferramentas e conceitos necessários à modelagem.

2.1 VISCOELASTICIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas asfálticas são comumente classificadas como materiais viscoelásticos, em decorrência do emprego de ligante asfáltico no compósito. Entretanto, é importante considerar que há ainda parcelas plásticas nas respostas a solicitações externas, além das elásticas e viscosas (Park *et al.*, 1996; Mello, 2008; Silva, 2009a). Trata-se, então, de um material viscoelastoplástico. A resposta não-linear da mistura tem sido amplamente estudada, e modelos constitutivos que abrangem todas as parcelas de deformação já foram propostos (Sides *et al.*, 1985; Kim e Little, 1990; Lu e Wright, 1998). O material viscoelástico, quando solicitado por uma tensão σ constante, por um tempo T_L , responde instantaneamente com uma deformação ε_0 , de natureza elástica (ε_e) e plástica (ε_p). Em seguida, deformações viscoelásticas (ε_{ve}) e viscoplásticas (ε_{vp}) se desenvolvem ao longo do tempo de carregamento. Na fase de descarregamento, ocorre instantaneamente uma recuperação da parcela elástica e, posteriormente, da parcela viscoelástica ao longo do tempo T_R (Sides *et al.*, 1985). Esse comportamento é ilustrado no gráfico resultante do ensaio de fluência estática, apresentado na Figura 2.1.

A importância de cada uma das parcelas de deformação (elástica, plástica, viscosa) é influenciada por fatores como magnitude, tempo e taxa de carregamento, bem como pela temperatura da mistura. Segundo Kim (2009), em seu trecho linear, os materiais podem ser

caracterizados por pelo menos duas propriedades: a resistência total à deformação e a distribuição relativa dessa resistência entre a parte elástica e a parte viscosa.

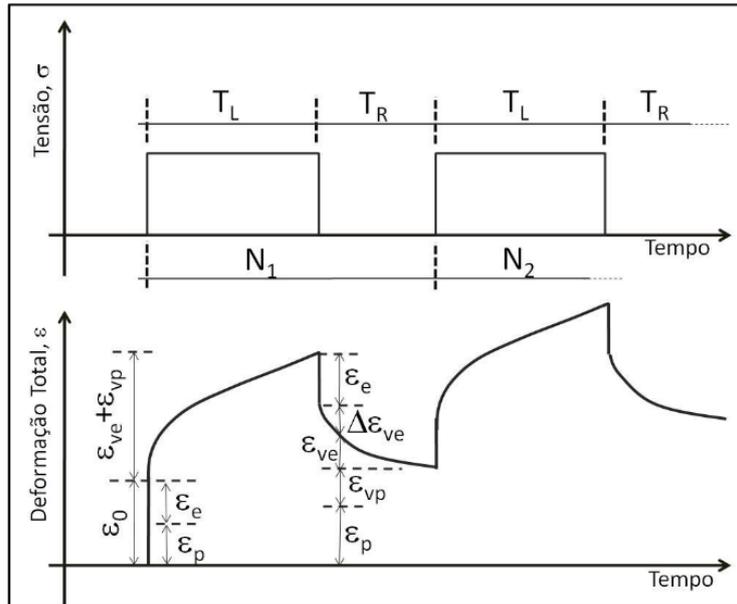


Figura 2.1. Componentes de deformação em material viscoelastoplástico (SIDES *et al.*, 1985, *apud* Mello, 2008).

Ao ser solicitado, o material viscoelástico responde às tensões aplicadas com deformações defasadas pelo ângulo de fase, representado na Figura 2.2. Materiais puramente elásticos apresentam ângulo de fase $\varphi = 0^\circ$, enquanto materiais viscosos ideais possuem $\varphi = 90^\circ$. O ângulo define a relevância da parcela imaginária e da real na composição do módulo complexo. A defasagem da resposta do material é apresentada na Figura 2.3.

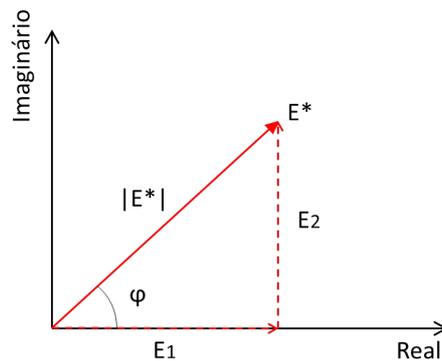


Figura 2.2. Plano complexo (Modificado – KIM, 2009)

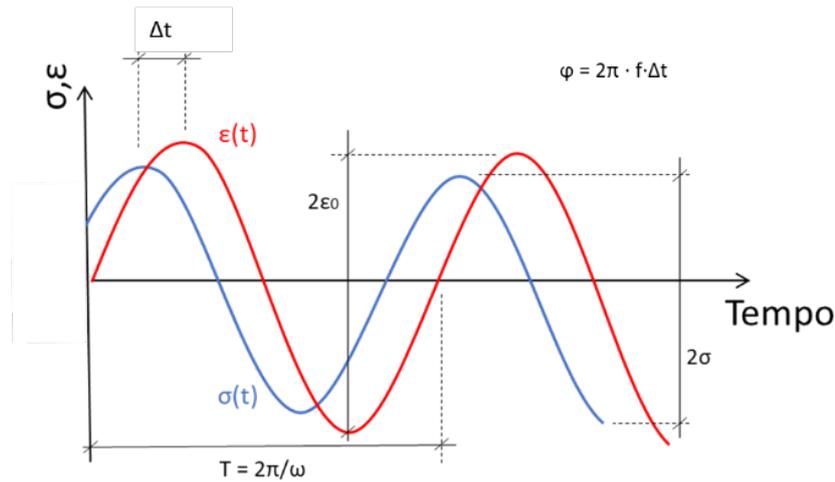


Figura 2.3. Resposta da tensão e da deformação a um ensaio com solicitação harmônica (Mello, 2008 *apud* Oliveira Junior, 2018).

A razão entre as amplitudes de tensão e deformação define o módulo dinâmico $|E^*|$, valor absoluto do módulo complexo E^* . Este, por sua vez, possui uma parte real, designada como módulo de armazenamento E' (elástico), e uma parte imaginária, correspondente ao módulo de perda E'' (viscoso). Define-se o módulo complexo pela Eq. 2.1. As Eq. 2.2 e 2.3 apresentam os módulos de armazenamento e de perda, respectivamente.

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (2.1)$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\varphi) = |E^*| \cdot \cos(\varphi) \quad (2.2)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin(\varphi) = |E^*| \cdot \sin(\varphi) \quad (2.3)$$

A resposta ao carregamento é altamente dependente do tempo (frequência) e temperatura. Para ilustrar o comportamento reológico de ligantes e misturas asfálticas, utiliza-se a Curva Mestre de Módulo Dinâmico. Essa permite comparar o comportamento viscoelástico de materiais por meio da condução de ensaios de aplicação de cargas harmônicas em diferentes frequências e temperaturas (Pellinen *et al.*, 2003). O ensaio para obtenção dessas propriedades reológicas pode ser realizado sob tensão ou deformação controlada. Como resultado, tem-se várias curvas isotérmicas. *Shift factors*, ou fatores de translação tempo-temperatura, são utilizados para deslocar manualmente as curvas, de modo que se tenha uma curva única, para determinada temperatura de referência. Dessa forma, para essa temperatura, é possível prever as propriedades reológicas para diferentes frequências de aplicação de carga, que se

correlacionam ao tráfego nos pavimentos. A Figura 2.4 ilustra uma curva mestra de módulo dinâmico construída a partir dessa metodologia e seus respectivos *shift factors*.

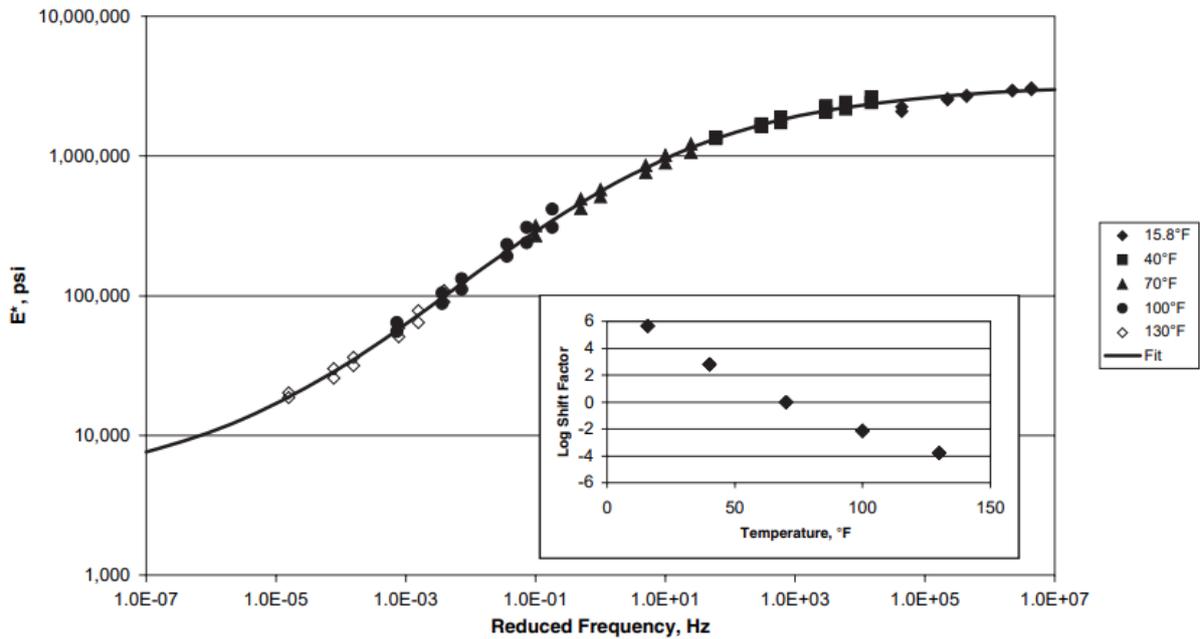


Figura 2.4. Exemplo esquemático de curva mestra e *shift factors* (Bonaquist e Christensen, 2005).

Para descrever a curva mestra, dependente da frequência, o MEPDG (NCHRP, 2004) apresenta uma função sigmoideal (Eq. 2.4). A equação incorpora a dependência do módulo com a temperatura, e é descrita em função da temperatura reduzida, que é a frequência de carregamento multiplicada pelo fator de translação tempo-temperatura (Eq. 2.5).

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log \omega_r)}} \quad (2.4)$$

$$a(T) = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (2.5)$$

sendo δ o valor mínimo do módulo dinâmico, $\delta + \alpha$ o valor máximo do módulo dinâmico, β e γ parâmetros que descrevem a forma da função sigmoideal, ω_r a frequência reduzida, $a(T)$ o *shift factor* em função da temperatura, T a temperatura, t o tempo de carregamento em determinada temperatura, t_r o tempo de carregamento na temperatura de referência, e ω a frequência de carregamento.

No espaço logarítmico, pode-se ajustar o modelo senoidal por meio do cálculo dos *shift factors* com a Eq. 2.6, a depender da temperatura.

$$\log a(T) = a.T_i^2 + b.T_i + c \quad (2.6)$$

sendo a , b e c coeficientes de equação de segundo grau para construção da curva mestra.

Ao utilizar a metodologia apresentada para a construção de curvas mestras, é possível determinar o comportamento reológico de ligantes, e conseqüentemente de misturas asfálticas, realizando testes em um número limitado de temperaturas e frequências. Isso faz com que a construção da curva seja muito simplificada, eliminando a necessidade de realizar ensaios em temperaturas muito baixas (ou muito altas). A realização de ensaios nessas condições tem execução extremamente complexa (Bonaquist e Christensen, 2005).

2.1.1 FUNÇÕES DE RESPOSTA VISCOELÁSTICA LINEAR

A caracterização do comportamento mecânico de misturas asfálticas pode ser feita por meio de três métodos experimentais mais comuns: o ensaio de Fluência estática (*creep compliance*), o ensaio de Relaxação, e o de Módulo Complexo (Kim, 2009). Este último é realizado por meio de um carregamento senoidal (*haversine*) com amplitude de tensão ou deformação constante. O ensaio de Fluência Estática consiste na aplicação de uma tensão constante, medindo-se as deformações ao longo do tempo, e o ensaio de Relaxação é aquele cuja deformação aplicada é mantida constante, medindo-se a tensão ao longo do tempo.

Ignorando-se a parcela viscoplástica da resposta do material, pode-se representar o comportamento viscoelástico de materiais a partir de integrais de Superposição de Boltzmann, ou integrais hereditárias. As equações a seguir definem a relação constitutiva de materiais viscoelásticos lineares, sem considerar o envelhecimento, entre tensão e deformação (Ferry, 1980; Tschoegl, 1989; Christensen, 2003).

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \cdot \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (2.7)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \tau) \cdot \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (2.8)$$

sendo σ a tensão, ε a deformação, E a função Relaxação, D a função Fluência, t o tempo transcorrido e τ a variável auxiliar de integração.

A função Fluência representa a taxa de deformação ao longo do tempo, dividida pela tensão constante aplicada. Já a função Relaxação define o comportamento do material quando este está submetido a uma deformação constante, com tensão se desenvolvendo ao longo do tempo, conforme:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (2.9)$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

Uma vez que a imposição de deformação constante, experimentalmente, é mais complexa em relação à aplicação de uma carga constante, tem-se que, em geral, o ensaio de Relaxação exige mais esforço. Portanto, é comum a obtenção de $E(t)$ a partir de interconversões de curvas de fluência, $D(t)$, ou Módulo Complexo, E^* (Kim, 2009). Há diferentes metodologias de interconversão entre as curvas apresentadas. Oliveira Junior (2018) obteve a curva de Relaxação por meio de uma interconversão baseada na Lei de Potência a partir dos resultados do ensaio de Fluência, visto que se trata de um ensaio mais simples de ser realizado. Outros métodos consagrados foram propostos por Hopkins e Hamming (1957), Leaderman (1958), Denby (1975), Christensen (1982) e Park e Kim (1999). Leis de potências simples representam perfeitamente materiais viscoelásticos lineares. Silva (2009b) aponta, em sua dissertação, que o método da colocação por MQL é numericamente mais robusto que o método da colocação clássico, sugerido por Shapery (1961).

Embora seja possível a interconversão a partir da curva de Fluência, a realização do ensaio de Módulo Complexo para obtenção da Função Relaxação é mais recomendada. Isso se deve ao fato de os testes de Fluência e Relaxação apresentarem limitações para representar o comportamento em tempos muito curtos. Além disso, o ensaio de Módulo Complexo permite a obtenção de valores mais coerentes de Relaxação para pequenos intervalos de tempo, e se aproxima mais dos carregamentos do tráfego de pavimentos, visto que parte de um carregamento cíclico.

A obtenção de $E(t)$ a partir de E^* , segundo Kim (2009), é realizada a partir da curva mestra construída do ensaio, que define o comportamento do material viscoelástico em função da temperatura e do tempo/frequência. Desta, obtém-se o Módulo de Armazenamento $E'(\omega)$, referente à parcela real do módulo complexo (elástica). Utilizando-se o Método da Colocação, é possível interconverter a Função $E'(\omega)$ em valores de E_i para tempos definidos e construir a Função Relaxação. Ou seja, do Módulo Complexo E^* , obtém-se a curva $E'(\omega)$ e, aplicando relações apresentadas por Schapery e Park (1999), chega-se à curva $E(t)$, com dados experimentais. Em geral, o comportamento das curvas segue o exemplificado na Figura 2.5.

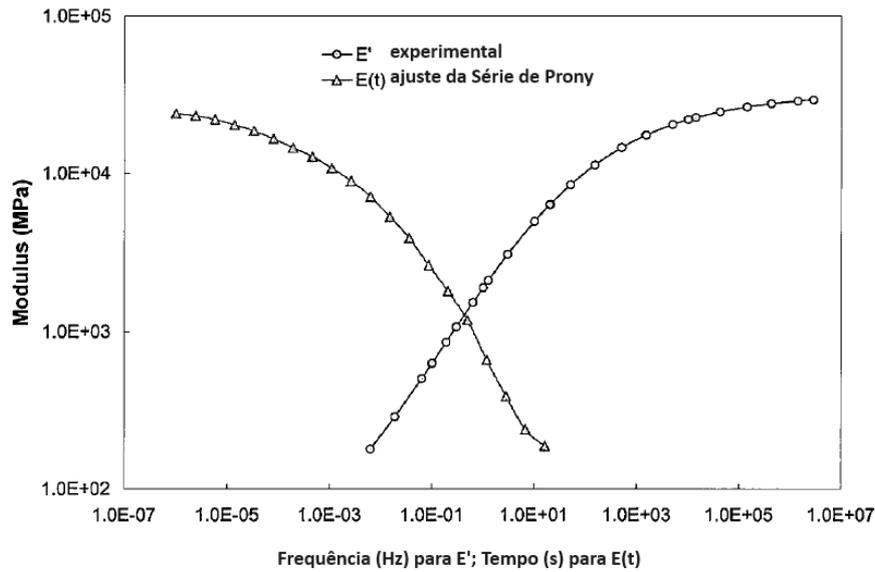


Figura 2.5. Conversão de E' em $E(t)$ para MAC (modificado – KIM, 2009)

2.1.2 MODELAGEM DAS PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Dado o comportamento viscoelastoplástico do concreto asfáltico, a modelagem do material passa pela consideração de todas as parcelas de deformações. Para a caracterização das misturas asfálticas, são utilizados, então, modelos mecânicos viscoelásticos que se ajustam aos dados experimentais. Esses são representados, em geral, por molas e amortecedores. Na Figura 2.6 apresentam-se diferentes modelos para caracterização desse tipo de material, segundo Huang (1993).

Geralmente é possível caracterizar o material viscoelástico pela função Relaxação $E(t)$ ajustando-se um Modelo Generalizado de Maxwell, constituído por modelos de Maxwell em paralelo, conforme a Figura 2.6c. A função é obtida pela aproximação de uma série de Prony, ou Dirichlet, que resulta em:

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{m=1}^n E_m e^{-\left(\frac{t}{\rho_m}\right)} \quad (2.11)$$

sendo $E(t)$ o módulo de relaxação; E_{∞} o módulo de equilíbrio a tempo infinito; n o número de termos da série de Prony; e E_m e ρ_m termos da série de Prony.

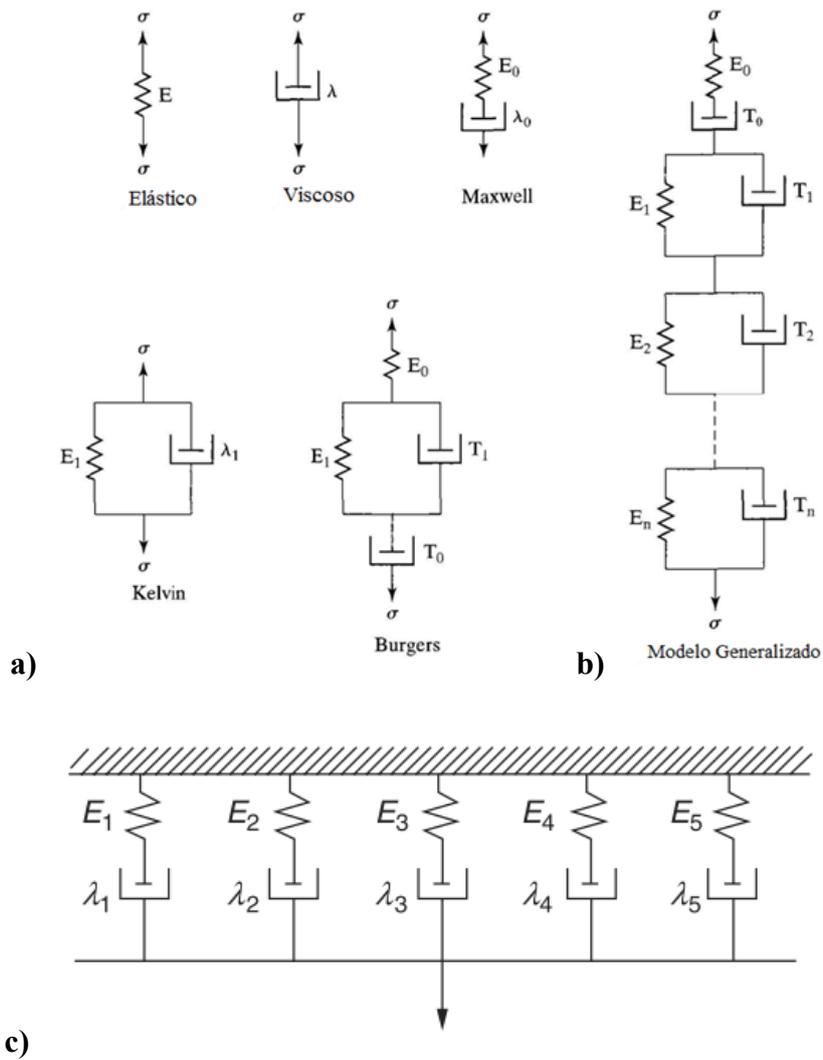


Figura 2.6. Modelos mecânicos de (a) materiais viscoelásticos (b) Voight-Kelvin generalizado (c) Maxwell generalizado (modificado - Huang, 1993).

Schapery (1961) e Kim (1996) apresentaram um método para ajuste de uma série de Prony aos dados experimentais de resposta viscoelástica de misturas asfálticas conhecido por Método da Colocação, comumente utilizado para a interconversão das curvas de resposta viscoelástica. Faz-se necessária, ainda, uma pré-suavização dos dados experimentais para o ajuste da série de Prony de modo a evitar problemas matemáticos no processo. Para tanto, Mun *et al.* (2007) apresentaram uma formulação da Eq. 2.11 em vetores coluna ($\{A\}$ e $\{C\}$) e uma matriz $[B]$, conforme:

$$E(t_n) - E_{\infty} = \sum_{m=1}^n e^{-\left(\frac{t}{\rho_m}\right)} \cdot E_m, n = 1, \dots, N \quad (2.12)$$

reescrita como: $\{A\} = [B]\{C\}$

O método prevê uma forma de forçar os coeficientes a serem positivos, enquanto satisfazem a seguinte equação:

$$\text{minimiza } |[B]\{C\} - \{A\}| \text{ de forma que } \{C\} \geq 0 \quad (2.13)$$

Dessa forma, os resultados experimentais são ajustados a uma Série de Prony que pode ser usada para modelagem da resposta do material, conforme exemplificado na Figura 2.7. Esse modelo ajustado é imprescindível para a definição do comportamento do material em *softwares* de Elementos Finitos usados para simulações numéricas.

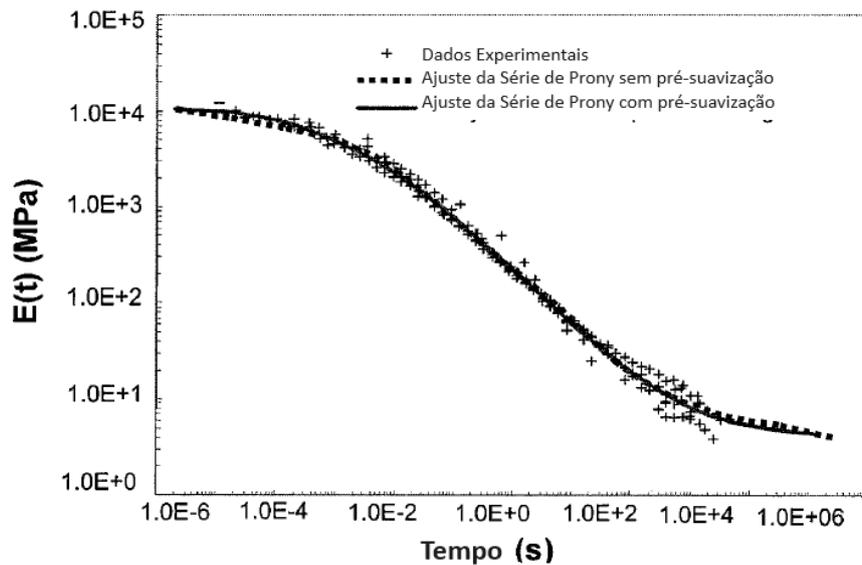


Figura 2.7. Ajuste de Série de Prony para $E(t)$ com e sem pré-suavização (modificado – KIM, 2009).

2.2 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A determinação de um teor de projeto de ligante consiste em processo complexo, uma vez que são vários os aspectos a serem considerados. A dosagem de uma mistura asfáltica consiste justamente na obtenção de um teor “ótimo”, a partir de metodologias experimentais, considerando uma curva granulométrica estabelecida. O método de dosagem, energia de compactação, tipo de mistura, temperatura, além de outros parâmetros, têm influência no teor de projeto de uma mistura asfáltica (Bernucci *et al.*, 2022).

Há diferentes metodologias de dosagem de misturas asfálticas conhecidas atualmente. O Método Marshall é, até então, o mais difundido e utilizado internacionalmente. No Brasil, é normatizado pelo Método de Ensaio DNER-ME 043/95. Tal procedimento envolve a compactação a partir de impacto. Pavimentos dimensionados com revestimentos dosados a

partir dessa metodologia começaram a apresentar deformações permanentes em menores idades nos Estados Unidos, e observou-se que o teor de ligante dosado seria muito elevado. Isso levou o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) a desenvolver um novo procedimento, o Método *Superpave*.

A Metodologia *Superpave* consiste, de forma resumida, em sete passos principais, de acordo com Roberts (1996):

1. **Seleção de agregados:** A metodologia restringe a granulometria a partir de pontos de controle, que tendem a resultar na utilização de misturas densas. Essa graduação de maior densidade, em geral, acarreta mais contatos entre partículas e redução de vazios no agregado mineral (VAM). Outros parâmetros também são considerados importantes, como rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e resistência à abrasão. Em termos de avaliação de forma, o *Superpave* restringe o uso de partículas “planas e alongadas” e arredondadas;

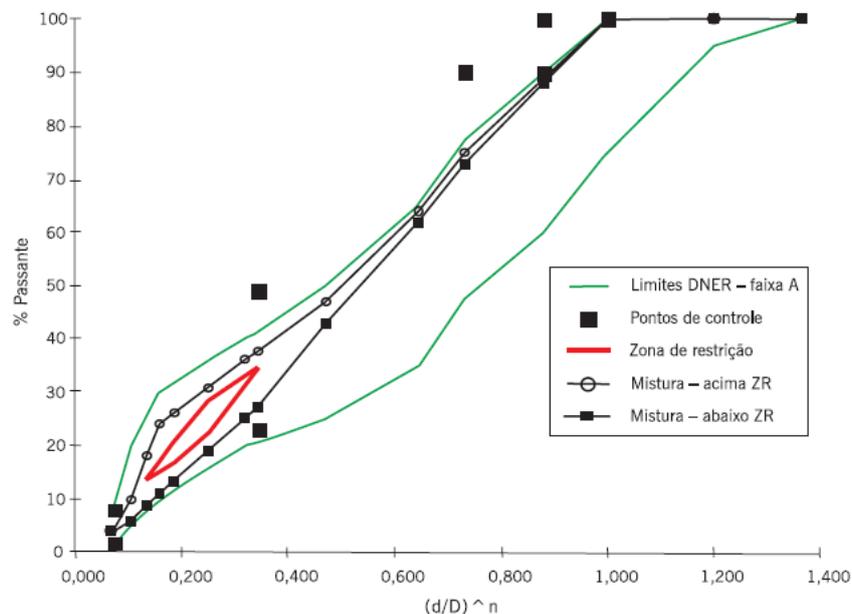


Figura 2.8. Exemplo de granulometria em gráfico com pontos de controle da Metodologia *Superpave* (Bernucci *et al.*, 2022).

2. **Seleção de teores de ligante:** O procedimento *Superpave* indica quatro teores iniciais ensaiados, com dois corpos de prova por teor. Adota-se, inicialmente, um teor estimado, para o qual varia-se ($\pm 0,5\%$ e $+ 1,0\%$);

- 3. Preparação dos corpos de prova:** Os corpos de prova são compactados no Compactador Giratório *Superpave* (CGS), até um número de giros de projeto dependente do tráfego esperado, considerando as condições exemplificadas na Figura 2.9;

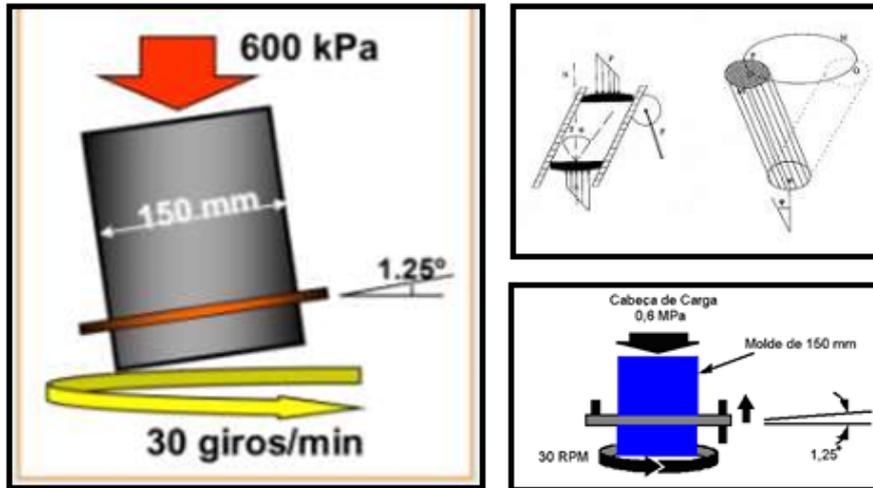


Figura 2.9. Esquema do molde e do giro do compactador giratório *Superpave* (DNIT, 2018).

- 4. Cálculos de densidade e vazios:** Das misturas experimentais, são determinadas as propriedades volumétricas (volume de vazios – V_v , vazios do agregado mineral – VAM , e Relação Betume-Vazios – RBV , entre outros).
- 5. Ensaios de desempenho:** A metodologia previa, inicialmente, a aplicação de ensaios de desempenho para a seleção do teor de projeto. Atualmente, os métodos para tal finalidade ainda estão em revisão, entretanto é usual a realização de Ensaios de Módulo Dinâmico nas misturas.
- 6. Seleção do teor ótimo de ligante:** O teor “ótimo” seria aquele que resulta em $V_v = 4,0\%$, a partir da interpolação dos resultados experimentais, considerando as premissas utilizadas na compactação;
- 7. Avaliação de susceptibilidade à umidade:** Avalia-se a resistência ao dano por umidade induzido da mistura dosada com o teor de ligante ótimo, a partir do ensaio normatizado pela AASHTO T 283-22.

2.3 MODELAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas asfálticas têm sido amplamente estudadas com a utilização de modelos numéricos. Isso decorre do fato de que prover um modelo numérico-computacional que simule com eficácia o comportamento do material acarretaria otimização de tempo e custos envolvidos nos ensaios. Embora a bibliografia consultada objetive estudar diferentes tipos de dano, há grande semelhança nos procedimentos computacionais adotados. A modelagem via método dos elementos finitos (FEM) de meios contínuos é a mais comumente utilizada para a simulação do problema, mostrando resultados satisfatórios em comparação com os dados experimentais. Segundo Zelelew (2008), a abordagem contínua de modelagem envolve a necessidade de testes cuidadosos para medir o comportamento macroscópico tensão-deformação de misturas asfálticas para dado carregamento e condições de temperatura, utilizando condições de contorno.

2.3.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A modelagem de problemas de engenharia segue uma sequência lógica, que relaciona o problema real, o modelo físico, o modelo matemático, os métodos de solução, de planejamento, a análise dos resultados e por fim, a solução do problema. Recarey (1999) resume essa sequência metodológica, conforme Figura 2.10.

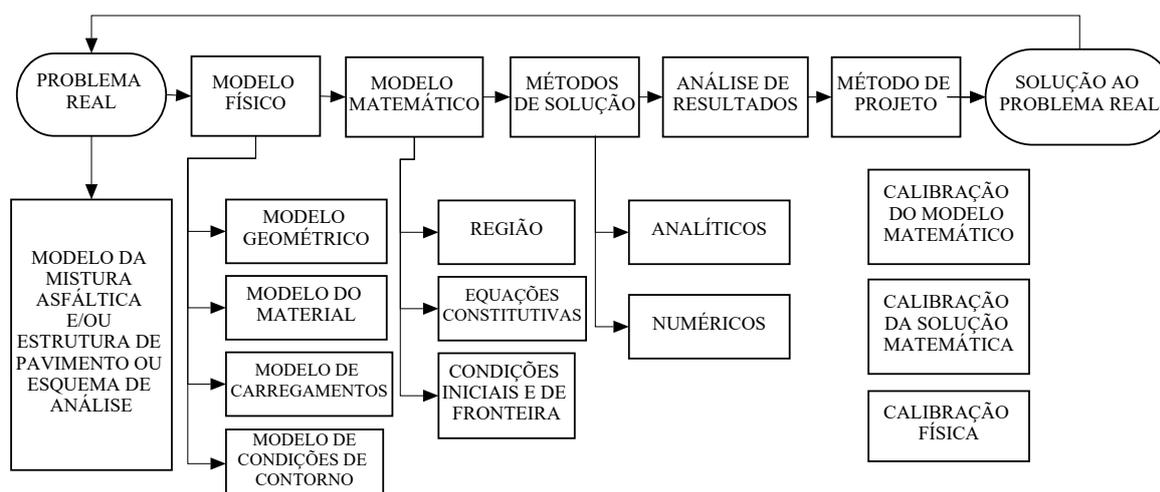


Figura 2.10. Fluxograma de modelagem de problema físico. (modificado – RECAREY, 1999).

A modelagem numérica computacional de problemas envolvendo misturas asfálticas pode ser realizada de duas formas: a micromecânica e a contínua (KIM, 2009). Em ambas as metodologias, é possível representar as alterações no comportamento tensão-deformação do

material. Em geral, a abordagem micromecânica envolve maior complexidade e custo computacional. Tem-se, ainda, como vantagem da abordagem contínua, a maior disponibilidade de *softwares* comerciais que empregam a tecnologia.

O conceito matemático geral do Método dos Elementos Finitos consiste no processo de aproximação do comportamento de um meio contínuo por “elementos finitos”, que se comportam de forma similar à realidade. O sistema busca soluções de relações tensão-deformação entre os elementos que definem o meio contínuo analisado, a partir de equações de equilíbrio (Zienkiewicz & Taylor, 2000).

A aplicabilidade de cada uma das vertentes deve ser definida também pela sua eficácia de aproximação dos resultados numéricos ao que se encontra no problema real. Essa eficácia pode ser prevista em função de sua relação com a escala de observação (García, 2017). Na Figura 2.11 são ilustrados os níveis de escala e a viabilidade de utilização de diferentes modelos numéricos. Observa-se que, em microescala, o MEF apresenta dificuldades para representação do comportamento real. Isso pode ser realizado, entretanto, com o emprego de funções para enriquecimento do modelo, que acrescentem formulações específicas. A mesoescala, com dimensões da ordem de grandeza dos grãos, é a adequada para entender os fenômenos de fadiga e será adotada neste trabalho (Tan *et al.*, 2024).

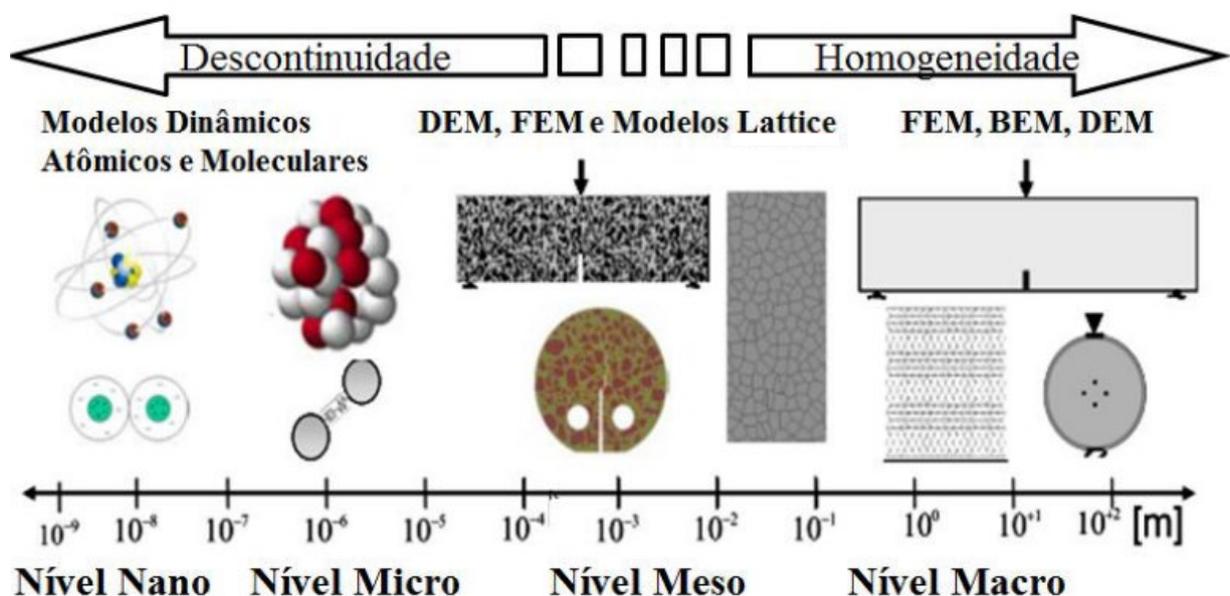


Figura 2.11. Relação entre diferentes escalas e técnicas de modelagem numérica. (modificado – KIM, 2007 *apud* GARCÍA, 2017).

2.3.2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

O trincamento de misturas asfálticas, considerando a geometria complexa do Esqueleto Sólido Graúdo (ESG) em posições aleatórias, consiste num problema em mesoescala. Para a simulação da formação e propagação de trincas, o MEF, por si só e utilizando-se de formulações tradicionais, não é suficiente, uma vez que não permite a abertura de descontinuidades de forma orgânica, sem que haja alteração de geometria e malha a cada passo de tempo. Para isso, tem-se, como alternativa, a utilização do Método dos Elementos Finitos Extendido, ou XFEM (*eXtended Finite Element Method*).

O XFEM foi, inicialmente, desenvolvido por Belytschko e Black (1999) e Moës *et al.* (1999), a partir do Método da Partição de Elemento Finito Unitário (Melenk e Babuška, 1996). Esse foi utilizado para produzir uma formulação na qual a formação e propagação de trincas independe da malha gerada para o domínio estudado.

No MEF tradicional, o vetor de deslocamentos \vec{u} é representado como:

$$\vec{u} = \sum_{i=1}^N N_i(x) \vec{u}_i \quad (2.14)$$

Sendo i o conjunto de todos os nós no domínio; N_i a função de forma (ou interpolação) do elemento finito padrão do nó i ; e \vec{u}_i o vetor de deslocamento nodal.

No XFEM, os nós são “enriquecidos” pelo acréscimo de graus de liberdade e inclusão de funções de interpolação locais, de forma a modelar a trinca como:

$$\vec{u} = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[\vec{u}_i + H(x) \vec{a}_i + \sum_{\zeta=1}^4 F_{\zeta}(x) \vec{b}_i^{\zeta} \right] \quad (2.15)$$

sendo \vec{a}_i e \vec{b}_i^{ζ} vetores de graus de liberdade nodais adicionais; $F_{\zeta}(x)$ a função elástica assintótica de ponta de trinca; e $H(x)$ a função degrau usada para representar a descontinuidade do deslocamento ao longo da superfície da trinca, definida como:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.16)$$

A função $H(x)$ permite definir a região do elemento que se desloca para um lado e a que se desloca para outro, no momento da separação pelo trincamento. Na Figura 2.12, ilustra-se o funcionamento.

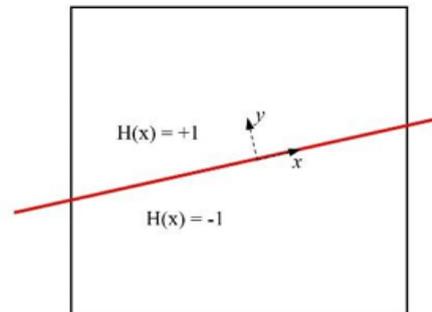


Figura 2.12. Cálculo da Função degrau para uma trinca.

2.3.3 HISTÓRICO DE MODELAGENS NUMÉRICAS

Pesquisadores têm desenvolvido modelos numérico-computacionais para simulação de corpos de prova asfálticos submetidos a ensaios há algum tempo. São várias as tecnologias empregadas, mas, em geral, observa-se que a representação da micro e mesoestrutura da mistura constitui-se na etapa mais complexa da modelagem. Ademais, a modelagem constitutiva do material viscoelastoplástico também demanda esforço experimental e matemático substancial. A seguir são apresentados exemplos de estudos realizados envolvendo a modelagem de misturas asfálticas.

Papagiannakis *et al.* (2002) descreveram uma formulação de comportamento não-linear viscoelástico de ligantes asfálticos e a implementam em modelos de elementos finitos de concretos asfálticos utilizando o programa ABAQUS. Esse processo pode ser feito utilizando uma solução fechada proveniente do módulo de relaxação ou utilizando uma sub-rotina que defina o comportamento tensão-deformação do material inteiramente. Os resultados do modelo foram promissores quando comparados com as medidas experimentais.

Soares e Freitas (2003) e Soares *et al.* (2003) apresentaram um método de análises baseado na teoria da mecânica da fratura, na qual o ligante e os agregados são tratados como materiais distintos, de forma bidimensional. O estudo objetivou investigar a evolução de trincas sob carregamentos monotônicos, com a utilização de elementos de ZC. Os resultados foram bem calibrados com os obtidos experimentalmente, e os modelos 2D são apresentados na Figura 2.13.

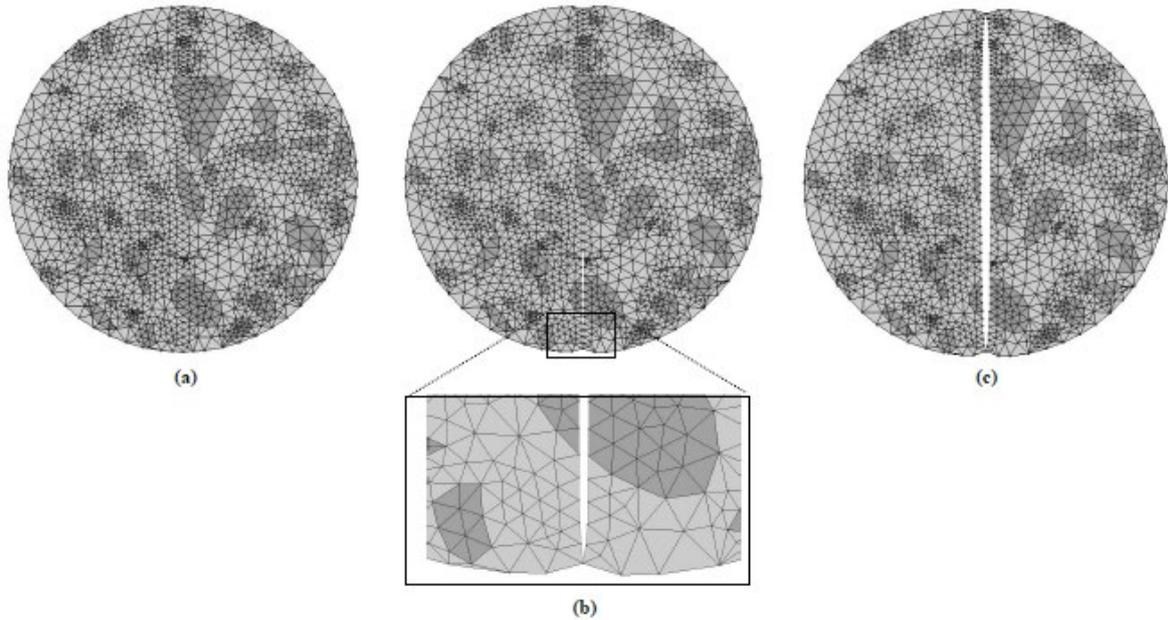


Figura 2.13. Compressão diametral simulada em corpos de prova heterogêneos (Soares *et al.*, 2003)

Yue *et al.* (2003) apresentaram análises bidimensionais de imagens digitais processadas que foram então usadas como dado de entrada (*input*) para uma modelagem em elementos finitos para simulações computacionais. São apresentados resultados muito realistas de simulações de ensaios de tração indireta em corpos de prova (Figura 2.13) de misturas asfálticas, visto que o método incorpora as não-homogeneidades do material.

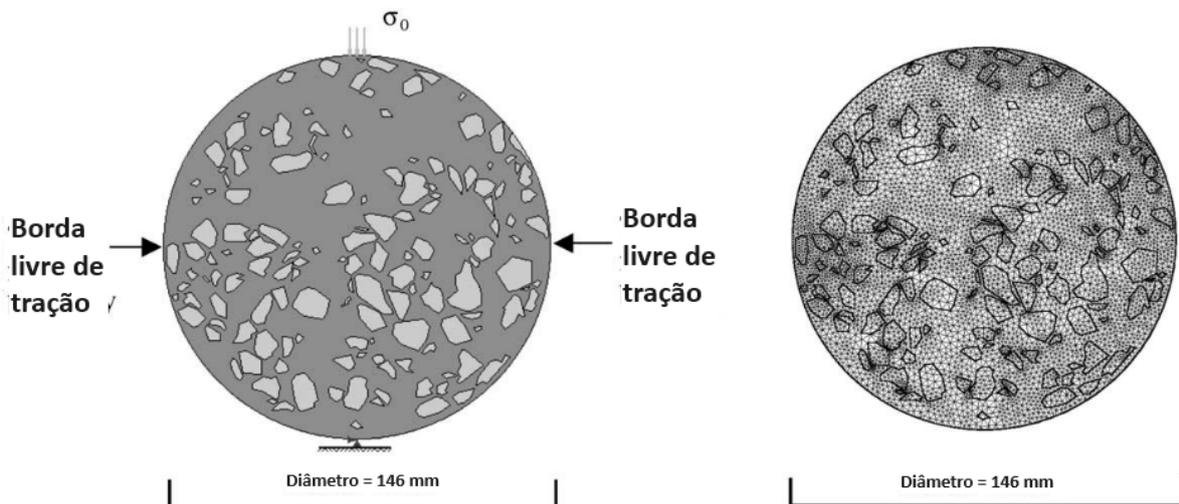


Figura 2.14. Corpos de prova simulados para análise de concreto asfáltico sob o ensaio Brasileiro (modificado - Yue *et al.*, 2003)

Su *et al.* (2010) apresentaram resultados de simulações numéricas tridimensionais de concreto tradicional sob diferentes esforços para análise de trincamento. Elementos coesivos

com dano foram inseridos entre elementos representativos dos materiais constituintes. Os autores apresentaram a metodologia de inserção destes e resultados de simulações eficientes, exemplificados na Figura 2.14.

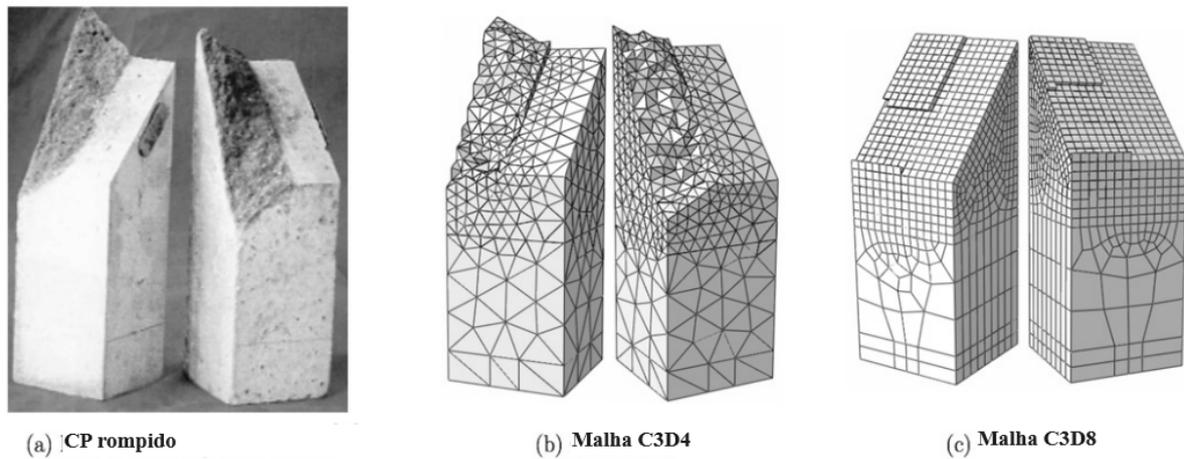


Figura 2.15. Superfícies de trincamento depois de ruptura para ensaio de tração (modificado - Su *et al.*, 2010).

Aragão (2011) estudou o desenvolvimento do processo bidimensional de zona de fratura na mistura asfáltica para simular a dependência de propriedades de fraturamento e taxa de carregamento, implementando um modelo computacional bidimensional que considera um modelo de zona coesiva, incluindo o fator tempo na propagação das fissuras. Na Figura 2.15, exemplifica-se o modelo desenvolvido. Ele não só remove as singularidades das tensões nas pontas de fissuras, como também provê uma ferramenta eficiente que pode ser implementada em FEM e DEM. O modelo de zona coesiva pode ainda ser utilizado em interfaces entre dois materiais (como a interface agregado-mástique), que são zonas consideradas susceptíveis a fraturas.

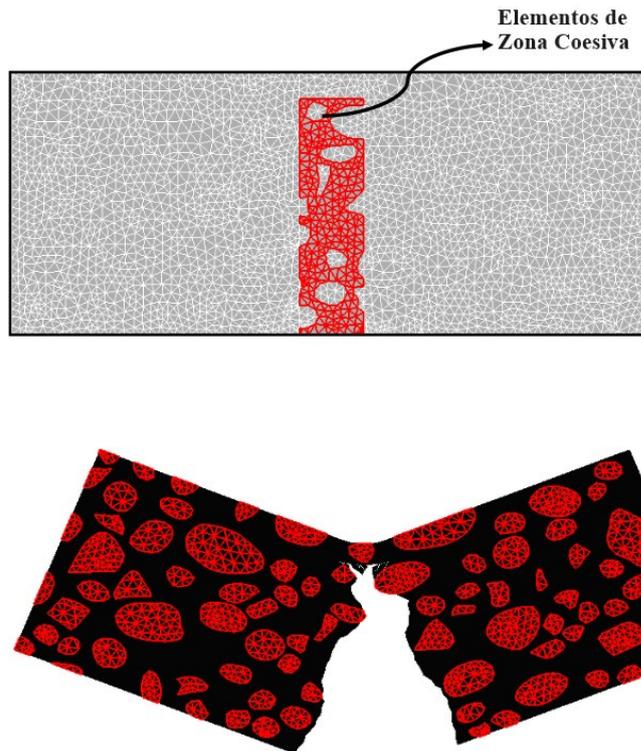


Figura 2.16. Simulação de ensaio de flexão em três pontos e formação de trinca em região enriquecida com Elementos de zona Coesiva (modificado - Aragão, 2011)

Lancaster *et al.* (2013) desenvolveram um modelo numérico tridimensional de simulação do ensaio SCBT, utilizando a metodologia XFEM (*eXtended Finite Element Method*), implementado no programa ABAQUS. Os autores desenvolveram um modelo com material homogêneo (sem consideração dos agregados, geometricamente) para modelagem de início e propagação de trincas. Os resultados mostraram ser promissor o método XFEM na simulação do trincamento de misturas asfálticas. O modelo numérico desenvolvido é exemplificado na Figura 2.16.

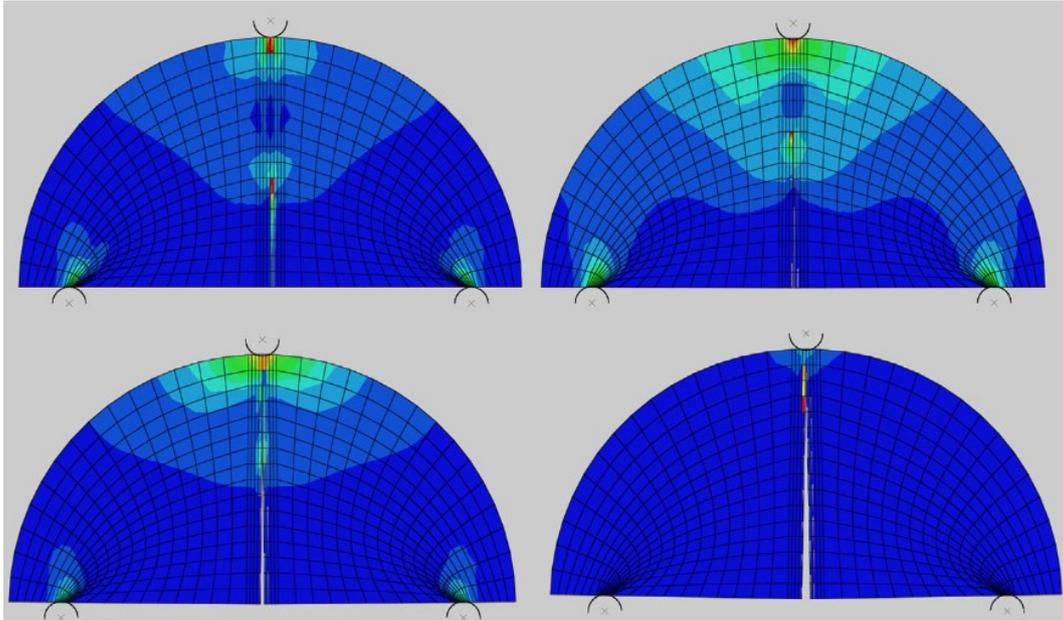


Figura 2.17. Propagação de trincas com modelo XFEM no ABAQUS (Lancaster *et al.*, 2013).

Oliveira Junior (2018) implementou um modelo contínuo no programa ABAQUS no qual simula o comportamento de misturas asfálticas sob um ensaio de fluência à carga constante, considerando os agregados graúdos com formas aproximadas a paralelogramos. Os resultados mostraram boa concordância da modelagem em elementos contínuos, com boas correlações entre o desempenho mecânico e a forma e granulometria dos agregados. Exemplifica-se, na Figura 2.17 o modelo desenvolvido, após simulação do ensaio de *creep*.

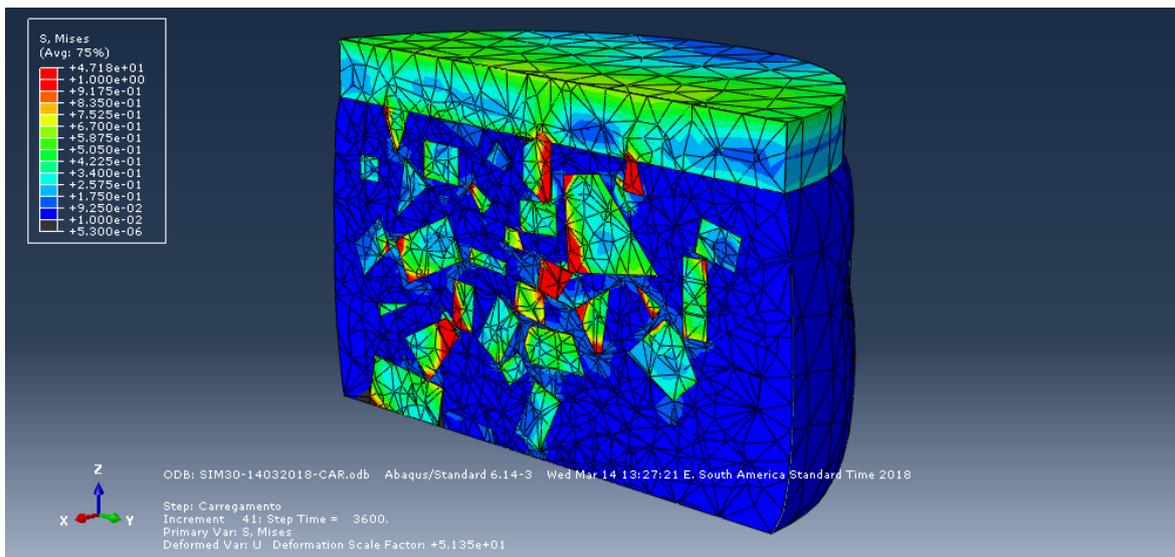


Figura 2.18. CP de CBUQ (MAF + ESG) ensaiado sob fluência estática (Oliveira Junior, 2018).

Pereira de Almeida *et al.* (2019) desenvolveram e validaram, para materiais asfálticos, um programa de elementos finitos para análise viscoelástica linear de compósitos, considerando

os materiais heterogêneos que os compõem. Foram apresentadas simulações de ensaios de módulos dinâmicos ângulos de fase de uma mistura asfáltica para diversas frequências de uma solicitação harmônica. A Figura 2.19 apresenta a precisão do modelo para simulação do ensaio.

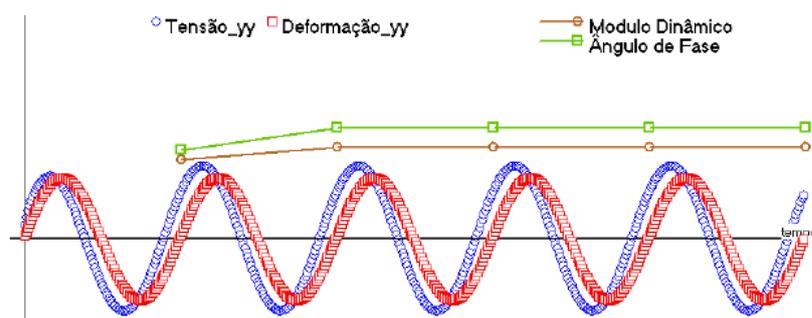
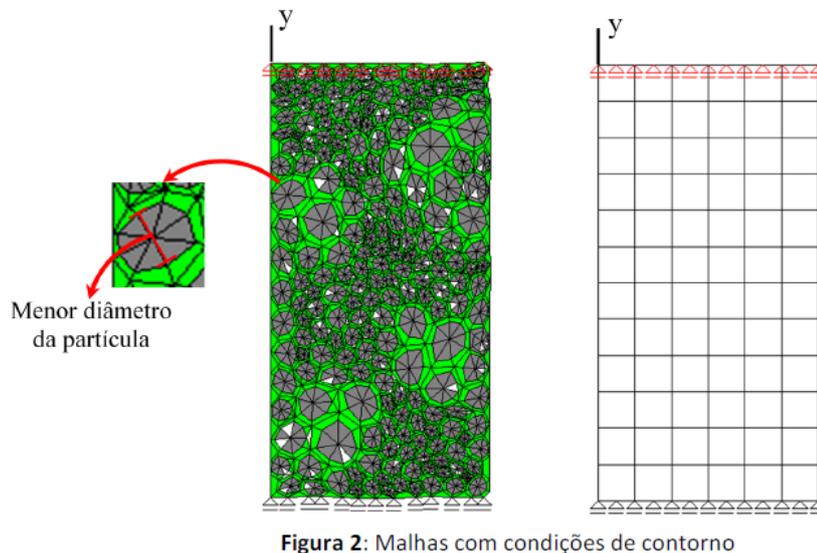


Figura 2.19. Deformação e tensão normais na direção y, homogeneizadas no CP virtual de MAF (Pereira de Almeida *et al.*, 2019).

2.3.4 MODELAGEM DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO

A complexidade da construção de um modelo microestrutural tridimensional de um corpo de prova asfáltico advém, primordialmente, da aleatoriedade e irregularidade da forma e localização das partículas de agregado no seu interior. A representação da microestrutura dos corpos de prova asfálticos tem sido realizada principalmente por modelos bidimensionais, como nos trabalhos de Dai e You (2007), Aragão *et al.* (2014, 2015) e Pazos *et al.* (2015). Ilustra-se, na Figura 2.20, essa utilização, na qual Dai e You (2007) representam os agregados por meio de elipses aproximadas. Entretanto, mais recentemente, tecnologias mais avançadas permitiram a representação geométrica tridimensional dos agregados graúdos inseridos na matriz de agregados finos. Para fins de simulação de ensaios de trincamento, a consideração das três

dimensões é de grande importância, visto que o caminho das trincas (e a resistência à sua formação) é dependente da posição dos agregados no domínio tridimensional da mistura.

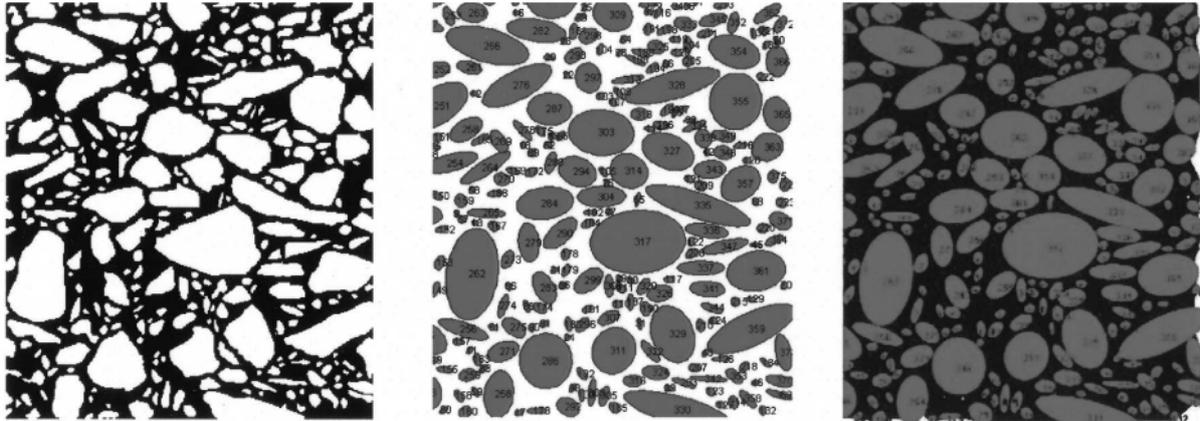


Figura 2.20. Geração de modelo bidimensional para simulação em Elementos Finitos (Dai & You, 2007).

Modelos tridimensionais já foram utilizados em outros trabalhos que simulam ensaios mecânicos em misturas asfálticas que não envolvem trincamento. As abordagens seguem basicamente dois tipos de técnicas: tomografias computadorizadas de raios-X e algoritmos de geração de pacotes de partículas randômicas. Numerosos autores utilizaram a primeira técnica para obter uma representação microestrutural de corpos de prova de misturas asfálticas em três dimensões, como Liu *et al.* (2009, 2017), Dai (2011) e Wang *et al.* (2014). Trata-se de uma técnica não-destrutiva de aquisição da representação dos materiais no interior do CP por meio da união de vários cortes bidimensionais ao longo de seu comprimento.

De posse dos dados obtidos pela tomografia de raios-X, os autores desenvolveram e/ou utilizaram algoritmos capazes de processá-los e interpretá-los, construindo o modelo 3D. Apresenta-se, na Figura 2.21a, a fase agregados obtida por meio desse procedimento. Xu *et al.* (2010) propuseram um novo algoritmo de geração de microestruturas de concreto asfáltico com alta densidade de agregados. O algoritmo gera poliedros de formas arbitrárias que constituem os agregados no interior da mistura asfáltica em dois passos: geração de agregados e empacotamento. Após gerados os agregados com poliedros construídos a partir de triângulos, esses são alocados e empacotados de forma a posicioná-los randomicamente e sem haver sobreposições de partículas (Figura 2.21b).

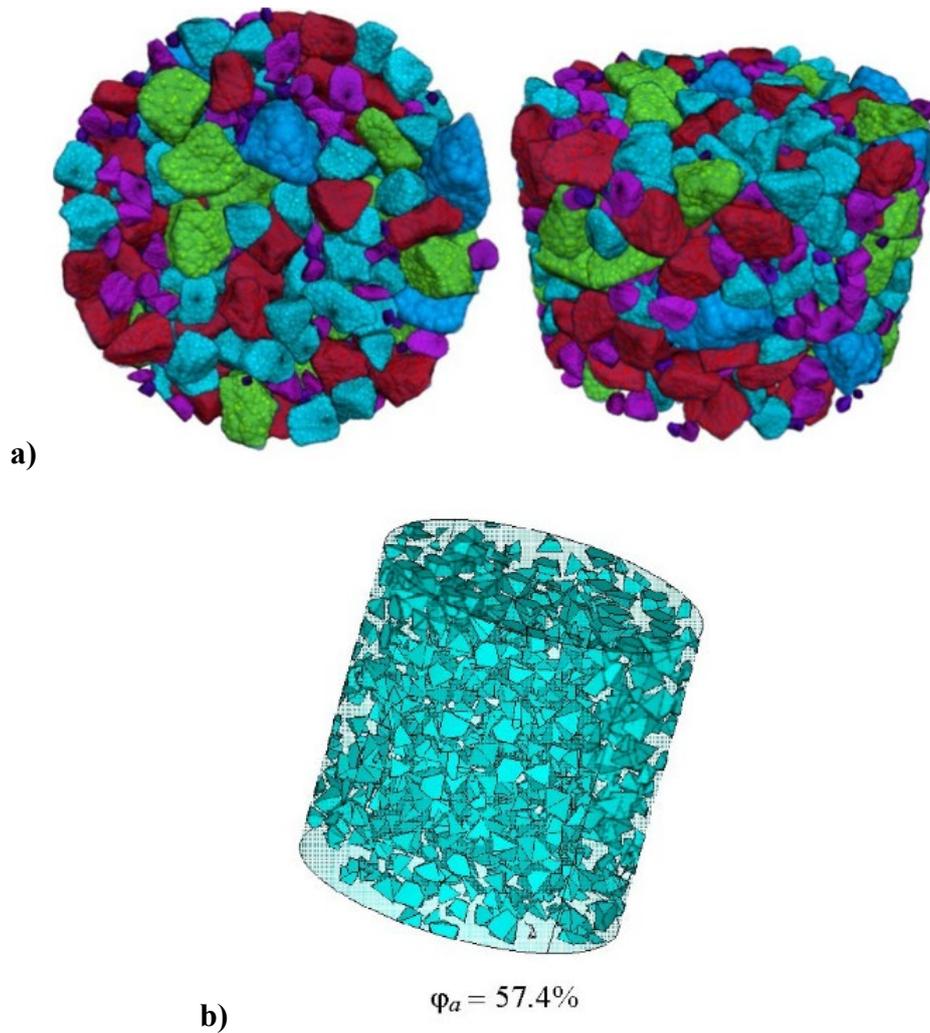


Figura 2.21. Pacotes de partículas (agregados) gerados via: (a) tomografia de raios-X (You *et al.*, 2009), e (b) geração algorítmica randômica (Liu *et al.*, 2017).

2.3.4.1 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS VIRTUAIS

Tradicionalmente, modelos discretos utilizam-se de empacotamento de partículas, uma vez que as simulações atuam, principalmente, no contato entre elas. Esse processo constitui-se em uma metodologia de geração de uma configuração inicial de partículas realista, que represente as condições naturais do conjunto de partículas, como densidade do pacote. Os pacotes de partículas são definidos em função de sua densidade, conectividade, homogeneidade e isotropia. Entretanto, ao se estender a técnica para outros tipos de uso, como por exemplo o de geração de um pacote de partículas que represente os agregados graúdos no interior de um corpo de prova de mistura asfáltica, como no caso da presente pesquisa, almeja-se um pacote de partículas que considere a granulometria e a forma das partículas, além da fração de volume

de ocupação por elas. A obtenção da forma das partículas pode ser realizada a partir de diferentes tecnologias, como já abordado no item anterior do presente capítulo.

Os algoritmos de empacotamento se dividem em basicamente dois tipos: algoritmos dinâmicos e construtivos. Os primeiros são baseados em simulações de Elementos Discretos. Em função da necessidade de o movimento de cada partícula ser calculado para a geração do pacote inicial, demandam maior capacidade computacional. Já os métodos construtivos são baseados em cálculos geométricos. Tendem a funcionar de maneira mais otimizada, computacionalmente. Os métodos construtivos podem ser classificados, ainda, em métodos de frente de avanço, nos quais partículas são geradas sequencialmente em suas posições finais, em contato com duas ou três outras partículas, e em métodos de inibição sequencial (Bagi, 2005).

Pérez Morales *et al.* (2011) e Valera *et al.* (2015) apresentaram um algoritmo do tipo frente de avanço de empacotamento de partículas inicialmente esféricas, posteriormente enriquecido, incluindo outras formas tridimensionais, como paralelogramos e tetraedros. Recarey *et al.* (2019) aprimoraram o código, tornando-o mais flexível em relação à forma das partículas, aos contatos entre elas e à checagem de sobreposições de partículas. É possível obter, por meio do algoritmo, pacotes densos de partículas de formas próximas às formas reais dos agregados, a partir de diferentes tipos de dados de entrada, como imagens de raios-X e escaneamento tridimensional.

O código gera as partículas calculadas com descritores de forma baseados em séries de Fourier. De posse de um catálogo de partículas, considera-se uma distribuição granulométrica predefinida e uma porosidade a ser alcançada. Antes de cada passo de adição de partícula ao pacote, é necessário verificar se é possível fazê-lo sem que haja sobreposição dos agregados. Dessa forma, as partículas são alocadas de forma randômica e sem que haja sobreposições. O modelo garante contato entre a maioria das partículas.

Valera *et al.* (2022) formularam e acoplaram tecnologias para modelagem de meios discretos e contínuos com partículas de morfologias reais. Os autores apresentaram duas diferentes formulações: uma para geração e caracterização de partículas únicas, e outra para empacotamento de partículas reais. A tecnologia apresenta a metodologia de processamento de partículas, baseada em duas ou três dimensões. Para representação 2D, foi utilizado o equipamento AIMS2 (*Aggregate Image Measurement System 2*). A tecnologia utilizada é baseada em descritores de Fourier para geração de partículas 3D a partir de dados 2D, e foi apresentada por Recarey *et al.* (2019). É ilustrado, na Figura 2.22, o processo de geração de

partículas. Para o empacotamento de partículas, os autores utilizam um código de empacotamento de frente de avanço no qual partículas são dispostas em determinada posição e novas partículas são adicionadas, de forma a tocarem outras partículas na frente de avanço.

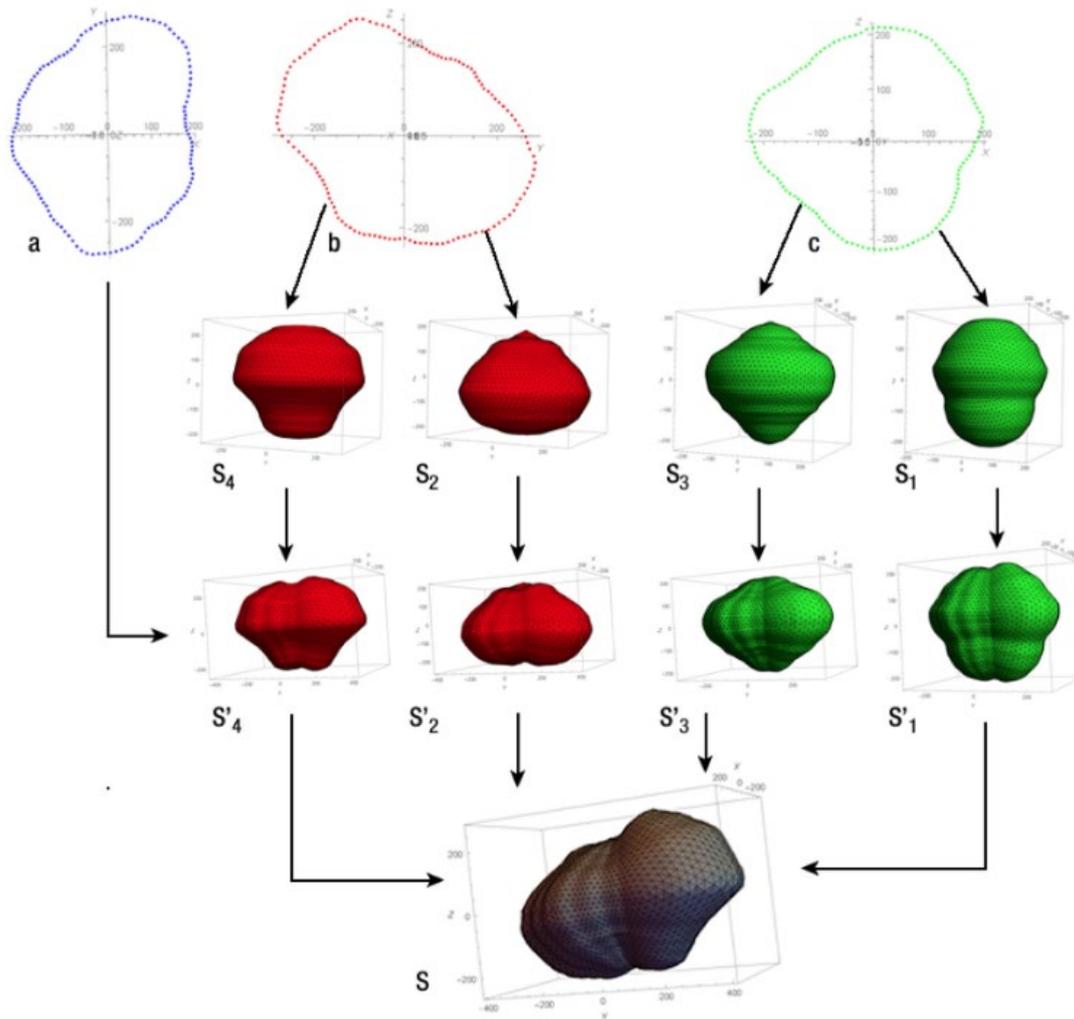


Figura 2.22. Método de geração 3D. (a) seção transversal (x, y); (b) seção transversal (y, z); (c) seção transversal (x, z); (d) sólidos S_1 a S_4 obtidos na revolução das metades das seções transversais; (e) sólidos S'_1 a S'_4 obtidos por alongamento horizontal de S_1 a S_4 ; (f) sólido final (Valera *et al.*, 2022)

O método apresentado por Valera *et al.* (2023) e Pena *et al.* (2024) apresenta a formulação de modelagem de problemas de engenharia a partir de partículas de geometrias complexas, que são simplificadas a partir de grupos de esferas. Isso permite que os algoritmos de empacotamento de esferas, já desenvolvidos em trabalhos anteriores, sejam eficientes na geração de pacotes de partículas de formas reais. A técnica viabiliza a simulação de

geomateriais, como grãos de areia ou mesmo agregados graúdos. A Figura 2.23 exemplifica a tecnologia.

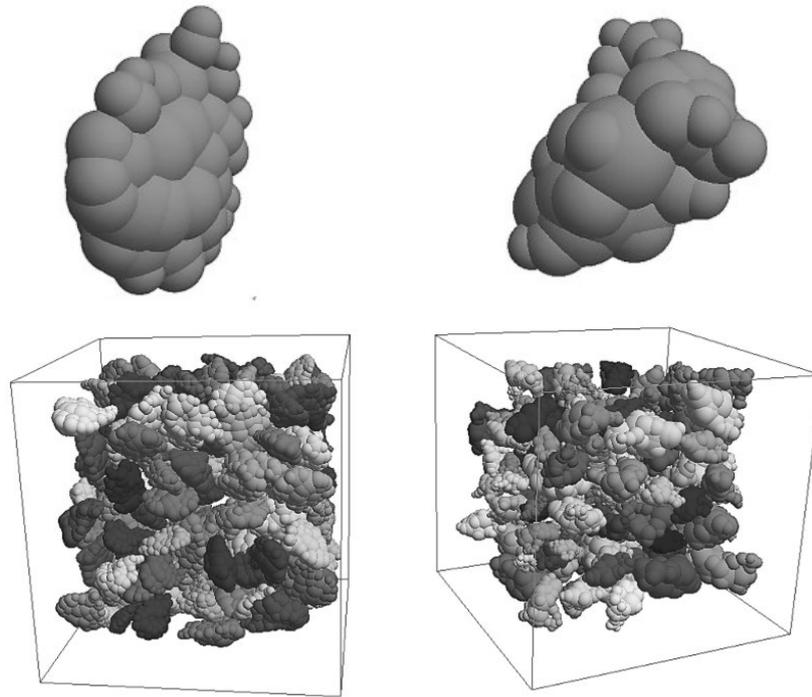


Figura 2.23. Exemplos de partículas de formas complexas simplificadas por *clusters* de esferas e pacotes gerados com as partículas simplificadas (Valera *et al.*, 2023).

2.4 TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Departamentos de Transportes do mundo todo se interessam pelo entendimento do trincamento de pavimentos asfálticos, visto que acometem frequentemente em suas estradas. Pavimentos flexíveis, em geral, apresentam dois tipos principais de manifestações patológicas: afundamentos e fendas. O primeiro tipo é derivado de deformações permanentes do revestimento e/ou de camadas inferiores. Já o segundo pode ser dividido em fissuras, quando perceptíveis a olho nu somente a menos de 1,5 m de distância, ou trincas, com aberturas maiores (Bernucci *et al.*, 2022). Essas podem ser ainda subdivididas em função da disposição geométrica e/ou mecanismo de formação. O trincamento pode ser classificado como térmico, de reflexão, de fadiga, do tipo “*top-down*”, e é afetado por variados fatores e suas interações. Exemplificam-se, na Figura 2.24, diferentes tipos de trinca definidos pela norma DNIT 005/2003 – TER.

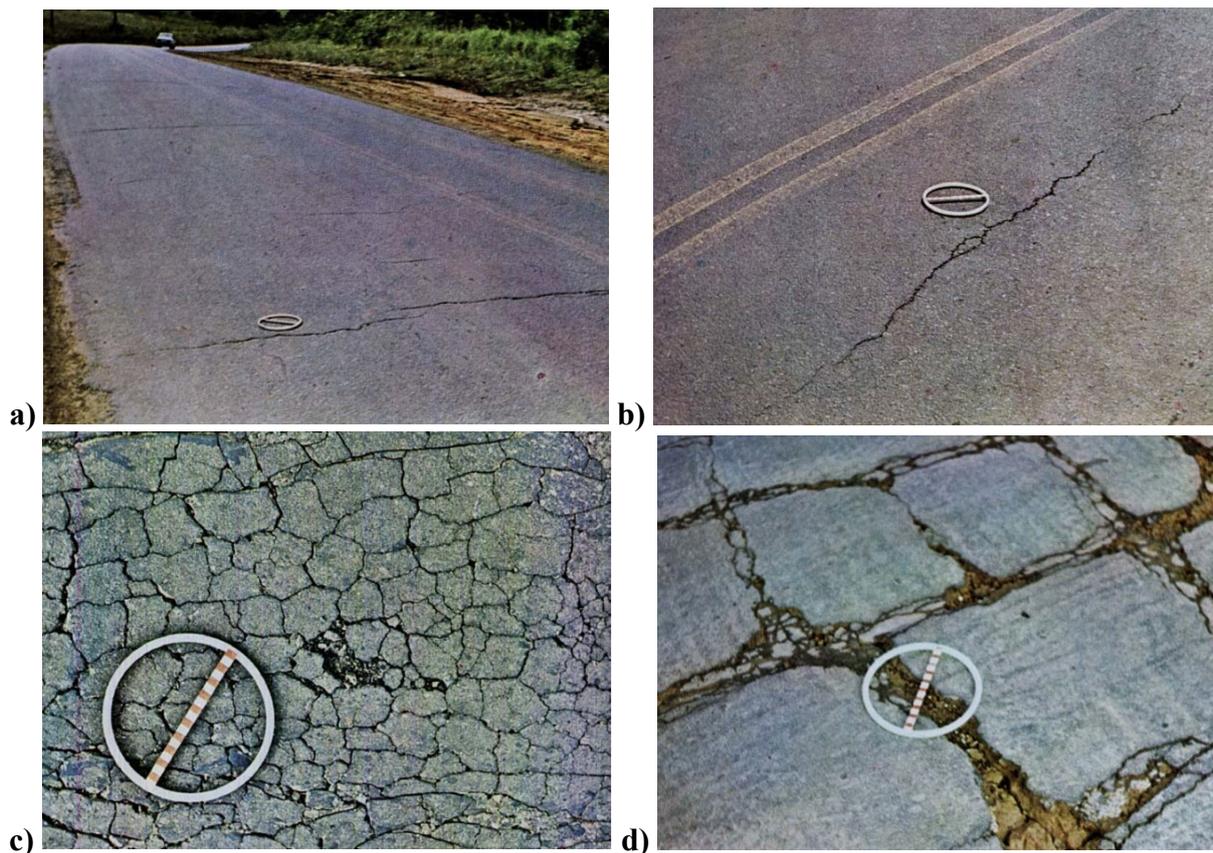


Figura 2.24. Exemplos de trincas em pavimento flexível: a) trinca transversal; b) trinca longitudinal; c) trincas tipo “couro de jacaré”; e d) trincas tipo “bloco” (DNIT 005/2003 – TER)

Tradicionalmente, considera-se que o trincamento de misturas asfálticas, especialmente as induzidas por carregamento, resultam do acúmulo de dano causado por aplicações repetidas de cargas de rodas na vida útil do pavimento. Uma abordagem alternativa correlaciona o início e propagação de trincas a um resultado de certas condições de carregamento críticas que induzem danos permanentes e desenvolvimento de aberturas (Roque *et al.*, 2015). Ou seja, de acordo com essa última teoria, o trincamento ocorre quando o material muda suas propriedades ao longo da vida útil, deixando-o mais rígido, mais frágil e menos recuperável. Segundo Roussel (2015), em geral, pavimentos flexíveis apresentam três tipos principais de trincamento: o tradicional, relacionado à fadiga, no qual a causa principal é estrutural; o trincamento de cima para baixo, relacionado à mistura asfáltica e suas resistências ao trincamento e envelhecimento; e o térmico, cuja causa principal também é relacionada às propriedades da mistura.

O entendimento do trincamento de misturas asfálticas por meio das propriedades do ligante e das misturas asfálticas se mostra fundamental para o projeto de pavimentação. Diversos ensaios de laboratório foram desenvolvidos para a simulação e a obtenção de propriedades de trincamento de misturas asfálticas. Como exemplo, tem-se o ensaio em disco

circular com fenda (*disk-shaped compact tension test* – DCT), o ensaio de tração indireta (*indirect tensile test* – IDT) e o ensaio de flexão em amostra semicircular (*semicircular bending test* – SCBT). Esse último tem sido amplamente empregado para simulação de trincamento de rochas e, mais recentemente, de concreto asfáltico (Saha e Biligiri, 2016). Sua abordagem racional e simplicidade têm instigado um crescente interesse nesse tipo de abordagem.

No Relatório 987 da NCHRP (Zhou *et al.*, 2022) avalia-se a robustez dos ensaios de laboratório para a determinação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas. Foram analisados sete diferentes ensaios de trincamento, quais sejam:

1. *ASTM D7313-20: Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry (or DCT test).*
2. *AASHTO TP 105-13: Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB) (or SCB-LT).*
3. *AASHTO TP 124-18: Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Flexibility Index Test (FIT) (or SCB-FI).*
4. *ASTM D8044-16: Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance Using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures (or SCB-Jc).*
5. *Tex-248-F: Overlay Test (or OT).*
6. *AASHTO T 321-17: Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending (or BBF).*
7. *University of Florida Indirect Tension Test Method (or UF-IDT).*

Foram considerados sete fatores, técnicos e práticos, para a avaliação dos ensaios, quais sejam: a correlação com o desempenho em campo; a sensibilidade do ensaio; a repetibilidade do ensaio; o tempo total do ensaio; o custo de equipamento; a adoção por Departamentos de Transporte nos EUA; e a disponibilidade de dados. Os apontamentos a respeito dos ensaios empregados para a avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas foram

numerosos, mas como conclusões gerais, o relatório aponta dois ensaios como robustos: o SCB-LT e o SCB-Jc. Os outros ensaios carecem de ajustes em questões significativas.

O ensaio de flexão em amostra semicircular pode ser empregado de forma estática ou cíclica. Segundo Saha e Biligiri (2015), quando estático, o ensaio provê conclusões acuradas sobre carga de ruptura e resistência ao fraturamento. Com a abordagem cíclica, o comportamento de fadiga do material é mais amplamente investigado. Entretanto, o carregamento monotônico é mais difundido entre pesquisadores, visto que a maioria dos estudos que utilizam o ensaio SCBT o realiza de forma estática.

O ensaio estático, ou monotônico, é normalizado pela norma ASTM D8044 – 16. A metodologia parte da teoria da mecânica da fratura e consiste em um corpo de prova que é carregado no topo e que tem geometria semicircular, com uma pré-trinca entalhada em seu centro. São realizados ensaios em diferentes tamanhos de pré-trinca. Na Figura 2.25, apresenta-se a metodologia de confecção dos corpos de prova semicirculares, de espessura igual a 54 mm, a partir de um corpo de prova cilíndrico, compactado com 150 mm de diâmetro, e de execução do ensaio, de forma simplificada.

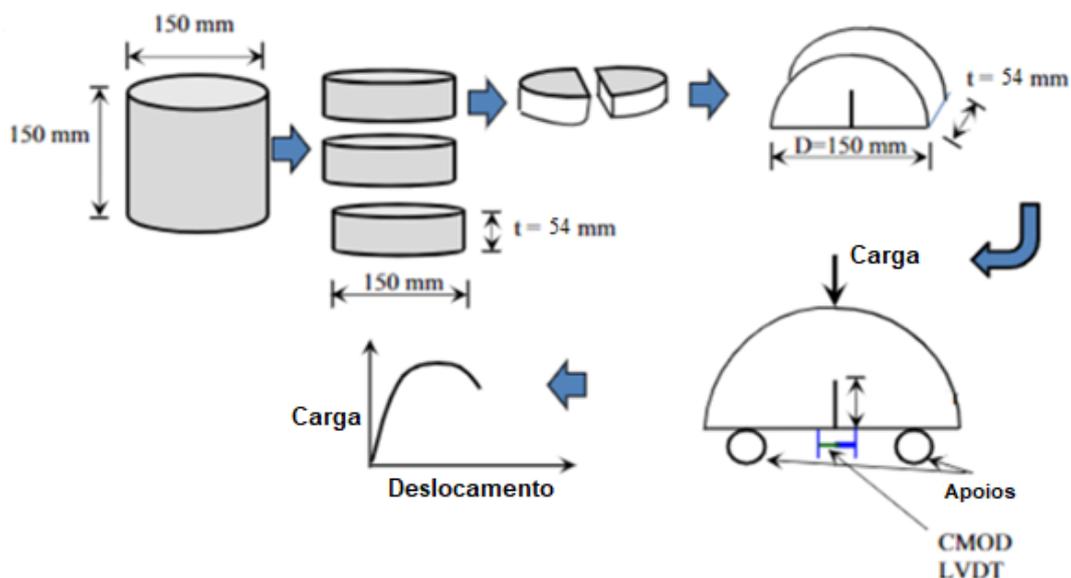


Figura 2.25. Esquema de preparação de corpos de prova e realização do ensaio SCBT (Saha e Biligiri, 2015 - modificado).

Estão previstos, na ASTM D8044-16, os procedimentos de preparação, ensaio e medição da resistência ao trincamento de misturas asfálticas em temperaturas intermediárias. Com base na aplicação de um deslocamento controlado de 0,5 mm/min no topo do corpo de

prova, são medidos os deslocamentos verticais e a carga, ao longo do ensaio. Da curva carga \times deslocamento, é possível obter a energia de deformação até a ruptura, qual seja a área abaixo da curva, até a carga de ruptura. Exemplifica-se, na Figura 2.26, a curva, obtida na execução do ensaio. O ensaio descreve ainda a determinação da taxa crítica de liberação de energia de deformação (J_c), posteriormente abordada no Capítulo 3 deste trabalho.

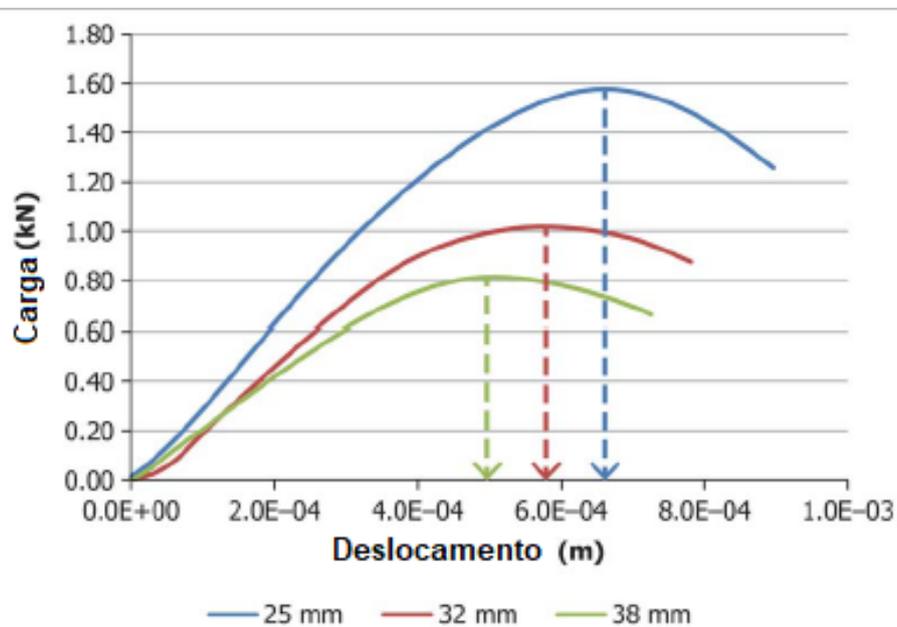


Figura 2.26. Exemplos de curvas carga \times deslocamento para diferentes aberturas de pré-trincas (ASTM D8044 - 16)

No Relatório NCHRP 987 (Zhou *et al.*, 2022), ao se avaliar a norma e os procedimentos necessários à execução do ensaio SCB, foram apontadas dificuldades e recomendações de revisões de tolerâncias adotadas nos fatores controlados do ensaio. Na Tabela 2.1, resumem-se as recomendações realizadas para sete fatores da norma ASTM D8044-16. Cabe salientar que as conclusões do relatório se devem, primordialmente, pela percepção dos autores da dificuldade de realização da preparação dos corpos de prova. O processo envolve, além da dosagem da mistura e moldagem do CP, vários cortes, conforme já mostrado na Figura 2.23. Na prática, é bastante complexo manter um alto grau de refinamento dos cortes de modo a respeitar as rígidas tolerâncias apontadas na norma atual. O relatório realizou estudos estatísticos com tolerâncias maiores, que se mostraram aceitáveis para que não houvesse efeitos danosos à compreensão do trincamento das misturas asfálticas. Cabe analisar, de forma mais completa, a possível indução de fraturas do tipo *Mixed-mode* com a ampliação do desvio máximo permitido do centro.

Tabela 2.1. Tolerâncias recomendadas para sete fatores da ASTM D8044-16: SCB-Jc (modificado-Zhou *et al.*, 2022)

Fator	Tolerância requerida na ASTM D8044-16	Tolerância recomendada pelo NCHRP 987
Espessura do CP [mm]	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
Profundidade da pré-trinca [mm]	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
Localização da pré-trinca	No centro do CP, com desvio máximo de 0,3 mm	O desvio máximo permitido do centro deve ser de 2 mm
Altura do CP [mm]	Corte no eixo central em duas amostras semicirculares iguais. A altura (raio) das duas amostras não deve desviar de 1 mm uma da outra.	A altura do CP semicircular deve ser de $73,5 \pm 2,0$ mm
Volume de vazios [%]	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Taxa de carregamento mm/min	não definida	$\pm 0,02$
Temperatura do ensaio [°C]	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$

2.4.1 MECÂNICA DA FRATURA E O ENTENDIMENTO DO TRINCAMENTO

O entendimento dos conceitos de mecânica da fratura, até a década de 50, eram restritos a materiais que obedecessem às leis de Hooke, ou seja, eram voltadas a comportamentos lineares. Após 1960, os trabalhos de Dugdale (1960) e Barenblatt (1962), posteriormente estendidos por Hillerborg (1978), desenvolveram teorias da mecânica da fratura para comportamentos não-lineares dos materiais.

A depender do carregamento ao qual um elemento está submetido, podem surgir três modos fundamentais de trincamento, caracterizados pelo movimento relativo entre as duas faces da trinca: o Modo I, sujeito a tração, com abertura da trinca; o Modo II, quando sujeito a

cisalhamento, com deslizamento das faces; e o Modo III, de rasgamento. Os modos de fratura estão exemplificados pela Figura 2.27.

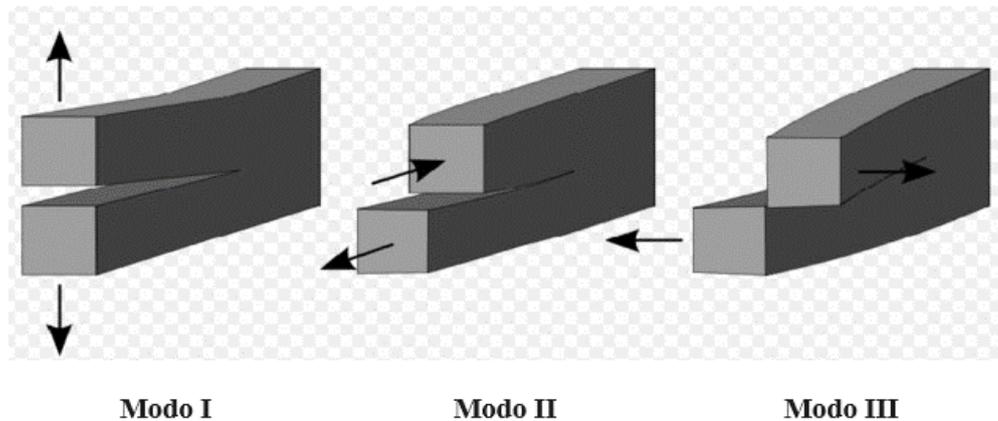


Figura 2.27. Modos de fratura: I (abertura), II (deslizamento) e III (rasgamento) (Alshandah *et al.*, 2018).

Para modos de fratura do tipo I, que constituem essencialmente o que ocorre em ensaios do tipo Flexão em Amostra Semicircular, como apresentado, tem-se que o campo de tensão próximo à ponta de abertura da trinca é dado por:

$$\sigma_{ij} = \left[\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right] f_{ij}(\theta) + \text{termos de ordem superior} \quad (2.17)$$

sendo K o fator de intensidade de tensão (proporção do termo que lidera a singularidade na ponta da trinca) e $f_{ij}(\theta)$ a função adimensional de θ . Trabalha-se, nesse caso, no sistema de coordenadas polares, com origem na ponta da trinca.

Conhecendo-se a matriz de rigidez do material, as deformações podem ser estimadas em localizações randômicas a partir de:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}; \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.18)$$

2.4.2 MODELAGEM NUMÉRICA DO TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A modelagem de trincamento de misturas asfálticas já foi realizada por alguns autores. Há diferentes abordagens para o problema, seja usando Modelos de Zona Coesiva, ou mesmo o Método Estendido dos Elementos Finitos. O uso da ZC mostra-se eficaz para a modelagem de trincas com aberturas maiores, entretanto o modelo torna-se restrito, visto que demanda a

inserção de elementos de zona coesiva em uma região pré-determinada. Isso pode levar a simulações irreais, visto que o caminho de propagação da trinca está delimitado pela região enriquecida com os elementos citados. Além disso, há a necessidade constante de reconstrução da malha conforme o trincamento avança nos modelos extrínsecos, o que eleva muito o custo computacional (Lancaster *et al.*, 2013). Apresenta-se, na Figura 2.28, um esquema com os dois métodos de modelagem de propagação das trincas.

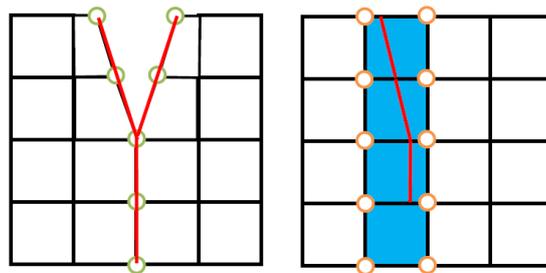


Figura 2.28. Esquema de modelagem de propagação de trincas com elementos de ZC (esquerda) e XFEM (direita).

O XFEM, anteriormente chamado de GFEM (*Generalized Finite Element Method*) possui a capacidade de propagar trincas sem operações de reconstrução de malha, e permite que a trinca se propague em qualquer direção. Essa abordagem, então, mostra-se particularmente eficiente para a modelagem do trincamento de misturas asfálticas. Roque *et al.* (2015) descrevem que, nesse caso, o dano é associado com a resposta viscosa (fluência) do material. Um elemento chave do processo de trincamento é introduzido, qual seja o conceito de limiar, que quando não é excedido, apenas microdanos recuperáveis são desenvolvidos. Entretanto, ao ser ultrapassado o limiar, ocorre a iniciação de macrodano, que é o início e propagação de trinca.

Com a utilização do XFEM, a localização da trinca e a sua propagação são independentes da malha. Os nós dos elementos próximos das descontinuidades são enriquecidos com graus de liberdade adicionais e funções de forma que permitem a modelagem do estado de descontinuidade (Lancaster *et al.*, 2013). A trinca modelada com XFEM pode, então, propagar-se por qualquer trajetória dentro do domínio do material, levando a soluções mais acuradas e realistas. Isso torna a abordagem muito adequada para a modelagem de misturas asfálticas, que lida com geometrias complexas e alto grau de aleatoriedade. Com o uso do programa ABAQUS, o XFEM pode ser implementado considerando parâmetros facilmente obtidos dos ensaios experimentais de misturas asfálticas. A aplicação do XFEM/GFEM para simulações envolvendo trincas mostra-se com alto grau de robustez, e já é incorporada em códigos consagrados como o LS-DYNA e o ABAQUS (Belytschko *et al.*, 2009).

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 3.1, resume-se a metodologia proposta para a pesquisa, que foi realizada no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB) da Universidade de Brasília (UnB). Em seguida, faz-se a descrição detalhada dos procedimentos adotados para a realização do trabalho.

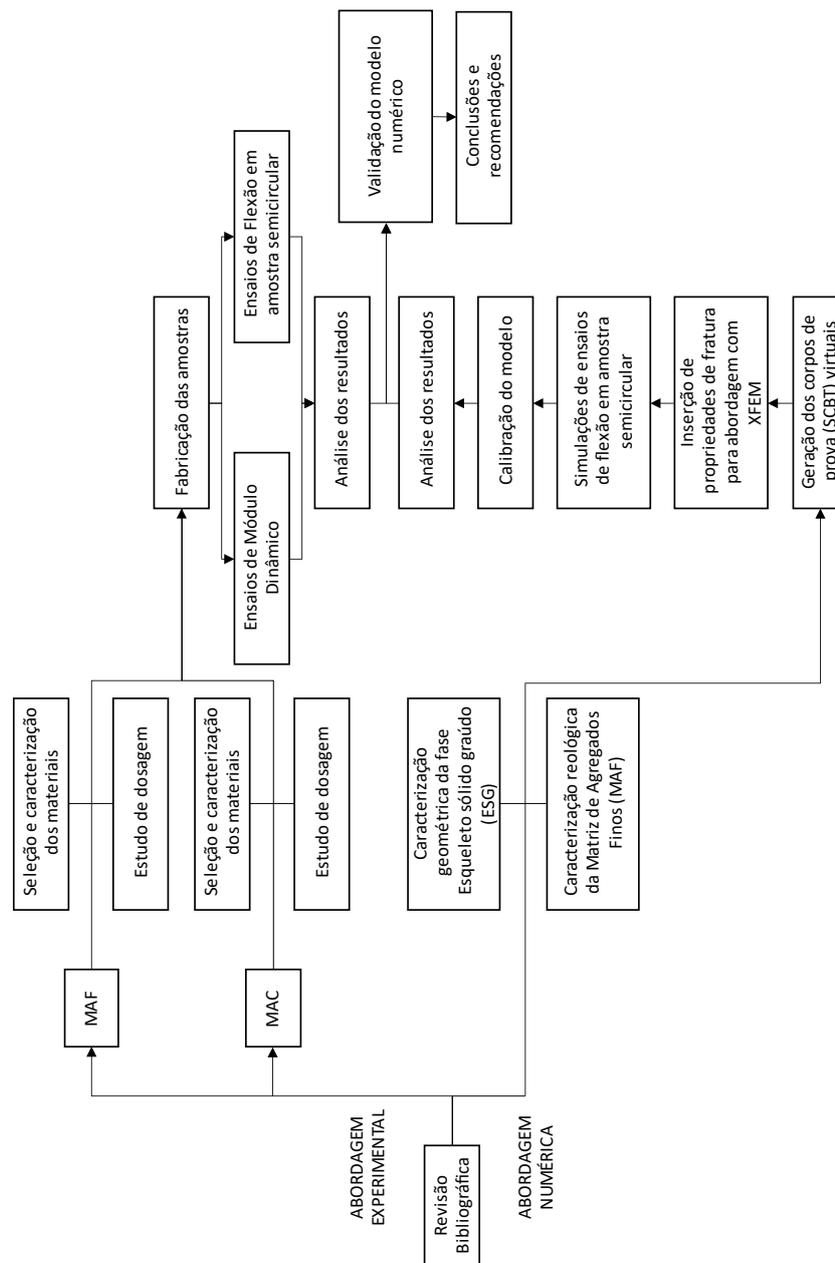


Figura 3.1. Fluxograma da metodologia do trabalho.

3.1 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A frente experimental da pesquisa consistiu em caracterizar os materiais utilizados para confecção da Mistura Asfáltica Completa (MAC) e da Matriz de Agregados Finos (MAF), além de estudar suas dosagens ideais para fabricação de corpos de prova. Posteriormente, foram executados ensaios em corpos de prova das duas misturas, a fim de caracterizar seus comportamentos reológicos e resistência ao fraturamento.

A MAC adotada para a pesquisa consiste em um Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) tradicional utilizado em camadas de rolamento de pavimentos. Os materiais utilizados e a dosagem executada são apresentados a seguir. Já a MAF consiste na mistura dos mesmos materiais, mas com agregados limitados à dimensão de 4,8 mm.

3.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O estudo experimental iniciou-se pela caracterização dos materiais utilizados para a mistura, quais sejam os agregados minerais e o ligante asfáltico. Os procedimentos foram realizados no INFRALAB/UnB.

3.1.1.1 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados para confecção da mistura foram cedidos pela Pedreira Contagem, localizada na Região Administrativa de Sobradinho, no Distrito Federal. Trata-se de um material calcário dolomítico comumente encontrado na região.

Para a dosagem almejada, foi construída uma composição granulométrica dos agregados para a MAC que atendesse ao centro da Faixa C, normatizada pelo DNIT 031/2006. Para a MAF, os agregados foram limitados à dimensão de 4,8 mm. Na Figura 3.2 são apresentadas as curvas granulométricas das duas misturas. Trata-se de uma composição densa, cujo centro da faixa possui o parâmetro n , qual seja o parâmetro de ajuste da função potência que controla a qualidade da graduação, igual a 0,5390 (Oliveira Junior, 2018). O parâmetro é determinado pela Equação 3.1, desenvolvida por Fuller e Thompson (1907).

$$P(d) = \left(\frac{d - d_0}{D - d_0} \right)^n \quad (3.1)$$

sendo $P(d)$ a porcentagem passante em função da abertura da peneira, d a abertura da peneira, d_0 a dimensão mínima dos agregados, igual a 4,8 mm, D a dimensão máxima dos agregados, e n o parâmetro de ajuste da curva que controla a qualidade da graduação.

Valores de n próximos a 0,5 indicam uma mistura bem graduada e, portanto, densa. A metodologia *Superpave* recomenda um valor de n próximo a 0,45. A Figura 3.3 apresenta a curva granulométrica da mistura entre os pontos de controle recomendados pela ADOT e limites do DNIT.

Observa-se que a curva adotada se encontra na região considerada, no passado, como zona de restrição. Entretanto, conforme Bernucci *et al.* (2006), essa definição tornou-se obsoleta e não mais faz-se relevante.

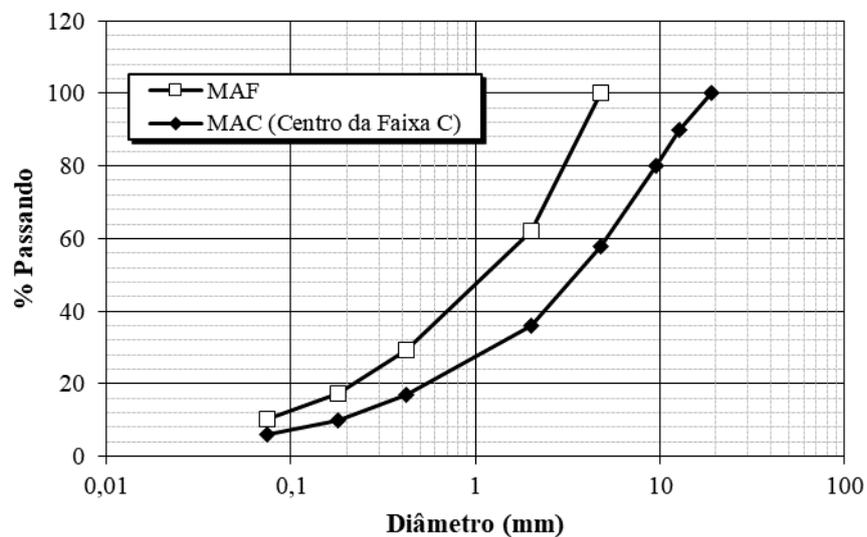


Figura 3.2. Composição granulométrica da MAF, a partir do Centro da Faixa C do DNIT.

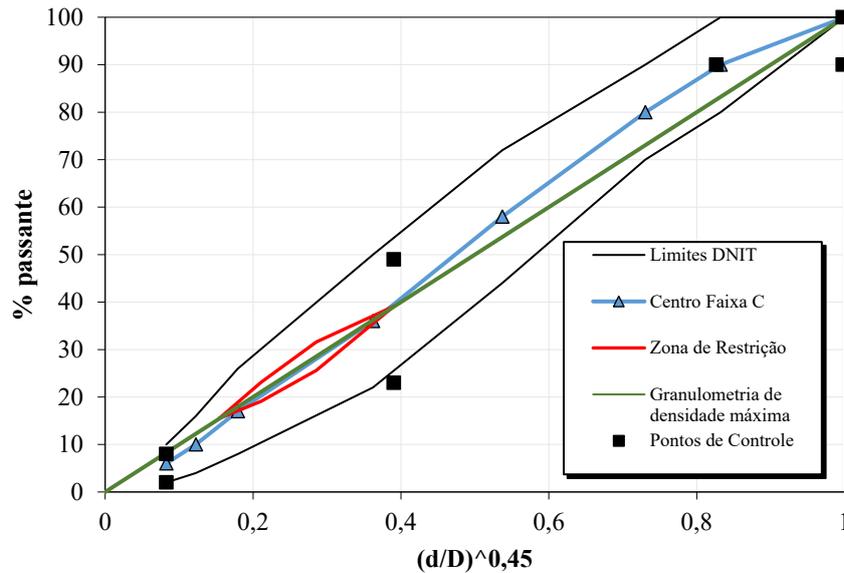


Figura 3.3. Análise granulométrica da Faixa C e limites do DNIT e ADOT.

A avaliação de forma dos agregados foi feita por Oliveira Junior (2018) e Oliveira Junior e Farias (2020), a partir da metodologia apresentada pela norma ABNT NBR 6954 MB 894 (1983) com o estudo estatístico a partir de medições com paquímetro, conforme exemplificado pela Figura 3.4.

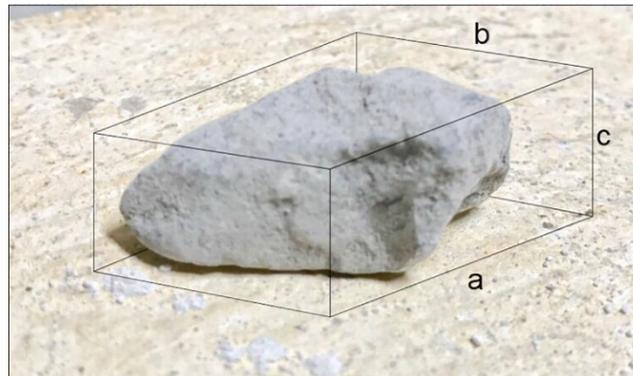


Figura 3.4 Medidas realizadas no paquímetro em amostra de agregados para caracterização de forma. Fonte: Oliveira Junior (2018) e Oliveira Junior e Farias (2020)

Para o processamento digital das partículas de agregados, foram usados diferentes tipos de equipamentos, seja em duas ou em três dimensões de informações. Os dados obtidos permitem a geração de partículas virtuais usadas para geração de pacotes de agregados, que formaram o Esqueleto Sólido Graúdo da mistura de CBUQ.

Para processamento de dados 2D, foi utilizado o *Aggregate Image Measurement System 2 (AIMS2)*. O equipamento foi desenvolvido para analisar propriedades de forma de agregados de pequenas e grandes dimensões, a partir de imagens de diferentes resoluções. Trata-se de um

sistema automático, de fácil operação, e que permite a separação de propriedades de forma, angularidade e textura. Os dados são avaliados segundo distribuições acumuladas, no lugar de índices baseados em médias aritméticas. Para tanto, é possível analisar um grande número de partículas em curto espaço de tempo.

Posteriormente, foi realizado o escaneamento de partículas de agregados com utilização do Scanner 3D DAVID, conforme Figura 3.5. O scanner tem precisão máxima de 0,03 mm, e em sua especificação permite digitalizações de objetos entre 60 mm e 500 mm. Para cada fração granulométrica (entre duas peneiras) componente da Faixa C do DNIT, foram escaneadas 30 partículas, considerando a constituição dos agregados graúdos. Dessa forma, tem-se uma representatividade estocástica das partículas reais, representando-as como partículas virtuais, conforme apresentado em Oliveira Junior *et al.* (2022). Tal procedimento foi realizado para composição de um repositório de partículas para subsidiar empacotamento de agregados que formam o Esqueleto Sólido Graúdo (ESG) de forma randômica. O mapeamento 3D da partícula permite a geração de um arquivo tridimensional por partícula, e esta pode ser posteriormente selecionada randomicamente e posicionada em um espaço predeterminado, a fim de conceber o pacote de agregados.



Figura 3.5. Escaneamento 3D de agregado com utilização do Scanner DAVID-3D.

3.1.1.2 Caracterização do ligante

O ligante utilizado para confecção das misturas consiste em um Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 50/70, cedido pela Centro-Oeste Asfaltos, localizada em Brasília, Distrito Federal. O material é proveniente da REGAP, refinaria localizada em Betim, MG. Amostras do ligante foram ensaiadas no INFRALAB/UnB a fim de se obterem suas características básicas. Dois dos equipamentos utilizados para a caracterização básica do ligante são apresentados na Figura 3.6. A campanha de ensaios de caracterização do ligante executada nesta pesquisa, e suas normas correspondentes são evidenciados na Tabela 3.1.



Figura 3.6. a) Penetrômetro e b) Viscosímetro *Brookfield*.

Tabela 3.1. Campanha experimental de caracterização do ligante.

Característica	Método
Penetração	ABNT NBR 6576/2007
Ponto de Amolecimento	ABNT NBR 6560/2000
Viscosidade Brookfield 135°C	ASTM D 4402/02
Viscosidade Brookfield 150°C	ASTM D 4402/02
Viscosidade Brookfield 177°C	ASTM D 4402/02
Densidade 20°C	ABNT NBR 6296/2004
RTFOT Variação em massa	ASTM D 2872/97
RTFOT Penetração Retida	ABNT NBR 6576/2007

Além da campanha de caracterização básica do ligante, as propriedades viscoelásticas do ligante foram obtidas por meio do reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer* – DSR), normatizado pela ASTM D 7175/2008, antes e após o envelhecimento. Na Figura 3.7, apresenta-se o reômetro utilizado na caracterização do ligante, no Infralab.



Figura 3.7. Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).

O ensaio consiste na obtenção do módulo dinâmico de cisalhamento $|G^*|$ e o ângulo de fase (φ) por meio da aplicação de tensões de cisalhamento oscilatórias em uma amostra de ligante situada entre duas placas paralelas. Os ensaios foram executados em três amostras, por meio de deformação controlada, em temperaturas de 28°C a 70°C, em intervalos de 5 ou 10°C, sob frequências de carregamento de 0,10; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1; 1,16; 2,5; 4; 6,3 e 10Hz. A caracterização reológica foi realizada conforme o modelo sigmoidal.

3.1.2 ESTUDO DA DOSAGEM

Neste subitem, apresentam-se as metodologias de dosagem das misturas empregadas, CBUQ e MAF. Foram empregados métodos difundidos, ambos experimentais, passando por numerosas iterações.

3.1.2.1 Dosagem da Mistura Asfáltica Completa (CBUQ)

A dosagem das misturas (MAC) foi realizada a partir da metodologia *Superpave*, com compactação feita por amassamento (giros) no compactador giratório do INFRALAB/UnB,

modelo Troxler 5850, representado na Figura 3.8. Para tanto, aplicaram-se, com o compactador, os giros com ângulo de $1,25^\circ \pm 0,2^\circ$ e pressão vertical de 600 kPa. O equipamento permite o controle do critério de parada a partir do número de giros ou altura do corpo de prova, no interior do molde. Foram utilizados moldes de 150 mm de diâmetro, o que acarretou a necessidade de cortes para conformação dos CPs para ensaios que especificam 100 mm de diâmetro.



Figura 3.8. Compactador giratório utilizado para confecção dos corpos de prova.

A partir dos resultados de viscosidade do ligante, foram determinadas as temperaturas do agregado, ligante, de mistura e de compactação da mistura, conforme Figura 3.9. Os resultados são apresentados na Tabela 3.2.

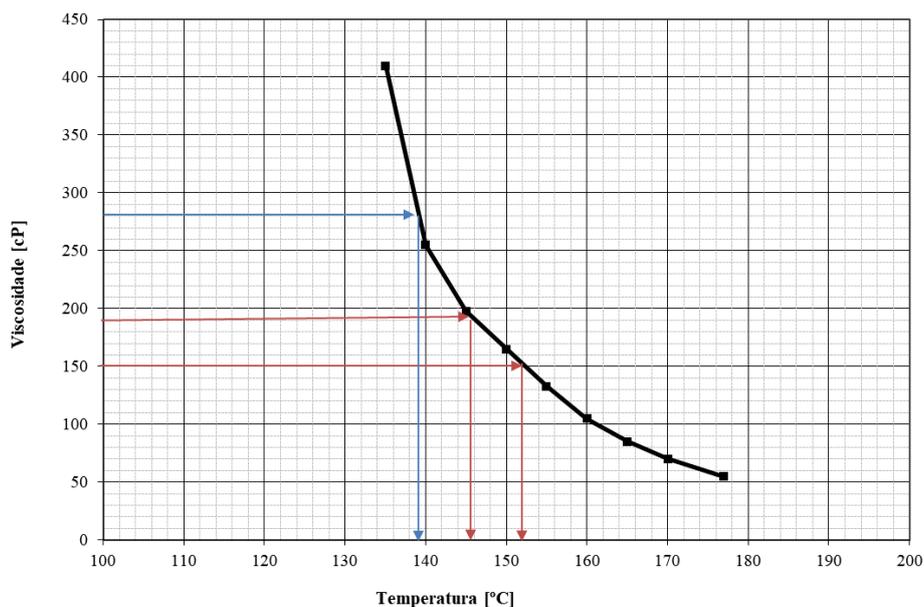


Figura 3.9. Determinação de temperaturas de mistura e compactação a partir do ensaio de viscosidade.

Tabela 3.2. Temperaturas de mistura e compactação.

	Temperaturas [°C]
Agregado	165
Ligante	155
Mistura e Compactação	140 - 150

A dosagem da MAC foi realizada com relação aos parâmetros volumétricos, partindo da determinação do teor de ligante de projeto. Para isso, foram realizadas moldagens de seis corpos de prova com teores de ligante iguais a $4,5\% \pm 0,5\%$, sendo dois por teor. O teor de projeto deve ser aquele para o qual a mistura compactada alcance um Volume de vazios (Vv) igual a aproximadamente 4%.

Inicialmente, foi necessário determinar as massas de agregados para comporem a Faixa C do DNIT, considerando os três diferentes teores de ligante ensaiados. A Tabela 3.3 resume os teores de cada material para compor as três misturas.

Tabela 3.3. Teores dos materiais estudados para determinação do teor de ligante da mistura.

Mistura	%a	% 19,1- 12,7	% 12,7- 9,5	% 9,5- 4,8	% 4,8-2	% 2-0,42	% 0,42- 0,18	% 0,18- 0,075	% 0- 0,075	Proporção Pó/asfalto
4,0%	4,0	9,6	9,6	21,12	21,12	18,24	6,72	3,84	5,76	1,4
4,5%	4,5	9,55	9,55	21,01	21,01	18,145	6,685	3,82	5,73	1,3
5,0%	5,0	9,5	9,5	20,9	20,9	18,05	6,65	3,8	5,7	1,1

Os agregados foram inicialmente pesados para compor a mistura e levados à estufa para atingirem a temperatura de 165 °C por 24 h. Uma vez aquecidos ligante e agregados, esses foram levados ao misturador mecânico, conforme Figura 3.10, onde permanecem por cerca de dois minutos para homogeneização dos materiais. O misturador é hermeticamente fechado e é possível programar sua temperatura interior, a fim de que não haja grandes perdas de temperatura da mistura. Nessa fase, há redução considerável da massa de materiais, que aderem às paredes do misturador. A massa total deve ser então superdimensionada, inicialmente.



Figura 3.10. Misturador mecânico para homogeneização dos materiais

Os moldes dos corpos de prova foram, então, preenchidos com 4700 g de mistura quente, para, em seguida, serem levados ao compactador giratório *Superpave*, que inicia o processo de compactação. Uma vez alcançada a altura pré-determinada, o adensamento previsto é alcançado e o corpo de prova pode ser retirado para posterior desmoldagem.

Os corpos de prova foram pesados segundo a AASHTO T 166, para a determinação da densidade aparente e obtenção dos dados de volumetria, e parte da massa da mistura foi

utilizada para a realização do ensaio de densidade máxima medida (*Rice*), a partir da norma ASTM D 2041, para cálculo da massa específica máxima da mistura sob condições específicas de vácuo, e posteriormente possibilitar a determinação do volume de vazios de cada preparo. O ensaio é realizado em equipamento exemplificado na Figura 3.11.

Esse processo foi realizado continuamente em vários corpos de prova, com os diferentes teores de ligante estudados, de forma a compreender número de giros adequado do compactador, altura do corpo de prova para obtenção do V_v ideal, massa inicial da mistura adequada para a obtenção do CP almejado. O conhecimento empírico e prático de confecção e moldagem/desmoldagem das misturas mostrou-se importante para o sucesso da campanha, visto que se trata, ainda, de procedimento bastante experimental.



Figura 3.11. Conjunto de *Rice Test* utilizado para determinação de massa específica máxima da mistura.

3.1.2.2 Dosagem da Matriz de Agregados Finos (MAF)

A fim de que se pudesse conhecer o comportamento isolado da Matriz de Agregados Finos, para que se possa simular o comportamento do compósito a partir de seus componentes, foram confeccionados corpos de prova da MAF. Tais corpos de prova deveriam ser suficientes para a realização dos mesmos ensaios aos quais seria submetida a MAC. Para tanto, a MAF foi dosada a partir da metodologia apresentada por Castelo Branco (2008). Outras metodologias já foram estudadas, conforme apresentado no capítulo da Revisão Bibliográfica, entretanto essa foi escolhida em virtude da maior exequibilidade e facilidade. A dosagem proposta passa pelos seguintes passos, a partir de informações obtidas da MAC:

- Definição de uma massa total da MAC (W_{MAC}), curva granulométrica, percentual de agregados passante na peneira #4 (usada, nesta pesquisa, como peneira limite dos agregados miúdos) ($\%_{pass\#4}$), teor de ligante ($P_{b,MAC}$) e massa de ligante ($W_{b,MAC}$);
- Determinação da massa de agregados utilizados na MAC passantes na peneira #4 ($W_{agg,MAF}$) e elaboração da curva granulométrica da MAF, conforme já apresentada, proporcionalmente à curva da MAC;
- Definição da massa total (W_{MAF}) a ser utilizada para confecção dos corpos de prova;
- Cálculo da porcentagem de ligante a ser utilizada na MAF ($\%P_{b,MAF}$), conforme Equação (3.2) e a massa de ligante ($W_{b,MAF}$) (Equação (3.3));

$$\%P_{b,MAF} = \frac{W_{b,MAC}}{W_{agg,MAF} + W_{b,MAC}} \quad (3.2)$$

$$W_{b,MAF} = W_{MAF} \cdot \%P_{b,MAF} \quad (3.3)$$

- Cálculo da massa de cada fração de agregado para compor $W_{agg,MAF}$.

3.1.2.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após dosados, os corpos de prova de ambas as misturas foram compactados seguindo os teores volumétricos determinados na dosagem volumétrica *Superpave*. Os corpos de prova compactados foram desformados e resfriados à temperatura ambiente. É importante salientar que o processo de desmoldagem ocorre com a utilização de desmoldante nas paredes do cilindro metálico utilizado como molde, o que não garante o sucesso do procedimento em todas as ocasiões, o que resultou em muito retrabalho. Observou-se, empiricamente, que uma espera de cerca de três minutos entre a retirada do CP do compactador e a desmoldagem era eficaz para o procedimento.

Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a processos de corte para conformação segundo os ensaios aos quais seriam submetidos. Para o ensaio de módulo dinâmico, foram preparados corpos de prova cilíndricos. Foi necessário o corte radial para redução do diâmetro do CP de 150 para 100 mm, com a utilização de serra copo diamantada, e cortes transversais para obtenção de 150 mm de altura, com serra de bancada com disco

diamantado. Para os semicírculos ensaiados no ensaio SCBT, foi necessário ainda cortar discos de 57 mm de espessura dos corpos de prova de 150 mm de diâmetro, que foram serrados ao meio. Posteriormente, foram abertas as fendas de pré-trincamento, com 25 mm, 32 mm e 38 mm. Alguns dos procedimentos são exemplificados na Figura 3.12. Os corpos de prova produzidos para os ensaios de Módulo Dinâmico (cilíndricos) e para o SCBT (semicírculos) são apresentados na Figura 3.13.

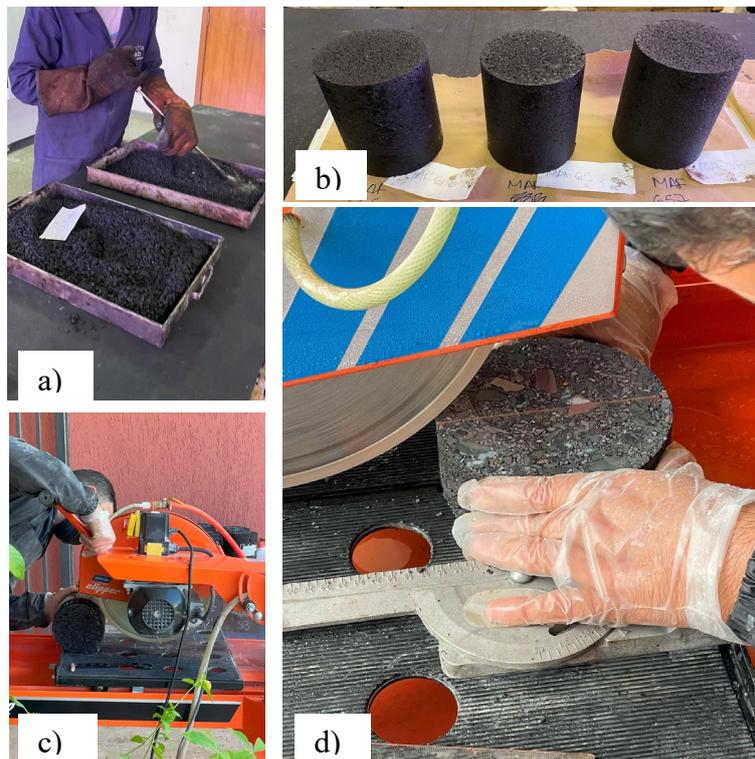


Figura 3.12. Procedimentos de preparação do corpo de prova de mistura asfáltica: a) Mistura antes da compactação; b) CPs compactados ao molde do cilindro do compactador; c) corte transversal para definição da altura do CP; d) corte dos semicírculos necessários ao ensaio SCBT.

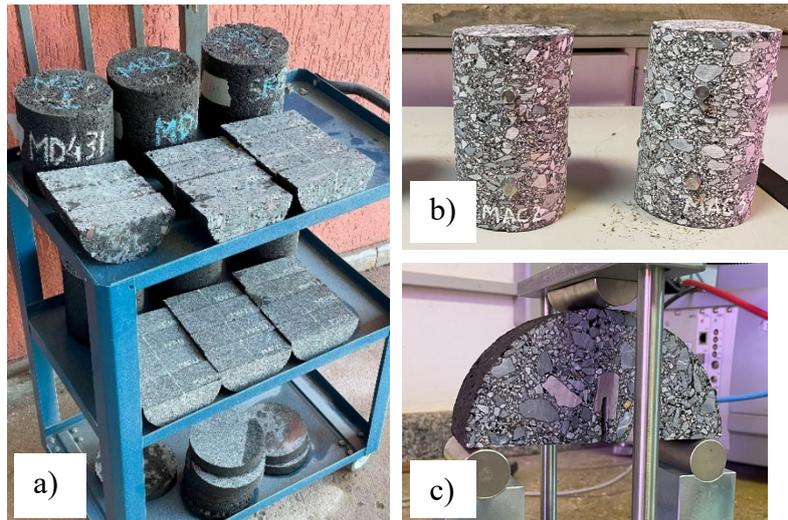


Figura 3.13. a) Corpos de prova cortados; b) CP para Ensaio MD; c) CP para ensaio SCBT.

3.1.2.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Foram realizados ensaios de Módulo Dinâmico, normatizado pela norma ASTM D3497-79 (2003), e o de Flexão em Amostra Semicircular (SCBT), normatizado pela ASTM D8044-16. Os procedimentos adotados são apresentados a seguir.

3.1.2.4.1 Curva mestra de módulo dinâmico

Para a confecção da curva mestra dos corpos de prova de amostras de MAC e MAF, foram realizados ensaios de módulo complexo no equipamento *AsphaltQube*, presente no INFRALAB/UnB. O equipamento realiza diversos ensaios de desempenho normatizados para execução em misturas asfálticas, a depender do aparato montado em sua câmara. Os ensaios podem ser realizados sob temperatura controlada. Apresenta-se, na Figura 3.14, o equipamento utilizado. É possível realizar a aplicação de cargas cíclicas, sob deformação controlada, em corpos de prova cilíndricos em diversas temperaturas e frequências, a uma carga de até 15 kN.



Figura 3.14. Equipamento de ensaios modular do tipo eletromecânico servoatuador - *AsphaltCube*

Para a realização do ensaio de Módulo Dinâmico, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de cada mistura (MAC e MAF), com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Esses foram submetidos a carregamentos cíclicos a 0,1; 0,5; 1,0; 5; 10; e 25 Hz, sob diferentes temperaturas (5, 10, 20, 30 e 40°C). O aparato para realização do ensaio é mostrado na Figura 3.15.



Figura 3.15. Corpo de prova posicionado para realização do ensaio de Módulo Dinâmico.

Para cada temperatura ensaiada, o *software* do *AsphaltQube* retorna o valor do Módulo Dinâmico, em MPa, e o ângulo de fase, em grau, para as diferentes frequências de carregamento. Parâmetros estatísticos são também gerados para avaliação dos dados gerados.

A partir dos resultados, é possível construir a curva mestra de Módulo Dinâmico, em função de diferentes frequências, que representa o comportamento elástico de um material viscoelástico linear submetido a um carregamento senoidal. Além disso, é possível representar a curva de Ângulo de Fase (φ), em função da frequência. Para tanto, foi utilizado o *Microsoft Excel*, de forma a ajustar um modelo calibrado a partir da função *Solver*. Adotou-se, para obtenção da curva, uma temperatura de referência de 20 °C. Foram ajustados diferentes parâmetros para minimização do erro entre o valor medido e o previsto pelo modelo representado pela função sigmoidal:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(t_r)}} \quad (3.14)$$

sendo δ, α, β e γ parâmetros de ajuste do modelo que representa a curva mestra aos dados experimentais; e t_r o tempo reduzido, posteriormente convertido em frequência reduzida.

A curva mestra de Módulo Dinâmico, uma vez obtida, pode ser usada para avaliação e caracterização de misturas asfálticas para o dimensionamento de pavimentos em métodos mecanístico-empíricos. A partir dela, é possível avaliar os efeitos das variações climáticas e da velocidade do tráfego sobre camadas de rolamento viscoelásticas.

Os resultados do ensaio também permitem a obtenção da curva de Relaxação da MAF a qual foi ajustada uma Série de Prony pelo Método da Colocação por Mínimos Quadrados Linear (MQL). Em seguida, foram extraídos seus coeficientes de módulo de relaxação cisalhante (G_t), normalizados pelo módulo de relaxação cisalhante instantâneo (G_0), e de módulo volumétrico elástico (K_t), normalizados pelo módulo volumétrico elástico instantâneo (K_0). Tal normalização é necessária à simulação utilizando-se do programa ABAQUS. Seus cálculos são feitos de forma análoga a materiais elásticos, adotando a hipótese simplificadora de constância do Coeficiente de Poisson, conforme a seguir.

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1 + \nu)} \quad (3.5)$$

$$K(t) = \frac{E(t)}{3(1 - 2\nu)} \quad (3.6)$$

Esses valores subsidiam a definição do modelo constitutivo viscoelástico da MAF no modelo numérico, dependente da série de Prony da função Relaxação $E(t)$. O próprio *software* também recebe como *input* a curva de Relaxação, ajusta a Série de Prony e normaliza-a pelos seus valores instantâneos.

3.1.2.4.2 Ensaio de flexão em amostra semicircular (SCBT)

O ensaio de flexão em amostra semicircular (*Semi-Circular Bend Test – SCBT*), normalizado pela ASTM D8044-16, é o método utilizado para medição da resistência ao trincamento de misturas asfálticas, em temperaturas intermediárias (25°C, neste estudo). O ensaio busca determinar a taxa de liberação de energia de deformação crítica (J_c) e outros parâmetros a partir de uma curva carga-deslocamento. O parâmetro J_c é uma propriedade de engenharia considerada um indicador de trincamento a temperaturas intermediárias.

Inicialmente, foram preparados três corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura no compactador giratório *Superpave*, com V_v alvo de 7,0%, para cada uma das misturas. Esse é o valor indicado pela norma ASTM D8044-16, e foi obtido reduzindo o número de giros do compactador giratório, utilizando a mesma mistura dosada pela metodologia *Superpave*. Porcentagens maiores de vazios resultam em diminuição na rigidez da mistura, o que ocasionam respostas menos frágeis do material.

Cada CP cilíndrico produzido foi cortado em dois discos de 57 mm e, posteriormente, cortados ao longo do eixo central, formando quatro semicírculos. Para cada quatro corpos de prova, foram abertas fendas iniciais (a) de 2 mm de espessura e diferentes comprimentos, sejam eles 25, 32 e 38 mm, no centro, paralelas ao carregamento. As fendas foram abertas com serra circular diamantada, de modo a respeitar o limite de 3,5 mm de espessura.

Os quatro semicírculos de cada abertura de fenda foram ensaiados. Os ensaios foram realizados no *AsphaltQube*, com o aparato adequado. O corpo de prova é posicionado sobre dois apoios e a câmara é fechada, de modo a estabilizar a temperatura em 25 °C. Ao iniciar o ensaio, no topo do corpo de prova é aplicado um carregamento com controle de deslocamento na taxa de 0,5 mm/min, conforme a norma. As medições e gravações das leituras foram feitas em uma frequência de 10 Hz. O ensaio era terminado, com base na norma, quando a carga aplicada reduzisse a 25% da carga de pico. Mostra-se, na Figura 3.16, a configuração do ensaio.

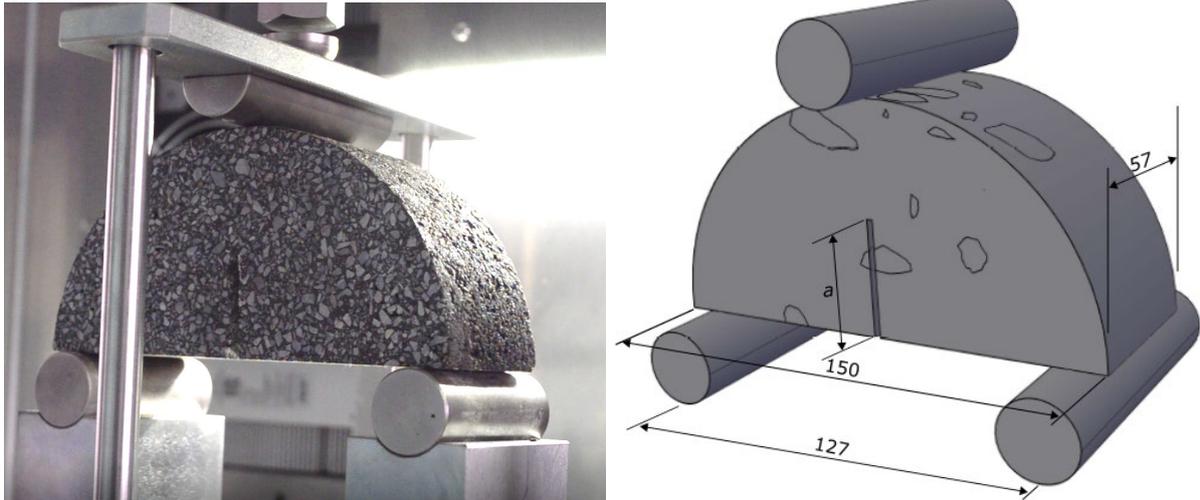


Figura 3.16. Aparato para realização de ensaio de Flexão em Amostra Semicircular. Dimensões em milímetros.

Após ensaiar os doze corpos de prova, foram construídas três curvas médias carga \times deslocamento, sendo uma para cada profundidade de abertura da fenda inicial. Dessa curva, calcula-se a energia de ruptura U , que é a área abaixo da vertente de carregamento da curva, até a máxima carga medida para cada abertura de fenda inicial. A área pode ser calculada de forma simplificada, de acordo com a norma, pela regra do trapézio:

$$U = \sum_{i=1}^n (u_{i+1} - u_i) \cdot P_i + \frac{1}{2} (u_{i+1} - u_i)(P_{i+1} - P_i) \quad (3.7)$$

sendo P_i a carga aplicada no i passo de carregamento [kN]; P_{i+1} a carga aplicada no $i+1$ passo de carregamento [kN]; u_i o deslocamento vertical no passo i [m]; e u_{i+1} o deslocamento vertical no passo $i+1$ [m].

A energia de deformação de uma curva indica a energia necessária para a ruptura do material, ou seja, maiores valores de U são obtidos em materiais mais resistentes ao trincamento sob temperaturas intermediárias. Pode-se, então, construir o gráfico Energia de deformação \times comprimento da fenda inicial. Esse gráfico foi usado para o cálculo da taxa crítica de liberação de energia de deformação (J_c), calculada por meio da seguinte equação:

$$J_c = \frac{-1}{b} \left(\frac{dU}{da} \right) \quad (3.8)$$

sendo b a espessura da amostra [m]; a a profundidade da trinca inicial [m]; U a energia de deformação na ruptura [kJ], calculada como a área abaixo da curva carga \times deslocamento, na porção de carregamento; e dU/da a variação de energia de deformação com a profundidade da fenda inicial [kJ/m].

A evolução do trincamento e os parâmetros obtidos do ensaio foram utilizados para subsidiar modelos de abertura de trincamento no programa ABAQUS, a partir do Método dos Elementos Finitos Estendido (XFEM). Posteriormente, o ensaio SCB foi reproduzido numericamente e comparado com os resultados experimentais, a fim de se validar um modelo com o qual possa ser possível estabelecer estudos paramétricos.

3.2 ABORDAGEM NUMÉRICA

Consecutivamente à caracterização experimental, o trabalho passou à abordagem numérica. A pesquisa buscou simular numericamente, utilizando o programa ABAQUS, o ensaio de flexão em amostra semicircular (SCBT). Inicialmente, foi realizada a definição do modelo geométrico do problema, com geração de agregados virtuais e respectivo empacotamento randômico, de modo a formar um conjunto de agregados considerando forma e granulometria reais. Na Figura 3.17, é mostrado um pacote de agregados em um domínio já cortado na forma real do ensaio. Esses são, então, envoltos na Matriz de Agregados Finos, assimilada como um material homogêneo contínuo, preenchendo os espaços entre as partículas, conforme Figura 3.18.

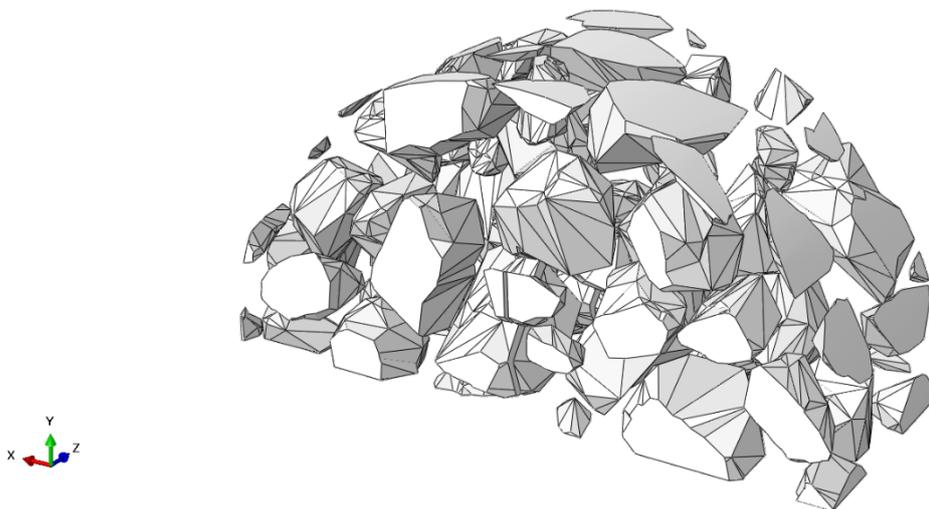


Figura 3.17. Agregados cortados no domínio do CP do ensaio SCB.

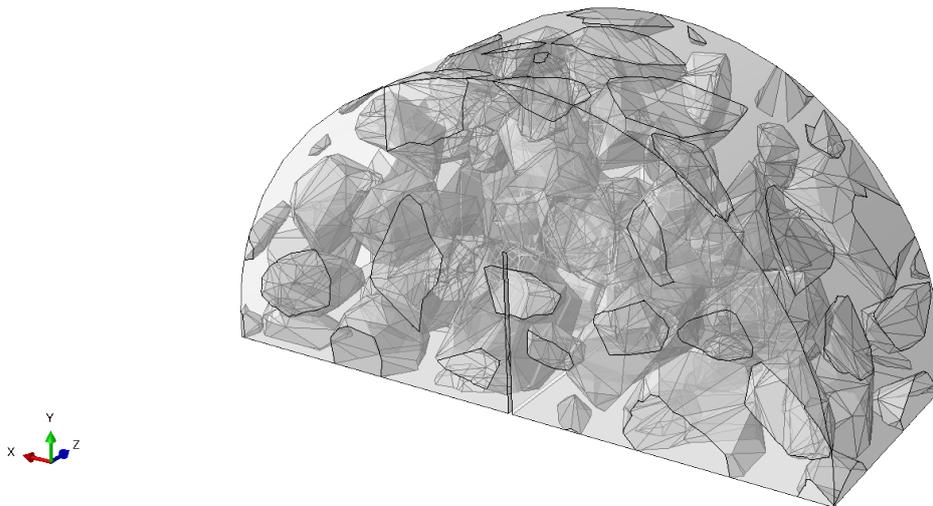


Figura 3.18. Corpo de prova com ESG (Esqueleto Sólido Graúdo) e MAF (Matriz de Agregados Finos).

Posteriormente, passou-se à caracterização dos modelos constitutivos dos materiais envolvidos. Ainda, foi utilizado o XFEM para modelagem de dano e evolução de trincas na MAF. Dessa forma, foi possível simular o ensaio, observando a progressão da trinca ao longo do corpo de prova.

A partir do modelo geométrico e constitutivo constituído no programa ABAQUS, foram realizadas 30 simulações do ensaio de flexão em amostra semicircular (SCB) para cada configuração comprimento de pré-trinca ensaiada (três, ao todo, conforme indicado no item 3.1.2.4.2 deste capítulo). Os resultados permitiram a visualização da formação da trinca, e a obtenção dos resultados numéricos de curvas Carga \times Deslocamento e de Energia de deformação \times Abertura da pré-trinca. Dessa forma, foi possível a realização de um estudo estatístico dos resultados, para comparação com os experimentais. Uma vez calibrado o modelo, para representação fidedigna do ensaio real, este pôde ser validado.

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO PROBLEMA

A caracterização dos agregados graúdos passou, inicialmente, pelo escaneamento tridimensional dos agregados. Para cada peneira entre 4,8 e 19,1 mm, foram escaneadas 30 partículas, que compuseram um repositório. Técnicas de escaneamento por meio do AIMS2 (bidimensional) e de Scanner 3D foram empregadas para representar as partículas, incluindo forma e angularidade. As propriedades de granulometria e forma das partículas são representadas, e a partir de uma distribuição estatística foi possível gerar partículas virtuais representativas do conjunto de agregados estudado.

Uma vez medidas as propriedades dos agregados reais, de forma estatisticamente representativa, foram aplicados métodos estocásticos apresentados por Mollon & Zhao (2014) e Recarey Morfa *et al.* (2019) para gerar partículas virtuais com formas complexas, mas descritíveis. Nesses métodos, a teoria de campos aleatórios para topologia esférica é combinada a descritores de Fourier para a geração de partículas. Para a representação microestrutural dos agregados, de forma a possibilitar a modelagem de partículas côncavas, foi utilizado um procedimento matemático apresentado em Zhou *et al.* (2015). O método representa a distância entre o centro da partícula e um ponto qualquer na superfície como sendo $r(\theta, \varphi)$, associada às coordenadas esféricas (θ, φ) , sendo $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. A partir disso, todos os pontos na superfície de coordenadas esféricas são transformados em coordenadas Cartesianas, a partir das expressões:

$$x_{ij} = R_{ij} \sin \theta_i \cos \varphi_j \quad (3.9)$$

$$y_{ij} = R_{ij} \sin \theta_i \sin \varphi_j \quad (3.10)$$

$$z_{ij} = R_{ij} \sin \theta_i \quad (3.11)$$

Salienta-se que a malha de superfície das partículas foi suavizada, de modo a reduzir o custo computacional para a modelagem. Isso resulta em menor detalhamento da superfície, que passa a representar textura mais grosseiramente.

Uma vez gerado um repositório de partículas que respeitasse as propriedades morfológicas dos agregados avaliados, foi possível passar à representação do pacote de partículas. O empacotamento dos agregados necessita preservar a granulometria da curva granulométrica adotada, qual seja a Faixa C do DNIT, além da ocupação do espaço cilíndrico, medida a partir do VAM da mistura.

Foram empregadas técnicas de empacotamento randômico de partículas que consideram a granulometria da mistura, e a ocupação de agregados dentro da mistura. A metodologia de empacotamento é apresentada em Recarey *et al.* (2019), Valera *et al.* (2022) e Valera *et al.* (2023). As partículas compõem um pacote compatível com as propriedades de ocupação de agregados graúdos no CP real. Em geral, a metodologia de empacotamento pode ser resumida na Figura 3.19.

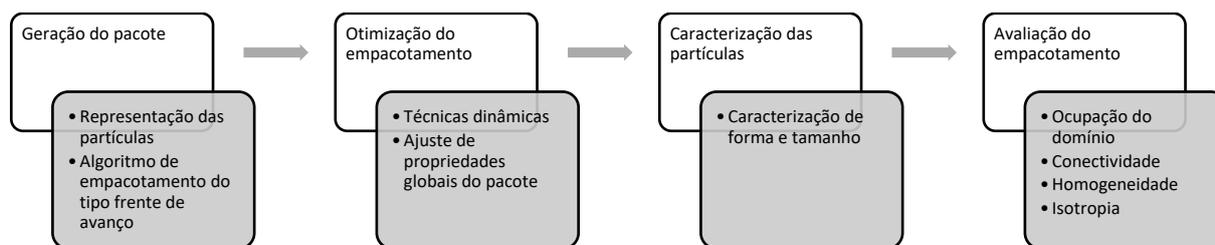


Figura 3.19. Metodologia geral de modelagem de microestrutura de materiais (modificado - Recarey *et al.*, 2019)

Para a geração do pacote, foi empregado um algoritmo de frente de avanço, o qual realiza a sequência abaixo, selecionando partículas do repositório gerado:

1. Inicializa o empacotamento (normalmente com duas ou três partículas);
2. Gera ou seleciona uma partícula a ser empacotada (a partir de metodologias já apresentadas);
3. Seleciona uma frente ativa e determina a posição na qual a partícula apenas toca as partículas nesta frente;
4. Checa se a partícula na posição determinada sobrepõe alguma outra já gerada;
5. Se não ocorrer nenhuma sobreposição, a nova partícula é aceita e o algoritmo retorna ao passo 2 para o posicionamento da próxima partícula. Caso contrário, segue-se ao passo 6;
6. Rejeita a posição e repete-se o passo 3 para outra frente ativa.

O algoritmo avalia constantemente a ocupação volumétrica do domínio pré-estabelecido, de forma a estabelecer um critério de parada para a geração e posicionamento de partículas a partir do VAM-G do CP. Para este estudo, foi encontrada, na dosagem *Superpave* do CBUQ, um VAM de 13,6%, ou seja, 86,4% do corpo de prova é constituído de agregados minerais. Considerando que, nesta pesquisa, a representação da fase agregados restringe-se aos agregados graúdos retidos na peneira #4, tem-se pela granulometria da Faixa C que eles representam 42% dos agregados. Dessa forma, a porcentagem de agregados graúdos, em relação ao volume do CP, seria de 42% de 86,4%, ou 36,3%. O algoritmo permite desde a geração de pacotes de partículas com geometrias básicas, como sólidos platônicos, a complexas, considerando a forma real das partículas, como no caso do estudo em questão. A superfície das partículas é discretizada por uma malha triangular e, portanto, formas mais complexas demandam maior refinamento da malha e, portanto, maior custo computacional. Na Figura 3.20, exemplificam-se geometrias já geradas pelo algoritmo considerando diferentes formas de

agregados.

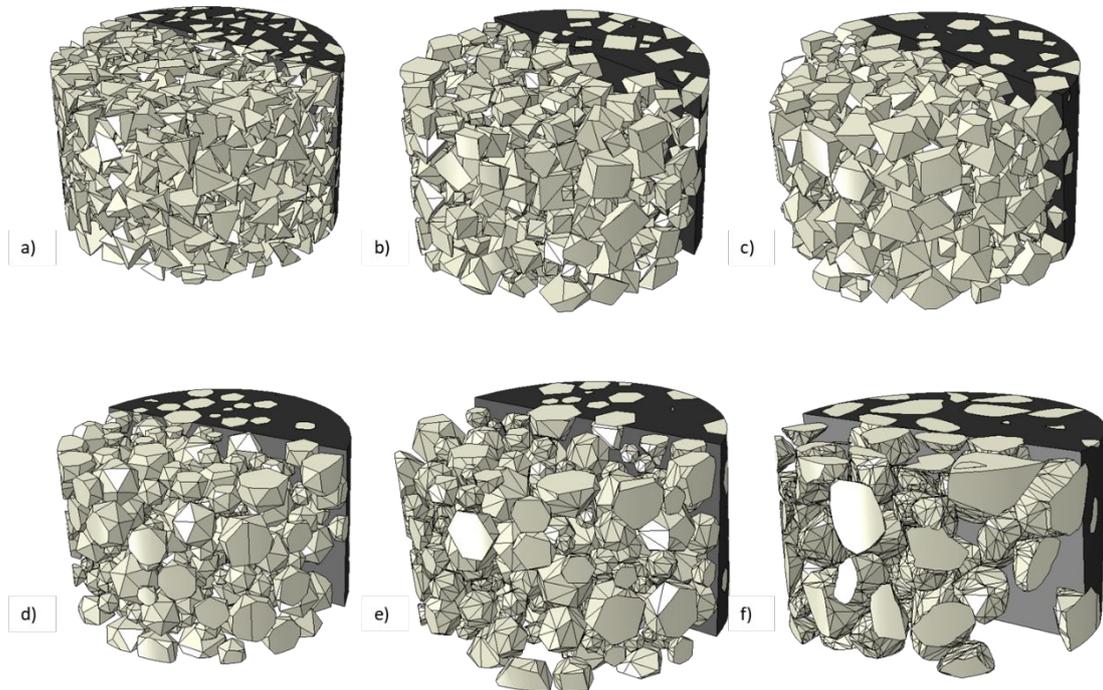


Figura 3.20. Corpos de prova gerados com agregados de diferentes formas, quais sejam: a) tetraedros; b) cubos; c) octaedros; d) dodecaedros; e) icosaedros; e f) forma real.

Salienta-se que, para o estudo em questão, foi gerado um domínio cúbico de 1 m^3 preenchido com agregados seguindo a Faixa C e o VAM da mistura de CBUQ estudada experimentalmente. Deste domínio, foram “cortados” domínios cilíndricos para posterior conformação, de acordo com a geometria dos corpos de prova de cada ensaio, conforme Figura 3.21. Tal procedimento coaduna com a prática experimental, que passa pela fase de cortes no corpo de prova até a forma final a ser ensaiada. Além disso, a geração desse domínio de grandes dimensões (para o tamanho das partículas em questão), permite o corte de CPs em posições randômicas. Para o “corte” virtual dos agregados, foi gerado um molde contínuo no programa ABAQUS, que intercepta as partículas, restando aquelas no interior do molde, conforme Figura 3.22.

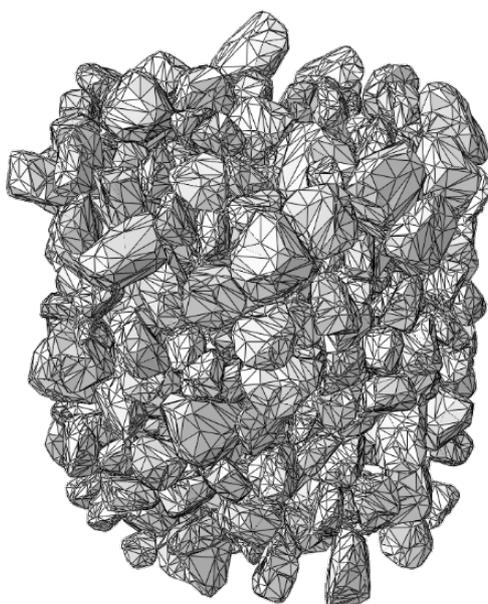


Figura 3.21. Domínio cilíndrico de empacotamento de agregados com forma e granulometria reais.

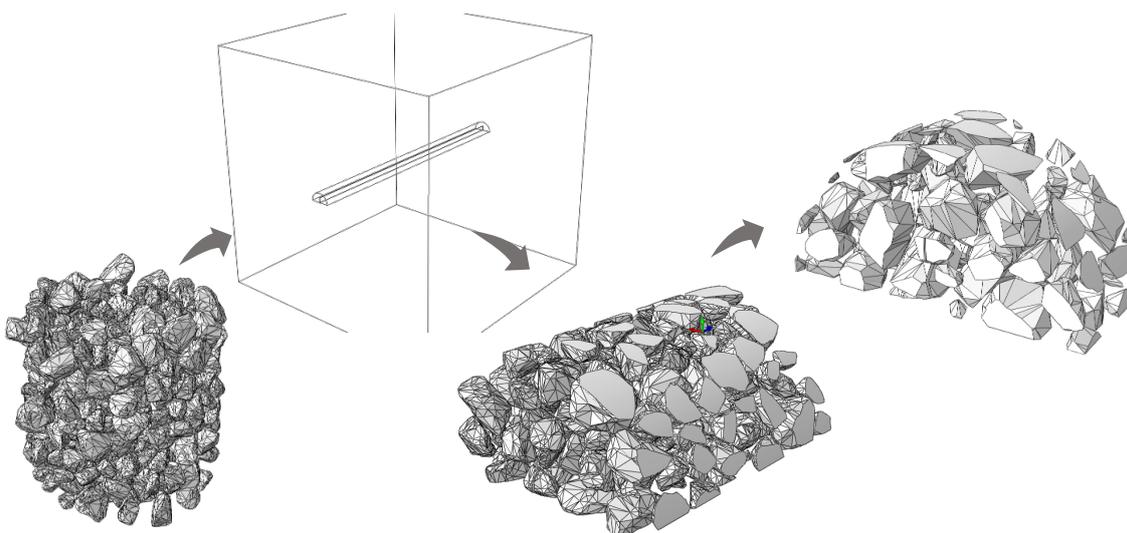


Figura 3.22. Corte de agregados para geração de corpos de prova na geometria do ensaio simulado.

3.2.1 MODELAGEM CONSTITUTIVA DOS MATERIAIS

Os agregados foram simulados como materiais elástico-lineares, com módulo de rigidez $E = 60$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$, valores sugeridos, dentro de uma faixa aceitável, por Farmer (1983). Considera-se que, apesar de possível a determinação do módulo utilizando o ensaio de indentação, a magnitude desse, muito maior que a da MAF, permite inferir a baixa relevância da determinação da propriedade no comportamento da mistura como um todo.

Valores coerentes dentro da ordem de grandeza apresentada em literatura mostram-se suficientes para determinar e representar o comportamento da mistura como um todo.

Os apoios rígidos, bem como o semicilindro para aplicação da carga, foram modelados com propriedades representativas do aço. O comportamento do material foi definido como elástico, em função dos níveis de tensão a que são submetidos, com Módulo de Young igual a 210 GPa e Coeficiente de Poisson igual a 0,4, valores coerentes com a literatura difundida. Reitera-se que, também em função da ordem de grandeza muito superior à da MAF, o material se comporta como corpo rígido.

Como já abordado, a MAF foi caracterizada como um modelo viscoelástico linear, representado por uma Série de Prony ajustada à curva de Relaxação. O ensaio de Módulo Dinâmico realizado na MAF subsidiou a obtenção dos dados de entrada do modelo constitutivo do material. As equações 3.5 e 3.6 apresentam os coeficientes de módulo de relaxação cisalhante (G_t), normalizados pelo módulo de relaxação cisalhante instantâneo (G_0), e de módulo volumétrico elástico (K_t), normalizados pelo módulo volumétrico elástico instantâneo (K_0). Esses parâmetros, para valores de tempo reduzido (em escala logarítmica), definem o comportamento viscoelástico do material a partir da Série de Prony ajustada. Considera-se que, para um tempo infinito (t_∞), tem-se, da curva de Relaxação, o valor do Módulo referente à parcela elástica da mistura (E_∞), valor também necessário à caracterização do material no programa ABAQUS. Na Tabela 3.4, apresenta-se a Série de Prony ajustada pelo *software* à curva de Relaxação obtida experimentalmente.

Ademais, foi adicionado um comportamento de tração-separação linear elástico e de evolução do dano, implementado em XFEM no ABAQUS. A modelagem do dano permite a simulação da degradação do material e eventual ruptura do elemento enriquecido. Esse comportamento foi representado por parâmetros obtidos do ensaio de Flexão em amostra semicircular realizados em corpos de prova de MAF. Para definição do início do trincamento, foi utilizada a Tensão principal máxima no início do dano. A evolução do dano foi caracterizada pela energia necessária à ruptura (energia de fratura) a partir do início do dano. Esse parâmetro independe da abertura da pré-trinca e, portanto, adequa-se aos três tipos de ensaios simulados. A suavização da curva foi definida como linear. Exemplifica-se, na Figura 3.23, o conjunto do ensaio a partir da diferenciação dos materiais simulados.

Tabela 3.4. Série de Prony ajustada à Curva de Relaxação da MAF.

i	<i>K_i</i>	<i>τ_i</i>
1	0,12201	0,0000284917
2	0,22976	0,00101320
3	0,30601	0,0208064
4	0,24330	0,40387
5	0,09490	17,689

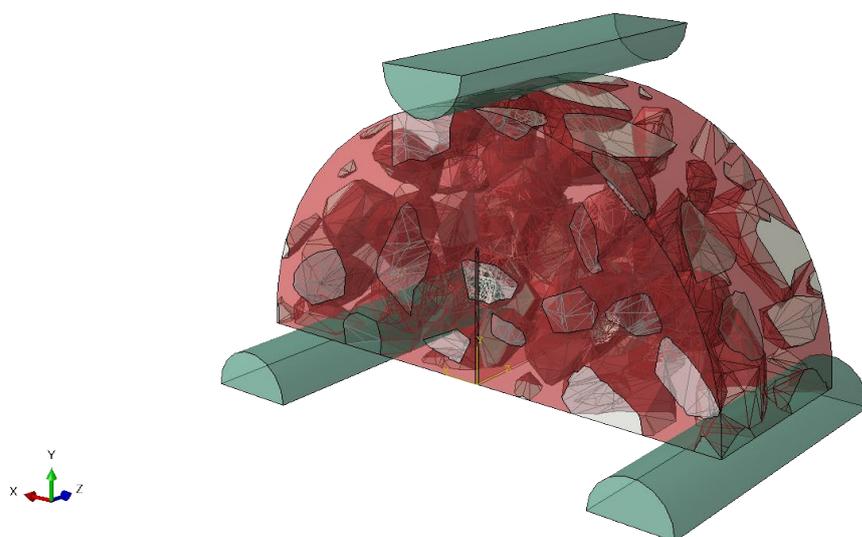


Figura 3.23. Materiais empregados nas simulações do ensaio SCB: aço, em verde; MAF, em vermelho; e Agregados Graúdos, em bege.

3.2.2 SIMULAÇÕES DE ENSAIOS DE FLEXÃO EM AMOSTRA SEMICIRCULAR (SCB)

O ensaio SCB é simulado conforme a abordagem experimental adotada. Uma vez configurado geometricamente o corpo de prova com agregados graúdos envoltos por MAF dentro de um domínio de um disco, em metade, o CP é posicionado sobre dois semicilindros modelados como apoios e abaixo de um semicilindro de aplicação de carga.

3.2.2.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Ao aparato modelado, foi imposto um deslocamento vertical do tipo tabular, de cima para baixo, no semicilindro do topo, de 0,5 mm/minuto, conforme normatização do ensaio. Ao aplicador de carga, foi imposto um travamento de deslocamentos nas direções horizontais. As

bases semicilíndricas foram apoiadas, com impedimento de deslocamento nas três direções na superfície retangular inferior. O corpo de prova pôde deslocar-se vertical e horizontalmente, no sentido radial. Na Figura 3.24, apresenta-se o aparato do ensaio e as condições de contorno utilizadas.

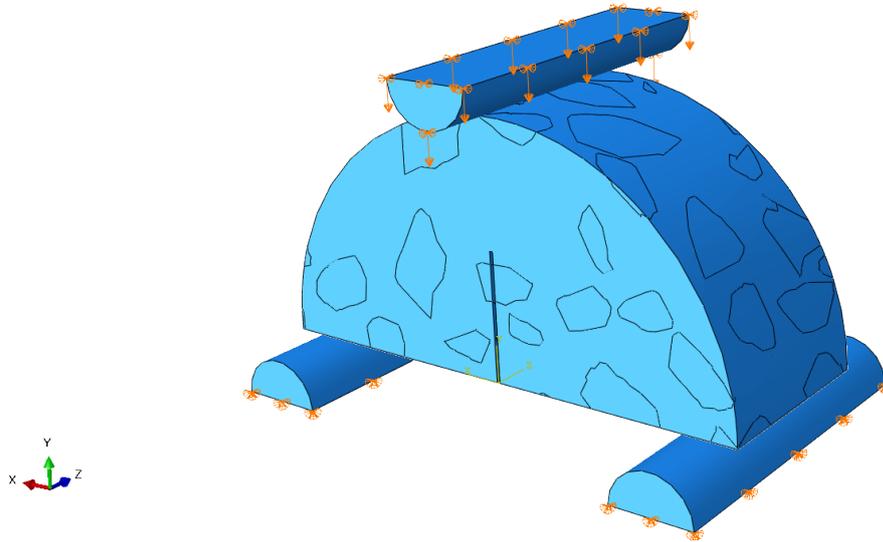


Figura 3.24. Aparato do ensaio simulado e condições de contorno.

Os contatos entre os cilindros de apoio e com o corpo de prova se dão por meio de “*Hard contact*”, no sentido normal. O comportamento tangencial foi formulado como friccional do tipo “*Penalty*”, de forma a permitir certo movimento relativo das superfícies (um escorregamento elástico). O programa ABAQUS ajusta o valor do coeficiente de atrito continuamente a fim de permitir esse pequeno deslocamento dentro de uma faixa elástica. Para o contato do CP com o semicilindro de aplicação de carga, foi imposto um comportamento normal do tipo “*Hard contact*” e “*Rough*”, no sentido tangencial, que representa um coeficiente de atrito “infinito”, de forma a não permitir deslizamentos. É importante salientar que foram realizadas simulações de teste com outros comportamentos de interação entre as partes, que resultaram em erros de convergência.

No domínio da MAF, foi inserido o recurso de formação de trinca do tipo XFEM (*eXtended Finite Element Method*). É possível, no ABAQUS, indicar a região de início da trinca, a partir de uma partição de elementos. Entretanto, uma vez que essa indução do trincamento já é realizada pelo próprio corte da pré-trinca, esse recurso não foi utilizado. Ademais, a inclusão de uma nova superfície que corta transversalmente o CP induziria a mais

complexidade geométrica na região e, conseqüentemente, uma maior necessidade de refinamento da malha, o que aumentaria ainda mais o custo computacional.

O passo de carregamento foi configurado como “viscoso”. Trata-se de um passo de análise quasi-estática de tensão/deformação para materiais com resposta estática transiente dependente do tempo. Esse tipo de análise é válida quando efeitos inerciais podem ser negligenciados, e podem ser do tipo linear ou não-linear (ABAQUS, 2021).

3.2.2.2 ESTUDO DA MALHA DO MODELO

O modelo em questão, por representar o comportamento de materiais em micro e mesoescala, trata-se de um problema geometricamente complexo. A imposição de agregados de diferentes tamanhos e formas aproximadas às reais resulta em um número muito alto de superfícies. O nível de detalhamento da malha necessário à representação da forma real das partículas e da complexidade da geometria impõe dificuldades à simulação.

A geração dos agregados virtuais em sua forma real, apesar da suavização do nível de detalhamento necessária em função da capacidade computacional, resulta, por si só, em uma malha de superfície, conforme Figura 3.21. Essa malha, quando importada no ABAQUS e inserida no domínio da MAF, deve ser refeita, a partir dos elementos finitos. Quanto menores os agregados a serem representados, menores serão os elementos necessários para gerar uma malha satisfatória no modelo.

Foram gerados, para o modelo, nós gerais, distantes 10 mm entre si. Entretanto, para regiões com maior complexidade devido à densidade e tamanho das superfícies dos agregados, foram especificados nós locais. Além disso, é preciso um enriquecimento da malha na região inicial do trincamento, qual seja o topo da fenda previamente aberta. O único elemento possível de ser utilizado, no ABAQUS, para a geometria complexa apresentada, é o tetraedro C3D10, um tetraedro quadrático de 10 nós, exemplificado pela Figura 3.25.

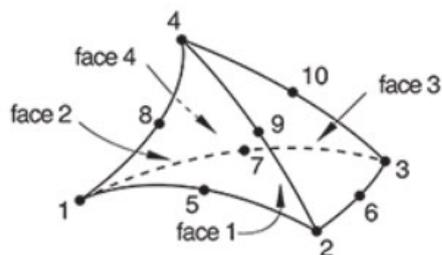


Figura 3.25. Elemento C3D10: tetraedro de 10 nós.

Na Figura 3.26, ilustra-se um corpo de provas ensaiado com sua malha, cuja distância entre nós gerais é de 10 mm e entre os nós locais, de 1 mm. Foi aplicado um controle de curvatura com fator de desvio máximo de 0,4. Tais parâmetros foram balizados conforme os testes foram realizados, de forma a viabilizar a convergência das simulações. Para o estudo de refinamento da malha, foram conduzidos testes de geração de malha com distâncias maiores que as apresentadas, que falharam. Ou seja, o programa ABAQUS não obtém sucesso na geração de malhas menos refinadas que consigam representar a geometria complexa. Posteriormente, foram conduzidos ensaios com malhas mais refinadas. Foi possível observar que malhas mais refinadas não resultaram em alterações significativas dos resultados de deslocamento máximo do topo do corpo de prova, conforme a Tabela 3.5. As simulações foram realizadas em *hardware* composto por Processador Intel® Xeon® W-2275 3,30 GHz, de 14 núcleos e 28 processadores lógicos; 256 GB de Memória RAM; e aceleração de GPU NVIDIA Quadro RTX 6000. Foi alocado, desse *hardware*, um máximo de 90% da memória física.

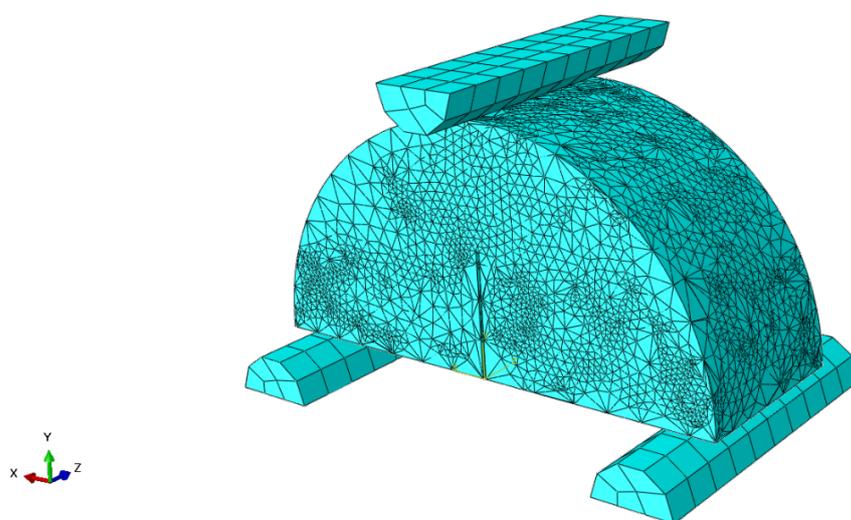


Figura 3.26. Exemplo de malha gerada para o corpo de prova gerado para o ensaio SCB.

Tabela 3.5. Análise de refinamento de malha.

Distância entre nós globais [mm]	Distância entre nós locais [mm]	Deslocamento máximo [mm]	Tempo computacional para simulação [s]
10	1	2,7986	12998,8
5	0,5	2,7689	21564,2
2,5	0,25	2,7699	53545,7

Para os ensaios simulados, a partir da malha definida de 10 mm de distância entre nós globais e 5 mm de distância entre nós locais, foram geradas malhas com aproximadamente 65.000 elementos e 100.000 nós. Esses valores variam conforme o corpo de prova ensaiado, visto que as posições, número e tamanho dos agregados graúdos são randômicos.

3.2.2.3 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO

A fim de validar o modelo numérico desenvolvido, foram realizadas trinta simulações de CPs com cada um dos três comprimentos de trinca normalizados (25 mm, 32 mm e 38 mm), mantendo-se a curva granulométrica pré-determinada (Faixa C do DNIT); forma, representados pela geração de agregados virtuais a partir da representação estocástica dos parâmetros de forma obtidos experimentalmente; volume de ocupação de agregados no corpo de prova; além dos modelos constitutivos. Porém, foram variadas as posições das partículas no interior do corpo de prova de forma randômica. Salienta-se que o algoritmo de empacotamento seleciona e/ou gera agregados virtuais também de forma randômica, ou seja, os agregados presentes em um CP muito provavelmente são diferentes daqueles presentes nos outros CPs. Entretanto, estatisticamente, tem-se uma representatividade dos corpos de prova reais ensaiados experimentalmente nessa pesquisa. Pretendeu-se, com essa repetibilidade, obter uma representatividade estatística aceitável.

Foram registrados os deslocamentos verticais no centro do semicilindro de aplicação de carga, além da carga aplicada para imposição do deslocamento de 0,5 mm/min, ao longo da simulação do ensaio. Considerou-se que não houve deformação do semicilindro, uma vez que se trata de elemento rígido, que se desloca como um todo. Isso foi possível de ser observado nas deformadas obtidas nos ensaios. Reitera-se que o deslocamento desse elemento foi permitido apenas no sentido vertical. A partir da medição dos deslocamentos verticais e da carga aplicada, foi possível obter, como saída das simulações, as curvas Carga [kN] x

Deslocamento [m], que servem de *input* para a determinação da energia necessária à ruptura por trincamento.

De posse das trinta curvas Carga [kN] x Deslocamento [m] de corpos de prova com 25 mm, 32 mm e 38 mm de comprimento de abertura de pré-trinca, foram modeladas as curvas médias. Essas curvas médias podem, então, ser comparadas às experimentais obtidas em ensaios de CBUQ, para validação do modelo numérico. Dessa forma, foi possível avaliar a viabilidade de se modelar o comportamento ao trincamento de misturas asfálticas completas, do tipo CBUQ, a partir das propriedades geométricas e constitutivas dos seus materiais componentes, quais sejam os agregados graúdos e a Matriz de Agregados Finos (MAF).

É importante salientar que, uma vez que o comportamento da MAF referente à evolução do dano e trincamento foi representado a partir da energia de ruptura ao trincamento, as simulações tornam-se fidedignas até o momento da ruptura do corpo de prova. Isso se deve ao fato de que a energia U é calculada como o módulo do trabalho de uma força variável, necessária ao deslocamento, até a carga de ruptura. Embora seja possível identificar, nas simulações, a carga de ruptura, uma vez que ela decresce a partir de determinado deslocamento, a propagação da trinca não foi claramente observada em todos os corpos de prova, visto que o *software* tende a abortar a simulação após a ruptura. Em corpos de prova simplificados, com menor nível de detalhamento dos agregados, a geração e propagação da trinca é mais facilmente obtida, sem a geração de erros do programa, conforme Figura 3.27, que exemplifica a trinca transversal propagada em meio homogêneo de MAF.

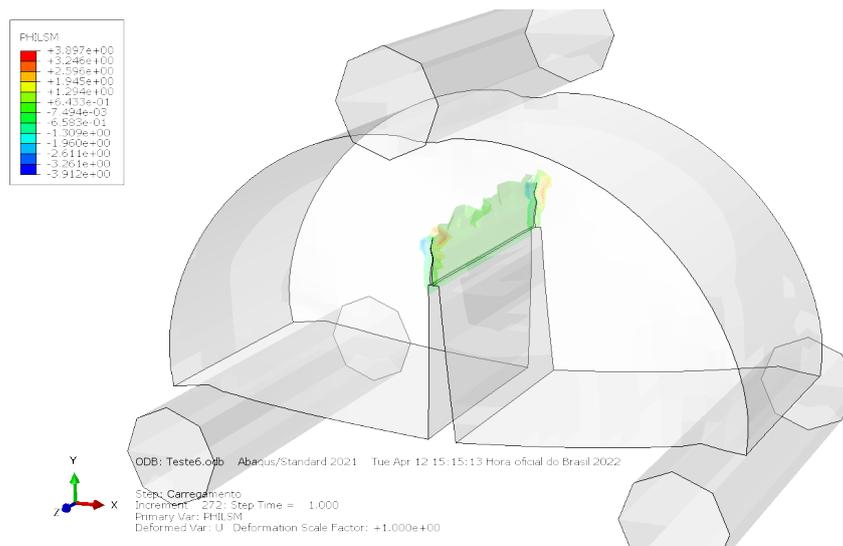


Figura 3.27. Exemplo de propagação de trinca em corpo de prova de MAF, após ruptura.

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento desta tese de doutorado. A abordagem experimental foi realizada, inicialmente, de forma concomitante ao desenvolvimento da tecnologia de modelagem e empacotamento de partículas virtuais. Anteriormente, foram desenvolvidas e aplicadas tecnologias que serviram de base para essa pesquisa, em Oliveira Junior (2018). O presente estudo evolui o conhecimento de modelagem de misturas asfálticas no *software* de Elementos Finitos ABAQUS, de forma a possibilitar a simulação de trincamento, consideravelmente mais complexa que a de deformações permanentes.

São apresentados os resultados experimentais de caracterização dos materiais relevantes, quais sejam os agregados minerais e o ligante asfáltico, e das misturas obtidas a partir desses materiais, Matriz de Agregados Finos (MAF) e Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Os resultados da campanha experimental servem de *input* para a modelagem numérica e permitem a validação dos resultados da campanha numérica.

4.1 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A campanha experimental da pesquisa envolveu, inicialmente, a caracterização dos materiais das misturas, quais sejam os agregados minerais e o ligante asfáltico. Posteriormente, realizou-se o estudo e definição da dosagem da mistura completa CBUQ. Uma vez definida, foi feita a dosagem da Matriz de Agregados Finos (MAF). De posse dos corpos de prova compactados da MAC e da MAF, passou-se à execução dos ensaios mecânicos: Módulo Dinâmico e Ensaio de Flexão em Amostra Semicircular. Os resultados dessas etapas são apresentados a seguir.

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais estudados podem ser divididos em duas fases principais, em função do objetivo numérico da pesquisa: agregados graúdos e ligante asfáltico, que compõem as misturas asfálticas estudadas.

4.1.1.1 AGREGADOS GRAÚDOS

Inicialmente, foram caracterizados os agregados utilizados nas misturas. Trata-se de um calcário dolomítico, cuja granulometria compõe a Faixa C do DNIT, como dito anteriormente. Os agregados são considerados elástico-lineares, com módulo de rigidez $E = 60$ GPa, e coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$, valores sugeridos por Farmer (1983).

Em relação à forma das partículas, são apresentadas, na Figura 4.1, as médias das dimensões características dos agregados analisados pelo método do paquímetro. Em média, os agregados utilizados podem ser considerados cúbicos, de acordo com a ABNT NBR 7809 (1983), o que é desejável para utilização em camadas de rolamento de pavimentos flexíveis. Na Tabela 4.1, apresentam-se os resultados das razões médias entre dimensões das partículas e sua classificação. Agregados cúbicos tendem a ser menos susceptíveis à quebra quando submetidos a esforços de rolamento, tanto de compressão, quanto de cisalhamento.

Tabela 4.1. Classificação da forma dos agregados segundo a ABNT NBR 7809 (1983)

Razão média	Resultado	Classificação
b/a	0,68	Cúbica
c/b	0,62	

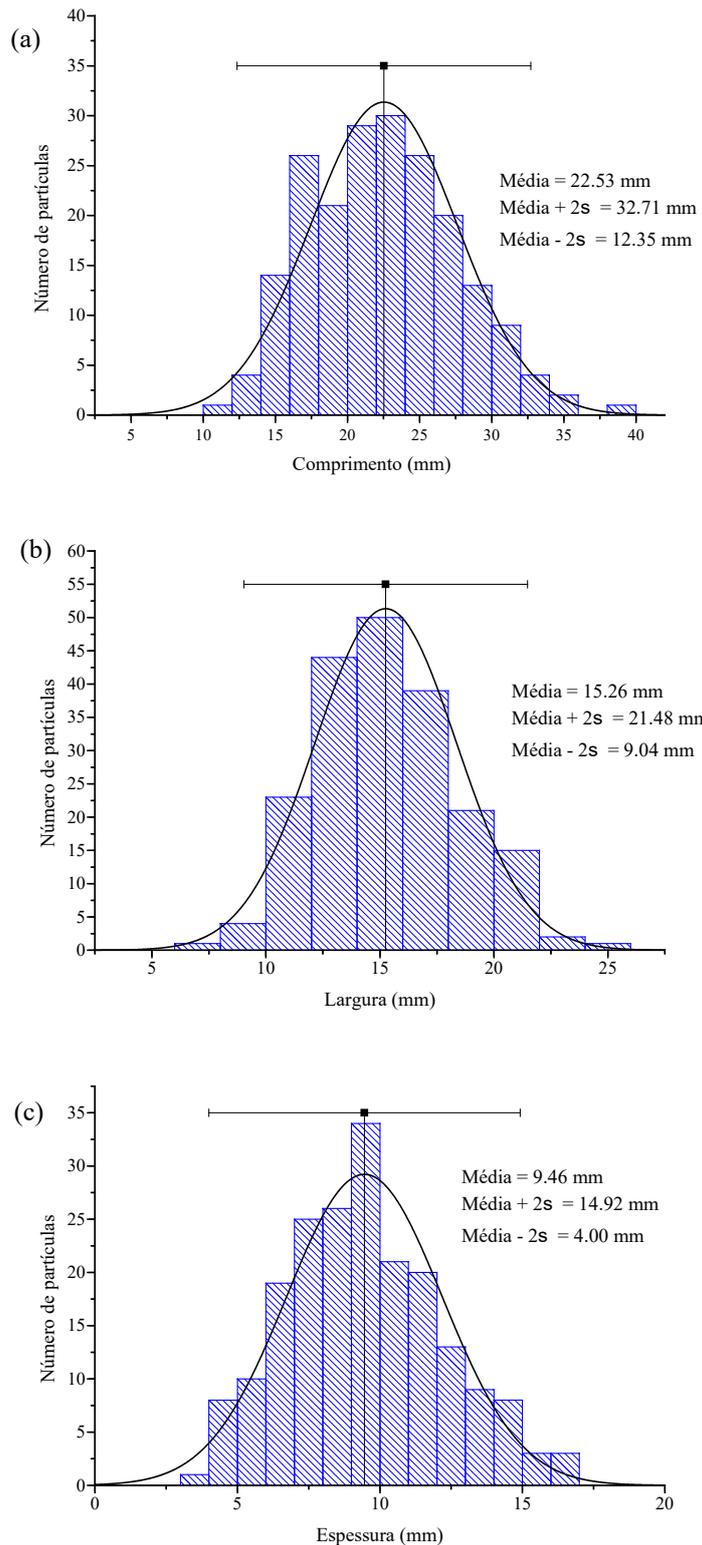


Figura 4.1 a) Distribuição de medidas de comprimento das partículas; b) distribuição das medidas de largura das partículas; e c) distribuição das medidas de espessura das partículas.

Além da análise realizada com o paquímetro, foi realizada a análise de conjunto de agregados com o AIMS2. Os resultados da análise são apresentados no Apêndice A, e na Tabela

4.2, resumem-se os principais índices de classificação do AIMS2 encontrados para as partículas.

Tabela 4.2. Índices de classificação de forma resultantes da análise no AIMS2.

	Média	Desvio Padrão	Classificação
Angularidade	2896,3	691,5	Moderada
Textura	299,4	98,4	Moderada
CAAT (Coarse Aggregate Angularity Texture)	4428,9	1013,7	Moderada
Esfericidade	0,699	0,100	Alta

Ademais, foram escaneadas 30 partículas de cada peneira, a partir da peneira de abertura #4 (4,8 mm), com um *scanner* 3D. Agregados retidos na peneira 4,8 mm, apesar de possíveis de serem escaneados, resultaram em muitos erros, em função do refinamento do Scanner e foram representados, portanto, a partir dos resultados obtidos pelo AIMS2. Na Figura 4.2, são apresentados exemplos de partículas escaneadas que constituem o repositório gerado. Com base nesses resultados, é possível avaliar aspectos de forma das partículas, e gerar pacotes randômicos de partículas, em um domínio pré-definido.

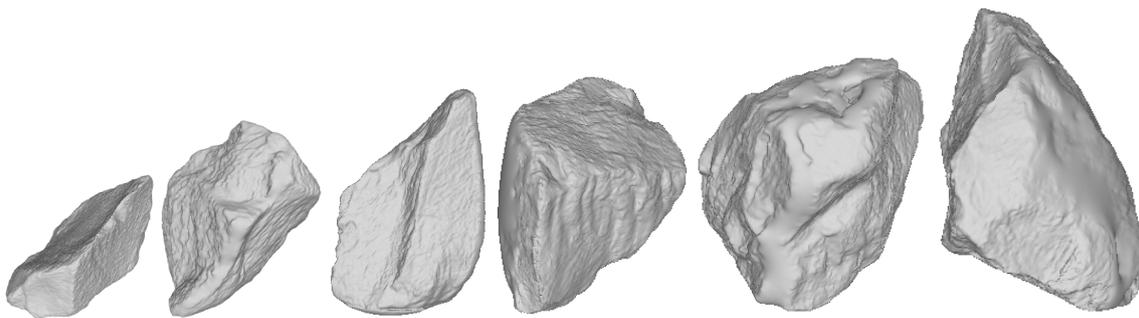
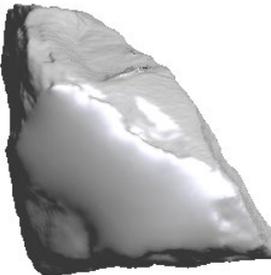
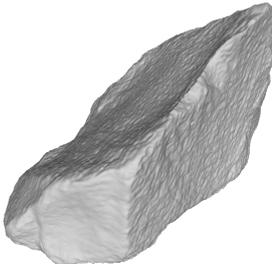
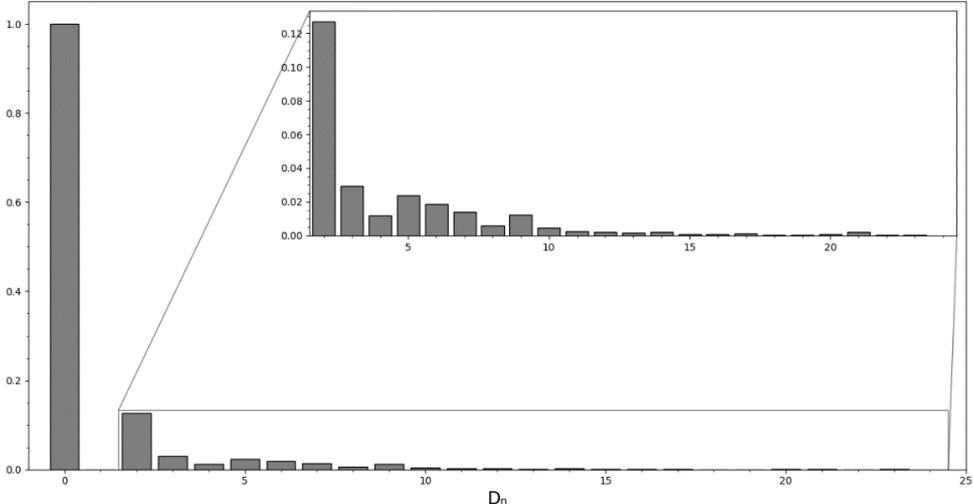


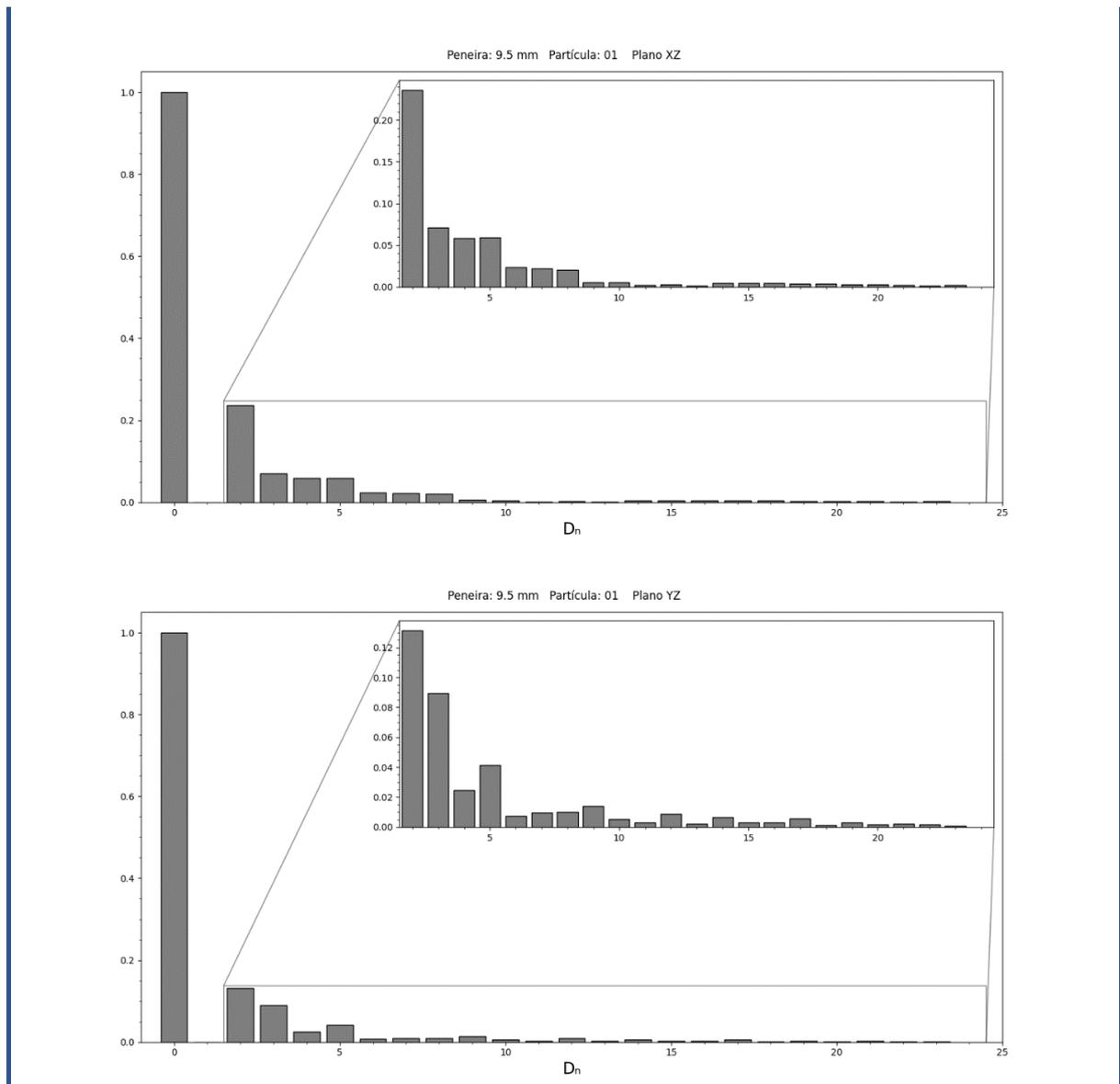
Figura 4.2. Exemplos de partículas escaneadas entre peneiras de aberturas 4,8 mm e 19,1 mm.

Para cada partícula escaneada, é calculada uma série de características e seus respectivos Descritores de Fourier. Como foram escaneadas e geradas 120 análises ao todo, exemplificam-se, na Tabela 4.3, os dados de saída resultantes do escaneamento de um agregado, retido na peneira de 9,5 mm de abertura. As partículas são usadas para compor um catálogo de agregados,

compondo diferentes peneiras, para posterior empacotamento randômico por algoritmos específicos.

Tabela 4.3. Exemplo de caracterização de partícula a partir do escaneamento 3D realizado.

Peneira: 9.5mm (3/8'')		Partícula: 01			
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D		
					
Características da partícula					
Area de superfície:	669.61	Volume:	1053.94	Centro de massa:	(2.78; 6.32; 4.71)
Tensor de inércia:	Eixos principais:		Momento de eixo:		
30601.62 2487.27 3015.54	-0.16 0.98 0.11		12925.375977		
2487.27 13484.5 -1401.23	-0.60 -0.18 0.78		27412.986328		
3015.54 -1401.2 29376.97	0.79 0.06 0.61		33124.738281		
Dimensão maior (dL):	19.95	Dimensão intermediária:	14.71	Dimensão menor (ds):	9.70
Achatamento:	0.660	Alongamento:	0.737	Relação F&E:	2.05 / 6
Diâmetro equivalente (dv):	12.626		Diâmetro equivalente (ds):		35.761
Diâmetro equivalente (dsv):	9.444	Esfericidade (Eef):	0.633	Convexidade (Cconv):	0.869
Descritores de Fourier:					
<p style="text-align: center;">Peneira: 9.5 mm Partícula: 01 Plano XY</p> 					



4.1.1.2 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante, qual seja um CAP 50/70, foi caracterizado segundo a campanha experimental apresentada no capítulo de Metodologia. Inicialmente foi feita uma caracterização convencional e a determinação do Grau PG do CAP 50/70. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Caracterização experimental do ligante CAP 50/70 utilizado.

Característica	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	50 a 70	50,5	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	mín. 46	49	°C
Viscosidade Brookfield 135°C	mín. 274	410	cP
Viscosidade Brookfield 150°C	mín. 112	165	cP
Viscosidade Brookfield 177°C	57 a 285	55	cP
Densidade 20°C	-	1,014	g/cm ³
RTFOT Variação em massa	-0,50 a 0,50	-0,15	%
RTFOT Penetração Retida	mín. 55	61	%
RTFOT P. de Amolecimento	máx. 8	9	°C

Posteriormente, passou-se à caracterização reológica e à realização de ensaios de desempenho no ligante utilizado em ensaios de fadiga e deformação permanente. Os ensaios foram realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico.

4.1.1.2.1 Diagrama de Espaço *Black*

Os dados reológicos do ligante CAP 50/70 para as condições virgem e envelhecida são apresentados em diagrama de espaço *black*, na Figura 4.3. Os resultados corroboram a propriedade dos materiais serem termoreologicamente simples, uma vez que se pode representar numa curva contínua o comportamento do material.

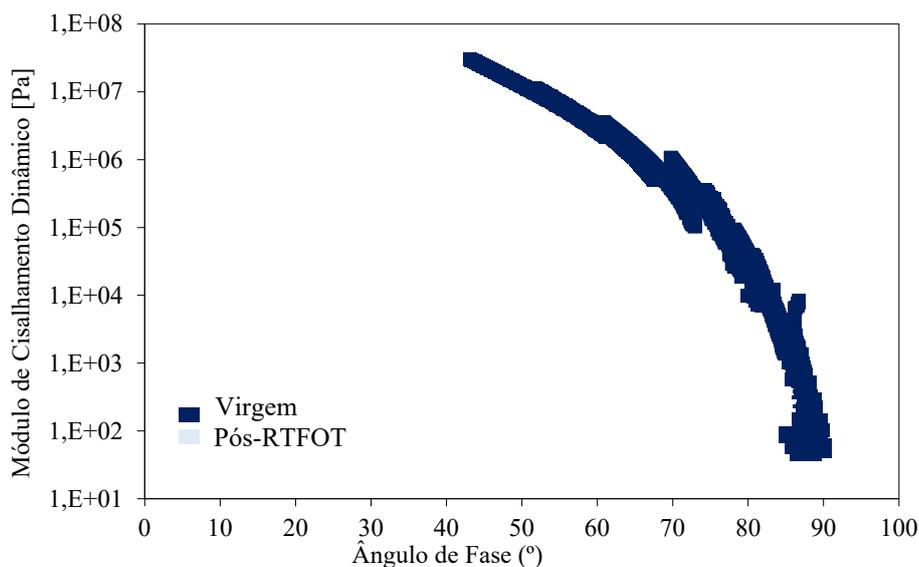


Figura 4.3. Diagrama de *Black Space* do ligante CAP 50-70 nas condições Virgem e Pós-RTFOT.

4.1.1.2.2 Curva mestra

Pellinen (2001), em sua tese, apresenta uma metodologia para construção da curva mestra de ligante asfáltico, a partir da minimização da soma do erro quadrático entre o $|G^*|$ medido durante o ensaio e o valor de $|G^*|$ modelado. O procedimento consiste no ajuste de cinco coeficientes para obtenção do menor erro de modelagem a partir de técnicas de regressão de mínimos quadrados não-lineares. Para tanto, foi utilizada a função *Solver* do Microsoft Excel. A Figura 4.4 apresenta as curvas mestras do ligante CAP 50-70 ensaiado tanto na condição virgem, quanto na condição envelhecida pós-RTFOT.

As curvas mestras foram construídas a partir do princípio de sobreposição tempo-temperatura (t-T). Nesse caso, baixas frequências representam altas temperaturas e baixas velocidades de carregamento, enquanto as altas frequências simulam baixas temperaturas e velocidades altas de solicitação. Para o ligante ensaiado em baixas frequências, o efeito no seu comportamento é mais influenciado pelo envelhecimento do que sob altas frequências, quando o comportamento do ligante fica bastante similar nas duas condições.

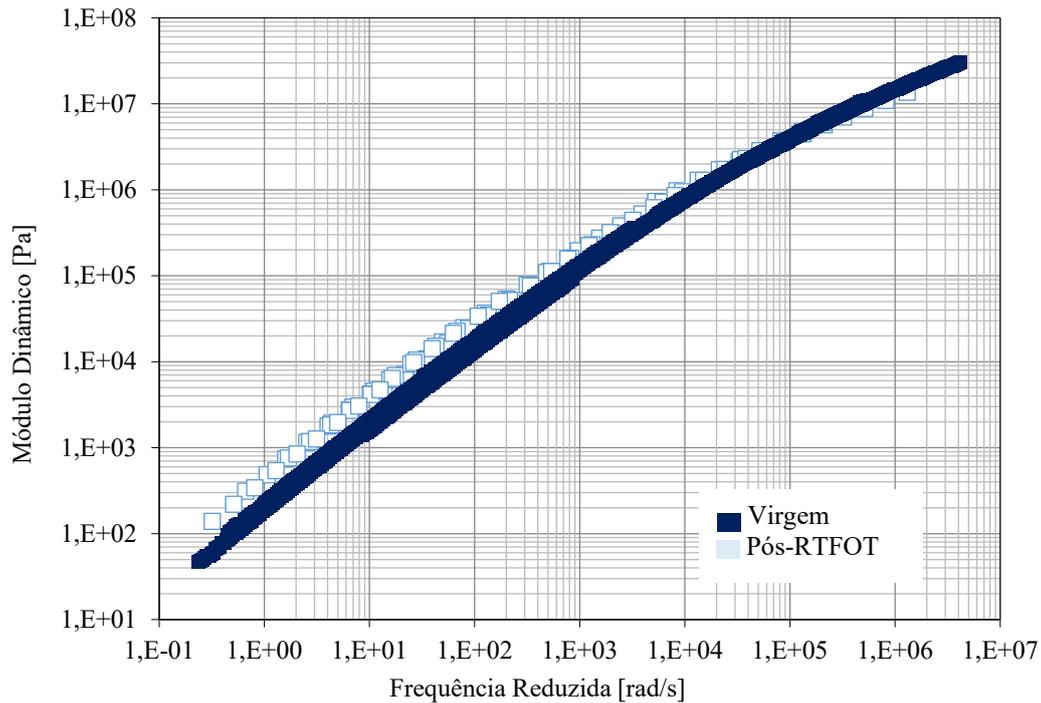


Figura 4.4. Curvas mestras do ligante CAP 50-70 nas condições Virgem e Pós-RTFOT.

Observa-se que o ligante envelhecido pós-RTFOT tem maior módulo de cisalhamento dinâmico, principalmente sob frequências mais baixas, quais sejam a representação de altas temperaturas. Isso é esperado, uma vez que o envelhecimento do ligante o torna mais viscoso, e por conseguinte, mais rígido. Entretanto, para maiores frequências de solitação, os comportamentos do material, envelhecido e virgem, são bastante semelhantes, com as curvas sobrepostas.

Com base nesses resultados, passou-se à dosagem experimental das misturas, a partir da metodologia *Superpave Mix Design*. O método busca uma dosagem de mistura asfáltica quente densa, para melhor desempenho em campo.

4.1.2 DOSAGEM SUPERPAVE

A dosagem do CBUQ adotado para essa pesquisa, a partir da Faixa C do DNIT, foi obtida após diversas tentativas, com vista a gerar uma mistura com volume de vazios igual a 4,0%. Foram compactados dois CPs para cada teor de ligante, quais sejam 4%, 4,5% e 5,0%, partindo da experiência empírica do laboratório.

A dosagem partiu das propriedades de massas específicas dos agregados encontradas por Nunes (2017), em sua dissertação executada com os materiais tradicionalmente utilizados no INFRALAB/UnB. Na Tabela 4.5, estão resumidas as massas específicas aparente (G_{sb}), real (G_{sa}) e o fator de absorção encontrados para os agregados graúdos, miúdos, e para a mistura em sua proporção determinada pela Faixa C do DNIT.

Tabela 4.5. Propriedades de massa específica dos agregados da mistura.

Gsb	Graúdos	2,71	g/cm^3
	Miúdos	2,83	g/cm^3
	Total	2,78	g/cm^3
Gsa	Graúdos	2,76	g/cm^3
	Miúdos	2,78	g/cm^3
	Total	2,77	g/cm^3
Fa	Graúdos	0,65	%
	Miúdos	0,94	%
	Total	0,79	%

Após várias tentativas para estabelecimento de procedimento de dosagem e mistura, foi adotada uma massa total inicial de 7000 g, com a parcela correspondente aos agregados aquela resultante da massa total menos a massa de ligante ensaiada para cada teor estudado. Exemplifica-se, na Figura 4.5, a composição granulométrica dos agregados utilizados para a confecção de um corpo de prova com teor de ligante de 4,0%. Durante o processo de mistura, perde-se muito material no misturador mecânico e NA transferência entre recipientes. Convencionou-se, após observação empírica, uma massa inicial de compactação de 4700 g.



Figura 4.5. Composição granulométrica de mistura para confecção de CP com 4,0% de teor de ligante.

São apresentados, na Figura 4.6, os resultados de (a) Volume de vazios; (b) Massa específica; (c) Vazios do Agregado Mineral; (d) Vazios com Betume; e (e) Massa específica teórica máxima, para os teores de ligante ensaiados.

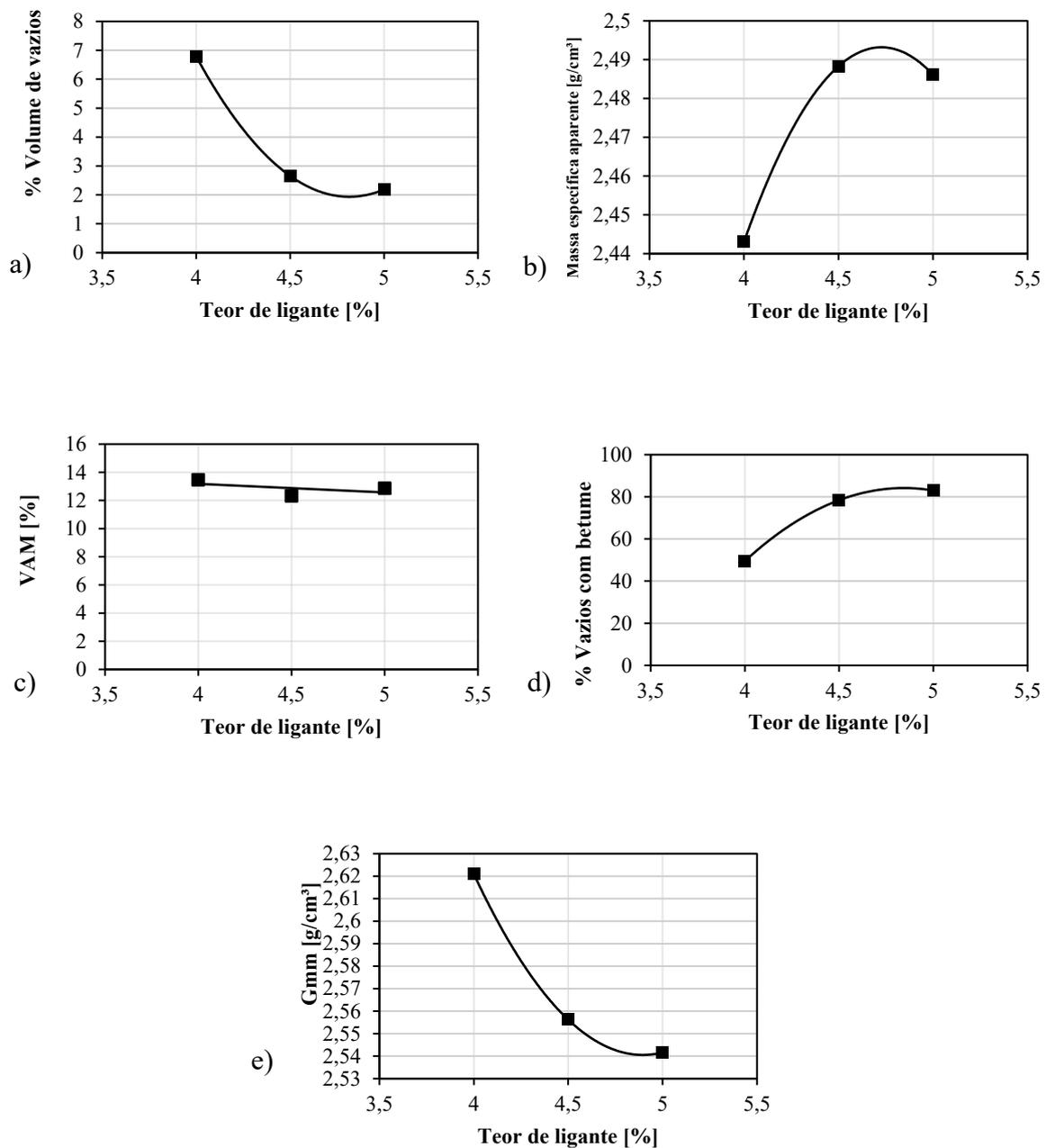


Figura 4.6. Resultados de parâmetros de dosagem do CBUQ.

Com base nos resultados, foi adotado um teor de ligante igual a 4,3%, que resultaria em corpos de prova com 4,0% de volume de vazios. Para o teor estabelecido, foram compactados três corpos de prova cujos parâmetros médios estão apresentados na Tabela 4.6. Os valores são compatíveis com as especificações *Superpave* e o teor foi, então, estabelecido.

Tabela 4.6. Parâmetros do CBUQ com 4,3% de Teor de ligante.

Parâmetro	a = 4,3%	Limites (Faixa C)	Unidade
Volume de vazios	4,6	3 - 5	%
Massa específica aparente	2,45	-	g/cm ³
VAM	13,6	> 13%	%
VCB	65,9	65 - 75	%
Gmm	2,57	-	g/cm ³

4.1.3 DOSAGEM DA MAF

A partir da metodologia apresentada por Castelo Branco (2008), a Matriz de Agregados Finos (MAF) foi dosada. A granulometria dos agregados seguiu a proporção da Faixa C, considerando apenas o material passante na peneira #4 (4,8 mm), correspondente a 58% dos agregados conforme Figura 4.7. A Figura 4.8 apresenta a composição granulométrica da MAF, restrita à peneira #4, calculada de forma proporcional.

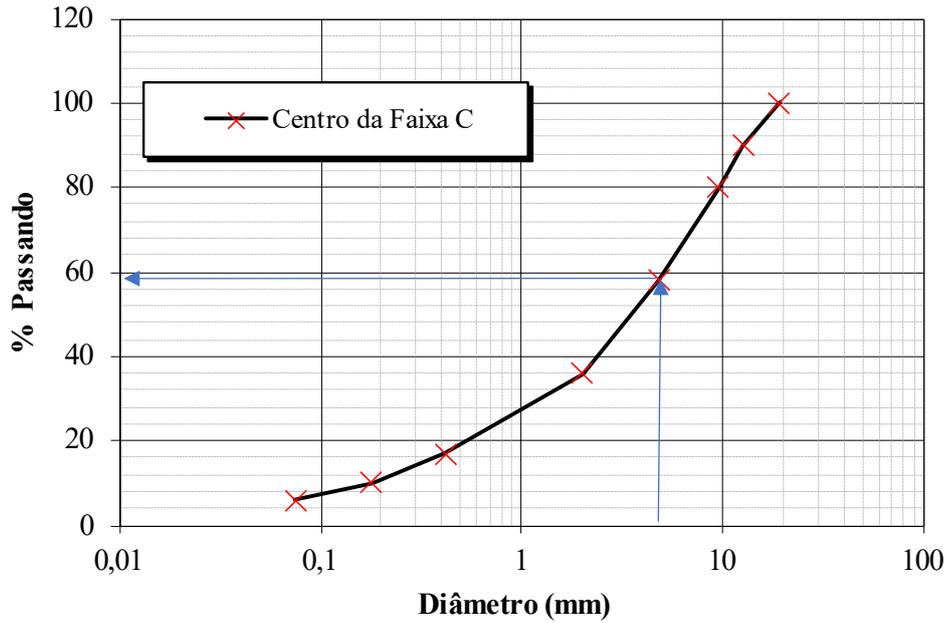


Figura 4.7. Porcentagem dos agregados correspondente à porção miúda, seguindo a Faixa C.

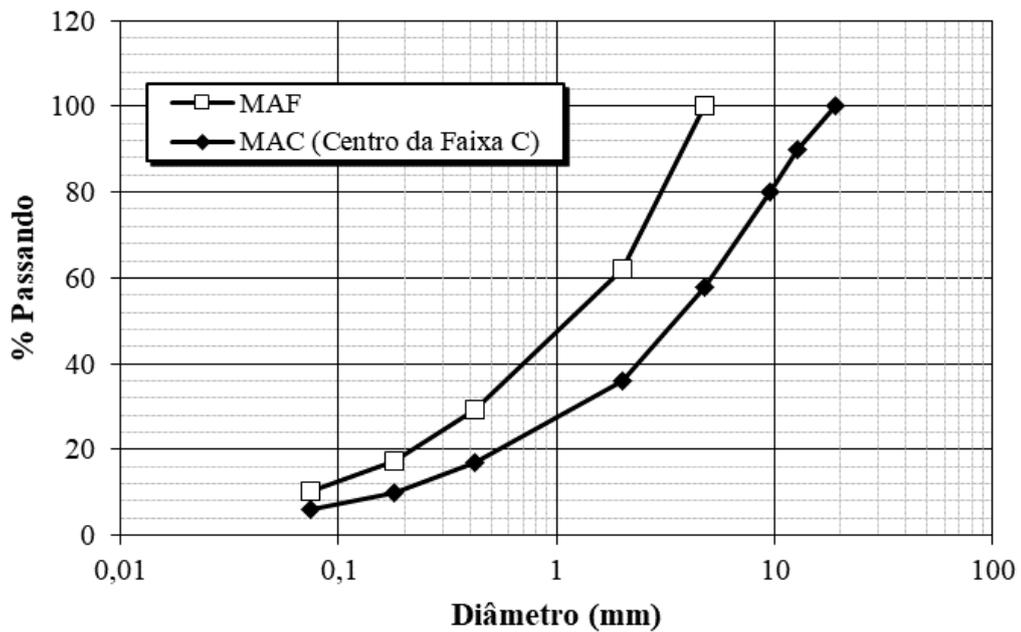


Figura 4.8. Granulometria dos agregados que compõem a MAF.

O teor de ligante ($\%P_{b,MAF}$) calculado foi de 6,5%. Os parâmetros volumétricos obtidos para a mistura estão apresentados na Tabela 4.7. Salienta-se que essa é uma metodologia de dosagem que basicamente correlaciona os volumes da MAF aos da MAC de forma proporcional, respeitando o limite de granulometria dos agregados e o teor de ligante estabelecido para a mistura completa na dosagem *Superpave*. Foram compactados seis corpos de prova para execução dos ensaios mecânicos.

Tabela 4.7. Parâmetros da MAF com 6,5% de Teor de ligante.

Parâmetro	a = 6,5%	Unidade
Volume de vazios	6,9	%
Massa específica	2,35	g/cm ³
VAM	19,1	%
VCB	63,7	%
Gmm	2,52	g/cm ³

Os corpos de prova foram compactados de forma a se obter um volume de vazios de cerca de 7,0%, valor indicado por norma para o ensaio de flexão em amostra semicircular. Para o ensaio de Módulo Dinâmico, o valor é superior ao desejado, entretanto sabe-se que o processo de corte dos CPs induz a uma diminuição dos vazios, visto que há concentração deles nas suas extremidades, que foram cortadas radialmente. Tal observação experimentada em campo corrobora indicações de Castelo Branco (2008), com reduções de cerca de 2% observadas.

4.1.4 MÓDULO DINÂMICO DAS MISTURAS

Os ensaios de módulo dinâmico foram realizados na MAF e na MAC. Para cada mistura, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Na Figura 4.9, apresenta-se a Curva Mestre do Módulo Dinâmico, $|E^*|$, obtida a partir dos ensaios em ambas as misturas. As curvas foram modeladas matematicamente pelo modelo sigmoidal apresentado na Eq. 2.4. A temperatura de referência das curvas é de 20 °C. São apresentados, na Tabela 4.8, os coeficientes de ajuste da equação sigmoidal. Observa-se que as curvas são similares, o que indica que o comportamento viscoelástico da mistura completa é bastante dependente da matriz de agregados finos. Entretanto, é possível observar a maior rigidez da MAC, em relação à MAF, devido à presença de agregados graúdos. Na Figura 4.10, apresentam-se as curvas dos ângulos de fase (ϕ). As curvas também são muito semelhantes, o que pode ser explicado pelo fato de a MAF determinar predominantemente o comportamento elástico/viscoso da mistura completa. Ainda é discutível o fato de a limitação dos agregados miúdos ter-se dado na peneira #4, de 4,8 mm, que pode ser ainda uma dimensão grande o suficiente para determinar maior rigidez da MAF, o que explicaria a curva da MAF ser tão próxima à da MAC.

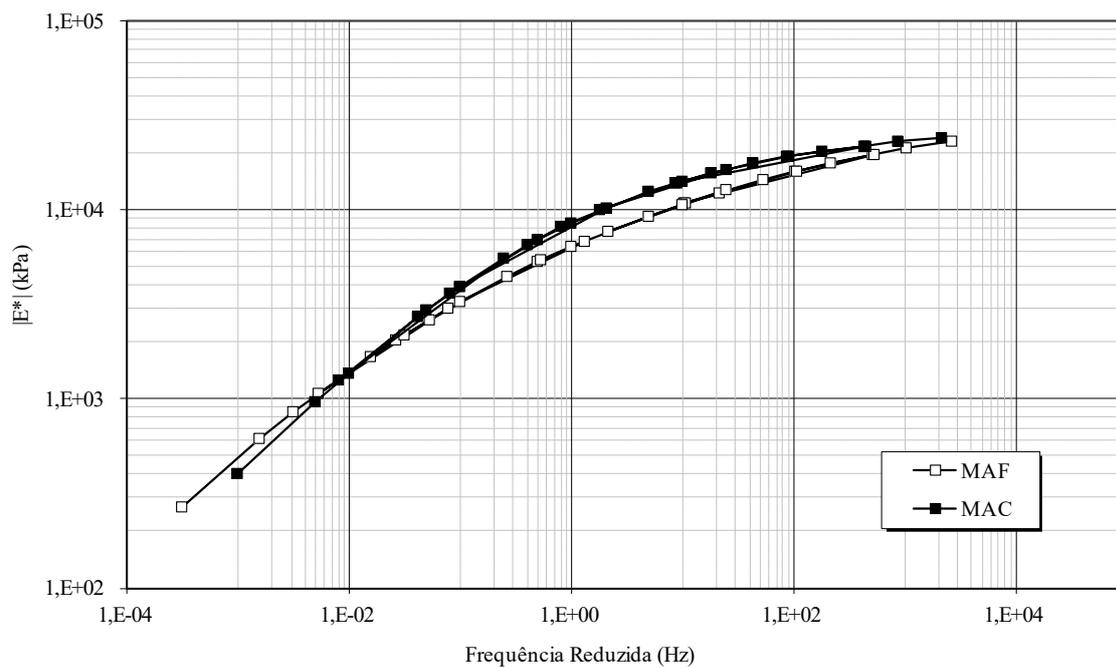


Figura 4.9. Curvas mestras de Módulo Dinâmico das misturas.

Tabela 4.8. Coeficientes de ajuste das equações sigmoidais à Curva Mestre das misturas.

Parâmetro	MAF	MAC
δ	-3,11394	0,95158
α	7,76642	3,50284
β	-2,10023	-1,74245
γ	0,33836	0,61702
R^2	0,976	0,983

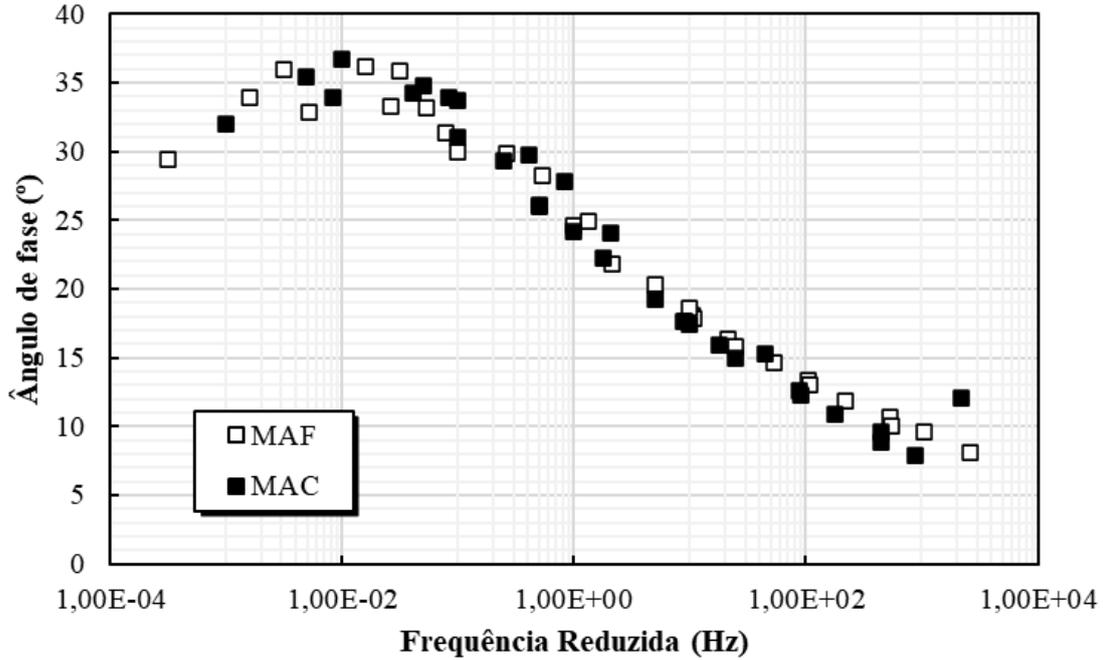


Figura 4.10. Curvas de ângulo de fase das misturas.

Para a simulação do comportamento viscoelástico da MAF que compõe a montagem do modelo numérico, é necessário caracterizar a curva de Relaxação $E(t)$ do material. A curva é obtida a partir dos resultados de Módulo Dinâmico e representa a diminuição da tensão com o tempo sob uma carga constante. Uma vez que se tem a curva de Módulo Dinâmico e Ângulo de fase modeladas, o procedimento para conversão de Módulo Dinâmico para Módulo de Relaxação adotado foi:

1. Calcula-se o Módulo de armazenamento E'_{exp} a partir dos dados experimentais;
2. Ajusta-se o $E'_{previsto}$ ao experimental E'_{exp} a partir das Equações 4.1 e 4.2, de forma a obter os parâmetros da Série de Prony E_{∞} e E_m ;
3. Substituem-se E_{∞} e E_m na Curva de Relaxação 4.1 na representação do Módulo de Relaxação para plotar sua curva mestra no domínio de tempo reduzido.

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^p E_m e^{-t/\rho_i} \quad (4.1)$$

$$E_m = [B]_{mi}^{-1} \times \{E'\}_{norm} \quad (4.2)$$

sendo E_{∞} , o módulo de equilíbrio a tempo infinito; E_m, ρ_i termos da Série de Prony.

Na Figura 4.11, é apresentada a curva de Relaxação $E(t)$, estimada a partir dos resultados experimentais do módulo dinâmico da MAF, no domínio do tempo. Uma vez que foi possível

representar a translação de temperatura no espaço tempo a fim de obter a curva, reforça-se a classificação do material como termoreologicamente simples (TRS – “*Thermorheologically Simple*”), ou seja, é possível descrever os efeitos de frequência e temperatura nas propriedades da mistura a partir de um tempo reduzido. Isso corrobora o comportamento esperado para misturas asfálticas em seu domínio viscoelástico linear (Kim, 2009).

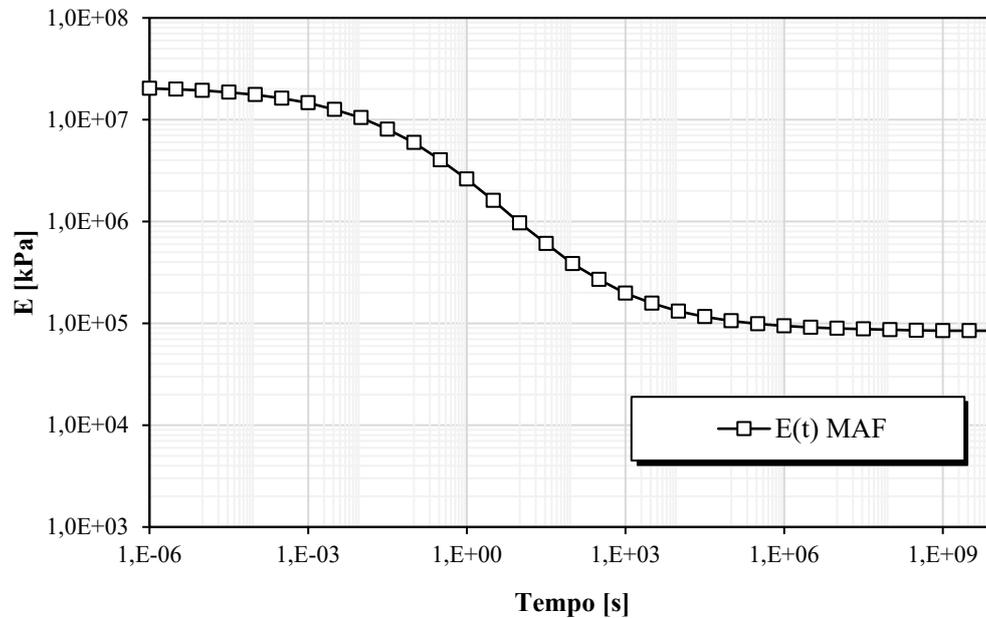


Figura 4.11. Curva de Relaxação da MAF, ajustada por uma Série de Prony.

Importante atestar que o programa ABAQUS realiza essa interconversão e ajuste da Série de Prony, além de definir o número de termos de Maxwell necessários à série para ajuste ideal do comportamento de relaxação. Uma vez determinados os valores de $E(t)$ pelo *software*, eles são normalizados pelo Módulo de Relaxação Instantâneo E_0 . Esse valor é utilizado como *input* para a definição do comportamento viscoelástico do material.

4.1.5 FLEXÃO EM AMOSTRAS SEMICIRCULARES DAS MISTURAS

O ensaio de flexão em amostra semicircular foi realizado na MAF e na MAC, em 12 corpos de prova por mistura, sendo três conjuntos de quatro CPs. Cada conjunto foi preparado com uma fenda inicial de tamanho diferente, conforme explicitado na Metodologia. O ensaio tem como dado de saída a carga L [kN] necessária para se manter uma taxa de deslocamento imposta de 0,5 mm/min. A frequência de medição de carga e deslocamento é imposta em 10 Hz.

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 representam as curvas Carga x Deslocamento obtidas para cada corpo de prova da MAF, além das curvas médias obtidas de cada conjunto de CPs com mesmo comprimento de pré-trinca. Em sequência, são apresentadas as curvas para corpos de prova com (a) 25 mm; (b) 32 mm; e (c) 38 mm de comprimento de pré-trinca.

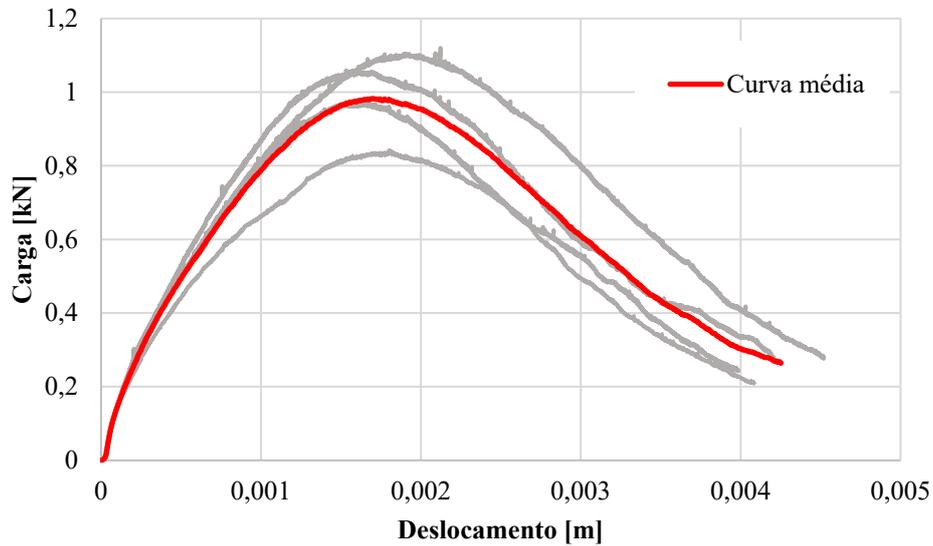


Figura 4.12. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAF com 25 mm de pré-trinca.

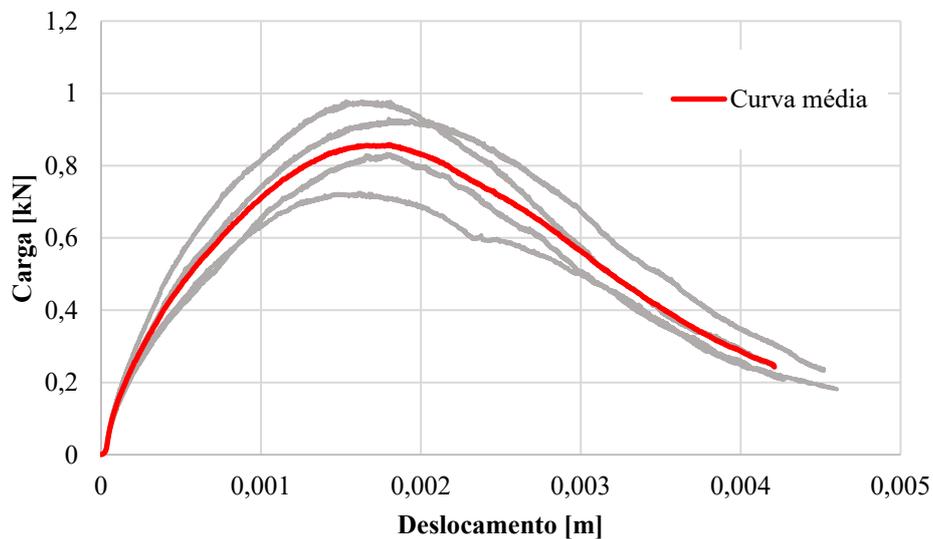


Figura 4.13. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAF com 32 mm de pré-trinca.

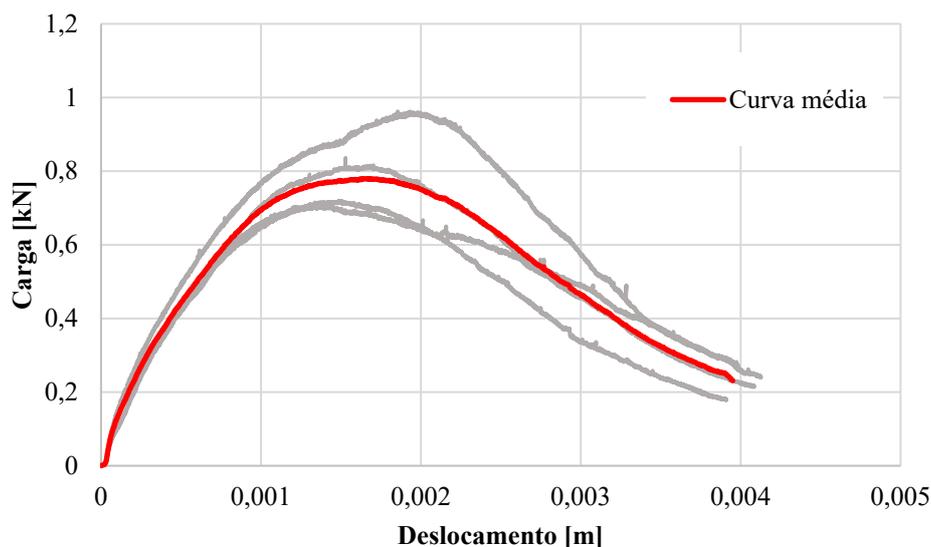


Figura 4.14. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAF com 38 mm de pré-trinca.

Nota-se que as curvas são relativamente suaves, sem variações abruptas de carga necessária para evolução do deslocamento. Isso se deve ao caráter aproximadamente homogêneo da Matriz de Agregados Finos, na qual a propagação de microtrincas não encontra grandes agregados que ofereçam maior resistência e que induzam modificação de trajetória contornando-os. Isso é possível de ser observado na Figura 4.15, que exemplifica corpos de prova de MAF rompidos.

Já as Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 representam as curvas obtidas para cada corpo de prova da MAC, e curvas médias obtidas de cada conjunto de CPs com mesmo comprimento de pré-trinca. Em sequência, são apresentadas as curvas para corpos de prova com (a) 25 mm; (b) 32 mm; e (c) 38 mm de comprimento de pré-trinca.

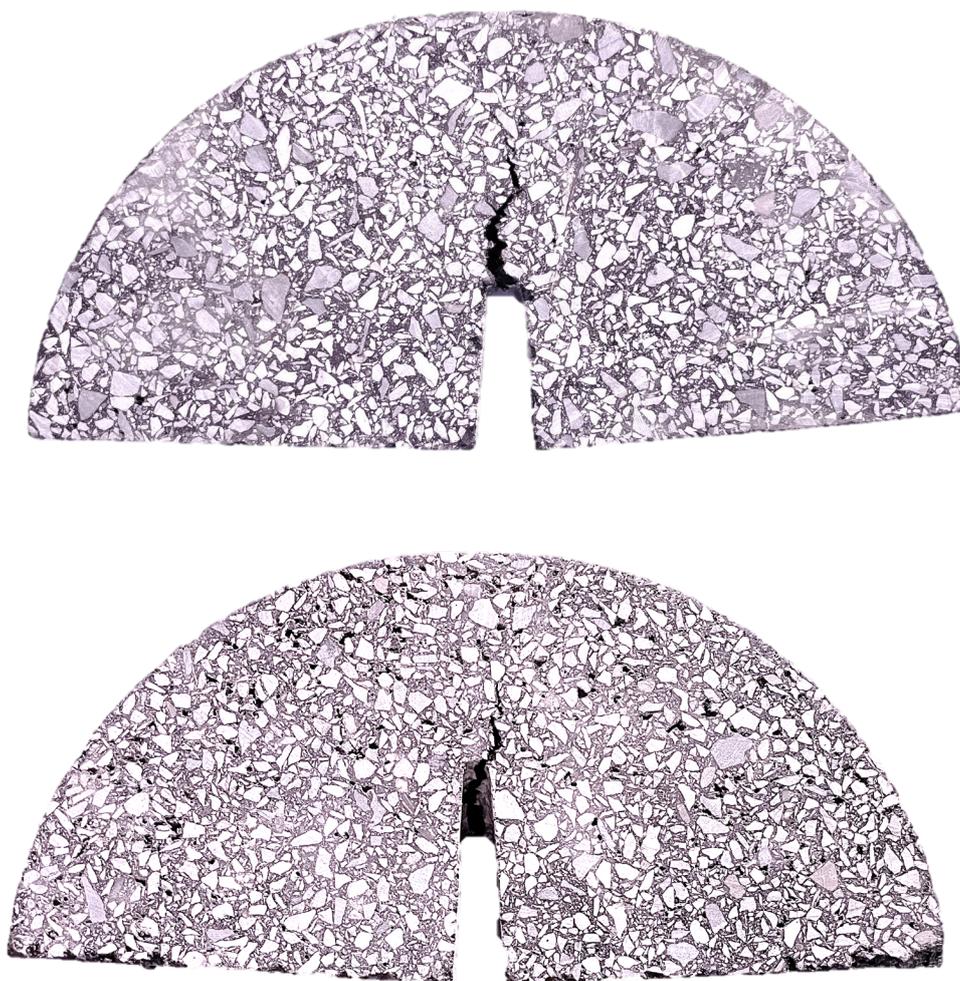


Figura 4.15. Exemplos de trincas abertas em CPs de MAF rompidos no ensaio SCB.

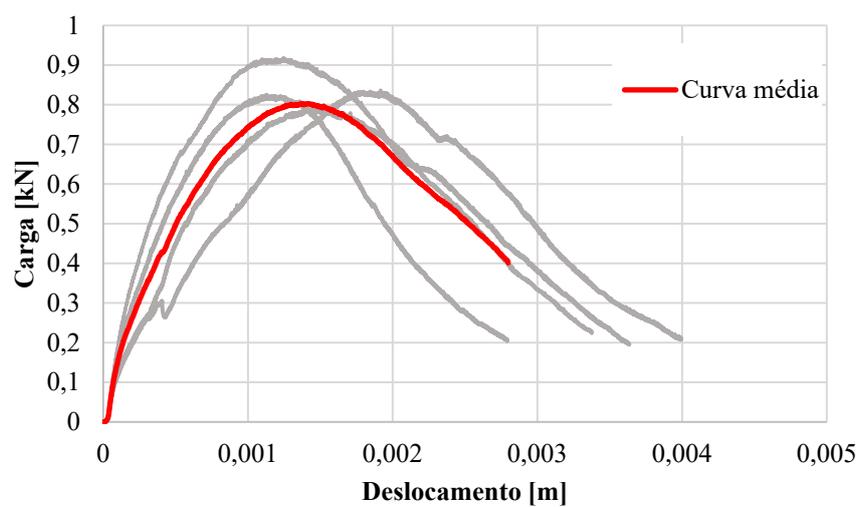


Figura 4.16. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAC com 25 mm de pré-trinca.

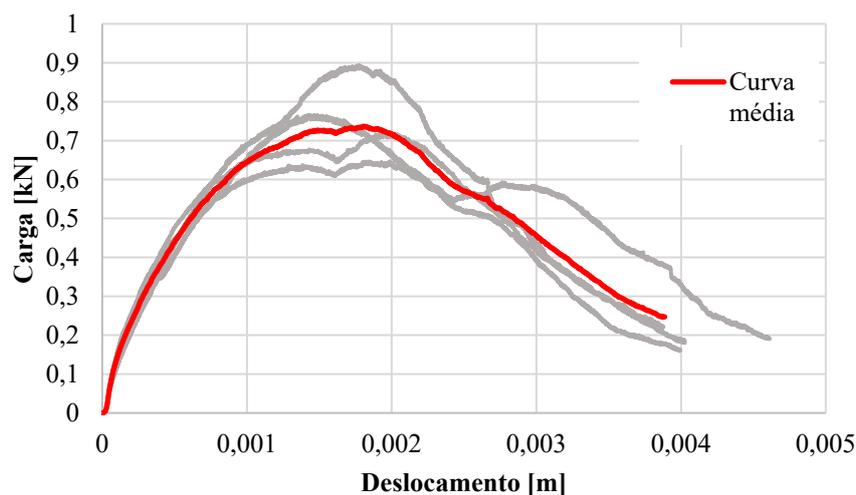


Figura 4.17. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAC com 32 mm de pré-trinca.

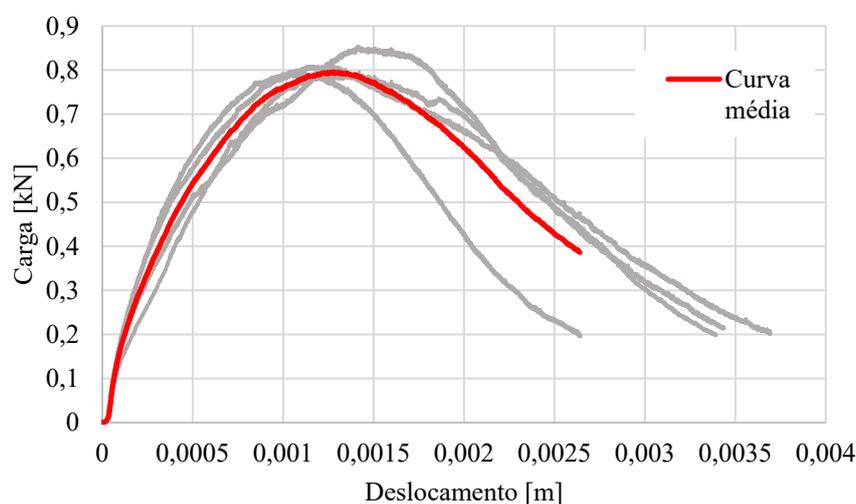


Figura 4.18. Resultados experimentais do ensaio SCB em amostras de MAC com 38 mm de pré-trinca.

É possível observar que, comumente, as trincas contornam os agregados graúdos, como exemplifica a Figura 4.19, o que evidencia as interfaces, além da própria MAF, como sendo a parte mais frágil da mistura. Isso provavelmente influencia no comportamento identificado nas curvas carga x deslocamento apresentadas, uma vez que se observam grandes variações abruptas ao longo de sua evolução. A trinca, ao se propagar e encontrar um agregado graúdo, deve modificar seu caminho a fim de contorná-lo e, antes disso, é notório um aumento de carga do equipamento para evolução dos deslocamentos.

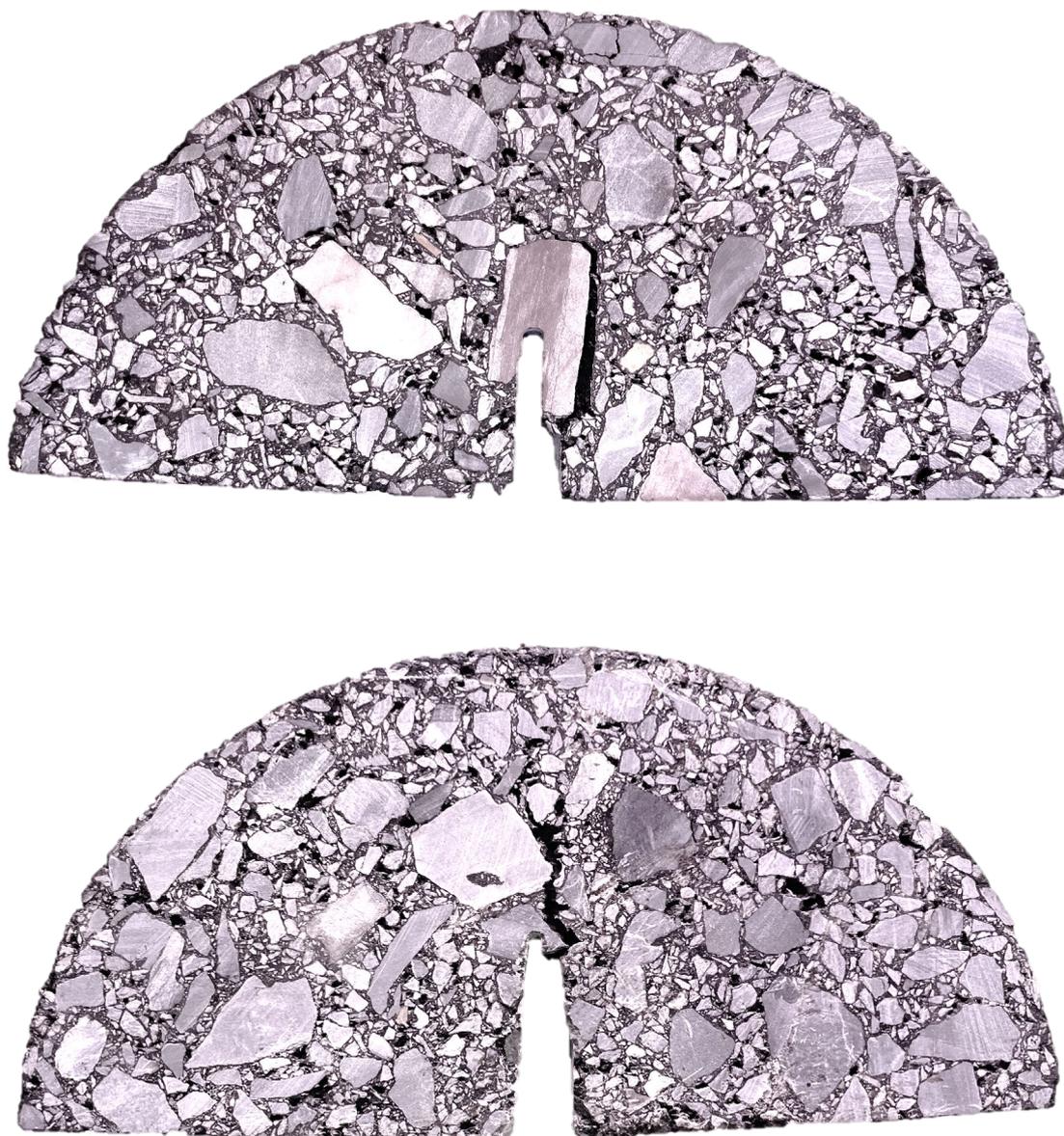


Figura 4.19. Exemplos de trincas abertas em CPs de MAC rompidos no ensaio SCB.

Na Figura 4.20, são apresentadas as curvas carga \times deslocamento médias ensaiadas para efeito comparativo. Cada curva corresponde à média de quatro curvas de corpos de prova ensaiados e levados à ruptura, com abertura de trinca. É possível observar que as misturas do tipo MAF se deformam mais para chegarem à ruptura, o que é coerente, visto que são menos rígidas e possuem maior teor de ligante. Observa-se, ainda, que as misturas completas MAC, embora deformem menos, rompem a cargas menores. Isso pode ser explicado pelo fato das grandes áreas de interface entre os agregados mais graúdos e a matriz que os envolve. As

imagens de todos os corpos de prova rompidos, tanto da MAC quanto da MAF encontram-se no Apêndice B deste trabalho.

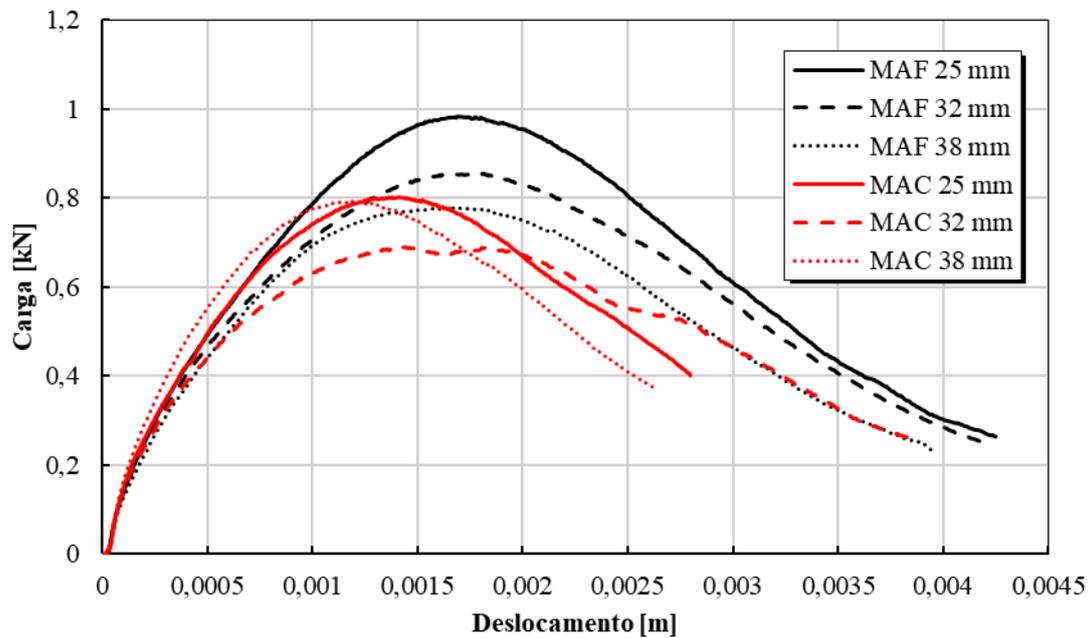


Figura 4.20. Curvas Carga \times Deslocamento de ensaios de flexão em amostra semicircular.

De posse das quatro curvas carga \times deslocamento por abertura de trinca inicial por mistura, foi possível calcular a energia de deformação na ruptura. Essa consiste na área abaixo da curva, durante a fase de carregamento, até a carga máxima aplicada (no momento da ruptura). Após calculadas, as energias de deformações de cada corpo de prova são plotadas em função da abertura da trinca inicial, conforme Figura 4.21. Com base nas funções de regressão linear dos pontos de cada mistura, foi possível identificar as variações da energia de deformação, em função da abertura da trinca inicial (dU/da). Passou-se, então, ao cálculo da taxa crítica de liberação de energia de deformação (J_c), usada para avaliar as resistências ao trincamento de misturas asfálticas. Na Tabela 4.9, são resumidos os resultados encontrados para as duas misturas (MAF e MAC).

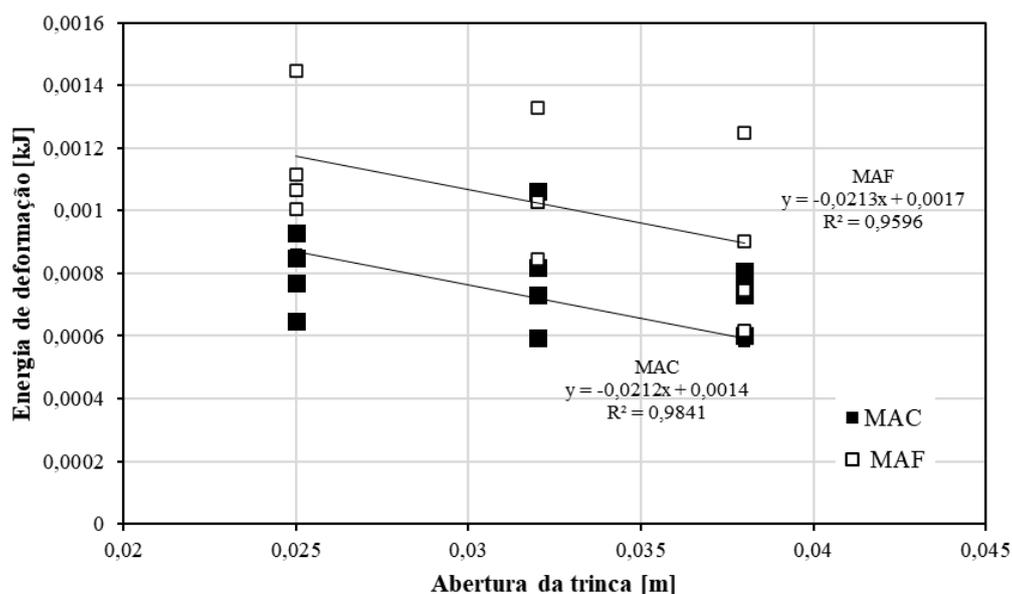


Figura 4.21. Gráfico de energia de deformação em função da abertura da trinca inicial das misturas.

Tabela 4.9. Resultados do ensaio SCB das misturas.

Mistura	dU/da	R^2	J_c [kJ/m ²]
MAF	-0,0213	0,9596	0,3737
MAC	-0,0212	0,9841	0,3719

A integral J_c caracteriza a fratura nos materiais não lineares. Trata-se de uma medida da tenacidade à fratura do material. Assim sendo, é possível concluir que a Matriz de Agregados Finos (MAF) é um material ligeiramente mais resistente ao trincamento em relação à Mistura Asfáltica Completa. Isso pode ser explicado, como já dito anteriormente, pela maior área de interface entre a matriz e os agregados graúdos e maior rigidez da MAC, mas observa-se que a susceptibilidade ao trincamento da mistura completa é altamente dependente do comportamento da MAF, região pela qual a propagação de trincas acontece normalmente.

De posse dos parâmetros que caracterizam o trincamento da MAF, quais sejam a tensão principal máxima na ruptura e a energia de deformação na ruptura, foi possível descrever o comportamento de dano com XFEM, no programa ABAQUS. Dessa forma, foi possível adicionar o comportamento de formação de trinca na MAF no composto formado por MAF + ESG. Definiu-se, no *software*, conforme explorado na Metodologia, o critério de início de dano como Tensão principal máxima, com evolução de dano do tipo “Energia”, com curva suavizada linearmente e tipo de fratura independente do modo.

4.2 ABORDAGEM NUMÉRICA DO ENSAIO SCB

Conforme abordado na Metodologia deste trabalho, a geração do modelo numérico trata-se de um procedimento complexo, que envolveu a caracterização geométrica e do comportamento constitutivo dos materiais. Uma vez que se viabilizou a caracterização do corpo de prova em configuração semelhante a real, passou-se à execução das simulações do ensaio de Flexão em Amostra Semicircular no programa ABAQUS.

No programa ABAQUS, define-se um material viscoelástico a partir do resultado da curva de Relaxação $E(t)$ normalizada pelo módulo de relaxação instantâneo E_0 , calculado em 21.073 MPa. Foram utilizados 5 termos da série de Prony, com seus tempos reduzidos e seus respectivos valores de módulo de relaxação normalizados (k_i). Foi necessário, ainda, definir o módulo de relaxação estabilizado E_∞ , igual a 84,6 MPa. Conforme já abordado, o próprio *software* calcula os parâmetros da série de Prony para representar o comportamento do material a partir da curva de Módulo Dinâmico ensaiada. Os resultados de módulos volumétricos de relaxação normalizados ajustados à série de Prony pelo ABAQUS estão apresentados na Tabela 4.10. O tempo de Relaxação (τ_i) corresponde ao tempo reduzido.

Tabela 4.10. Dados de entrada da série de Prony calculados pelo ABAQUS, em função da curva de Relaxação.

i	K_i	τ_i
1	0,12201	0,0000284917
2	0,22976	0,00101320
3	0,30601	0,0208064
4	0,24330	0,40387
5	0,09490	17,689

Após a calibração e a otimização dos processos até chegar aos procedimentos apresentados na Metodologia, viabilizou-se o modelo pronto para a simulação. Foram gerados 30 diferentes modelos para cada configuração de abertura de trinca (três), resultando em 90 simulações, ao todo. Como saída da simulação, além DE outros parâmetros, foram selecionados o deslocamento e a carga no centro do semicilindro de aplicação. Exemplifica-se, na Figura 4.22, um corpo de prova ensaiado e seus deslocamentos. Salienta-se que foi aplicado um fator de escala de deformação para melhor visualização da deformada. Observa-se que os maiores

deslocamentos acontecem na região da pré-trinca, como era esperado, visto que se trata de uma indução do caminho de trincamento. Maiores deslocamentos induzem a maiores energias de deformação na ruptura, parâmetro utilizado para definição do início do trincamento. Portanto, é intuitivo esperar a formação de trincas passando pela região de maiores deslocamentos, indicada pelas cores vermelho e laranja na figura. O exemplo ilustrado na Figura 4.22 apresenta o módulo da resultante dos deslocamentos.

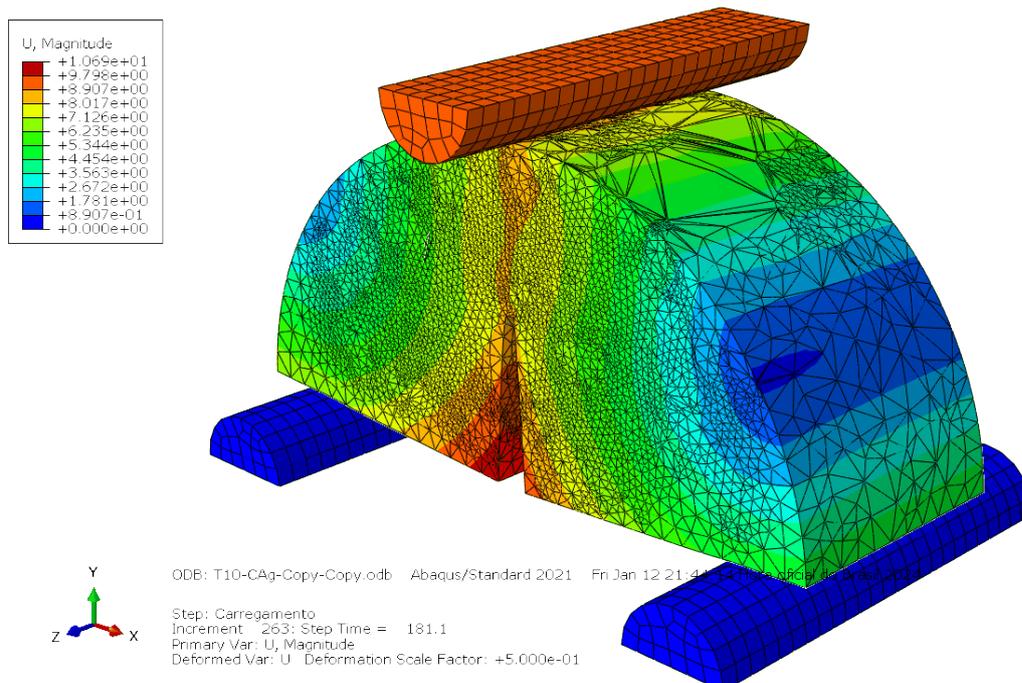


Figura 4.22. Corpo de prova ensaiado e deformado ao final do ensaio, no momento da ruptura.

A Figura 4.23 apresenta o estado de tensões no interior do corpo de prova ensaiado. É possível observar a concentração de tensões em regiões de contato entre os agregados, em função do intertravamento das partículas. Cabe salientar que, no modelo desenvolvido, não se implementou modelo de interface entre os materiais, e o contato entre os agregados não permite descolamento dos agregados da matriz. Nota-se que as tensões se propagam através do Esqueleto Sólido Graúdo, e a região da MAF, embora deforme-se mais, não apresenta grandes tensões.

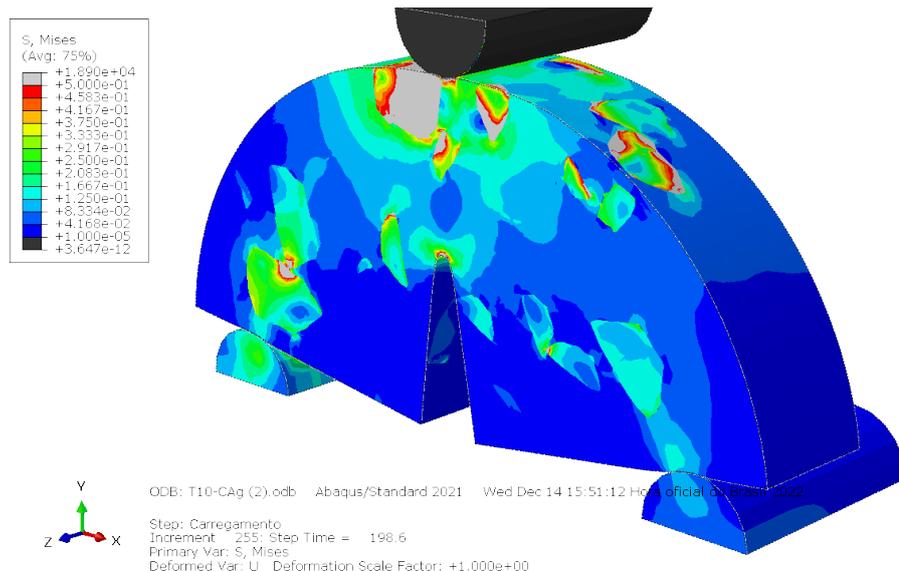


Figura 4.23. Visualização da concentração de tensões no interior do corpo de prova ensaiado.

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 são apresentados os resultados encontrados e as curvas médias para cada cenário de pré-trinca ensaiado. É possível perceber que a dispersão das 30 curvas experimentais, em cada gráfico, é muito baixa em relação à média das curvas experimentais. Isso mostra que o modelo numérico, calibrado e ensaiado, simula o comportamento da mistura asfáltica completa de forma fidedigna, o que valida o modelo proposto. As curvas experimentais avançam até o nível de deslocamento correspondente à ruptura dos CPs, momento a partir do qual o modelo, em geral, apresenta erro de convergência e o *software* aborta a simulação.

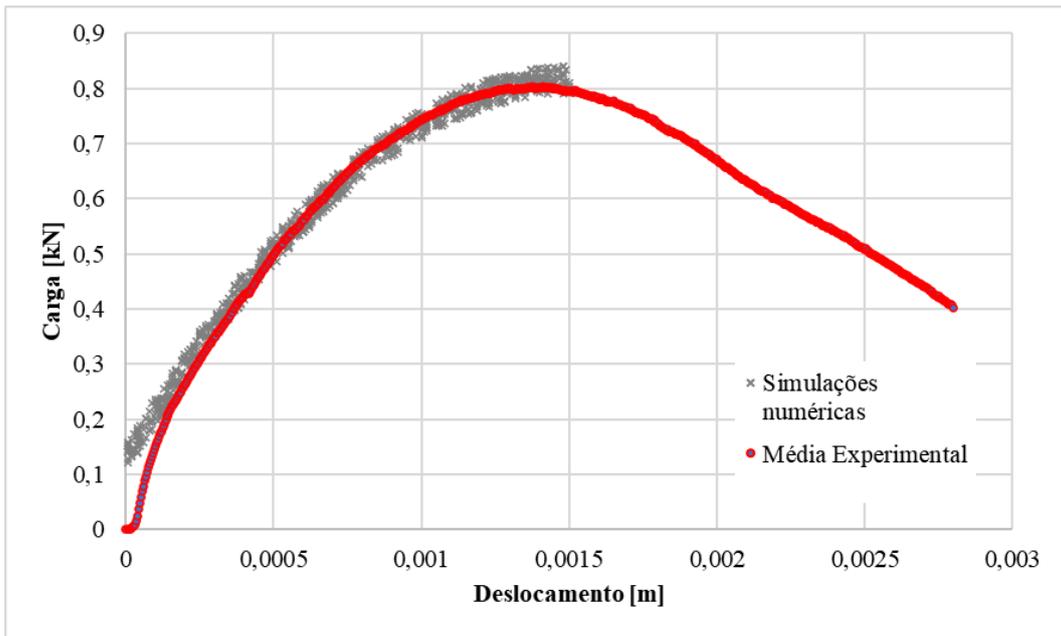


Figura 4.24. Resultados de simulações numéricas com CPs com 25 mm de abertura de pré-trinca.

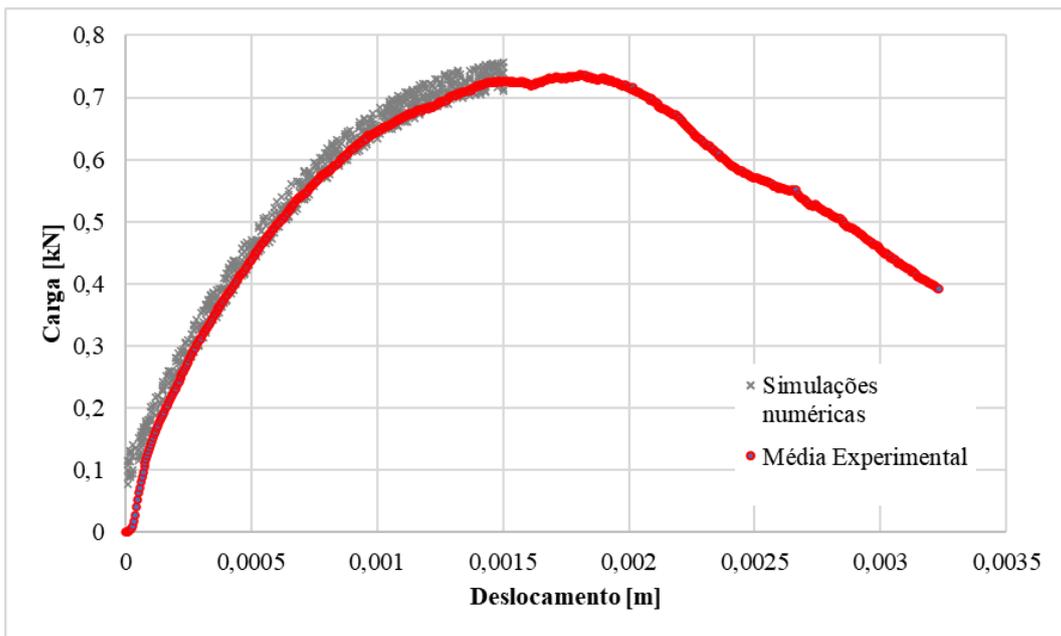


Figura 4.25. Resultados de simulações numéricas com CPs com 32 mm de abertura de pré-trinca.

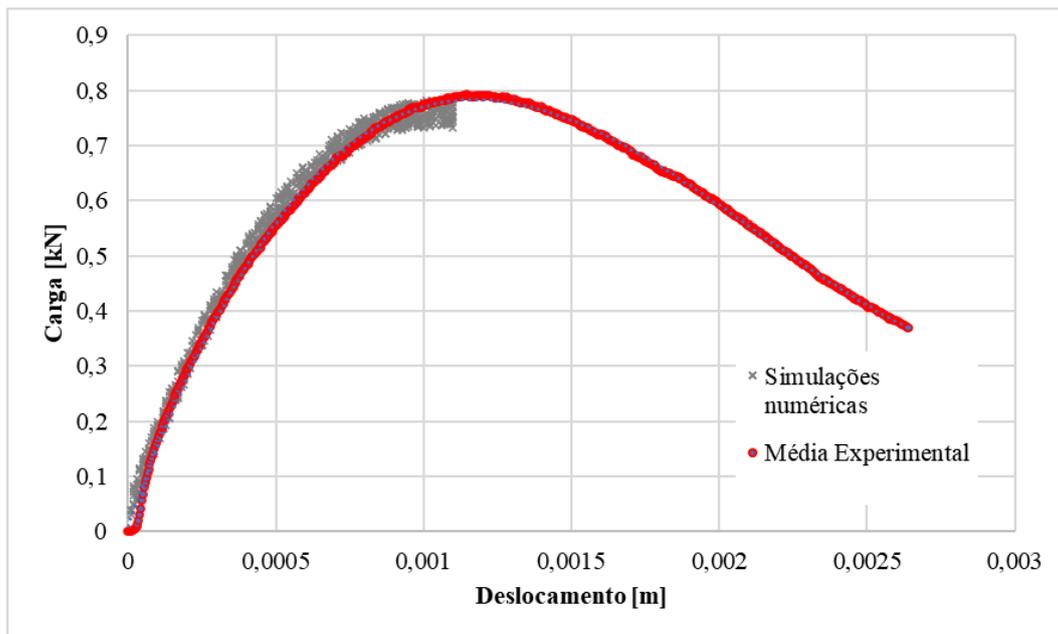


Figura 4.26. Resultados de simulações numéricas com CPs com 38 mm de abertura de pré-trinca.

Percebe-se, dos resultados dos ensaios numéricos, que normalmente há um incremento de carga inicial maior do que o visualizado experimentalmente para início dos deslocamentos. Além disso, visualiza-se que a dispersão dos resultados das simulações aumenta com o desenvolvimento dos deslocamentos, o que pode ser explicado pela geração aleatória de microtrincas ao longo do corpo de prova. O ABAQUS permite a plotagem do dado de saída PHILSM, que se trata de propriedade indicadora de formação de trincas em domínio XFEM. O valor, quando negativo, indica a formação de trinca.

Nos corpos de prova preenchidos por agregados graúdos, de geometria muito complexa, não é possível visualizar facilmente a propagação de trincas, conforme já dito. O *software* aborta a simulação devido ao grande número de inconvergências gerado. Entretanto, por vezes é possível visualizar a formação de microtrincas em algumas regiões do corpo de prova, como exemplificado na Figura 4.27, na qual se apresenta a saída PHILSM do ABAQUS para um corpo de prova ensaiado. A propagação da trinca, mesmo que em pequena escala, sem prolongamento ao longo do corpo de prova, confirma o início do microfissuramento seguido do amolecimento de partes da MAF. Observa-se, em todas as simulações, que as microtrincas iniciam a propagação ao longo dos passos de tempo antes do programa abortar a simulação.

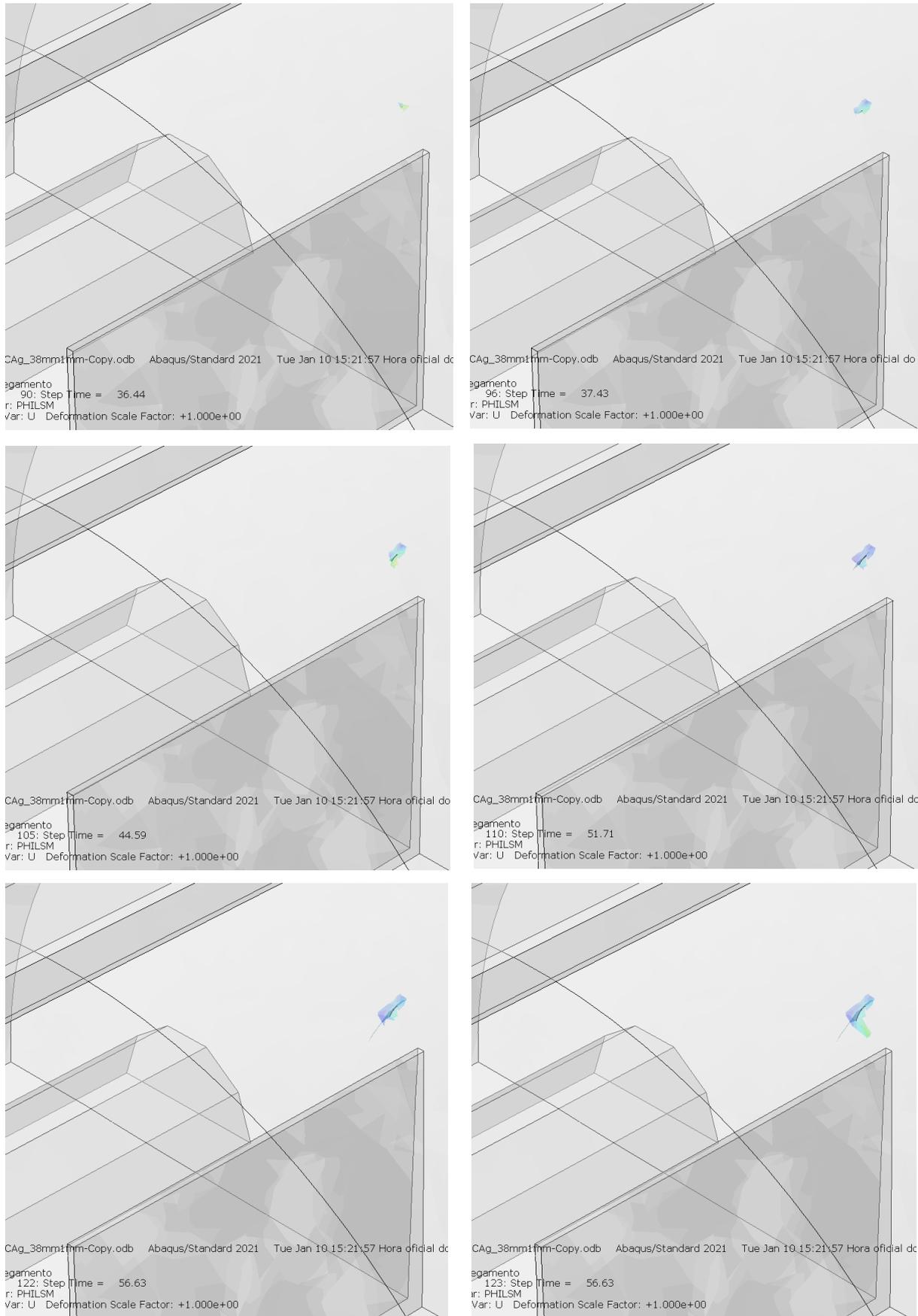


Figura 4.27. Exemplos de microtrincas geradas antes ou até a ruptura do corpo de prova.

A partir das curvas de carga x deslocamento, é possível calcular a energia de ruptura por trincamento, U , conforme apresentado pela Equação 3.4. São resumidos, na Tabela 4.11, os resultados de energia de trincamento encontrados para as três aberturas de pré-trinca estudadas. Observa-se que os erros relativos encontrados para as energias de ruptura por trincamento entre os modelos experimental e numérico são muito baixos, de no máximo 3%. O resultado valida a utilização do modelo, uma vez que o critério para a abertura de trinca adotado no ABAQUS foi o da energia de ruptura ao trincamento.

Tabela 4.11. Resumo de energias de ruptura por trincamento

U [kJ]	Experimental	Numérico	Erro relativo
25 mm	0,000859	0,000836	3%
32 mm	0,000740	0,000742	0,28%
38 mm	0,000582	0,000568	3%

Na Figura 4.28, resumem-se os resultados de energia de ruptura por trincamento da MAC numéricos e experimentais, permitindo estabelecer comparações. Uma vez plotados os resultados, pode-se observar que a tendência de energia necessária para o trincamento, em função da abertura da pré-trinca, é praticamente a mesma. A partir da variação de energia de ruptura, em função da abertura da pré-trinca, é possível calcular a taxa de liberação crítica de energia de deformação, J , parâmetro usado para determinação da susceptibilidade ao trincamento de uma mistura. Na Tabela 4.12, são comparados os resultados, que se apresentaram muito convergentes, com erro relativo de 3,4% entre o modelo numérico e o experimental. É possível estabelecer a validação do modelo numérico, uma vez que representa de forma fidedigna o comportamento da mistura em relação ao trincamento, até a ruptura.

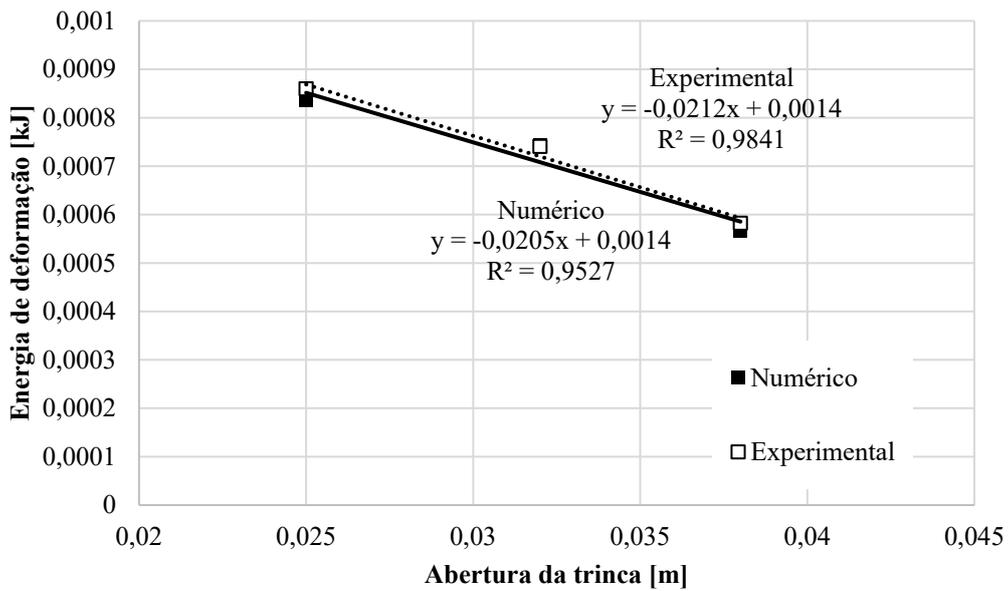


Figura 4.28. Energia de deformação em função da abertura da trinca inicial da MAC para resultados experimentais e numéricos.

Tabela 4.12. Comparação de resultados de taxa de liberação crítica de energia de deformação.

	dU/da	R^2	J_c [kJ/m ²]	Erro relativo
Numérico	-0,0205	0,9527	0,3597	3,4%
Experimental	-0,0212	0,9660	0,3719	

CAPÍTULO V

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais do trabalho, passando pelas conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

5.1 CONCLUSÕES

O trabalho em questão apresenta-se como um estudo inovador à medida que emprega novas tecnologias, desenvolvidas no grupo de pesquisa do INFRALAB, para a modelagem de misturas asfálticas para simulação de trincamento em três dimensões. O trabalho passou pela caracterização de materiais amplamente utilizados no Distrito Federal, a fim de representá-los geométrica e constitutivamente em um modelo numérico implementado no programa ABAQUS. Uma mistura asfáltica padrão foi estudada experimentalmente para subsidiar o estudo numérico. Foram empregadas tecnologias inovadoras de geração e empacotamento de partículas virtuais para representação dos agregados graúdos. O modelo numérico foi calibrado e, finalmente, validado a partir de resultados experimentais. A seguir, são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

5.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

- Agregados usualmente empregados no DF foram caracterizados a partir de diferentes metodologias, e considerados como partículas cúbicas. O desempenho de misturas asfálticas tende a ser melhor com o emprego de partículas com essa forma;
- Foram analisados e catalogados agregados de cada faixa granulométrica, de forma a prover um repositório de partículas para a modelagem numérica de compósitos que sejam constituídos de agregados da fonte utilizada;
- O ligante CAP 50/70 foi caracterizado e condiz com as especificações recebidas pela refinaria fornecedora. O material pôde ser classificado como

termoreologicamente simples, a partir dos resultados da caracterização reológica no DSR;

- O envelhecimento do ligante tornou a mistura mais rígida, em especial em baixas frequências, o que se espera para materiais viscoelásticos.

5.1.2 DOSAGEM EXPERIMENTAL DAS MISTURAS ESTUDADAS (MAF E MAC)

- Determinou-se um teor de projeto de ligante asfáltico, a partir da metodologia *Superpave*, de 4,3%, para obtenção de misturas de CBUQ com volume de vazios de 4,0%;
- Para a MAF, foi determinado um teor de ligante de 6,5%, para obtenção de propriedades semelhantes à da MAF componente do CBUQ estudado. Esperava-se um teor maior que o do CBUQ em função da maior presença de agregados miúdos.

5.1.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ESTUDADAS

- Observou-se, a partir do ensaio de Módulo Dinâmico, que embora a MAC apresente maior rigidez em relação à MAF, o comportamento viscoelástico da mistura completa é bastante semelhante e dependente do desempenho da matriz de agregados finos. Os agregados de fato conferem menor deformabilidade, mas a influência da temperatura e da frequência no desempenho das misturas sugere ser maior na MAF, visto que é um material mais deformável;
- A partir do ensaio SCB, o trincamento das misturas asfálticas (MAF e MAC) foi estudado, de forma a compreendê-lo e a se obterem dados de entrada para as simulações numéricas. Observou-se que a MAF se deforma mais até sua ruptura, uma vez que se trata de material menos rígido, entretanto a taxa crítica de liberação de energia de deformação das misturas foi bastante semelhante, o que sugere que a resistência ao trincamento da MAC é determinado pela Matriz de Agregados Finos, já que o trincamento se propaga ao longo da MAF.

5.1.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TRINCAMENTO DO CBUQ

- Simulações do ensaio SCB foram realizadas de forma a prover um modelo que se provou válido para a representação do desempenho de misturas asfálticas quanto ao trincamento. Os resultados numéricos encontrados apresentaram erro relativo de apenas 3,4% na taxa de liberação crítica de energia de deformação em relação aos resultados experimentais. O modelo foi, então, validado para o seu emprego em estudos paramétricos futuros.
- As simulações mostraram-se bastante complexas no programa ABAQUS, e foi necessário realizar diversos processos de otimização e calibração do modelo para que ele convergisse para a ruptura dos corpos de prova. A propagação de trincas, entretanto, não se mostrou possível para problemas com geometria muito complexas, resultado em erros com interrupção das simulações.
- O modelo numérico construído representou bem o momento de ruptura do corpo de prova, a partir do início de formação da trinca, mas não foi possível observar a propagação de trinca, após seu início, uma vez que a definição do dano foi realizada a partir da energia de deformação na ruptura, que se limita ao deslocamento no momento da ruptura do corpo de prova.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Uma vez que o modelo foi validado, é possível empregá-lo para o estabelecimento de estudos paramétricos das misturas de concreto asfáltico. Sugere-se que sejam conduzidas pesquisas para determinação da influência da forma e da granulometria dos agregados no trincamento das misturas asfálticas.

Ademais, sugere-se o estudo da interação nas interfaces entre agregados e Matriz de Agregados Finos, a fim de se estudar sua influência no comportamento global da mistura. O presente estudo não tratou desse assunto e entende-se que, para o trincamento, faz-se relevante o entendimento da propagação de trinca nessas regiões de interface.

À medida que novas tecnologias são desenvolvidas e a capacidade computacional aumenta, viabiliza-se a modelagem mais detalhada, a fim de se observar, de fato, o comportamento micromecânico dos materiais. Entende-se que menos simplificações e menor calibragem do modelo podem ser adotadas para a simulação do desempenho das misturas

asfálticas de forma mais fidedigna. De forma geral, o emprego de tecnologias de abordagem distinta, por exemplo o DEM, pode ser realizado em estudos similares.

Com relação ao modelo validado, entende-se que ele pode ser empregado para a simulação de outros ensaios. Atualmente, o INFRALAB dispõe de equipamentos para a realização dos mais variados ensaios de desempenho de misturas asfálticas e a simulação numérica desses ensaios permite ganhos de produtividade consideráveis. Entende-se que o modelo empregado nesse estudo pode ser, inclusive, acoplado a simulações de deformação permanente, de forma a simular o desempenho global do material, a partir de seus dois principais tipos de danos gerados nas solicitações de tráfego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1983). Agregado Graúdo - Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro.
- Alshandah, M., Huang, Y., Lu, P. & Tolliver, D. (2018). Bottom-up crack detection in concrete pavements using in-pavement strain sensors. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018*, . SPIE, 93.
- Aragão, F.T.S. (2011). Computational Microstructure Modeling of Asphalt Mixtures subjected to rate-dependent fracture. PhD Dissertation, University of Nebraska.
- Aragão, F.T.S., Hartmann, D.A., Kim, Y.-R., Motta, L.M.G. & Javaherian, M.H. (2014). A numerical-experimental approach to characterize fracture properties of asphalt mixtures at low in-service temperatures. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. January 12-16, Washington, D.C., : 1–17.
- Aragão, F.T.S., Hartmann, D.A., Vargas, G.A.B., Pazos, A.R.G. & Kim, Y.-R. (2015). MODELAGEM computacional microestrutural: uma alternativa para a caracterização do comportamento mecânico de misturas asfálticas (1): 1995–2006.
- Barenblatt, G. I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in applied mechanics*, 7, 55-129.
- Belytschko, T. & Black, T. (1999). Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *Int J Numer Methods Eng*, 45(5): 601–620.
- Belytschko, T., Gracie, R. & Ventura, G. (2009). A review of extended/generalized finite element methods for material modeling. *Model Simul Mat Sci Eng*,.
- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G., Ceratti, J.A.P. & Soares, J.B. (2008). Diagnóstico de defeitos, avaliação funcional e de aderência. *Pavimentação asfáltica : formação básica para engenheiros*, PETROBRAS: ABEDA (Ed.), Rio de Janeiro.
- Bernucci, L.B., da Motta, L.M.G., Ceratti, J.A.P. & Soares, J.B. (2022). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Abeda,.
- Bonaquist, R. & Christensen, D.W. (2005). Practical procedure for developing dynamic modulus master curves for pavement structural design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1929(1): 208–217.
- Castelo Branco, V.T. (2008). A unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixtures using the dynamic analyzer. .
- CNT: SEST SENAT. (2021). Pesquisa CNT de Rodovias 2021.
- Dai, Q. (2011). Two- and three-dimensional micromechanical viscoelastic finite element modeling of stone-based materials with x-ray computed tomography images. *Constr Build Mater*, 25(2): 1102–1114.

- Dai, Q. & You, Z. (2007). Prediction of creep stiffness of asphalt mixture with micromechanical finite-element and discrete-element models. *J Eng Mech*, 133(2): 163–173.
- DNIT. (2006). Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico - especificação de serviço.
- DNIT. (2018). Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento.
- Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), 100-104.
- Farmer, I. (1983). Engineering behaviour of rocks. *Eng Geol.*, 2nd edn. Chapman and Hall Ltd, London, 19.
- García, L.M. (2017). Influência da argamassa asfáltica na fluência de uma mistura idealizada. Universidade de Brasília.
- Hillerborg, A. (1978). A model for fracture analysis.
- Huang, Y.Hsien. (1993). Pavement analysis and design : 775.
- Kim, Y.. R. & Little, D.N. (1990). One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete 116(4): 751–772.
- Kim, Y.R. (2009). Modeling of Asphalt Concrete. ASCE Press. New York.
- Lancaster, I.M., Khalid, H.A. & Kougioumtzoglou, I.A. (2013). Extended fem modelling of crack propagation using the semi-circular bending test. *Constr Build Mater*, 48: 270–277.
- Liu, Y., Dai, Q. & You, Z. (2009). Viscoelastic model for discrete element simulation of asphalt mixtures. *J Eng Mech*, 135(4): 324–333.
- Liu, Y., Zhou, X., You, Z., Yao, S., Gong, F. & Wang, H. (2017). Discrete element modeling of realistic particle shapes in stone-based mixtures through matlab-based imaging process. *Constr Build Mater*, 143: 169–178.
- Lu, Y. & Wright, P.J. (1998). Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures. *Comput Struct*, 69(2): 139–147.
- Melenk, J.M. & Babuška, I. (1996). The partition of unity finite element method: basic theory and applications. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 139(1–4): 289–314.
- Mello, L.G.R. (2008). O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília.
- Moës, N., Dolbow, J. & Belytschko, T. (1999). A finite element method for crack growth without remeshing. *Int J Numer Methods Eng*, 46(1): 131–150.
- Mollon, G. & Zhao, J. (2014). 3D generation of realistic granular samples based on random fields theory and fourier shape descriptors. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 279: 46–65.

- Oliveira Junior, M. (2018). Análise numérica de fluência estática de misturas asfálticas via MEF: Estudo da fase Agregados Graúdos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Oliveira Junior, M. & de Farias, M.M. (2020). A simple numerical methodology to simulate creep and recovery tests in hma. *Constr Build Mater*, 262: 120793.
- Oliveira Junior, M., De Farias, M.M. & Rodrigues, I.A. (2019). Proposta de um modelo geométrico e computacional para simulação de fluência estática em concretos asfálticos. *TRANSPORTES*, 27(4): 187–200.
- Oliveira Junior, M., de Farias, M.M. & Morfa, C.A.R. (2022). A numerical study of the influence of aggregates shape on creep and recovery tests behavior. *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. ISBM 2020.*, pp. 143–149.
- Papagiannakis, A.T., Abbas, A. & Masad, E. (2002). Micromechanical analysis of viscoelastic properties of asphalt concretes. *Transp Res Rec*, 1789(1): 113–120.
- 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 Materials*, 24(4): 241–255.
- Pazos, A.G., Aragão, F.T.S. & Motta, L.M.G. (2015). Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas : 147.
- Pellinen, T.K., Witczak, M.W. & Bonaquist, R.F. (2003). Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization. *Recent Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems*, . American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 83–101.
- Pena, J.C., Castro, M.A., de Farias, M.M., Oñate, E., Moreno, L.A. & Recarey, C.A. (2024). Development of an individual 3d particle reconstruction method for discrete mechanical modeling: interpolation by fourier composition. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 420: 116705.
- Pereira de Almeida, F.J., Lima Babadopulos, L.F. de A., Soares, J.B. & Parente Junior, E. (2019). Simulação computacional do ensaio de módulo complexo em misturas asfálticas. *TRANSPORTES*, 27(2): 136–148.
- Pérez Morales, I., Farias, M.M. de, Valera, R.R., Morfa, C.R. & Carvajal, H.E.M. (2011). Contributions to the generalization of advancing front particle packing algorithms. *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, (March): 1885–1891.
- Recarey, C., Pérez, I., Roselló, R., Muniz de Farias, M., Hernández, E., Giraldo, R. & Oñate, E. (2019). Advances in particle packing algorithms for generating the medium in the discrete element method. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 345(November): 336–362.
- Roberts, F.L. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design & Construction*. Second. National Center for Asphalt Technology, Lanham, Maryland.
- Roque, R., Zou, J. & Hernando, D. (2015). Cracking mechanisms in asphalt mixtures. *Advances in Asphalt Materials*, Shin-Che Huang & Hervé Di Benedetto (Eds.), Elsevier, pp. 135–168.

- Saha, G. & Biligiri, K.P. (2015). Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using semi-circular bending test based on fracture energy approach. *Eng Fract Mech*, 142: 154–169.
- Saha, G. & Biligiri, K.P. (2016). Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: a state-of-the-art review and future research. *Constr Build Mater*, 105: 103–112.
- Sides, A., Uzan, J. & Perl, M. (1985). Comprehensive viscoelasto-plastic characterization of sand-asphalt compressive and tensile cyclic loading. *J Test Eval*, 13(1): 49–59.
- Silva, H.N. (2009a). Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas : operacionalização computacional e análise pelo método dos elementos finitos : 190.
- Silva, H.N. (2009b). Caracterização Viscoelástica Linear de Misturas Asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- SIMULIA (2020) Abaqus Documentations. Dassault Systems
- Su, X., Yang, Z. & Liu, G. (2010). Finite element modelling of complex 3d static and dynamic crack propagation by embedding cohesive elements in abaqus. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 23(3): 271–282.
- Tan, Z., Guo, F., Leng, Z., Yang, Z. & Cao, P. (2024). A novel strategy for generating mesoscale asphalt concrete model with controllable aggregate morphology and packing structure. *Comput Struct*, 296: 107315.
- Valera, R.L.R., González, J.I., de Oliveira Junior, M., de Farias, M.M., Fuentes, M.A.C., Martínez, R.T., Aguila, J.P., Anselmi, L.A.M., Morfa, C.A.R. & Oñate, E. (2022). Development and coupling of numerical techniques for modeling micromechanical discrete and continuous media using real particle morphologies. *Comput Part Mech*,
- Valera, R.L.R., González, J.I., de Oliveira Junior, M., de Farias, M.M., Fuentes, M.A.C., Martínez, R.T., Aguila, J.P., Anselmi, L.A.M., Morfa, C.A.R. & Oñate, E. (2023). Development and coupling of numerical techniques for modeling micromechanical discrete and continuous media using real particle morphologies. *Comput Part Mech*, 10(1): 121–141.
- Valera, R.R., Morales, I.P., Vanmaercke, S., Morfa, C.R., Cortés, L.A. & Casañas, H.D.-G. (2015). Modified algorithm for generating high volume fraction sphere packings. *Comput Part Mech*, 2(2): 161–172.
- Wang, H., Huang, Z., Li, L., You, Z. & Chen, Y. (2014). Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on x-ray ct microstructure images. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(1): 55–61.
- Xu, R., Yang, X.H., Yin, A.Y., Yang, S.F. & Ye, Y. (2010). A three-dimensional aggregate generation and packing algorithm for modeling asphalt mixture with graded aggregates. *Journal of Mechanics*, 26(02): 165–171.
- You, Z., Adhikari, S. & Emin Kutay, M. (2009). Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the x-ray computed tomography images. *Mater Struct*, 42(5): 617–630.

- Yue, Z.Q., Chen, S. & Tham, L.G. (2003). Finite element modeling of geomaterials using digital image processing. *Comput Geotech*, 30(5): 375–397.
- Zeleeuw, H. (2008). Simulation of the Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixtures Using Discrete Element Method (DEM). 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- Zhou, B., Wang, J. & Zhao, B. (2015). Micromorphology characterization and reconstruction of sand particles using micro x-ray tomography and spherical harmonics. *Eng Geol*, 184: 126–137.
- Zhou, F., Newcomb, D. & Hu, S. (2022). Ruggedness of Laboratory Tests for Asphalt Mixture Cracking Resistance. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Zienkiewicz, O.C. & Taylor, R.L. (2000). *The Finite Element Method Volume 1 : The Basis*. 5th edn. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1.

Texture																
Size	Particles in Range	Average	Standard Deviation	Low (≤ 200)		(≤ 200)	Moderate (200 - 500)		(≤ 500)	High (500 - 750)		(≤ 750)	Extreme (750 - 1000)		(≤ 1000)	Out of Range
				#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#
37,5 (1,5")																
25,0 (1,0")																
19,0 (3/4")	56	316,3	103,0	5	8,9%	8,9%	47	83,9%	92,9%	4	7,1%	100,0%	0	0,0%	100,0%	0
12,5 (1/2")	75	296,4	93,0	6	8,0%	8,0%	66	88,0%	96,0%	3	4,0%	100,0%	0	0,0%	100,0%	0
9,5 (3/8")	75	295,3	89,8	10	13,3%	13,3%	63	84,0%	97,3%	2	2,7%	100,0%	0	0,0%	100,0%	0
4,75 (#4)	75	293,8	106,8	16	21,3%	21,3%	57	76,0%	97,3%	2	2,7%	100,0%	0	0,0%	100,0%	0

Sphericity																
Size	Particles in Range	Average	Standard Deviation	Low (≤ 0,5)		(≤ 0,5)	Moderate (0,5 - 0,6)		(≤ 0,6)	High (0,6 - 0,8)		(≤ 0,8)	Extreme (0,8 - 1,0)		(≤ 1,0)	Out of Range
				#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#
37,5 (1,5")																
25,0 (1,0")																
19,0 (3/4")	56	0,76	0,07	0	0,0%	0,0%	2	3,6%	3,6%	41	73,2%	76,8%	13	23,2%	100,0%	0
12,5 (1/2")	75	0,72	0,10	0	0,0%	0,0%	11	14,7%	14,7%	51	68,0%	82,7%	13	17,3%	100,0%	0
9,5 (3/8")	75	0,69	0,09	2	2,7%	2,7%	8	10,7%	13,3%	57	76,0%	89,3%	8	10,7%	100,0%	0
4,75 (#4)	75	0,65	0,11	6	8,0%	8,0%	23	30,7%	38,7%	39	52,0%	90,7%	7	9,3%	100,0%	0

Flat and Elongated Distribution												
Size	Particles in Range	L/S ≥ 1:1		L/S > 2:1		L/S > 3:1		L/S > 4:1		L/S > 5:1		Out of Range
		#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#
37,5 (1,5")												
25,0 (1,0")												
19,0 (3/4")	56	56	100,0%	17	30,4%	1	1,8%	0	0,0%	0	0,0%	0
12,5 (1/2")	75	75	100,0%	32	42,7%	9	12,0%	2	2,7%	0	0,0%	0
9,5 (3/8")	75	75	100,0%	46	61,3%	5	6,7%	1	1,3%	1	1,3%	0
4,75 (#4)	75	75	100,0%	50	66,7%	17	22,7%	5	6,7%	1	1,3%	0

Flat or Elongated Distribution												
Size	Particles in Range	F or E ≥ 1:1		F or E >2:1		F or E >3:1		F or E >4:1		F or E >5:1		Out of Range
		#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#
37,5 (1,5")												
25,0 (1,0")												
19,0 (3/4")	56	56	100,0%	4	7,1%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0
12,5 (1/2")	75	75	100,0%	9	12,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0
9,5 (3/8")	75	75	100,0%	9	12,0%	1	1,3%	0	0,0%	0	0,0%	0
4,75 (#4)	75	75	100,0%	25	33,3%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0

CAAT														
Size	Particles in Range	Average	Standard Deviation	Low (≤ 3050)		Moderate(3050-6987,5)		High(6987,5-10200)		Extreme(10200-15000)		Out of Range		
				#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	
37,5 (1,5")														
25,0 (1,0")														
19,0 (3/4")	56	4606,5	1020,8	4	7,1%	51	91,1%	1	1,8%	0	0,0%	0	0,0%	0
12,5 (1/2")	75	4342,7	891,9	4	5,3%	71	94,7%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0
9,5 (3/8")	75	4428,1	1051,7	4	5,3%	70	93,3%	1	1,3%	0	0,0%	0	0,0%	0
4,75 (#4)	75	4383,2	1066,4	6	8,0%	67	89,3%	2	2,7%	0	0,0%	0	0,0%	0

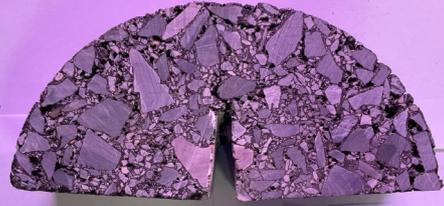
APÊNDICE B
CORPOS DE PROVA ROMPIDOS SCBT

- MAC

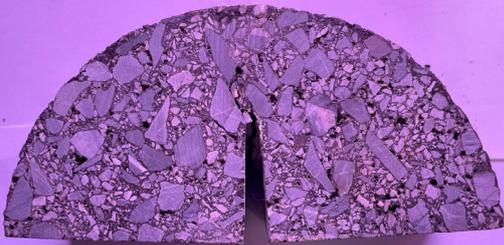




MAC 23



MAC 24



MAC 31



MAC 32



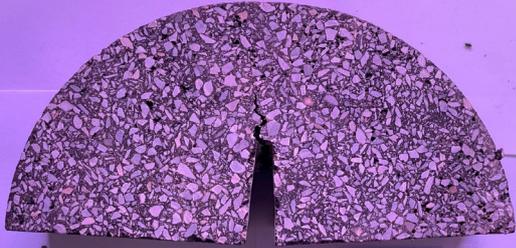
MAC 33



MAC 34

- MAF





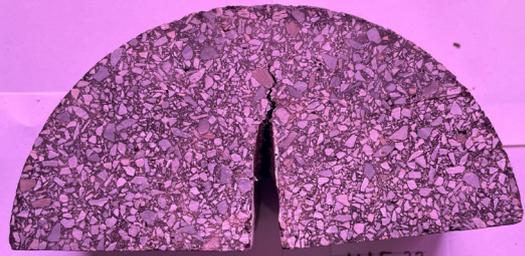
MAF 23



MAF 24



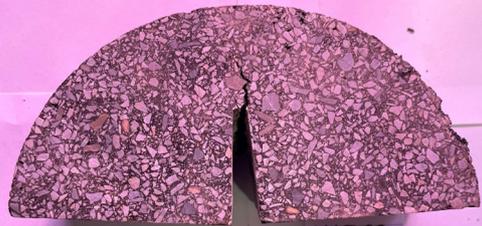
MAF 31



MAF 32



MAF 34



MAF 33