



UM GERADOR DE AMOSTRAS VIRTUAIS DE MISTURAS ASFÁLTICAS:
DESENVOLVIMENTO E APLICABILIDADE EM SIMULAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Diego Arthur Hartmann

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Francisco Thiago Sacramento
Aragão.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

UM GERADOR DE AMOSTRAS VIRTUAIS DE MISTURAS ASFÁLTICAS:
DESENVOLVIMENTO E APLICABILIDADE EM SIMULAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Diego Arthur Hartmann

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA
DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Francisco Thiago Sacramento Aragão, Ph.D.

Prof^a. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr.

Eng. Luis Alberto Herrmann do Nascimento, Ph,D.

Prof. Yong-Rak Kim, Ph,D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2017

Hartmann, Diego Arthur

Um gerador de amostras virtuais de misturas asfálticas: desenvolvimento e aplicabilidade em simulações microestruturais / Diego Arthur Hartmann. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVIII, 124 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Francisco Thiago Sacramento Aragão

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 110-124.

1. Misturas asfálticas. 2. Modelos constitutivos. 3 Modelagem numérica microestrutural. I. Aragão, Francisco Thiago Sacramento. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais e meu irmão, que vêm me suportando (interpretação livre) ao longo destes anos.

O processo de doutoramento foi longo, penoso e desgastante. Muitas vezes ao longo desta jornada, nem me encontrava plenamente capaz de perceber diretamente as tácitas dificuldades e apenas as notava a partir dos olhares de comiseração que recebia de meus amigos mais próximos. Toda esta negatividade vivida em *alguns* momentos do doutoramento foi, porém, completamente dissipada pelo sentimento de alívio alcançado ao receber a aprovação do trabalho.

Sem dúvida alguma, é fato incontestável, que de todas as lições encontradas no processo de doutoramento, a que mais levarei para a vida é exatamente a que por muitas vezes me fez esquecer das dificuldades relacionadas a ele: as amizades.

Também agradeço aos grandes amigos (em ordem alfabética sem indicação de preferência):

Abraham, pela companhia diária de almoço e pesquisa, tornamo-nos grandes amigos;

Alan, Leandro, Rodrigo e Washington, pelas inúmeras ajudas no laboratório e risadas compartilhadas;

Alex, por me auxiliar nos modelos matemáticos, simulações, entre tantas outras coisas;

Andrea, Bel, Cristiano, Dimas, Ederli, Jaelson, João, Pedro, Rafaela, Ricardo, Saulo, amigos da Rua Cambucá que levarei para a vida;

Carmen e Yanneth, companheiras de sala, de trilhas, passeios e tantos outros momentos de descontração;

Carol, Esther, Gabriel, Isadora, Julio, Liliana, Luiza, Marcelo, Mylenna, Patrícia, Salam, Silvana, Thaisa, amigos de laboratório que em diversos momentos trocamos experiências fundamentais para o desenvolvimento desta tese, de algum modo ou de outro;

Cayto, desde a graduação tendo discussões muito filosóficas e que no doutorado não foi nada diferente (só piorou);

Gustavo, por me auxiliar na realização dos muitos ensaios. Muitos mesmos;

Marcela, que inicialmente tinha medo de mim (?) mas que acabamos nos tornando bons amigos;

Mauro, que por ser parecido comigo, trocamos ótimos dias de silêncio juntos, até que alguém nos apresentou;

Raquel, grandessíssima amiga que tive oportunidade de conhecer, obrigado pelos almoços diários, pelas diversas conversas sobre a vida o universo e tudo o mais, e especialmente, pelas gargalhadas;

Tamile, pelo companheirismo, paciência e pelos ótimos momentos vividos juntos ao longo destes anos. Sem dúvida foi essencial para esta conquista;

Thiago, pela orientação e por acreditar na minha capacidade, por muitas vezes até mais do que eu mesmo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UM GERADOR DE AMOSTRAS VIRTUAIS DE MISTURAS ASFÁLTICAS:
DESENVOLVIMENTO E APLICABILIDADE EM SIMULAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Diego Arthur Hartmann

Dezembro/2017

Orientador: Francisco Thiago Sacramento Aragão

Programa: Engenharia Civil

Misturas asfálticas são materiais compósitos onde partículas de diversas dimensões encontram-se dispersas em uma matriz composta de ligante asfáltico, agregados finos, vazios e aditivos. Diversos ensaios laboratoriais são necessários para compreender e controlar a qualidade destas misturas, porém, laboratorialmente, o estudo das interações microestruturais das misturas não é tão elementar. Neste sentido, neste trabalho buscou-se desenvolver um gerador de amostras asfálticas virtuais representativas de misturas asfálticas reais, utilizando imagens de agregados reais obtidos a partir de imageamento digital na geração das amostras. Diversas amostras virtuais geradas foram utilizadas em simulações numéricas de elementos finitos que replicassem ensaios laboratoriais de parâmetros como módulo dinâmico e de fratura; os resultados foram, então, comparados a ensaios reais. Foi verificada uma semelhança adequada entre os resultados, indicando que o gerador desenvolvido pode vir a se tornar uma boa ferramenta na análise e projeto de misturas asfálticas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A VIRTUAL ASPHALT MIXTURE SAMPLE GENERATOR: DEVELOPMENT AND
APPLICABILITY IN MICROSTRUCTURAL SIMULATIONS

Diego Arthur Hartmann

December/2017

Advisor: Francisco Thiago Sacramento Aragão

Department: Civil Engineering

Asphalt mixtures are composite materials where particles with varied dimensions are dispersed in a matrix composed of binder, fine and coarse aggregates, voids and additives. Nowadays, several laboratory tests are necessary to understand and control the asphalt mixture quality, however, the microstructural interactions are not so readily accessed in the laboratory. In this sense, this work sought the development of a virtual asphaltic sample generator, capable of generating representative asphalt mixture microstructures. The developed generator uses real aggregates images obtained through digital image sampling. Several virtual samples were generated and used in finite element simulations prepared to replicate real laboratory testing, such as dynamic module and fracture. Simulation results were compared to laboratory data. Results indicated a good agreement between virtual and real asphalt samples, indicating the developed generator has the potential to become a good tool for the analysis and design of asphalt mixtures.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo geral	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
1.2. Estrutura e descrição dos capítulos	3
2. Revisão da literatura	4
2.1. Matriz de agregados finos.....	6
2.2. Microestruturas	10
2.2.1. Definição	10
2.2.2. Obtenção de microestruturas	11
2.2.3. Geração virtual.....	17
2.2.4. Elemento de volume representativo	20
2.3. Mecânica da fratura	21
2.3.1. Base teórica	21
2.3.2. Mecânica da fratura linear elástica (MFLE)	23
2.3.3. Modelos de zona coesiva	27
3. Materiais e métodos	30
3.1. Desenvolvimento do gerador	30
3.1.1. Concepção	30
3.1.2. Processo simplificado de geração de microestrutura virtual	32
3.1.3. Detalhamento do mecanismo de geração	37
3.2. Desenvolvimento do código dependente de temperatura e taxa de aplicação de carga	47
3.2.1. Breve histórico da implementação.....	47

3.2.2. Visão geral da implementação em elementos finitos de ARAGÃO (2011)....	47
3.2.3. Código dependente da taxa e da temperatura.....	51
3.3. Programa experimental e numérico	52
3.3.1. Dosagem do concreto asfáltico	52
3.3.2. Dosagem da MAF	56
3.3.3. Determinação de propriedades dos agregados	57
3.3.4. Determinação de propriedades viscoelásticas lineares das MAFs.....	59
3.3.5. Módulo dinâmico uniaxial	61
3.3.6. Fratura em ensaios de flexão biapoiados	66
4. Resultados	75
4.1. Dosagens e propriedades básicas dos materiais	75
4.1.1. Dosagens das misturas de concreto asfáltico.....	75
4.1.2. Dosagem das MAFs	75
4.1.3. Agregados.....	76
4.1.4. MAF	76
4.2. Gerador de microestruturas desenvolvido.....	78
4.2.1. Verificação	78
4.2.2. Validação	90
4.3. Modelagem do processo de fratura em misturas asfálticas.....	94
4.3.1. Verificação	94
4.3.2. Validação	96
4.3.3. Análise paramétrica das equações.....	103
5. Conclusões	107
5.1. Sugestões para pesquisas futuras	109
Bibliografia	110

Lista de Figuras

Figura 2.1: Representação visual da MAF	7
Figura 2.2: Esquema do molde de preparação de amostras MAF (adaptado de KIM <i>et al.</i> , 2003).....	8
Figura 2.3: Método de dosagem proposto por COUTINHO (2012).	9
Figura 2.4: Método de dosagem de MAF proposto por SOUZA <i>et al.</i> (2013).	9
Figura 2.5: Definição de micro- e macro- estrutura adotada neste trabalho.	11
Figura 2.6: Exemplo do processo de obtenção de microestruturas por escaneamento.....	13
Figura 2.7: Tecnologia de tomografia tridimensional (adaptado de WANG, 2010).	14
Figura 2.8: Microestrutura de uma fatia de concreto obtida através de microtomografia com dois níveis de resolução (ZHU e YVONNET, 2015).....	15
Figura 2.9: Resultados tridimensionais de tomografia com raios-X (adaptado de WANG, 2010).....	15
Figura 2.10: Metodologia de seccionamento serial.	17
Figura 2.11: Fluxograma do processo de geração de microestruturas desenvolvido por Javaherian (adaptado de JAVAHERIAN, 2011).	19
Figura 2.12: Três modos de fratura.....	22
Figura 2.13: Efeito da espessura na magnitude de KIC (adaptado de MACHADO, 2012).....	24
Figura 2.14: Distribuição das tensões na região da ponta da trinca (FORTES, 2003).....	25
Figura 2.15: Esquemática das zonas na região da ponta da trinca.....	26
Figura 2.16: Singularidade de tensões na ponta da trinca.	26
Figura 2.17: Modelo de zona coesiva: (a) amostra com detalhe da zona coesiva; (b) representação da zona coesiva.	28
Figura 2.18: Exemplos de curvas de tração-separação.	29

Figura 2.19: Modelo de zona coesiva bilinear (adaptado de ARAGÃO, 2011).	29
Figura 3.1: Equipamento AIMS2 da UFRJ.	31
Figura 3.2: Interface do gerador de microestruturas desenvolvido pelo autor nesta tese.	32
Figura 3.3: Exemplos de microestruturas com diferentes frações de área.	33
Figura 3.4: Definição da orientação das partículas.	33
Figura 3.5: Exemplos de controle de orientação.	34
Figura 3.6: Exemplo de distribuição de orientação.	34
Figura 3.7: Seletor de banco de dados.	35
Figura 3.8: Interface do gerador após microestrutura ter sido gerada.	36
Figura 3.9: Exemplo de microestrutura gerada.	36
Figura 3.10: Visualização da imagem em um programa CAD.	37
Figura 3.11: Diagrama de blocos do processo de geração.	38
Figura 3.12: Exemplo de imagem raster (a) e vetor (b).	39
Figura 3.13: Definição do ângulo de simplificação.	40
Figura 3.14: Exemplo de número de vértices versus grau de simplificação.	41
Figura 3.15: Exemplificação do algoritmo <i>ray casting</i> .	42
Figura 3.16: Conceito de diâmetro de Feret.	44
Figura 3.17: Exemplo de redimensionamento forçado de agregados.	45
Figura 3.18: Elemento coesivo de quatro nós (adaptado de SONG, 2006).	48
Figura 3.19: Esquema geral dos ensaios realizados.	52
Figura 3.20: Granulometrias das misturas asfálticas utilizadas.	54
Figura 3.21: Misturador mecânico da COPPE utilizado nesta tese.	55
Figura 3.22: Compactador giratório Superpave da COPPE utilizado nesta tese.	55
Figura 3.23: Esquema do processo de indentação.	58

Figura 3.24: Lixamento da amostra de agregado para indentação.	58
Figura 3.25: Amostra preparada para indentação.....	59
Figura 3.26: (a) extração de amostras MAF (b) amostras sendo ensaiadas no DSR.	60
Figura 3.27: Pulso de tensão <i>haversine</i> aplicado no ensaio de módulo dinâmico (adaptado de NASCIMENTO, 2008).	62
Figura 3.28: Representação do módulo complexo.....	62
Figura 3.29: Instalação dos LVDTs na amostra de módulo dinâmico (PAZOS, 2015).....	63
Figura 3.30: Exemplo de uma amostra de concreto asfáltico real digitalizada e vetorizada.	64
Figura 3.31: Esquema da simulação de módulo dinâmico realizada.....	66
Figura 3.32: Resumo do procedimento numérico experimental adotado neste trabalho.....	68
Figura 3.33: Geometria SCB utilizada.....	69
Figura 3.34: Amostra SCB preparada na prensa hidráulica para ensaio.....	70
Figura 3.35: Exemplo do guia metálico sendo utilizado para a centralização de uma amostra.	71
Figura 3.36: Amostra de CBUQ preparada e ensaiada na câmara térmica.....	72
Figura 3.37: Ajuste da expressão matemática para representar as curvas de força-deslocamento dos ensaios laboratoriais.....	74
Figura 3.38: Exemplo de comparação de resultados experimentais e numéricos.	74
Figura 4.1: Curvas mestras de 25°C de módulo de cisalhamento dinâmico da MAFs G1, G2, G3 e G4.....	77
Figura 4.2: Curvas mestras a -10, 10 e 25°C de módulo de cisalhamento dinâmico da MAF M1.	77
Figura 4.3: Microestruturas idealizadas com diferentes orientações de partículas: (a b c) 0°; (d e f) 45°; e (g h i) 90°.....	80

Figura 4.4: Amostras virtuais de MAF com características volumétricas variadas.	81
Figura 4.5: Comparação entre granulometria especificada e gerada no gerador de microestruturas.	83
Figura 4.6: Microestruturas asfálticas virtuais: (a) três imagens obtidas a partir de amostras laboratoriais reais; e (b) orientações das partículas das imagens.	85
Figura 4.7: Quatro microestruturas virtuais de concreto asfáltico: (a) e (b) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 86% (duas réplicas); (c) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 66%; (d) granulometria 2 e fração de área dos agregados de 86%.	87
Figura 4.8: Resultados de módulo dinâmico à 21°C de amostras virtuais.....	89
Figura 4.9: Distribuição das tensões nas microestruturas de quatro amostras virtuais de asfalto: (a) e (b) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 86% (duas réplicas); (c) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 66%; (d) granulometria 2 e fração de área dos agregados de 86%.	90
Figura 4.10: Tratamento de digitalização da microestrutura G1.....	91
Figura 4.11: Resultados experimentais e numéricos da mistura G1 à 25°C.....	92
Figura 4.12: Resultados experimentais e numéricos da mistura G2 à 25°C.....	92
Figura 4.13: Resultados experimentais e numéricos da mistura G3 à 25°C.....	93
Figura 4.14: Microestrutura da mistura G4 gerada.....	93
Figura 4.15. Resultados experimentais e numéricos da mistura G4 à 21,1°C..	94
Figura 4.16: Problema simulado para a verificação do código implementado..	95
Figura 4.17: Verificação do código implementado neste trabalho considerando diferentes temperaturas e (a) modo I; (b) modo II; (c) modo misto de fratura.	96
Figura 4.18: Amostra SCB gerada com o gerador desenvolvido.....	97
Figura 4.19: Amostra SCB de CBUQ com malha preparada.....	97
Figura 4.20: Comparação entre ensaios e simulações numéricas a 17°C utilizando propriedades de fratura calibradas para 17°C e 0,5 mm/min.....	99

Figura 4.21: Comparação entre ensaios e simulações numéricas a 0,5 mm/min utilizando propriedades de fratura calibradas para 17°C e 0,5 mm/min.....	99
Figura 4.22: Ajuste de curvas de fratura a 10°C.	101
Figura 4.23: Ajuste de curvas de fratura a 17°C.	101
Figura 4.24: Ajuste de curvas de fratura a 25°C.	102
Figura 4.25: Distribuição das tensões (Von Mises) em uma amostra SCB ao fim de uma simulação de ensaio de fratura de concreto asfáltico.	103
Figura 4.26: Resultados da análise paramétrica a 10 °C.	105
Figura 4.27: Resultados da análise paramétrica a 17 °C.	105
Figura 4.28: Resultados da análise paramétrica a 25 °C.	106

Lista de Símbolos

- Símbolos

u_M^n	deslocamento global do nó n
G_c	energia de fratura máxima
G_c^0	energia de fratura máxima na taxa de referência
T_{\max}	resistência coesiva máxima
T_{\max}^0	resistência coesiva máxima na taxa de referência
$\dot{\lambda}_0$	taxa de expansão do elemento coesivo
$\bar{\delta}_n$	vetor de deslocamento relativo local
$\bar{\delta}_t$	vetor de deslocamento relativo local
\bar{u}	vetor de deslocamentos globais
\bar{f}	vetor de força
\bar{t}	vetor de tração
P_b	teor de ligante
V_v	volume de vazios
ζ_T, ζ_G	parâmetros do modelo de fratura
$ G^* $	módulo de cisalhamento dinâmico
C	matriz do módulo tangente
d	ângulo de fase
E	módulo de Young
E^*	módulo complexo
E'	módulo de armazenamento
E''	módulo de perda

G'	módulo cisalhante de armazenamento
G_{∞}	módulo de equilíbrio a um tempo longo de carregamento
G_b	massa específica do ligante
G_i	constantes de mola do modelo generalizado de Maxwell
G_{mm}	Massa específica máxima
$G_{sbgraúdos}$	massa específica dos graúdos
$G_{sbmiúdos}$	massa específica dos miúdos
J_0	matriz jacobiana entre as coordenadas originais e isoparamétricas
K	fator de intensidade de tensões
K	matriz de rigidez tangente
K_C	fator crítico de intensidade de tensões
K_{IC}	fator crítico de intensidade de tensões em modo I
L	matriz de operadores para definir os deslocamentos relativos δ_x e δ_y entre os nós do topo e da base de cada elemento coesivo
N	matriz das funções de forma
n	número de unidades de Maxwell no modelo generalizado de Maxwell
N_1, N_2	funções de forma
N_{final}	número de giros final
$N_{inicial}$	número de giros inicial
P_{b4}	teor de ligante do grupo 4 da dosagem MAF
p_i	tempo de relaxação
R	matriz dos cossenos direcionais
S	rigidez e contato
T_{cr}	tração normal crítica
T_n	tração normal

T_t	tração de cisalhamento
V_s	volume de sólidos
W_{Ai}	massa do grupo de dosagem MAF
W_{mi}	massa do grupo de dosagem MAF
W_p	massa do recipiente de dosagem MAF
α	ângulo entre o prolongamento de um segmento de reta e outro segmento de reta qualquer
α_{simp}	ângulo de simplificação
β	ângulo formado entre o plano de maior dimensão do agregado e o plano das abcissas
ε_0	pico de deformação
θ	ângulo entre os sistemas de coordenadas global e local
Θ	temperatura atual
Θ_0	temperatura de referência
Θ_m	temperatura característica
ν	coeficiente de Poisson
σ_0	pico de tensão
ω	frequência angular

- Siglas

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

AIMS 2 - Aggregate Imaging Measurement System

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAD - Computer-Aided Design

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CGS - Compactador Giratório Superpave

CMOD - *Crack Mouth Opening Displacement*

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CTOD - *Crack Tip Opening Displacement*

DC(T) - *Disk-Shaped Compact Tension*

DEM - *Discrete Element Method*

DF - Diâmetro de Feret

DIC - *Digital Image Correlation*

DSR - *Dynamic Shear Rheometer* (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico)

DXF - *Drawing Exchange Format*

FA - Fração de Área

GPL - *General Public License*

GR - Granulometria

IDT - *Indirect Tension Test*

LCPC - *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LVDTs - *Linear Variable Differential Transformer*

MAF - Matriz de Agregados Finos

MaxDF - Máximo Diâmetro de Feret

MEF - Método dos Elementos Finitos

MFLE - Mecânica da Fratura Linear Elástica

MinDF - Mínimo Diâmetro de Feret

PG - *Performance Grade*

PIP - *Point in Polygon*

PNG - *Portable Network Graphics*

RVE - *Representative Volume Element*

SCB - *Semicircular Bending*

SEB - *Single-edge Notched Beam*

TIF - *Tagged Image Files*

UEL - *User Element Subroutine*

UFRJ - *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

1. INTRODUÇÃO

Materiais compósitos consistem de uma combinação de dois ou mais materiais constituintes, com propriedades físicas e/ou químicas significativamente diferentes, resultando em um material com características distintas daquelas dos seus constituintes. Na engenharia civil moderna, estes materiais são amplamente utilizados. Diversos ensaios de laboratório foram e vêm sendo desenvolvidos e adotados por agências para fins de controle de qualidade e/ou avaliação de desempenho.

De modo complementar, diversos estudos almejam utilização de modelagem numérica para prever o comportamento microestrutural de materiais compósitos por meio de simulações numéricas. Assim, ao considerar cada constituinte individualmente e com suas devidas propriedades, esta metodologia é capaz de prever o comportamento do material compósito de modo mais eficiente e mais econômico do que as metodologias tradicionais, baseadas puramente em procedimentos experimentais.

Para que esta metodologia seja bem-sucedida, é fundamental que informações microestruturais – tais como: propriedades mecânicas, distribuição espacial e orientação dos constituintes – sejam fornecidas ao modelo de forma apropriada.

A obtenção de microestruturas a partir de amostras reais é um processo relativamente complexo e diversas técnicas estão à disposição na literatura para este fim. Em uma destas técnicas, utilizada em diversos estudos, uma amostra é serrada e a face revelada é escaneada, obtendo-se uma microestrutura a partir da amostra real. Porém, estes procedimentos são geralmente complicados e de custo elevado.

Deste modo, buscando alternativas para superar as limitações práticas das metodologias clássicas de obtenção de amostras virtuais, diversos autores vêm buscando o desenvolvimento de geradores de microestruturas. Estes geradores são baseados em procedimentos puramente computacionais e dependem de dados de entrada que geralmente envolvem características volumétricas e geométricas dos constituintes. Como desvantagem, estes parâmetros de entrada geralmente seguem definições pré-definidas pelos programas, o que torna a representatividade das microestruturas limitada,

dificultando, assim, que a geometria dos constituintes esteja de acordo com o material real.

Deste modo, esta pesquisa tem como proposta o desenvolvimento de um gerador de microestruturas capaz de fabricar amostras virtuais de concreto asfáltico sem as limitações impostas pelos métodos de geração usuais. O gerador desenvolvido utiliza imagens reais de partículas de agregados, aumentando a representatividade geométrica das partículas das amostras virtuais, sem a necessidade de um processo adicional de geração das partículas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um gerador bidimensional de amostras virtuais que utilize imagens de partículas reais de agregados.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Desenvolver um gerador bidimensional de microestruturas que considere parâmetros tipicamente usados em processos de dosagem de misturas asfálticas em laboratório, além de características como a orientação dos agregados e da consideração explícita de vazios;
- Verificar a implementação do gerador;
- Validar e demonstrar a aplicabilidade do programa a partir da comparação entre simulações de amostras virtuais e resultados de ensaios de laboratório correspondentes.

1.2. ESTRUTURA E DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo eles Introdução, Revisão da literatura, Materiais e métodos, Resultados, e Conclusões.

O capítulo 2, de revisão da literatura, apresenta uma sucinta abordagem sobre modelagem microestrutural e mecânica da fratura.

Em seguida, o capítulo 3 descreve os materiais empregados e os métodos utilizados na realização desta pesquisa, apresentando inicialmente a idealização do gerador de microestruturas seguida do modelo de fratura estudado e dos ensaios de caracterização dos materiais usados na validação.

Os resultados são apresentados e discutidos no capítulo 4. Inicialmente, faz-se uma breve descrição dos resultados relacionados à implementação do gerador de microestruturas; em seguida, são mostrados resultados das simulações de ensaios reais, conduzidos em laboratório.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões sobre os estudos realizados e inclui sugestões para trabalhos futuros.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento deste estudo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Em um projeto estrutural de um pavimento, busca-se determinar as dimensões mínimas que tornem o conjunto durável, suportando diversas condições climáticas e de carga. Para tornar isto possível, engenheiros rodoviários e pesquisadores vêm buscando desenvolver técnicas e ensaios de laboratório que sejam capazes de reproduzir o comportamento dos materiais de pavimentação no laboratório. Diversos equipamentos estão disponíveis e tornam possível que engenheiros e pesquisadores estudem o comportamento dos materiais de pavimentação com grande acurácia e precisão, em um ambiente laboratorial, com diversos graus de controle, como temperatura, magnitude e taxa de carregamento, umidade, entre outros.

Porém, frequentemente são necessárias múltiplas amostras para a caracterização dos materiais em laboratório, o que resulta em grandes quantidades de material a serem mobilizadas ou grande esforço para obter as amostras em campo. Assim, cresce rapidamente o interesse por metodologias alternativas de determinação de propriedades de misturas asfálticas, que gerem economia significativa de tempo e custos.

Entre estas alternativas, modelos preditivos que consideram características individuais dos constituintes das misturas vêm ganhando espaço nos últimos anos na literatura. Um clássico exemplo deste tipo de modelo é o desenvolvido por Witczak, que após foi incorporado na primeira versão do *Mechanistical-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), o qual considerava variáveis de entrada, como propriedades volumétricas da mistura, granulometria, viscosidade do ligante e frequência da carregamento na previsão do módulo dinâmico. O modelo foi posteriormente revisado para incorporar propriedades atualizadas como módulo dinâmico cisalhante e ângulo de fase de ligantes (ANDREI *et al.*, 1999; BARI e WITCZAK, 2006; ARAGÃO, 2012).

Apesar de atraentes pela sua razoável simplicidade, métodos empíricos possuem importantes limitações. São criados essencialmente a partir da análise estatística de dados acumulados em experimentos realizados ao longo de um determinado período de tempo em regiões pré-selecionadas. Isso faz com que o seu escopo seja limitado a misturas e condições climáticas com características semelhantes às consideradas no desenvolvimento dos modelos.

Visando superar esta limitação, pesquisadores vêm desenvolvendo modelos micromecânicos que permitem a determinação de soluções mais universais. Para isto, variáveis como as características individuais dos constituintes e suas proporções volumétricas na mistura precisam ser consideradas. Modelos micromecânicos vêm sendo desenvolvidos há aproximadamente 100 anos, sendo que os primeiros modelos datam desde o século XIX, como os trabalhos de VOIGT (1887, 1889). Outros trabalhos primordiais são os de EINSTEIN (1905), REUSS (1929) e HASHIN (1962, 1965). Todos estes modelos foram desenvolvidos com propósitos diversos, para diferentes tipos de materiais compósitos.

Apesar de modelos analíticos micromecânicos representarem um grande avanço científico, o uso destes modelos em misturas asfálticas é muito restrito, devido ao seu comportamento complexo e à heterogeneidade do material, sendo necessárias diversas simplificações geométricas.

Com o avanço da capacidade de processamento computacional, métodos de elementos finitos (MEF) e de elementos discretos (DEM) ganharam maior visibilidade, tornando possível a obtenção de uma solução mais aproximada destes problemas complexos. Buscando melhor compreender os efeitos dos componentes individuais e suas interações nas misturas asfálticas, diversos pesquisadores (BUTTLAR e YOU, 2001; MASAD *et al.*, 2002; PAPAGIANNAKIS *et al.*, 2002; SADD *et al.*, 2003; SOARES *et al.*, 2003; YOU e BUTTLAR, 2004, 2005, 2006; ABBAS *et al.*, 2005; DAI *et al.*, 2005; KIM e BUTTLAR, 2005; DAI e YOU, 2007; ARAGÃO *et al.*, 2009, 2010; YOU *et al.*, 2009; ARAGÃO e KIM, 2010; KIM *et al.*, 2010, JAVAHERIAN, 2011; KIM e ARAGÃO, 2013, HARTMANN *et al.*, 2014, ARAGÃO *et al.*, 2015, ARAGÃO *et al.*, 2017) vêm utilizando modelos microestruturais computacionais. Diferente de outras metodologias, a modelagem microestrutural permite uma análise detalhada da contribuição de cada constituinte da mistura.

A modelagem computacional microestrutural vem sendo cada vez mais adotada como uma ferramenta eficiente para a previsão do comportamento mecânico de misturas asfálticas (PAPAGIANNAKIS *et al.*, 2002; DAI e YOU, 2007; ARAGÃO, 2011). Trabalhos recentes sobre modelagem microestrutural de misturas asfálticas geralmente consideram

o material composto por duas partes principais: agregados graúdos e matriz de agregados finos (MAF). A MAF engloba um conjunto de constituintes, como o ligante asfáltico, os agregados miúdos, materiais de enchimento e os vazios preenchidos por ar. Atualmente, identifica-se este constituinte como de grande importância na caracterização da deformabilidade e dano de misturas asfálticas. Em ensaios de fratura, por exemplo, diversos autores reportaram que, em temperaturas intermediárias, as misturas tendem a fraturar essencialmente na MAF, sendo que os agregados graúdos geralmente mantêm-se intactos. Assim, diversos pesquisadores propõem técnicas para a caracterização de propriedades e características de dano de misturas MAF, que são, então, incorporadas nos modelos microestruturais na forma de parâmetros de entrada (CARO *et al.*, 2008; CASTELO BRANCO, 2008; ARAGÃO *et al.*, 2011; IZADI *et al.*, 2011).

Deste modo, a adequada determinação das propriedades desta fase cimentícia é de fundamental importância para a previsão das respostas mecânicas do concreto asfáltico. Neste sentido, diversos trabalhos propõem metodologias para dosagem de misturas MAF na tentativa de representar de forma realista características da matriz quando esta é considerada como apenas uma fase do compósito (KARKI, 2010; COUTINHO, 2012; SOUZA *et al.*, 2013).

Esta revisão bibliográfica busca: apresentar as principais metodologias existentes para a dosagem de misturas MAF, incluindo a utilizada neste trabalho; definir os conceitos relacionados às microestruturas e agrupar os principais métodos à disposição para obtenção das mesmas; e resumir as metodologias frequentemente empregadas em simulações computacionais de microestruturas.

2.1. MATRIZ DE AGREGADOS FINOS

Define-se a matriz de agregados finos como a parcela de uma mistura asfáltica composta pelo conjunto de agregados miúdos, filer e ligante asfáltico (CASTELO BRANCO, 2008), tendo seus primórdios em estudos realizados por KIM *et al.* (2003) na caracterização de dano por fadiga e potencial de regeneração de trincas. A Figura 2.1 apresenta a representação geral de uma MAF.

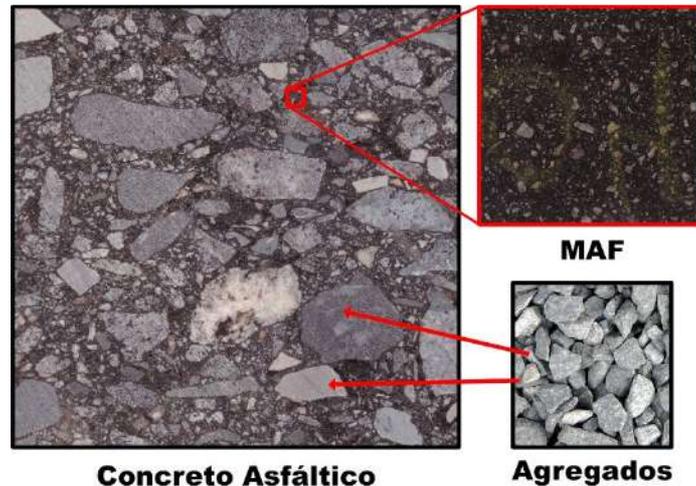


Figura 2.1: Representação visual da MAF.

De acordo com COUTINHO (2012), o dano por fadiga nas misturas asfálticas tipicamente inicia-se na MAF. ZOLLINGER (2005) avaliou a suscetibilidade ao dano por umidade de misturas de MAF, enquanto MASAD *et al.* (2007) caracterizaram as MAFs quanto ao dano por fadiga. Mais recentemente, ARAGÃO *et al.* (2014, 2017) utilizaram misturas de MAF em uma metodologia numérico-experimental para a caracterização de propriedades de fratura, utilizando múltiplas geometrias.

De acordo com ARAGÃO *et al.* (2017), a estrutura interna da MAF é mais uniforme do que aquelas de concretos asfálticos, o que faz com que os resultados de ensaios executados com uma MAF tendam a ter menor variabilidade. Ainda, como será melhor visto adiante no capítulo , a utilização de MAF em simulações numéricas de microestruturas traz diversas vantagens.

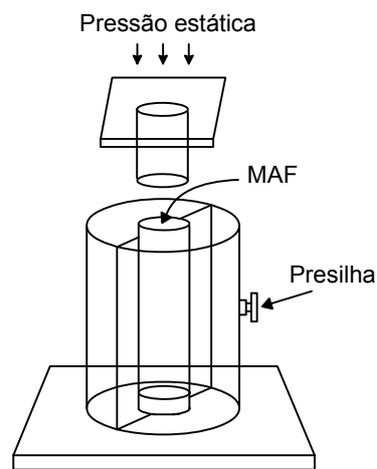
A dosagem de uma MAF ainda é foco de estudo e autores propõem diferentes metodologias de dosagem, porém sem ainda atingir um consenso quanto a uma metodologia definitiva.

KIM *et al.* (2003) propuseram um método de dosagem baseado em um percentual de ligante fixo em relação à massa da MAF. O valor de 8% de teor de ligante foi fixado arbitrariamente, partindo da suposição de que todos os agregados graúdos estariam cobertos por uma espessura constante de ligante de 10 μm . Os autores

definiram que agregados passantes na peneira #16 (1,18 mm) seriam pertencentes à fase da MAF e desenvolveram um compactador para a preparação de amostras cilíndricas de 12 mm de diâmetro e 50 mm de altura, próprias para serem ensaiadas no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). Esta metodologia de compactação é, porém, questionável, podendo resultar em MAFs que não sejam representativas das que de fato compõem misturas de concreto asfáltico.



(a) Molde para compactação de amostras



(b) Esquemática do molde

Figura 2.2: Esquema do molde de preparação de amostras MAF (adaptado de KIM *et al.*, 2003).

Já o método de dosagem de KARKI (2010) parte de uma dosagem puramente matemática e considera informações como densidades reais e efetivas e área de superfície específica dos agregados, densidade e espessura da película de ligante. Algumas dificuldades deste método de dosagem são as determinações da espessura da camada de ligante e da área superficial dos agregados finos.

COUTINHO (2012) propôs um método empírico baseado em ensaios de granulometria de agregados graúdos e miúdos e de extração de ligante (DNER-ME 053-94). Para tal, uma mistura de concreto betuminoso previamente dosada é preparada e posta na peneira #10 (2 mm). As porções retidas e passantes têm seu ligante extraído e o teor de cada porção é determinado. O teor de ligante na porção passante na peneira #10 é admitido como o teor de ligante da mistura MAF.

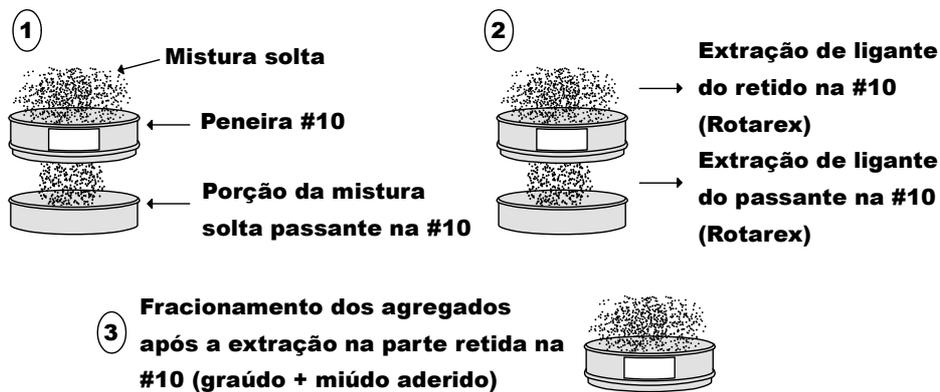


Figura 2.3: Método de dosagem proposto por COUTINHO (2012).

Por fim, o método proposto por SOUZA *et al.* (2013) segue o mesmo princípio de peneiramento do método de COUTINHO (2012), com os diferenciais de que três peneiras são utilizadas, levando a quatro porções de material, e que o teor de ligante das porções é obtido usando o forno de ignição. A base do método é a seguinte: a mistura de concreto asfáltico já dosada e preparada é separada, por peneiramento, com esferas metálicas, nas peneiras #4 (4,76 mm), #8 (2,36 mm) e #16 (1,18 mm), e o teor de ligante de cada uma das quatro porções é determinado no forno de ignição. O teor de ligante pertencente à última porção fica definido como o teor de ligante da MAF, conforme indicado na Figura 2.4.

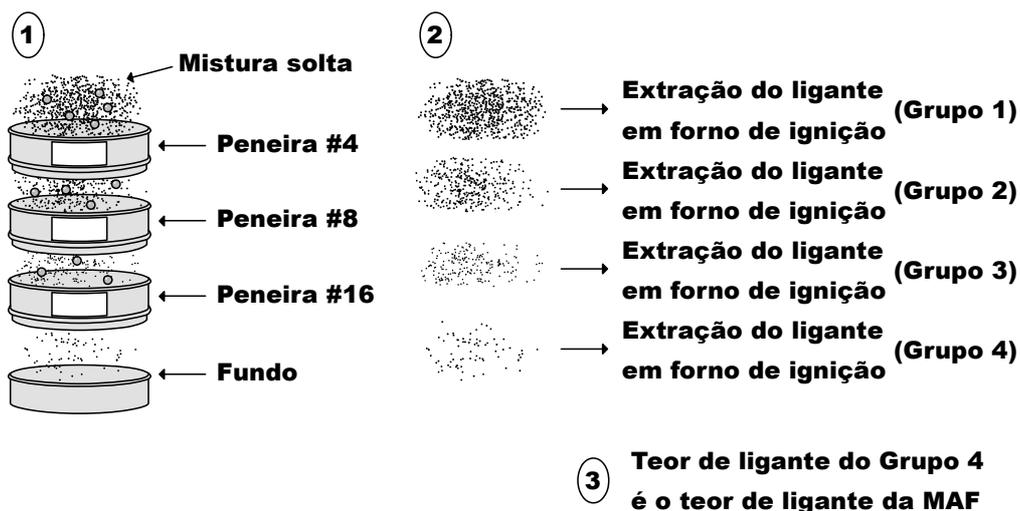


Figura 2.4: Método de dosagem de MAF proposto por SOUZA *et al.* (2013).

2.2. MICROESTRUTURAS

2.2.1. Definição

Das várias escalas estruturais, a microestrutura é, historicamente, uma das mais importantes para estudos de comportamentos de materiais (ABBASCHIAN *et al.*, 2009). As definições de micro- e macro- estruturas em misturas asfálticas diferem consideravelmente das definições utilizadas nas demais áreas do conhecimento como a metalurgia ou a biologia. Na realidade, o uso da palavra microestrutura em misturas asfálticas é um tema sinuoso, sendo tratado ao início desta revisão.

Diversos materiais podem ser considerados, quando visualizados a olho nu, como materiais contínuos, ou seja, sem espaços vazios. Como exemplos, citam-se o aço, o vidro, líquidos em geral, etc. Porém, se estes forem observados com suficiente ampliação, tornar-se-ão evidentes as estruturas existentes nestes materiais.

De acordo com ABBASCHIAN *et al.* (2009), metais são materiais policristalinos, sendo os cristais destes normalmente referenciados como grãos, que devido as suas pequenas dimensões só podem ser observados em microscópios ópticos capazes de aproximar cerca de 100 a 1000 vezes. Estruturas que necessitam deste grau de ampliação para se tornarem observáveis encaixam-se na classe denominada microestruturas. Estas estruturas possuem dimensões da ordem de um milionésimo de metro. Ainda, ABBASCHIAN *et al.* (2009) definem macroestruturas de materiais como sendo a parcela estrutural que pode ser observada tátil-visualmente.

Em se tratando de materiais compósitos em geral, HASHIN (1983) propôs que as dimensões típicas das regiões de fase, como os diâmetros das partículas, definem uma microescala. O conceito de um elemento de volume representativo, a ser tratado em mais detalhes a seguir, pode ser usado para a definição da miniescala. Já quando se considera o elemento como todo o corpo do material, fica definido como macroescala.

Quando o concreto asfáltico é tratado como um material contínuo composto de três microcontínuos, agregados, ligante e vazios, a microestrutura fica definida como sendo a distribuição e configuração destes três microcontínuos (WANG, 2010). Esta

definição impõe que a microestrutura de concreto asfáltico não fica limitada à visualização por meio de um microscópio, já que uma pessoa com a visão em plenas condições é capaz de distinguir agregados tão pequenos quanto retidos na peneira de menor dimensão considerada na dosagem de misturas asfálticas. Já HUANG e DI BENEDETTO (2015) decidem pela utilização da nomenclatura clássica, baseada na escala da estrutura.

Neste trabalho, optou-se pela utilização da nomenclatura definida por WANG (2010), ou seja, uma microestrutura asfáltica é uma estrutura na qual o ligante asfáltico, os agregados e os vazios[†] são considerados de maneira individual, cada um com características distintas. A Figura 2.5 apresenta um esquema ilustrativo desta definição.

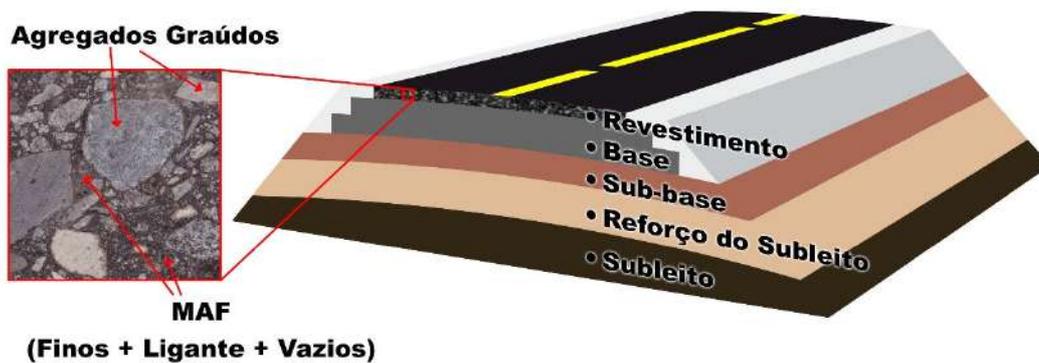


Figura 2.5: Definição de micro- e macro- estrutura adotada neste trabalho.

2.2.2. Obtenção de microestruturas

Uma das grandes vantagens da modelagem microestrutural é a possibilidade de considerar características das misturas asfálticas como heterogeneidade, vazios e propriedades geométricas. Porém, obter uma microestrutura representativa não é um processo trivial. Atualmente, as microestruturas são obtidas essencialmente de duas maneiras: (a) diretamente de uma amostra real, por escaneamento; (b) a partir da

[†] É comum a consideração de vazios na fase da MAF, por questões de simplificação computacional, como já mencionado.

geração de amostras virtuais por programas computacionais. Estes processos podem resultar em microestruturas tanto bidimensionais quanto tridimensionais.

Alguns autores reportaram desvantagens da utilização de modelos bidimensionais. YOU *et al.* (2008), por exemplo, indicaram que a rigidez da mistura é subestimada pelas simulações bidimensionais visto que estes modelos não levam em consideração o intertravamento das partículas. Apesar de tais limitações, muito pode ser aprendido a partir de simplificações bidimensionais de modelos tridimensionais. A modelagem bidimensional pode garantir uma melhor eficiência computacional, além de ser uma etapa necessária ao melhor entendimento do comportamento tridimensional do material. Algumas referências na literatura descrevem procedimentos de transformação de dados de misturas tridimensionais para suas correspondentes bidimensionais (KIM *et al.*, 2014). Para tal, características geométricas importantes como a granulometria, fração volumétrica e angularidade são necessárias.

Em geral, procedimentos correntes consideram as imagens de microestruturas como sistemas binários, diferenciando somente uma fase completamente preta (MAF) de outra completamente branca (agregados graúdos) (ARAGÃO *et al.*, 2010). Esta opção não permite a consideração explícita de vazios preenchidos por ar nas microestruturas. Os vazios são, então, considerados indiretamente, já que, durante a dosagem da MAF a partir de características volumétricas do concreto asfáltico correspondente, as amostras de MAF são confeccionadas de forma a incluir vazios.

2.2.2.1. Escaneamento de amostras serradas

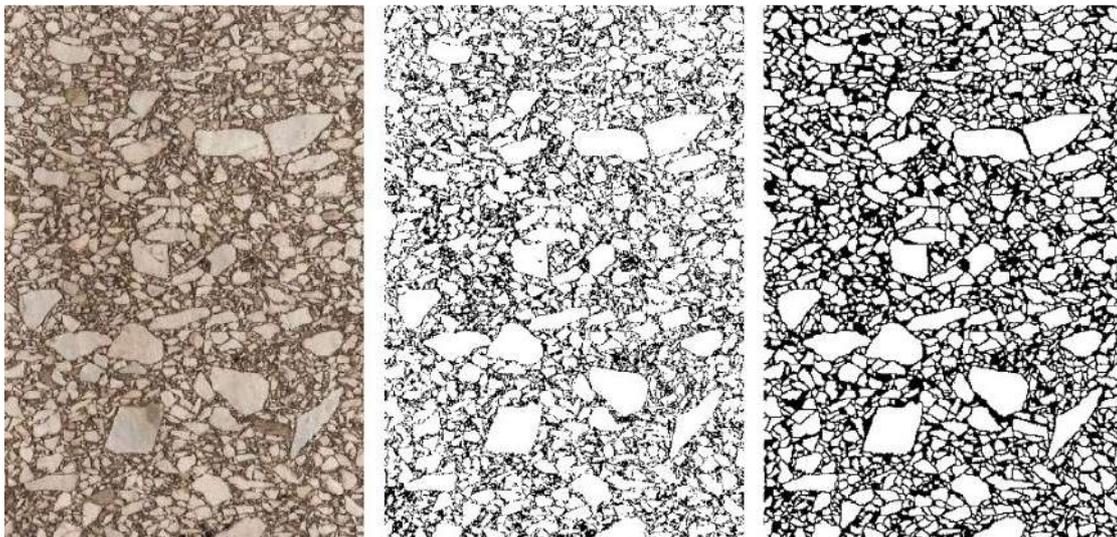
Uma prática comum para a obtenção de microestruturas, devido a sua acessibilidade, é o uso de escâneres de mesa para a obtenção de seções transversais de amostras de concreto asfáltico serradas.

O processo parte da confecção ou retirada de campo de amostras de concreto asfáltico. Estas amostras são, então, serradas em um plano que depende da análise a ser realizada – usualmente com uma serra circular –, e, então, digitalizadas por meio de um escâner de mesa.

Após a aquisição das imagens, estas são usualmente convertidas para arquivos binários, isto é, considera-se que a parcela referente à fase da MAF é puramente preta (1) e a parcela referente à fase dos agregados graúdos é puramente branca (0). Dependendo da mistura em uso, a conversão inicial para binário pode ser ignorada, geralmente sendo mais eficiente para misturas *gap-graded* como *Stone Matrix Asphalt* (SMA), visto que, durante a conversão, agregados de diferentes tamanhos podem se misturar, tornando complicado o delineamento posterior.

Quando utilizada, a conversão das imagens é seguida por um processo assistido por computador, no qual as partículas são delineadas manualmente. O processo é usualmente lento e tedioso, e altamente dependente das habilidades e da dedicação do usuário.

A Figura 2.6 apresenta um exemplo do processo de digitalização, onde a imagem (a) representa a amostra logo após a digitalização, a imagem (b) é a imagem (a) convertida para binário, e a imagem (c) é a imagem (b) tratada manualmente.



(a)

(b)

(c)

Figura 2.6: Exemplo do processo de obtenção de microestruturas por escaneamento.

Tendo em vista simplicidade do método, diversos pesquisadores (MASAD *et al.*, 1999; PAPAGIANNAKIS *et al.*, 2002; ARAGÃO *et al.*, 2009, 2010) optaram por utilizá-lo.

Porém, como mencionado, o tratamento é manual, o que consome muito tempo para o tratamento da imagem binária e o volume de vazios ainda precisa ser considerado indiretamente.

2.2.2.2. Tomografia raio-X

A tomografia por raios-X, muito utilizada na medicina, tem grandes aplicações nos estudos de microestruturas dos materiais, contudo, os altos custos relacionados a equipamentos limita, a abrangência deste tipo de escaneamento. Mesmo assim, diversos estudos vêm sendo realizados (BRAZ, 1997; WANG *et al.*, 2001; TASHMAN *et al.*, 2004; MASAD *et al.*, 2005; YOU *et al.*, 2009) utilizando a tecnologia para melhor compreender o comportamento dos materiais.

O escaneamento por tomografia vem de avanços obtidos na aplicabilidade de raios-X, que até então era utilizado apenas para obter imagens bidimensionais. Raios-X possuem enorme capacidade de penetração e podem transpassar sólidos como metais, rochas e misturas asfálticas. Ao penetrar um material, os raios-X são absorvidos ou refletidos de maneira diferente para diferentes materiais, resultando na atenuação da sua intensidade. Assim, ao se conhecer a intensidade antes e depois da penetração em um dado material, é possível determinar o tipo de material em estudo (WANG, 2010).

A Figura 2.7 apresenta um esquema de funcionamento geral de um equipamento de tomografia por raios-X. O equipamento consiste de um gerador de raios-X, de um colimador (controlador da dosagem de radiação), de uma placa que controla a rotação da amostra, e de um detector de raios-X.

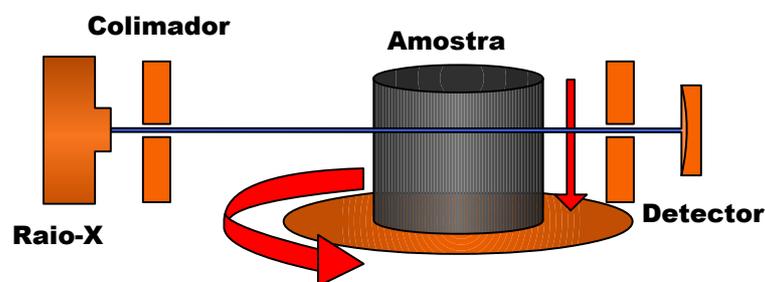


Figura 2.7: Tecnologia de tomografia tridimensional (adaptado de WANG, 2010).

A amostra é rotacionada lentamente por 180 graus enquanto raios-X a penetram, tornando possível a sua reconstrução digital em duas dimensões. Na Figura 2.8, estão apresentadas duas resoluções de escaneamento, mostrando o nível de detalhamento que pode ser obtido. A escala identifica o tipo de material, sendo que 0 representa os vazios, 1 a matriz cimentícia, e 2 os agregados.

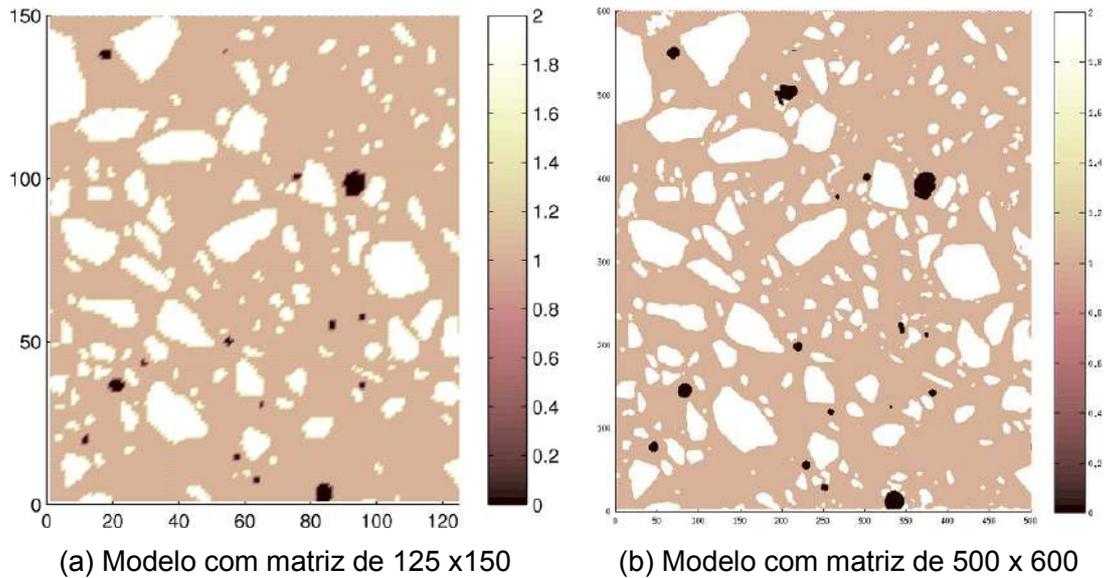


Figura 2.8: Microestrutura de uma fatia de concreto obtida através de microtomografia com dois níveis de resolução (ZHU e YVONNET, 2015).

Ao repetir o processo com a amostra em diferentes alturas, é possível obter diversas imagens bidimensionais, que podem ser usadas para a reconstituição tridimensional (Figura 2.9).

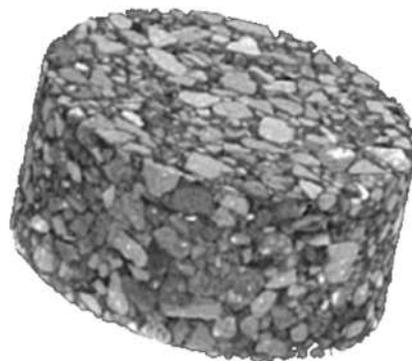


Figura 2.9: Resultados tridimensionais de tomografia com raios-X (adaptado de WANG, 2010).

Este tipo de solução implica na criação de uma matriz de dados tridimensional que, dependendo do nível de detalhe, pode levar a arquivos que exigem muito esforço computacional. É geralmente utilizada em modelos numéricos baseados na tecnologia de voxels, ou pixel volumétrico (do amalgama inglês, *volumetric pixel*). Ao invés de pixels, que contêm informações bidimensionais (metodologia tradicional bidimensional), os voxels contêm informação de uma imagem tridimensional. Imagens em voxels podem ser utilizadas em programas de elementos finitos, sendo que MISHNAEVSKY (2005) desenvolveu o programa Voxel2FEM especificamente para converter microestruturas em voxel para elementos quadráticos de elementos finitos.

Mais detalhes dos procedimentos e da tecnologia podem ser encontrados em WANG (2010) e em ZHU e YVONNET (2015).

2.2.2.3. *Seccionamento serial*

De maneira simples, a metodologia de seccionamento serial envolve escanear múltiplas seções de uma amostra e então reconstruir digitalmente a amostra em três dimensões. Para o procedimento, a amostra é seccionada múltiplas vezes, podendo ser serrada ou lixada e, a cada novo faceamento, o escaneamento é realizado. Diversas seções são escaneadas, com um espaçamento “d” entre si e, para cada seção, uma imagem é gerada (Figura 2.10). Destas imagens, a reconstrução tridimensional é realizada.

O método é largamente utilizado nas mais diversas áreas da ciência, como paleontologia, biologia e ciência dos materiais (MOSS *et al.*, 1990; HERBERT e JONES, 2001; CHAWLA e CHAWLA, 2006; UCHIC, 2011), e diversos autores utilizaram a metodologia para reconstrução de misturas asfálticas em três dimensões (WANG *et al.*, 2001, TASHMAN *et al.*, 2004, MASAD *et al.*, 2005, YOU *et al.*, 2009).

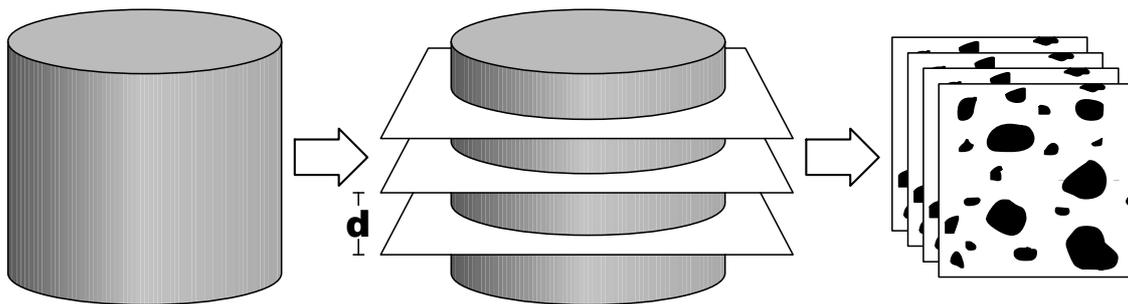


Figura 2.10: Metodologia de seccionamento serial.

Assim como o escaneamento por tomografia com raios-X, este procedimento ainda é razoavelmente oneroso, pois necessita de equipamentos especiais que nem sempre estão à disposição dos centros de pesquisa em misturas asfálticas.

2.2.3. Geração virtual

Como mencionado, a geração virtual de microestruturas vem da necessidade de superar as dificuldades atuais da digitalização de microestruturas, aliadas aos avanços computacionais que possibilitam e aceleram o processo de geração. A geração virtual de microestruturas visa reduzir a subjetividade e o tempo demandado na fase de delimitação dos contornos dos agregados necessária em amostras digitalizadas através de um escâner de mesa.

O processo de geração de microestruturas busca reproduzir digitalmente propriedades geométricas de misturas reais por meio de geração virtual, isto é, microestruturas são geradas a partir de dados de entrada definidos pelo usuário. Exemplos de parâmetros de entrada são: volumétricos, como volume de vazios e teor de ligante; e geométricos como forma e angularidade dos grãos e geometria da amostra.

A partir da variação coerente entre estes parâmetros de entrada, é, em teoria, possível gerar uma microestrutura que seja semelhante às microestruturas de amostras reais. Garantir que uma microestrutura virtual seja representativa de uma microestrutura real é fundamental para o sucesso das simulações numéricas com microestruturas virtuais.

Vários trabalhos (STROEVEN *et al.*, 2006; TSCHOPP *et al.*, 2008; PUTANOWICZ, 2015; HOU *et al.*, 2016) utilizaram a geração virtual de microestruturas de materiais compósitos em geral e diversos outros (ZHANG, 2003; SOUZA, 2009; JAVAHERIAN, 2011; SOARES *et al.*, 2014; CASTILLO *et al.*, 2016; CARO *et al.*, 2016) focaram essencialmente na geração de microestruturas de misturas asfálticas como método de substituição e/ou complementação de ensaios de laboratório, de forma a auxiliar na tomada de decisões e de projeto de misturas.

As metodologias de geração de microestruturas virtuais variam de acordo com o propósito para o qual o gerador foi desenvolvido. MISHNAEVSKY (2005) implementou um gerador de microestruturas baseado na tecnologia de voxels para a geração automática de microestruturas tridimensionais de compósitos, e analisou a evolução do dano e a deformação de vários compósitos com microestruturas aleatórias e graduadas através de simulações numéricas.

JAVAHERIAN (2011) desenvolveu um gerador de microestruturas bidimensionais de misturas asfálticas no qual as microestruturas são geradas a partir da entrada das propriedades da mistura real, como granulometria, angularidade dos agregados e fração volumétrica. A partir destes dados, as informações volumétricas da mistura são convertidas para informações bidimensionais, agregados virtuais são gerados e posicionados aleatoriamente na amostra, e uma análise estatística é realizada buscando avaliar se a microestrutura gerada coincide com o esperado. A Figura 2.11 apresenta um fluxograma do processo de geração desenvolvido por JAVAHERIAN (2011).

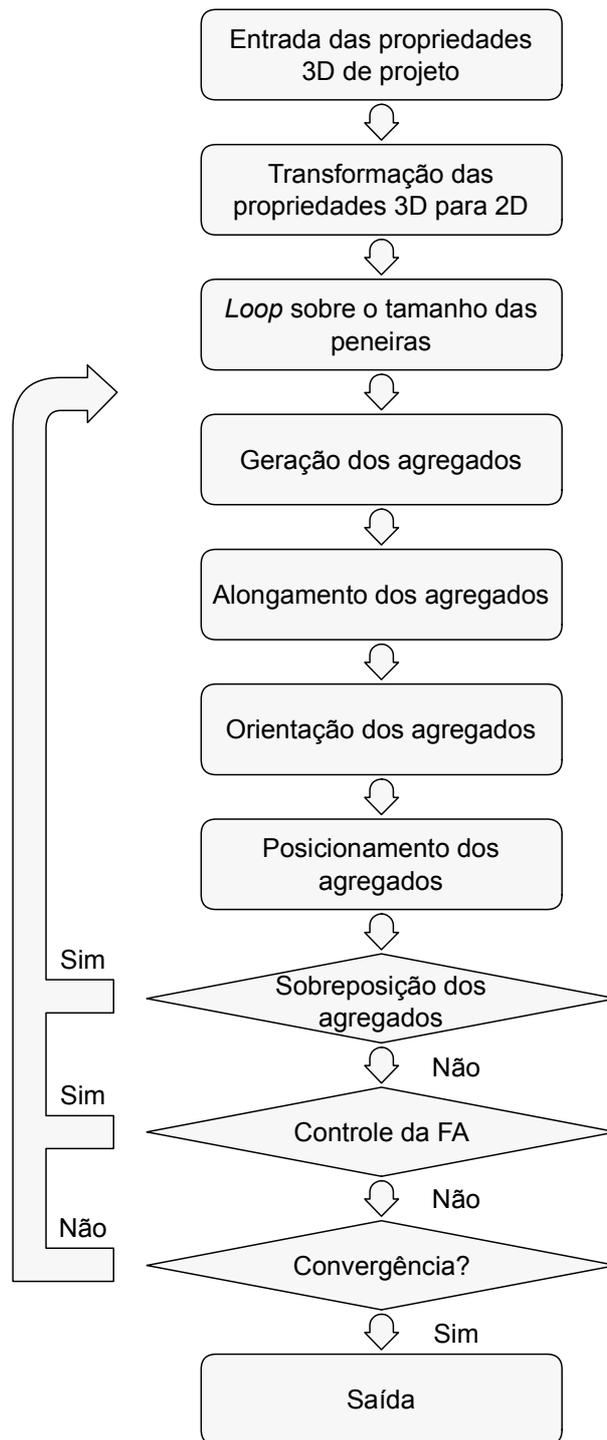


Figura 2.11: Fluxograma do processo de geração de microestruturas desenvolvido por Javaherian (adaptado de JAVAHERIAN, 2011).

2.2.4. Elemento de volume representativo

Nos estudos com microestruturas, é frequentemente vantajoso considerar apenas um fragmento de toda a amostra real nas simulações. A consideração de um elemento de microestrutura de dimensões inferiores à da amostra alivia o esforço computacional, pois uma menor quantidade de partículas será considerada na simulação, tornando as simulações mais eficientes. Porém, o uso de um elemento com dimensões muito pequenas pode resultar na perda de acurácia dos resultados de simulações.

Deste modo, o conceito de elemento de volume representativo (do inglês, *Representative Volume Element* - RVE) deve ser adotado. O RVE pode ser definido como o menor, porém suficientemente grande, elemento de volume com o qual é possível representar de maneira efetiva as propriedades do compósito (KIM *et al.*, 2009). Ainda, o RVE também pode ser definido como o volume de um material no qual as respostas sob carregamentos mecânicos independam dos tamanhos de agregados e das condições de contorno impostas à amostra (WEN e KIM, 2002).

Os RVEs de misturas de concreto asfáltico são sujeitos a mudanças dependendo da temperatura, homogeneidade, e taxa de carregamento do material (WEISSMAN *et al.*, 1999 *apud* ROMERO e MASAD, 2001). Ainda, de acordo com WEISSMAN *et al.* (1999) *apud* ROMERO e MASAD (2001), a temperaturas baixas, quando a rigidez do agregado e do mástique estão próximas, amostras de concreto asfáltico se comportam como um material único. Por outro lado, a altas temperaturas, a rigidez dos agregados é significativamente diferente do mástique, o que faz com que haja maior variabilidade nos resultados, afetando as dimensões do RVE.

Para investigar as dimensões adequadas do RVE de misturas de concreto asfáltico, pesquisadores propuseram diferentes métodos baseados em análises numéricas e/ou experimentais. WEN e KIM (2002) utilizaram *Digital Image Correlation* – DIC, para identificar o RVE de amostras de concreto asfáltico em ensaios de *indirect tensile* (IDT) *creep*. Os autores recomendaram um RVE de 50 x 50 mm para misturas com agregados de até 19 mm, o que é razoavelmente condizente com a maioria das misturas de concreto asfáltico.

Em outro estudo, KIM *et al.* (2009) propuseram uma metodologia que combina a análise de diversos fatores geométricos, como fração de área, granulometria, orientação e distribuição das partículas com simulações de propriedades viscoelásticas lineares de misturas asfálticas em elementos finitos. Os autores analisaram misturas com tamanho máximo de agregados igual a 19 mm e concluíram que em uma mistura de concreto asfáltico densa, dosada pela metodologia *Superpave*, um RVE de 50 x 50 mm é suficiente para caracterizar propriedades características sem danos. Também concluíram que amostras com dimensões de 60 x 60 mm são suficientemente grandes para a análise de propriedades como módulo dinâmico e *creep compliance* à baixa temperatura.

2.3. MECÂNICA DA FRATURA

2.3.1. Base teórica

A mecânica da fratura é a área da mecânica que estuda o surgimento e a propagação de trincas nos materiais. Estudos iniciais na área foram desenvolvidos no início do século XX tendo como objeto materiais de comportamento frágil. Avanços na mecânica computacional resultaram em um grande desenvolvimento da mecânica da fratura, a partir de um maior entendimento sobre teorias de comportamento de ruptura de materiais dúcteis, cerâmicos, e altamente heterogêneos como misturas asfálticas e concretos de cimento Portland (RODRIGUES, 1991; HIRSCH, 2009).

A causa da maioria das falhas estruturais geralmente se encaixa em duas categorias (ANDERSON, 2005): negligência durante o projeto, construção ou operação; ou utilização de um novo material, que leva a um resultado inesperado ou indesejado. Enquanto no primeiro caso os procedimentos de investigação são suficientes para evitar a falha, no segundo caso a falha pode ser muito mais difícil de prever. Novos materiais podem necessitar do desenvolvimento de novas metodologias de análise e por este motivo é fundamental uma extensiva análise do material antes de sua liberação para utilização.

Na ponta da trinca, o campo de tensões pode ser separado em três componentes, chamadas de Modo I, Modo II e Modo III. A fratura em Modo I faz com que a trinca abra ortogonalmente à superfície de fratura, levando a tensões de compressão e

tração. No Modo II, as superfícies de fratura deslizam umas em relação às outras, paralelas ao plano de fratura e perpendiculares à ponta da trinca, resultando em tensões cisalhantes. Já no Modo III, também ocorrem tensões cisalhantes, porém a trinca se desenvolve a partir do deslizamento das faces cisalhantes de modo paralelo ao plano de fratura e paralelo à ponta da trinca (ZEHNDER, 2012). Na Figura 2.12 estão representados os três modos de fratura.

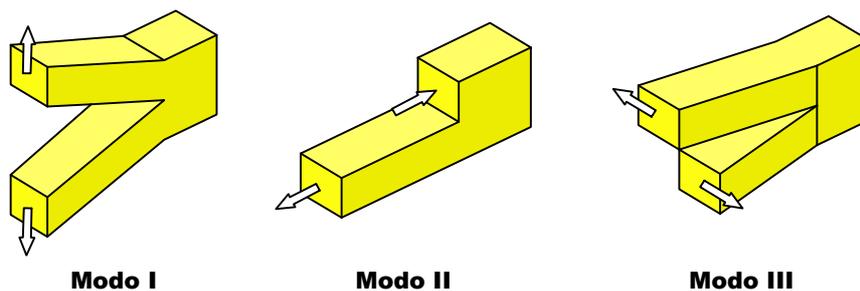


Figura 2.12: Três modos de fratura.

Na engenharia é comum classificar a fratura de materiais em dois modos primários: frágil e dúctil. Em materiais frágeis, as trincas se espalham rapidamente com nenhuma ou pouca deformação plástica. Já em materiais dúcteis, as trincas crescem lentamente e geralmente há considerável deformação plástica. A ruptura dúctil ocorre em três estágios: nucleação de vazios, crescimento e coalescência (THOMSON E HANCOCK, 1984). Em materiais quebradiços, o Modo I de fratura é, com razoável diferença, o de mais frequente ocorrência, pois em trincamento quebradiço sempre há uma tendência da trinca buscar uma orientação que minimize os carregamentos cisalhantes (LAWN, 1993).

A região na ponta da trinca onde ocorre o dano no material é denominada de zona inelástica ou plástica, e nela ocorrem deformações não lineares advindas da ocorrência de microtrincas isoladas. Estas microtrincas coalescem formando macrotrincas, que vêm a se mesclar à estrutura da trinca principal. Sob o ponto de vista macroscópico, a falha dá-se de acordo com a seguinte sequência: acúmulo de danos, iniciação e coalescência das microtrincas, propagação das macrotrincas e, por último, fratura do material (ANDERSON, 2005). Diferentes teorias buscam descrever a zona

inelástica de modo a desenvolver modelos preditivos, como a mecânica da fratura linear elástica, mecânica da fratura elasto-plástica, e os modelos de zona coesiva.

Para as misturas asfálticas, pesquisadores têm adotado principalmente ensaios de DC(T) (*disk-shaped compact tension*), SCB (*semicircular bending*) e SEB (*single-edge notched beam*) para determinação de propriedades de fratura em Modo I (ARAGÃO *et al.*, 2017). Para caracterização de fratura em Modo II, pesquisadores vêm usando amostras SCB com a pré-trinca descentralizada (AYATOLLAHI e PIRMOHAMMAD, 2013) ou centralizada em ângulo (IM *et al.*, 2014).

O estudo da fratura em misturas asfálticas no Brasil foi iniciado no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) por RODRIGUES (1991), que avaliou a fratura a partir de ensaios de fadiga considerando o material como homogêneo. Desde então, diversos outros trabalhos foram realizados no país (MELLO, 2008; HIRSCH, 2009; LÓPEZ, 2010; VARGAS, 2016).

2.3.2. Mecânica da fratura linear elástica (MFLE)

A mecânica da fratura linear elástica teve grande parte de seu desenvolvimento durante a primeira guerra mundial, com estudos do engenheiro aeronáutico Alan Arnold Griffith, publicados em 1920. Griffith utilizou a primeira lei da termodinâmica para formular uma teoria de fratura baseada no balanço de energia. O modelo de Griffith foi formulado para prever o comportamento de materiais quebradiços, como o vidro, mas se mostrou inaplicável na previsão do comportamento de materiais dúcteis. Uma modificação do modelo de Griffith para metais só se tornou realidade em 1948 (ANDERSON, 2005).

Para materiais isotrópicos elásticos lineares, a MFLE caracteriza o campo de tensões na ponta da trinca a partir de um único parâmetro denominado fator de intensidade de tensões (K). O parâmetro K depende das tensões aplicadas, da geometria da amostra e do tamanho e posição da trinca. É utilizado na previsão do estado de tensões próximo da ponta da trinca. Quando este estado de tensões atinge valores críticos, a trinca progride e o material vem a falhar.

O fator de intensidade de tensões crítico, K_{Ic} , representa uma propriedade do material denominada tenacidade, que é altamente dependente da temperatura e é função da espessura da amostra. Normas como a ASTM E399 demandam uma espessura mínima de amostras de caracterização de tenacidade à fratura, K_{Ic} (o “I” subscrito denotando que é fratura em modo I), de modo a garantir condições de estado plano de deformações, visto que neste estado, o valor de K_{Ic} atinge a sua menor magnitude (MACHADO, 2012). A Figura 2.13 ilustra esta ideia. A tenacidade à fratura no estado plano de deformações é uma propriedade fundamental do material que depende de diversos fatores, como temperatura, taxa de deformação e microestrutura (CALLISTER e RETHWISCH, 2014).

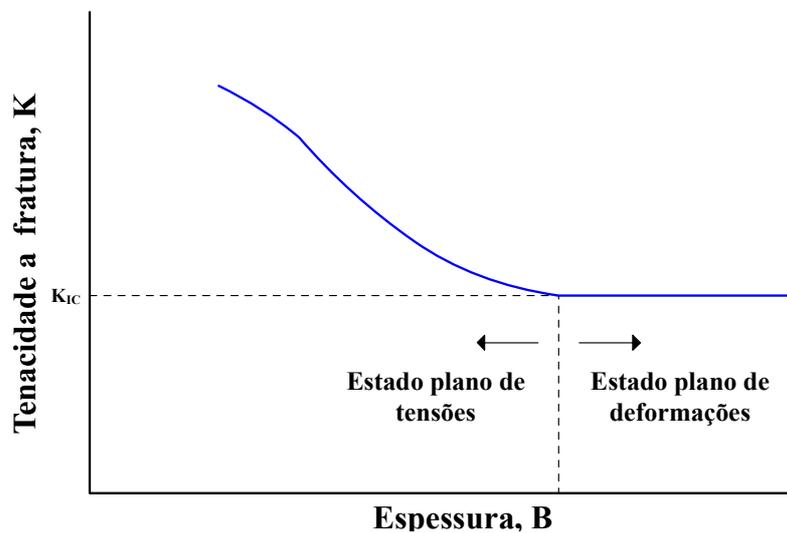


Figura 2.13: Efeito da espessura na magnitude de K_{Ic} (adaptado de MACHADO, 2012).

O fator de intensidade de tensões é o parâmetro que faz a ponte entre o estado de tensões no entorno da ponta da trinca e as cargas globais e condições de contorno do problema modelado. As tensões na ponta da trinca podem ser calculadas a partir do fator de intensidade de tensões, conforme ilustrado na Figura 2.14 (WILLIAMS, 1952; FORTES, 2003).

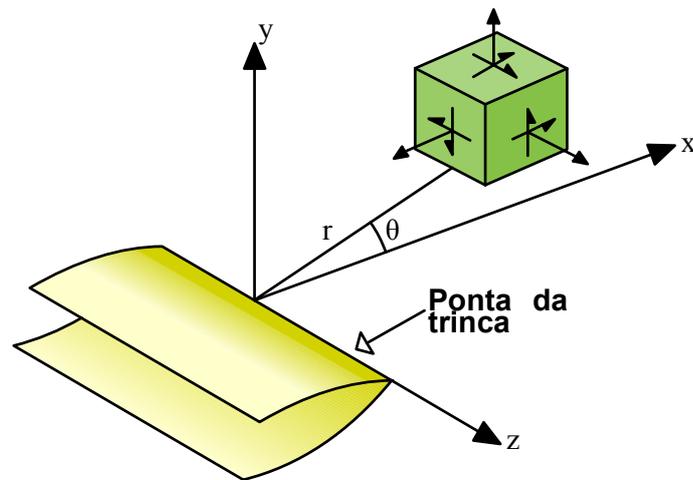


Figura 2.14: Distribuição das tensões na região da ponta da trinca (FORTES, 2003).

As equações a seguir podem ser utilizadas para a determinação das tensões na ponta da trinca, tanto em modo I (eq. 2.1 a 2.3) quanto em modo II (eq. 2.4 a 2.6).

$$\sigma_{rr} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{5}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad 2.1$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{3}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad 2.2$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{4} \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \text{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad 2.3$$

$$\sigma_{rr} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[-\frac{5}{4} \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{3}{4} \text{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad 2.4$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[-\frac{3}{4} \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{3}{4} \text{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad 2.5$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{3}{4} \text{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad 2.6$$

onde:

r é a distância a partir da ponta da fissura;

θ é o arco tangente (x_2/x_1);

K_I é o fator de intensidade de tensão em modo I;
 K_{II} é o fator de intensidade de tensão em modo II.

Como verifica-se nas equações, o estado de tensões na proximidade da trinca é proporcional à raiz quadrada de r , o que significa que observa-se um problema de singularidade de tensões conforme o valor de r aproxima-se de 0. A ponta da trinca é cercada da denominada zona de processo de fratura, onde deformações plásticas irreversíveis ocorrem e a MFLE perde sua validade. A Figura 2.15 ilustra estas zonas, e a Figura 2.16 ilustra as tensões na ponta da trinca para a situação real e para a situação teórica, com a representação da singularidade.

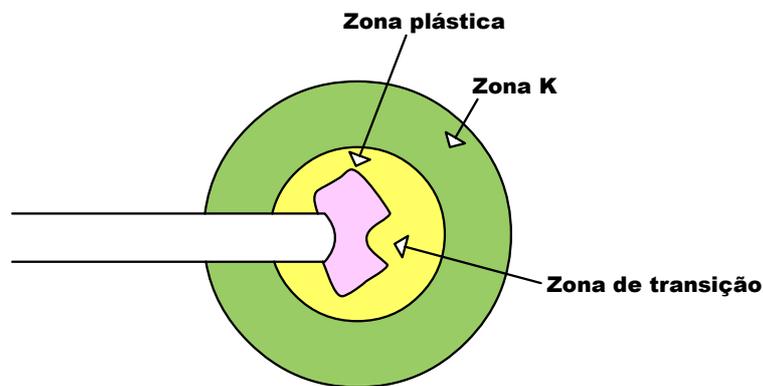


Figura 2.15: Esquemática das zonas na região da ponta da trinca.

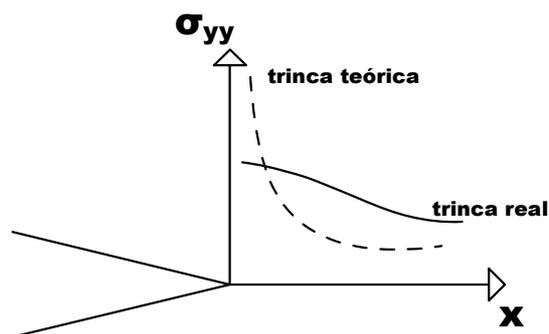


Figura 2.16: Singularidade de tensões na ponta da trinca.

As dimensões da zona de transição e da zona plástica devem ser pequenas o suficiente para que resultados dentro da zona K, onde a solução assintótica da MFLE conduza a resultados aproximados do estado de tensões completo.

Além do fator de intensidade de tensões, a taxa de dissipação de energia é outro fator que tem grande importância no estudo da evolução da fratura; esta pode ser interpretada como um parâmetro global, enquanto aquele retrata especialmente o comportamento da ponta da trinca.

2.3.3. Modelos de zona coesiva

Na mecânica da fratura, a zona coesiva é uma região no material onde descontinuidades ocorrem. Equações relacionando saltos no deslocamento normal e tangencial nas regiões de descontinuidades com suas trações definem um modelo de zona coesiva. Diversos tipos de modelos de zona coesiva estão à disposição na literatura (DUGDALE, 1960; BARENBLATT, 1962; NEEDLEMAN, 1987; RICE e WANG, 1989; TVEGAARD e HUTCHINSON, 1992; XU e NEEDLEMAN, 1994; CAMACHO e ORTIZ, 1996; GEUBELLE e BAYLOR, 1998; ALLEN e SEARCY, 2001), podendo estes serem classificados como multilineares, polinomiais, trigonométricos e exponenciais (VOLOKH, 2004). Independente do modelo utilizado, todos são construídos seguindo a seguinte sequência: a tração T_n elevam-se com a separação (δ) até atingirem um valor máximo (T_{cr}) e atenuam-se com a progressão da separação δ_n . Na Figura 2.17 está ilustrado o conceito do modelo de zona coesiva em modo I.

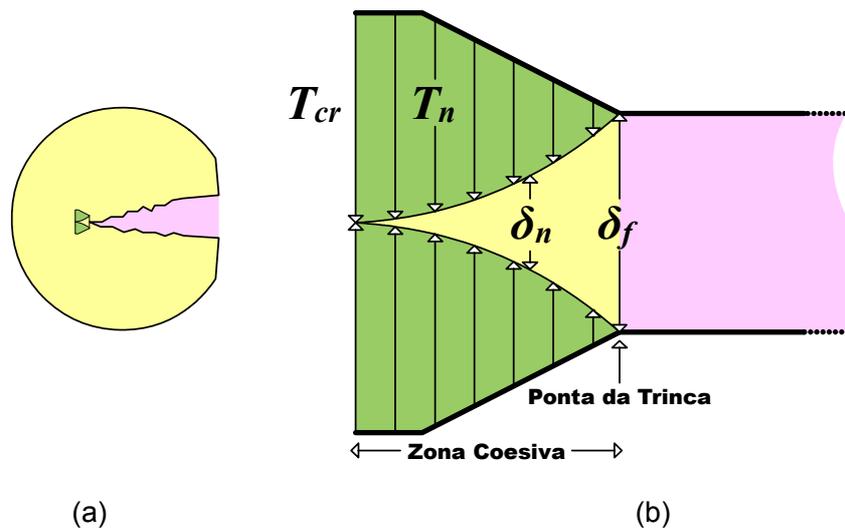


Figura 2.17: Modelo de zona coesiva: (a) amostra com detalhe da zona coesiva; (b) representação da zona coesiva.

Além das diferentes formas das curvas de tração-separação que distinguem os modelos de zona, estes também podem ser formulados de duas maneiras: modelos intrínsecos e modelos extrínsecos. Os modelos intrínsecos apresentam comportamento inicial elástico ou viscoelástico e a relação tração-separação é tal que com o aumento da separação, a tração no elemento coesivo aumenta até um valor máximo e então cai, chegando eventualmente a valores nulos. Já os modelos extrínsecos não apresentam esta tendência de ascensão inicial na curva de tração-separação, e se assume que a separação ocorre quando a tração na zona coesiva alcança a resistência coesiva do material, e assim que a separação ocorre a tração na zona coesiva decresce conforme a separação avança. A maior diferença entre os modelos intrínsecos e extrínsecos dá-se na forma da curva tração-separação e nas constantes do material que são utilizadas para descrever a forma da curva.

O modelo intrínseco é tipicamente de mais fácil implementação em elementos finitos, enquanto os modelos extrínsecos são comumente adicionados na malha durante a simulação, tornando a solução do problema complexa, visto que para tal é necessária a atualização da malha e do número dos nós no decorrer da simulação. Uma vantagem dos modelos extrínsecos é a possibilidade de evitar a compliância artificial, que é um efeito adverso que impacta na não convergência do modelo. A Figura 2.18a apresenta

exemplos de curvas tração-separação, sendo na Figura 2.18a apresentado um modelo bilinear e na Figura 2.18b um modelo de forma exponencial.

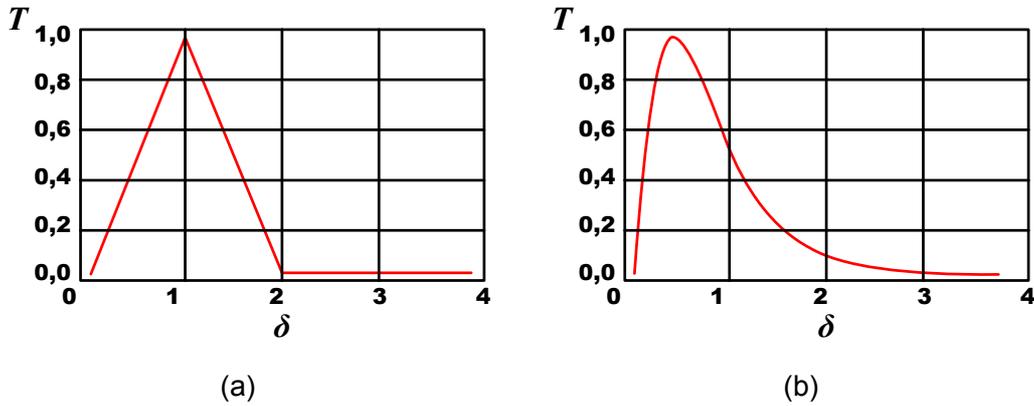


Figura 2.18: Exemplos de curvas de tração-separação.

O modelo bilinear vem sendo frequentemente utilizado, pois oferece grande flexibilidade na minimização dos efeitos de compliância artificial a partir do ajuste da inclinação inicial da curva tensão-separação (GEUBELLE e BAYLOR, 1998; ESPINOSA *et al.*, 2000; ESPINOSA e ZAVATTIERI, 2003; SONG *et al.*, 2006; SHUKLA *et al.*, 2009). O modelo de zona coesiva bilinear pode ser descrito a partir de três parâmetros: a energia coesiva, a resistência coesiva e a distância de separação das superfícies da trinca. Estes parâmetros são relacionados entre si e somente dois são necessários, já que o terceiro pode ser calculado a partir destes dois (ARAGÃO, 2011).

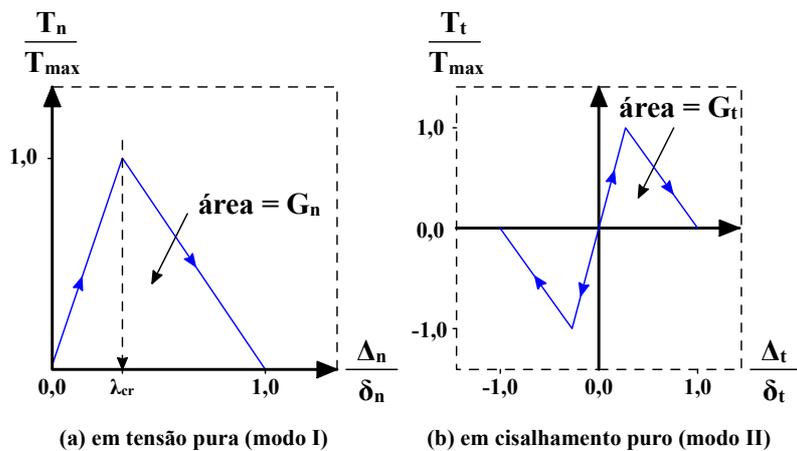


Figura 2.19: Modelo de zona coesiva bilinear (adaptado de ARAGÃO, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como visto, ainda são necessários muitos estudos para se obter uma adequada representação de microestruturas de misturas asfálticas a serem usadas em modelos computacionais microestruturais. Para desenvolver um gerador de microestruturas virtuais que utiliza imagens reais de agregados, foram necessárias diversas etapas: determinar um método de obter as imagens dos agregados de modo independente da habilidade do usuário, desenvolver o gerador de microestruturas que fosse capaz de importar as imagens obtidas, verificar a funcionalidade do gerador de microestruturas a partir de simulações com microestruturas pré-definidas, e, por fim, a comparação de microestruturas geradas com outras de amostras reais. Estas etapas serão descritas em detalhes neste capítulo.

3.1. DESENVOLVIMENTO DO GERADOR

A seguir será abordada um pouco da história do gerador de microestruturas desenvolvido nesta tese, uma breve descrição do processo de geração e seu funcionamento e, ainda, detalhes da mecânica da geração de microestruturas, tratando sucintamente dos algoritmos utilizados no gerador.

3.1.1. Concepção

Conforme discutido, obter uma microestrutura não é um processo simples e em muitos casos tem requerido a fabricação de amostras que são cortadas ou escaneadas em equipamentos geralmente robustos e com processos trabalhosos. A geração virtual é uma alternativa interessante visto que não necessita fabricação de amostras reais e pode ser realizada em um computador qualquer, requerendo geralmente pouco material. No entanto, geralmente, não só a microestrutura é gerada, mas também as partículas. O processo de geração virtual destas partículas está muitas vezes ligado a critérios pré-estabelecidos pelos desenvolvedores, podendo levar a microestruturas não tão representativas.

A ideia de utilizar imagens reais para a geração de microestruturas veio da aquisição do laboratório de pavimentação da COPPE/UFRJ, o equipamento AIMS2

(Figura 3.1). O AIMS2 possui conjuntos de bandejas circulares nas quais os agregados de tamanhos variados são posicionados. As bandejas então rotacionam e os agregados sobre elas posicionados são automaticamente fotografados por uma câmera de alta resolução. O equipamento é capaz de caracterizar agregados com dimensões entre 0,075 mm (peneira #200) e 25 mm (peneira 1"). As imagens são copiadas para um computador conectado ao equipamento e ficam salvas no formato *Tagged Image Files* (TIF).



Figura 3.1: Equipamento AIMS2 da UFRJ.

O gerador de microestruturas foi desenvolvido com o objetivo de utilizar imagens obtidas no AIMS2, sendo implementado de modo a importar as imagens do AIMS2 de forma mais automatizada possível. Isto, porém, não significa que apenas imagens do AIMS2 podem ser utilizadas, visto que o gerador é capaz de importar qualquer tipo de imagem binária e a transformar em um banco de dados.

O gerador de microestruturas virtuais foi desenvolvido nesta tese em C++ e foi todo desenvolvido para funcionar sem interface gráfica, através da linha de comando, tanto em Windows como em Linux. Porém, para torná-lo mais acessível, uma interface gráfica básica foi desenvolvida, como ilustrado na Figura 3.2. A interface foi desenvolvida pelo autor da própria tese no programa Clickteam Fusion 2.5 e só está disponível para o sistema operacional Windows (usuários Linux devem executar o programa pelo terminal).

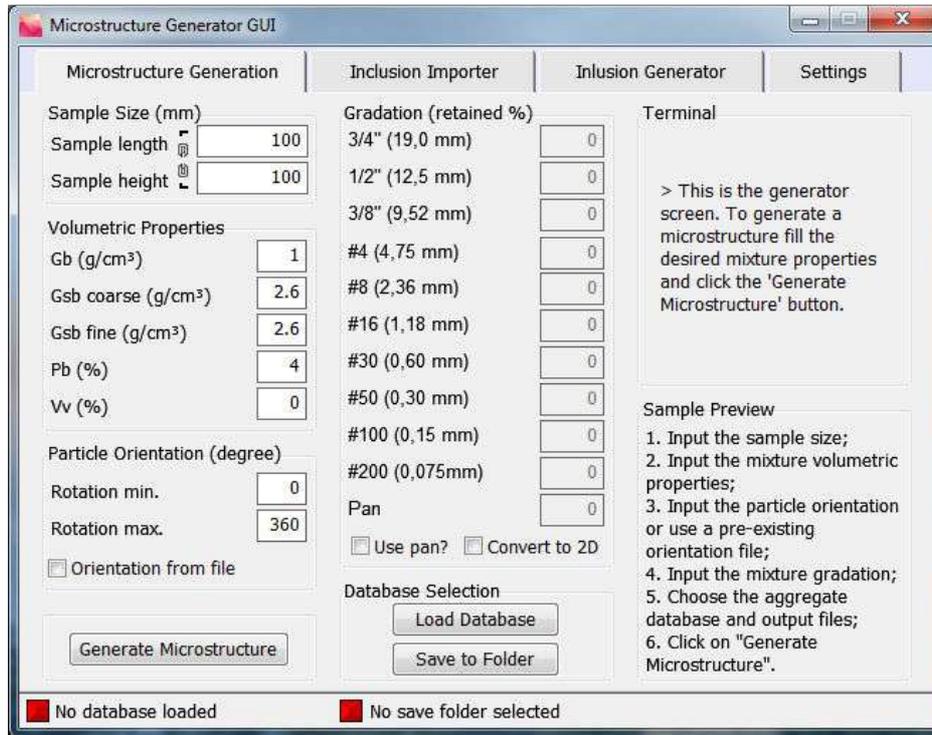


Figura 3.2: Interface do gerador de microestruturas desenvolvido pelo autor nesta tese.

3.1.2. Processo simplificado de geração de microestrutura virtual

O primeiro passo é definir as dimensões horizontal e vertical, em milímetros, da microestrutura a ser gerada. Apesar de geometrias complexas (por exemplo SCBs ou DCTs) não poderem ser fabricadas diretamente a partir do gerador, o arquivo de saída é facilmente editável em programas CAD (*Computer-Aided Design*) comumente utilizados na engenharia, como será melhor tratado nos itens seguintes.

Para gerar uma microestrutura, são essenciais as propriedades volumétricas e de granulometria do compósito. Propriedades volumétricas são: as massas específicas do ligante, dos agregados grãos e dos miúdos, o teor de ligante e o volume de vazios. A granulometria é inserida como percentagem retida por peneira. Com estas propriedades informadas ao programa, a fração de área de cada peneira da microestrutura a ser gerada é calculada.

A fração de área de agregados pode ser definida como a razão entre a área de uma microestrutura bidimensional ocupada por agregados e a área total. Assim, uma fração de área maior significa que a microestrutura apresenta mais agregados e, conseqüentemente, menos ligante. A Figura 3.3 ilustra o conceito de fração de área de agregados de uma microestrutura.

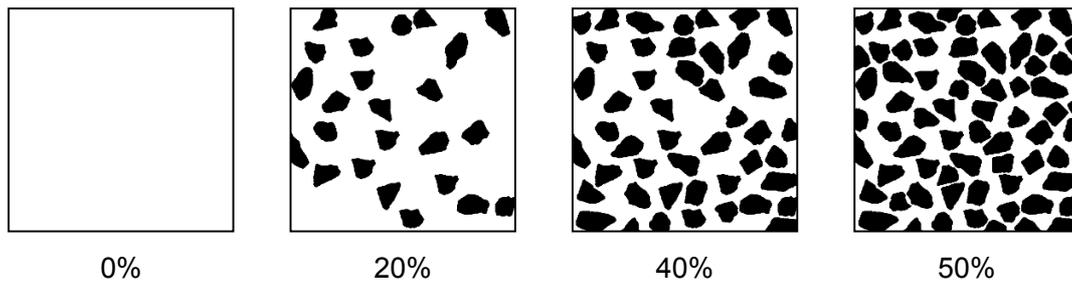


Figura 3.3: Exemplos de microestruturas com diferentes frações de área.

O próximo passo é selecionar como o gerador deve controlar a orientação dos agregados na microestrutura, ou seja, o ângulo que estes fazem com o plano horizontal. A definição simplificada deste ângulo pode ser verificada na Figura 3.4, na qual o ângulo β é representado como o formado entre o plano de maior dimensão do agregado e o plano das abcissas.

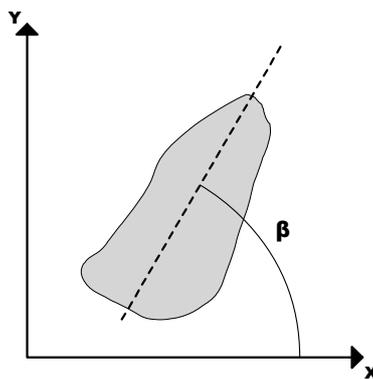


Figura 3.4: Definição da orientação das partículas.

O usuário pode escolher entre duas opções de controle de orientação: aleatório ou distribuição. A opção “aleatório” permite que sejam escolhidos limites superiores e inferiores de orientação nos quais os agregados podem ser gerados, como, por exemplo, limites entre -20 e 20° . A Figura 3.5 apresenta três microestruturas geradas com

orientações fixadas em 0, 45 e 90°, assim como uma microestrutura com controle de orientação aleatório entre -20 e 20°.

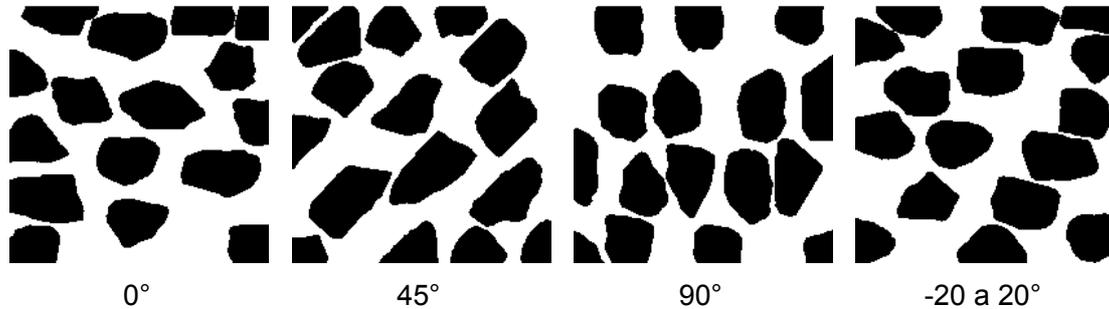
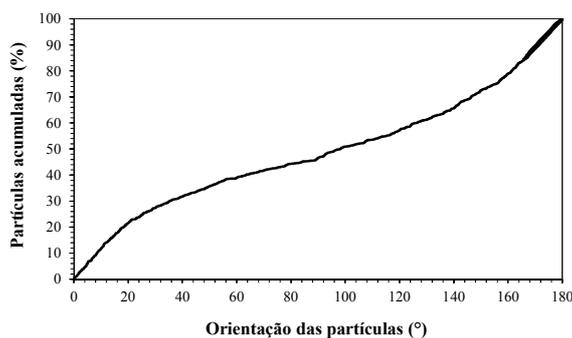


Figura 3.5: Exemplos de controle de orientação.

Já a opção “distribuição” permite ao usuário escolher um arquivo de entrada que controlará a distribuição de orientação das partículas. Esta opção é particularmente interessante quando se deseja replicar a orientação das partículas de uma mistura real, porém ela requer que o usuário já possua dados de orientação de antemão, o que implica na necessidade de obtenção de microestruturas a partir de uma amostra real para determinação das orientações. O arquivo contendo os dados de entrada deve ser importado para o gerador, no formato de texto puro. A Figura 3.6 apresenta um gráfico de dados de entrada de orientação por distribuição como exemplo, onde no eixo das abscissas tem-se a orientação das partículas e no eixo das ordenadas tem-se o número cumulativo de partículas.



Partículas acumuladas (%)	Orientação (°)	Partículas acumuladas (%)	Orientação (°)
0,0	0,0	53,8	110,9
4,9	4,5	58,7	123,8
9,8	8,3	63,6	136,2
14,7	12,7	68,5	143,6
19,6	17,4	73,4	152,2
24,5	24,8	78,3	159,2
29,4	34,5	83,2	164,5
34,2	46,5	88,1	168,5
39,1	60,3	93,0	173,7
44,0	78,6	97,9	177,4
48,9	95,2	100,0	180,0

Figura 3.6: Exemplo de distribuição de orientação.

O usuário deve, então, selecionar o banco de dados de imagens a ser utilizado, clicando no botão “Load” ou “Load and Close”, o que abrirá a janela apresentada na Figura 3.7. Nesta janela, é possível selecionar vários grupos de agregados já fotografados no laboratório de pavimentação da COPPE/UFRJ até a presente data. Os agregados vêm de diversas fontes e possuem características variadas. Adicionalmente, é possível criar um banco de dados de imagens próprio, não sendo obrigatoriedade utilizar os bancos de dados já incluídos nas bibliotecas do sistema.

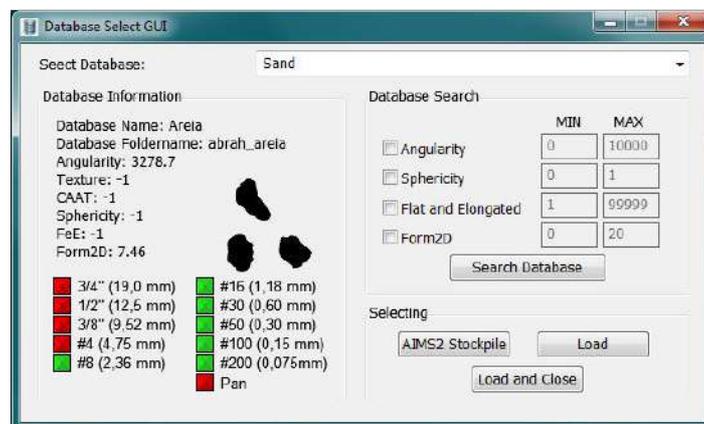


Figura 3.7: Seletor de banco de dados.

Finalmente, a microestrutura pode ser gerada clicando no botão “Generate Microstructure”. O programa gerará a microestrutura e criará uma imagem prévia que será mostrada na interface do gerador, conforme mostrado na Figura 3.8.

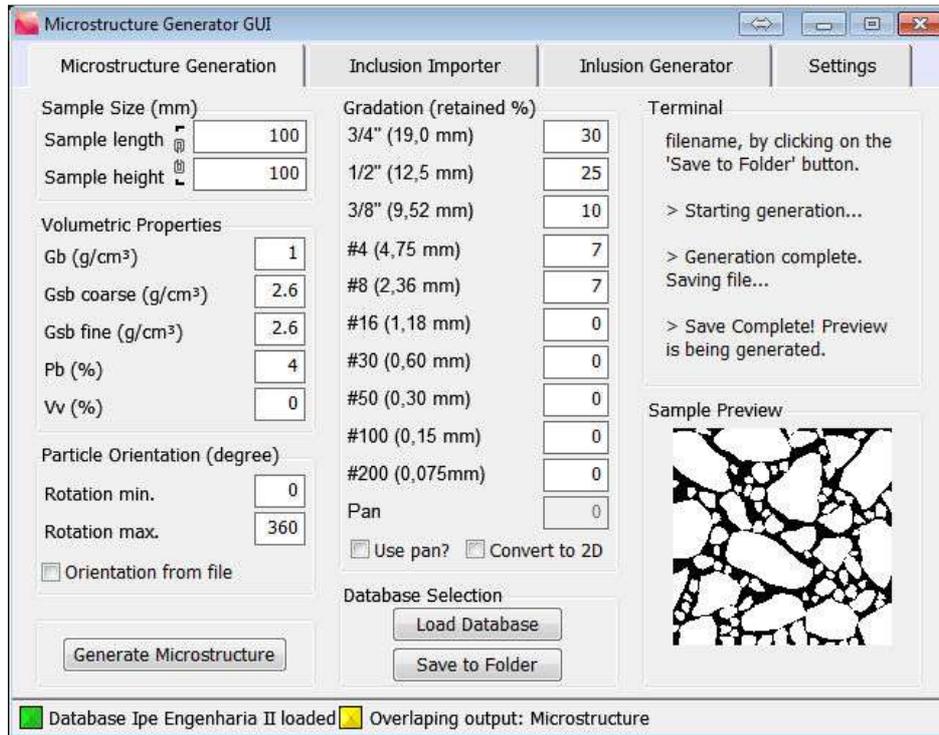


Figura 3.8: Interface do gerador após microestrutura ter sido gerada.

A microestrutura gerada é então exportada no formato *Drawing Exchange Format* (DXF), um formato vetorial aberto e de fácil compreensão, que pode ser importado por uma variedade de programas de simulação computacional ou editado em programas CAD. Um exemplo de microestrutura gerada pelo programa é mostrado na Figura 3.9.

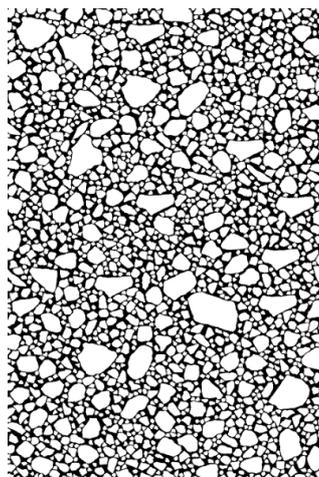


Figura 3.9: Exemplo de microestrutura gerada.

A mesma imagem da Figura 3.9, sendo visualizada em um programa CAD, com magnificação suficiente para mostrar detalhes dos menores agregados, é ilustrada na Figura 3.10. É interessante notar que o número de pontos representados pelo programa CAD não coincide com o número de pontos da matriz de pontos do gerador de microestruturas. Enquanto o gerador de microestruturas armazena apenas os vértices dos polígonos, o programa CAD representa inclusive os pontos intermediários entre vértices. Assim, na Figura 3.10, o número real de pontos armazenados é equivalente à metade dos pontos visualmente representados.

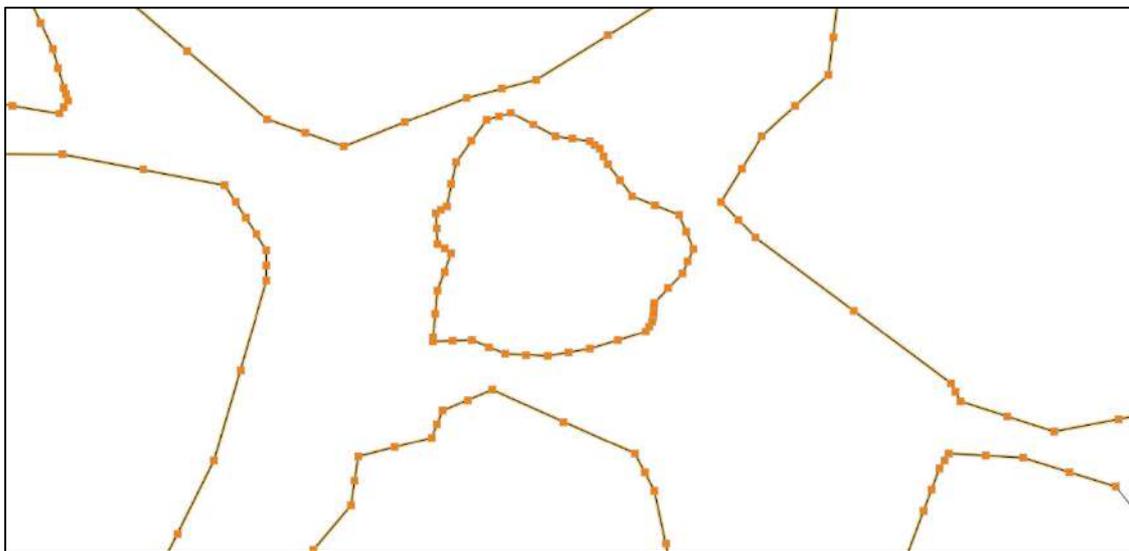


Figura 3.10: Visualização da imagem em um programa CAD.

Também é interessante notar a quantidade de pontos utilizados na representação de uma partícula. O programa busca representar todas as partículas, independentemente do tamanho, com no máximo 50 pontos, por questões de alívio computacional. Foi verificado que mais de 50 pontos geravam um aumento considerável no tempo de geração, com ganhos irrelevantes na precisão da definição geométrica da partícula.

3.1.3. Detalhamento do mecanismo de geração

Como a maioria dos programas computacionais, o usuário tem acesso ao início (interface e *inputs*) e ao fim (resultados ou *outputs*) do processo de geração, enquanto

que todo o processo intermediário (o da geração propriamente dita) ocorre de maneira “invisível” a ele. Neste item serão brevemente apresentadas as lógicas seguidas para tornar o processo de geração possível.



Figura 3.11: Diagrama de blocos do processo de geração.

3.1.3.1. Conversão de imagem raster para vetor

Imagens raster são como fotografias tiradas com uma câmera digital. De modo resumido, elas são compostas de matrizes de pontos, cada um contendo informações quanto à coloração do ponto em questão. Imagens vetoriais contêm informações geométricas, como pontos que limitam um segmento de reta, e, através de um conjunto de segmentos de reta, é possível traçar uma dada geometria. A diferença entre imagens raster e vetoriais pode ser facilmente visualizada na Figura 3.12, onde a silhueta de um agregado fotografado é apresentada em (a), e este mesmo agregado representado na forma vetorial é apresentado em (b).



Figura 3.12: Exemplo de imagem raster (a) e vetor (b).

Como o equipamento AIMS2 trabalha com imagens raster e programas de elementos finitos em geral importam apenas imagens vetoriais, faz-se necessária a conversão de raster para vetorial.

Para a conversão das imagens raster para vetoriais, o programa Potrace[®] foi utilizado, e este foi anexado aos arquivos do gerador de microestrutura. Potrace[®] é um programa com licença *General Public License* (GPL), com suporte a Windows e Linux, capaz de converter imagens raster para vetoriais com grande simplicidade. Ele é executado automaticamente pelo gerador para converter as imagens obtidas no AIMS2 para o formato DXF. Quando necessário, as imagens são redimensionadas para uma resolução inferior (no caso das partículas maiores) e o formato dos arquivos é convertido para *Portable Network Graphics* (PNG) utilizando o software XnView[®] (incorporado ao gerador) no Windows e Imagemagick no Linux (não incorporado e requer *download* manual). Os dois programas de conversão são gratuitos. O gerador de microestruturas então lê os arquivos DXF gerados pelo Potrace[®] e os converte para o formato de banco de dados específico do programa desenvolvido nesta tese.

3.1.3.2. Simplificação das partículas

As partículas, quando convertidas conforme item 3.1.3.1, apresentarão uma grande quantidade de segmentos de reta, o que pode acarretar em gerações muito demoradas, visto que quanto mais pontos seja constituído um agregado, mais pontos precisam ser levados em consideração durante a geração. Assim, um processo de simplificação é executado após a imagem ser convertida para o programa pela primeira vez. O processo de simplificação é automático, porém é possível alterar o parâmetro de

simplificação (denominado ângulo de simplificação – α_{simp}) manualmente, caso o operador do gerador assim desejar.

Define-se como α o ângulo entre o prolongamento de um segmento de reta com outro segmento de reta qualquer; α_{simp} define o menor ângulo α possível no qual os segmentos de reta são considerados segmentos individuais (Figura 3.13). Quando o ângulo α torna-se menor que o ângulo de simplificação ($\alpha < \alpha_{\text{simp}}$), estes segmentos são substituídos por um único segmento (segmento unido).

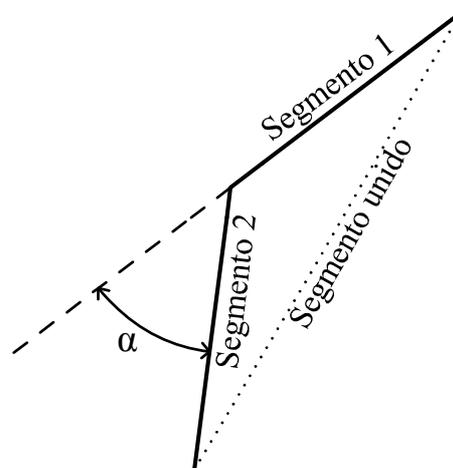


Figura 3.13: Definição do ângulo de simplificação.

Como forma de testar esta metodologia de simplificação, polígonos foram simplificados seguindo esta lógica. A Figura 3.14 apresenta os resultados de um polígono de agregado, incluindo a imagem resultante de sua simplificação. Como pode ser visto, com um ângulo de simplificação igual a 0° , a partícula digitalizada e convertida utilizando o programa Potrace[®] contém um total de 152 vértices. Já com um ângulo de simplificação igual a 5° , o número de vértices da partícula cai para 64, uma diminuição de mais de 50% do número total de vértices. Esta simplificação se mostra necessária para uma geração eficiente de microestruturas, visto que o número de vértices influencia diretamente no tempo de geração da microestrutura.

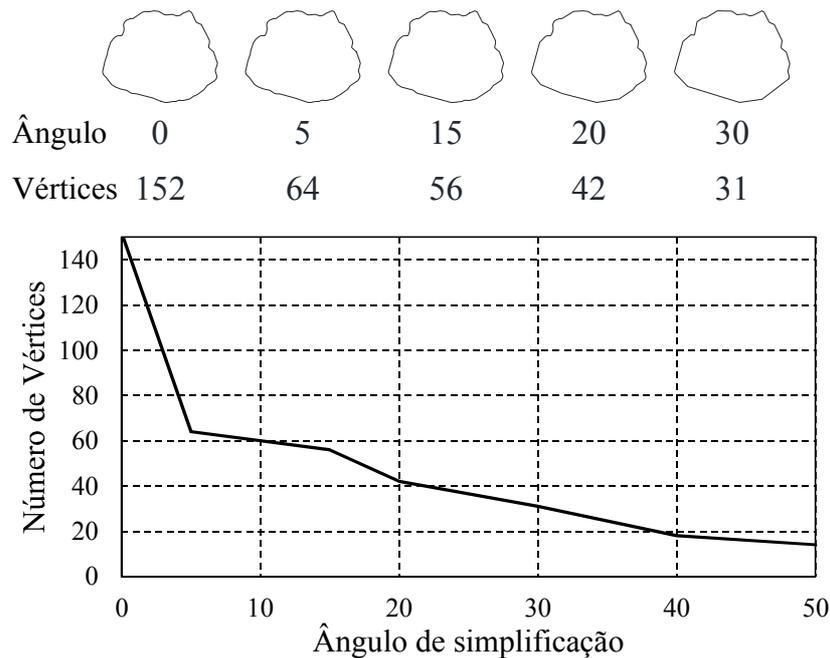


Figura 3.14: Exemplo de número de vértices versus grau de simplificação.

O ângulo de simplificação foi então definido como 5° por padrão pelo gerador de microestruturas. Este valor pode ser facilmente alterado na interface do programa.

3.1.3.3. Posicionamento dos agregados

Como mencionado no item 3.1.3.1, as imagens dos agregados são convertidas para vetores, o que transforma os agregados em polígonos. O objetivo do gerador é então posicionar estes polígonos em um espaço bidimensional no plano cartesiano, garantindo que estes não se sobreponham durante o processo de posicionamento. O gerador insere o primeiro polígono em um ponto aleatório sem verificação e os demais polígonos são posicionados aleatoriamente. A sua sobreposição com os demais polígonos existentes é verificada. Para isso, duas estratégias de verificação foram implementadas: algoritmo de *ray casting* e verificação de cruzamento de segmentos de reta.

O algoritmo de *ray casting* (também chamado de *crossing number*) implementado é um algoritmo utilizado para verificar se um dado ponto encontra-se dentro de um polígono, ou seja, é um algoritmo para solucionar o simples problema matemático de *point-in-polygon* (PIP). A ideia é simples e pode ser facilmente

compreendida visualizando a Figura 3.15. Caso se deseje verificar se um determinado ponto encontra-se dentro de um dado polígono, traça-se uma reta a partir do ponto em questão, usualmente na horizontal, que teoricamente se prolonga até o infinito. O número de vezes que a reta estendida ao infinito cruza com o polígono em análise é anotado. Se este número é par, isto significa que o ponto encontra-se fora do polígono; se o número é ímpar, o ponto encontra-se dentro do polígono. A reta traçada a partir do ponto P1 da Figura 3.15 cruza com o polígono duas vezes, indicando que o ponto P1 encontra-se fora do polígono. Já a reta traçada a partir do ponto P2 cruza três vezes, assim indicando que o ponto encontra-se dentro do polígono.

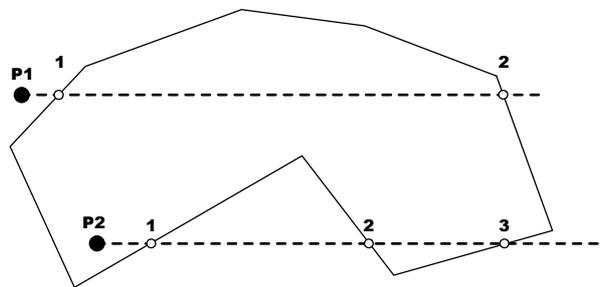


Figura 3.15: Exemplificação do algoritmo *ray casting*.

Detalhes como a possibilidade de o ponto encontrar-se sob um segmento de reta que compõe o polígono, da reta traçada a partir do ponto cruzar sobre um vértice do polígono (encontro de dois segmentos de reta) e a precisão computacional foram levados em consideração. O detalhamento destes procedimentos, porém, foge ao escopo deste trabalho, e recomenda-se a leitura do trabalho de ALCIATORE e MIRANDA (1995).

A verificação de PIP é executada para todos os pontos do polígono a ser inserido, para todos os polígonos já inseridos. Isto significa que quanto mais polígonos forem adicionados, mais tempo leva a verificação do PIP. Porém, apenas a verificação do PIP não é suficiente para verificar se um polígono não está sobrepondo outro polígono. Assim, a segunda estratégia de verificação visa identificar se segmentos de reta do novo polígono não se cruzam com os dos polígonos já inseridos. Novamente, é um processo lento, que demora tanto mais quanto mais polígonos forem inseridos na microestrutura.

Assim, o processo é repetido até a fração de área atingir os valores calculados a partir da granulometria especificada. Os agregados são posicionados sempre aleatoriamente, até encontrarem um espaço onde não ocorra sobreposição com demais agregados previamente posicionados (metodologia de força bruta).

3.1.3.4. Cálculo da fração de área e critérios de parada

A fração de área é calculada em função de parâmetros de granulometria e de propriedades volumétricas. O usuário insere o teor de ligante ($\%P_b$), a massa específica do ligante (G_b), as massas específicas dos agregados graúdos ($G_{sbgraúdo}$) e miúdos ($G_{sbmiúdo}$), o volume de vazios (V_v) e a granulometria da mistura, e o gerador então calcula as frações de áreas que as partículas de cada peneira devem ocupar na imagem. Assim, o produto da percentagem passante por peneira pelo volume de sólidos (V_s) resulta na percentagem passante por peneira em volume. Para este cálculo, assume-se que o volume de sólidos da mistura asfáltica é exatamente igual ao de uma microestrutura bidimensional. Esta consideração é uma simplificação.

Durante a geração, para cada peneira, um agregado é selecionado aleatoriamente dentre todos agregados que compõem a peneira em questão. A área padrão deste agregado, calculada no processo de geração do banco de dados, é acessada pelo gerador. O gerador então compara a fração de área que deve ser atingida à fração de área atual já somada à do agregado a ser inserido. Caso a fração de área com o novo agregado ainda seja inferior à área que se objetiva, o agregado é posicionado na microestrutura e o processo se reinicia. Caso contrário, se a fração de área com o novo agregado exceder a fração de área a ser atingida, o agregado não é inserido, e um novo agregado é selecionado aleatoriamente.

3.1.3.5. Garantia de precisão da fração de área

Como atingir uma fração de área precisa é praticamente impossível, por padrão, o programa considera que deve passar à próxima peneira quando os polígonos já inseridos levarem a uma fração de área superior à fração de área que deve ser atingida. Esta metodologia pode acarretar em erros consideráveis durante a geração,

especialmente quando polígonos são grandes o suficiente para ocuparem grande porcentagem da área da microestrutura.

Assim, foi adicionada ao gerador uma opção de definir o erro tolerável da fração de área. Por exemplo, se a área final ocupada deve ser de 10 unidades de área e cada polígono ocupa 3,5 unidades de área, é impossível atingir uma área exatamente igual a 10. Sendo assim, o usuário pode determinar que um desvio de até 5% é tolerável, e com 3 polígonos ter-se-á uma área ocupada igual a 10,5 unidade de área, o que se enquadra na tolerância determinada.

Para garantir maior precisão no cálculo da fração de área, os polígonos que forem inseridos na borda da imagem podem ser cortados pelo gerador e terem sua área recalculada durante a geração. O algoritmo de corte de polígonos é baseado no de Cohen-Sutherland (FOLEY *et al.*, 1996). É importante notar que caso o usuário opte pelo corte das bordas, a granulometria do material poderá ser consideravelmente alterada dependendo das dimensões da amostra.

3.1.3.6. Determinação do ângulo das partículas

Para determinar este ângulo, o conceito de diâmetro de Feret (DF) foi utilizado. O DF pode ser definido como a distância entre dois planos paralelos restringindo um polígono. Ao se determinar a menor distância possível entre os planos que restringem determinado polígono, tem-se o mínimo diâmetro de Feret (MinDF). De modo análogo, a maior distância entre estes planos fica definida como máximo diâmetro de Feret (MaxDF). Na Figura 3.16 estão apresentados estes conceitos.

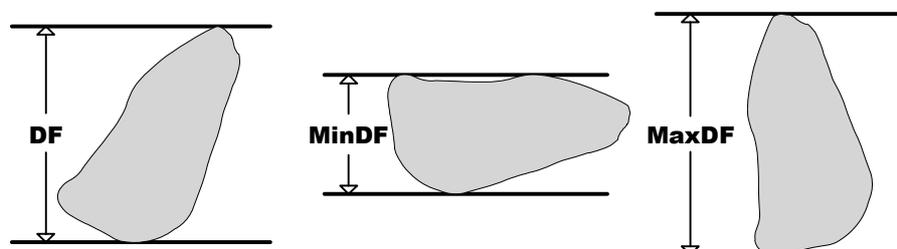


Figura 3.16: Conceito de diâmetro de Feret.

Para determinar o ângulo do polígono, o gerador de microestruturas primeiro determina o seu MinDF, e então o orienta de modo que os planos paralelos que restringem o polígono fiquem dispostos na horizontal. Assim, a referência para a orientação de 0° do polígono é a orientação dos planos que restringem o polígono durante a determinação do seu MinDF.

O cálculo do MinDF só é realizado durante a criação de um banco de dados novo, pois as partículas quando escaneadas pelo AIMS2 (ou qualquer outro método de escaneamento) não necessariamente estarão orientadas na horizontal. Assim, o banco de dados quando criado já contém todas as partículas orientadas a 0° em relação ao plano horizontal.

3.1.3.7. Escalonamento das partículas

O gerador de microestruturas foi desenvolvido de modo a suportar duas opções de escala das partículas: fixa e AIMS2. A opção fixa aplica um fator de escala no polígono de contorno do agregado, que o redimensiona de modo que seu MinDF venha a coincidir com a abertura da peneira imediatamente acima da peneira à qual ele pertence. Por exemplo, polígonos de agregados retidos na peneira #16, cuja abertura da malha é de 1,18 mm, serão redimensionados para que seu MinDF seja de 2,36 mm, o equivalente à malha da peneira imediatamente acima. Esta situação é apresentada na Figura 3.17.



Figura 3.17: Exemplo de redimensionamento forçado de agregados.

Esta metodologia depende do conjunto de peneiras selecionado, visto que se a peneira #8 não fizesse parte do conjunto, o polígono do agregado seria redimensionado para a abertura da próxima peneira acima desta. Sendo assim, o conjunto padrão de peneiras suportado pelo programa é o equivalente ao conjunto ASTM (o mesmo utilizado

pelo AIMS2), indicado na Tabela 3.1. A tabela também apresenta o MinDF usado no redimensionamento dos agregados das respectivas peneiras.

Tabela 3.1: Conjunto de peneiras utilizadas pelo gerador de microestruturas.

Peneira	Abertura (mm)	MinDF (mm)
3/4"	19	25
1/2"	12,5	19
3/8"	9,52	12,5
#4	4,75	9,52
#8	2,36	4,75
#16	1,18	2,36
#30	0,6	1,18
#50	0,3	0,6
#100	0,15	0,3
#200	0,075	0,15
Pan	-	0,075

Já a opção de escala baseada no AIMS2 redimensiona os polígonos dos agregados utilizando o fator de escala das imagens do AIMS2, ou seja, os polígonos dos agregados serão redimensionados de acordo com as dimensões reais do agregado. Para isto, inicialmente foram utilizadas duas tabelas de MASAD (2005), que indicavam que o equipamento AIMS era capaz de fotografar em escala, tornando possível determinar as dimensões dos agregados a partir das fotos. Porém, estas tabelas se referiam à primeira versão do equipamento AIMS, e este trabalho foi realizada na versão mais atualizada, o AIMS2. Assim, tornou-se necessária a determinação dos fatores de escala atualizados.

Para a determinação do fator de escala das imagens obtidas no AIMS2, foram escaneadas múltiplas partículas retidas nos grupos de peneiras da 3/4" à #200. Entre os diversos arquivos gerados pelo AIMS2, encontra-se um arquivo que contém o comprimento máximo (maxDF) de cada partícula fotografada. Estes comprimentos foram então comparados aos comprimentos medidos em pixels nas imagens geradas pelo AIMS2. Esta medição foi realizada utilizando o programa ImageJ (RASBAND, 2012; SCHNEIDER *et al.*, 2012), desenvolvido em 1997 pelo Instituto Nacional de Saúde dos Estados Unidos da América. O programa permite a análise de diferentes propriedades bidimensionais das partículas, como orientação, fração de área, e granulometria. Assim, conhecendo-se o comprimento real das partículas e o comprimento em pixels, pode-se determinar o fator de escala por peneira.

3.2. DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO DEPENDENTE DE TEMPERATURA E TAXA DE APLICAÇÃO DE CARGA

Como parte deste trabalho também buscou-se implementar um código de fratura dependente da taxa de progressão da trinca e da temperatura do material. O princípio da tentativa de aplicação será apresentado nos itens a seguir. A implementação em seu estado final e as dificuldades encontradas serão apresentadas no capítulo 4.

3.2.1. Breve histórico da implementação

Nos anos recentes, diversos autores vêm buscando modelar o comportamento de misturas asfálticas quanto à fratura. Este tipo de modelagem é de grande complexidade, pois envolve fatores como heterogeneidade, comportamento inelástico e características dependentes da taxa de aplicação da carga e da temperatura à qual a amostra está condicionada. Diversas metodologias vêm sendo empregadas para este tipo de modelagem, sendo que a implementação de modelos de elementos coesivos tem mostrado grande popularidade.

Como a maioria dos modelos encontrados na literatura não consideravam o comportamento dependente da taxa de aplicação da carga, o trabalho de ARAGÃO (2011) implementou um modelo computacional de zona coesiva capaz de considerar este comportamento dependente da taxa, no programa ABAQUS, em forma de uma subrotina *user-element* (UEL). Grande parte da implementação da subrotina UEL que considera a taxa, desenvolvida por ARAGÃO (2011), vem do trabalho de SONG (2006), que desenvolveu um modelo de zona coesiva independente da taxa e o incorporou no ABAQUS em forma de uma subrotina UEL. ARAGÃO (2011) então modificou esta subrotina, de modo que propriedades de fratura diferentes fossem assimiladas a diferentes elementos de zona coesiva dependendo da taxa de separação dos mesmos na malha de elementos finitos.

3.2.2. Visão geral da implementação em elementos finitos de ARAGÃO (2011)

A modelagem computacional de misturas asfálticas é uma tarefa de grande complexidade, visto que fatores como a heterogeneidade, a geometria irregular das

partículas e o comportamento mecânico inelástico da matriz (que depende da temperatura e da taxa de deformação) influenciam na resistência à formação e à propagação de trincas no material.

O trabalho de ARAGÃO (2011) constituiu na ampliação daquele desenvolvido por SONG (2006), que implementou um modelo de zona coesiva no programa ABAQUS. A implementação de SONG (2006) não considerava, porém, a influência da taxa de separação dos elementos coesivos, o que foi incluído na versão implementada por ARAGÃO (2011).

A implementação em elementos finitos da contribuição dos elementos coesivos no vetor de força, \vec{f} , e a matriz de rigidez tangente, K , foi proposta por SONG (2006). A definição de f e K nodais para um elemento coesivo de quatro nós, no domínio isoparamétrico $-1 < \xi < 1$, é feita através das equações 3.1 e 3.2. A Figura 3.18 apresenta um esquema do deslocamento dos nós de um elemento coesivo de quatro nós.

$$f = \int_{-1}^1 B^T t j_0 d\xi \quad 3.1$$

$$K = \int_{-1}^1 B^T C B j_0 d\xi \quad 3.2$$

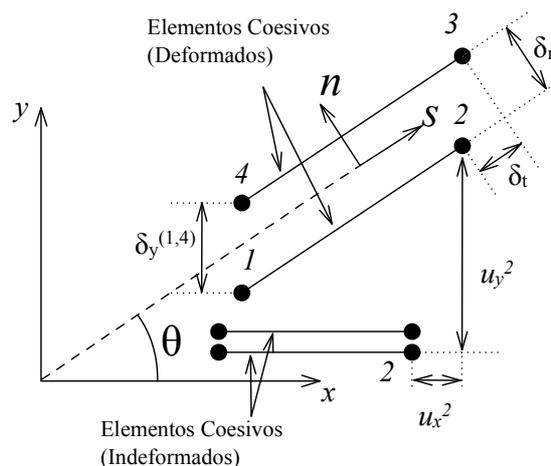


Figura 3.18: Elemento coesivo de quatro nós (adaptado de SONG, 2006)

onde \vec{t} , J_0 , e C , são, respectivamente, o vetor de tração, a jacobiana entre as coordenadas originais e as isoparamétricas, e a matriz do módulo tangente. A matriz B é definida como:

$$B = R \cdot N \cdot L \quad 3.3$$

onde R (matriz dos cossenos direcionais) define a transformação ortogonal do sistema de coordenadas global para o local; N define a matriz de funções de forma; e L é uma matriz de operadores utilizada para definir os deslocamentos relativos δx e δy entre os nós do topo e da base de cada elemento coesivo.

A Matriz B é usada para transformar o vetor de deslocamentos globais, \vec{u} , em um vetor de deslocamento relativo local, $\vec{\delta}_t$ e $\vec{\delta}_n$:

$$\begin{Bmatrix} \vec{\delta}_t \\ \vec{\delta}_n \end{Bmatrix} = Bu = R \cdot N \cdot L \cdot u \quad 3.4$$

Ou,

$$\begin{Bmatrix} \vec{\delta}_t \\ \vec{\delta}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_X^1 \\ u_Y^1 \\ u_X^2 \\ u_Y^2 \\ u_X^3 \\ u_Y^3 \\ u_X^4 \\ u_Y^4 \end{bmatrix} \quad 3.5$$

onde θ é o ângulo entre os sistemas de coordenadas global e local, e u_M^n é o deslocamento global do nó n (variando de 1 a 4) no sistema de coordenadas globais M (x ou y). Funções de forma N_1 e N_2 são definidas no domínio isoparamétrico como:

$$N_1 = \frac{1}{2}(1 - \zeta) \quad 3.6$$

$$N_2 = \frac{1}{2}(1 + \zeta) \quad 3.7$$

Os saltos de deslocamentos no sistema de coordenadas local, δ_t e δ_n , são usados no cálculo do vetor de tração, \vec{t} , de acordo com a lei de tração-separação adotada. Para computar a matriz do módulo tangente, C , é necessário diferenciar \vec{t} em relação a $\vec{\delta}_t$ e $\vec{\delta}_n$. As componentes da matriz de módulo tangente são dados por:

$$C_{ij} = \frac{\partial t_i}{\partial \delta_j} \quad 3.8$$

onde $i, j=t$ ou n .

A quadratura Gaussiana é utilizada para aproximar a integral das funções mostradas nas equações 3.1 e 3.2 em dois pontos de integração Gaussiana especificados, com a função peso associada igual a 1.

A dependência de taxa de aplicação de carga na resistência coesiva e na energia de fratura é definida a partir das equações 3.9 e 3.10, propostas no trabalho de ESPINOSA e ZAVATTIERI (2003). A representação das equações difere em parte da proposta por ESPINOSA e ZAVATTIERI (2003), visto que a implementação da parcela do modelo que considera os efeitos da temperatura estava além do escopo do trabalho de ARAGÃO (2011).

$$T_{\max} = T_{\max}^0 \left(1 + \zeta_T \ln \left[\frac{\dot{\lambda}}{\dot{\lambda}_0} \right] \right) \quad 3.9$$

$$G_c = G_c^0 \left(1 + \zeta_G \ln \left[\frac{\dot{\lambda}}{\dot{\lambda}_0} \right] \right) \quad 3.10$$

Sendo $\dot{\lambda}_0$ a taxa de expansão do elemento coesivo, T_{\max}^0 a resistência coesiva em $\dot{\lambda}_0$, G_c^0 a energia de fratura em $\dot{\lambda}_0$, e ζ_T e ζ_G parâmetros do modelo determinados a partir de ensaios de laboratório (como ensaios de fratura SCB). $\dot{\lambda}$ representa a crescente taxa de separação das superfícies de cada elemento coesivo, determinada pela equação 3.11.

$$\delta_e = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_t^2} \quad 3.11$$

A taxa efetiva de separação das superfícies do elemento coesivo, $\dot{\delta}_e = \frac{\partial \delta_e}{\partial t}$, é individualmente calculada para cada elemento coesivo para deslocamentos na região de comportamento linear elástico recuperável da lei de tração-separação coesiva. Com o $\dot{\delta}_e$ calculado, as propriedades de fratura apresentadas nas equações 3.9 e 3.10 são determinadas e utilizadas para atualizar o vetor de tração, \vec{t} , e a matriz de módulo tangente, C .

3.2.3. Código dependente da taxa e da temperatura

Neste trabalho, a parcela referente aos efeitos da temperatura foi adicionada ao código implementado por ARAGÃO (2011), tornando a subrotina UEL dependente da taxa e da temperatura a que o material está submetido. As equações 3.12 e 3.13, são as representações finais da proposta por ESPINOSA e ZAVATTIERI (2003).

$$T_{\max} = T_{\max}^0 \left(1 + \zeta_T \ln \left[\frac{\dot{\lambda}}{\dot{\lambda}_0} \right] \right) \left(1 - \frac{[\Theta - \Theta_n]}{[\Theta_m - \Theta_0]} \right) \quad 3.12$$

$$G_c = G_c^0 \left(1 + \zeta_G \ln \left[\frac{\dot{\lambda}}{\dot{\lambda}_0} \right] \right) \left(1 - \frac{[\Theta - \Theta_n]}{[\Theta_m - \Theta_0]} \right) \quad 3.13$$

onde Θ é a temperatura atual, Θ_0 é a temperatura de referência, e Θ_m é a temperatura característica do material.

3.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL E NUMÉRICO

O programa experimental desta pesquisa contempla um total de cinco misturas, G1, G2, G3, G4 e M1. Estas diversas misturas foram utilizadas para a confecção de amostras para ensaios de módulo dinâmico e ensaios de fratura, a serem utilizados na validação do gerador de microestruturas desenvolvido. Para cada mistura foi dosada uma MAF, sendo determinadas as propriedades viscoelásticas da MAF e os módulos de elasticidade dos agregados a fim de se simular o comportamento dos ensaios realizados. A Figura 3.19 apresenta um esquema geral dos ensaios realizados.

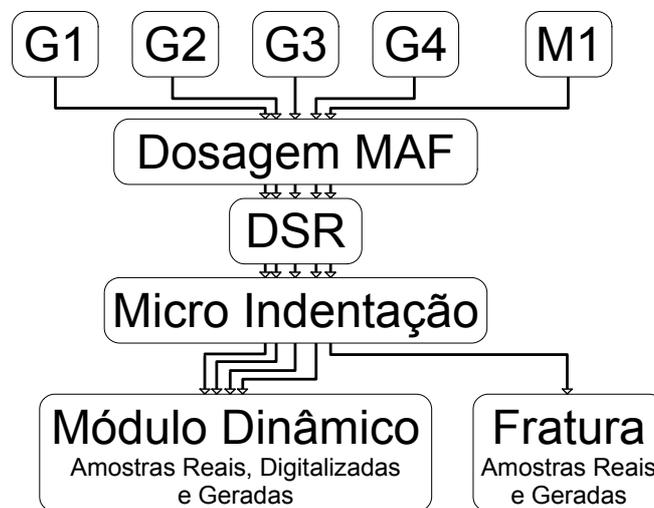


Figura 3.19: Esquema geral dos ensaios realizados.

Nos itens a seguir serão descritos os materiais e procedimentos adotados.

3.3.1. Dosagem do concreto asfáltico

O programa experimental desta pesquisa baseou-se em cinco misturas asfálticas, que serão designadas pelos termos G1, G2, G3, G4 e M1. A dosagem dos concretos asfálticos seguiu a metodologia *Superpave* (AASHTO M323, 2013), que pode ser resumida na determinação de proporções de ligante asfáltico e agregados que geram propriedades volumétricas, como vazios no agregado mineral, vazios na mistura, relação betume-vazios e filer-asfalto efetivo, %G_{mm} no número de giros (N_{inicial}) inicial e final (N_{final}) dentro de limites especificados pelo projetista.

A mistura G1 foi composta por agregados de gnaiss da pedreira Esam - RJ e ligante asfáltico classificado como CAP 30/45 ou PG 70-16 S. A mistura G3 utilizou um agregado do tipo seixo rolado proveniente de Santarém - PA, uma areia natural do Rio de Janeiro e o mesmo ligante asfáltico da mistura G1. A mistura G2 utilizou uma mistura de 50% de agregados da mistura G1 e 50% da mistura G3, e o mesmo ligante asfáltico. A mistura M1 foi composta por um agregado de granito proveniente da pedreira de Sepetiba - RJ, uma cal hidratada calcítica CH-I e um ligante asfáltico com classificação CAP 50/70 ou PG 64-22 S. Estas quatro dosagens foram realizadas no laboratório de pavimentação da COPPE/UFRJ nas pesquisas de PAZOS (2015) e VARGAS (2016).

A mistura G4 foi preparada na University of Nebraska - Lincoln (Estados Unidos da América), e foi composta por uma mistura de agregados de cascalho e calcário, cal hidratada e ligante asfáltico classificado como PG 64-28. A Tabela 3.2 apresenta a relação dos agregados e ligantes utilizados em cada mistura.

Tabela 3.2: Resumo das dosagens utilizadas no trabalho.

Dosagem	Agregado	Região	Forma	Ligante	
G1	Essam	RJ	Cubica	CAP 30/45	PG 70-16 S
G2	Essam/Santarém	RJ/PA	50% Brita Cubica 50% Seixo	CAP 30/45	PG 70-16 S
G3	Santarém	PA	Seixo	CAP 30/45	PG 70-16 S
G4	Nebraska	-	-	-	PG 64-28
M1	Sepetiba	RJ	-	CAP 50/70	PG 64-22 S

A curva granulométrica adotada para todas as misturas brasileiras (G1, G2, G3 e G4), com tamanho máximo nominal de 19 mm, foi enquadrada entre os limites da faixa IV do *Asphalt Institute*, seguindo a prática da prefeitura do Rio de Janeiro. A faixa utilizada para a mistura G4 não foi informada. As curvas granulométricas das misturas e os valores das mesmas estão representados, respectivamente, na Figura 3.20 e na Tabela 3.3.

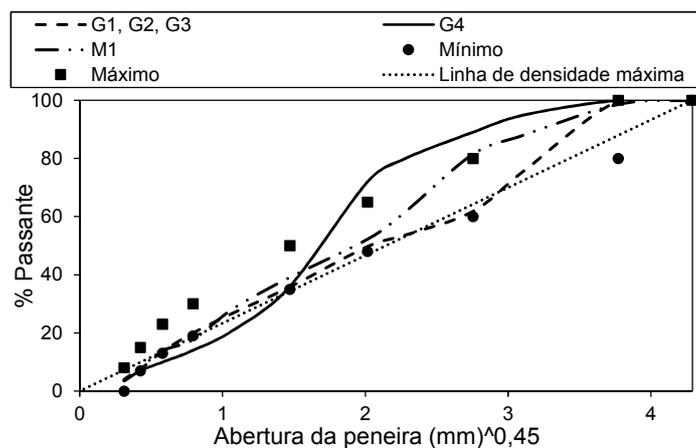


Figura 3.20: Granulometrias das misturas asfálticas utilizadas.

Tabela 3.3: Dados das granulometrias das misturas utilizadas.

Abertura da malha da peneira ASTM	Abertura da malha da peneira (mm)	Mistura			Limites (% passante)	
		G1, G2, G3 %Passante	G4 %Passante	M1 %Passante	Mínimo	Máximo
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100	100
3/4"	19,1	99,8	100,0	98,6	80	100
1/2"	12,5	76,0	95,0	88,1		
3/8"	9,5	61,8	89,0	81,4	60	80
1/4"	6,3	53,7		61,7		
Nº 4	4,8	49,7	72,0	52,2	48	65
Nº 8	2,4	35,8	36,0	39,1	35	50
Nº 16	1,2	26,9	21,0	28,4		
Nº 30	0,6	19,9	14,0	17,6	19	30
Nº 50	0,3	13,6	10,0	13,9	13	23
Nº 100	0,2	7,5	7,0	8,0	7	15
Nº 200	0,1	3,6	3,5	3,9	0	8

As misturas foram preparadas em um misturador mecânico, apresentado na Figura 3.21. Para promover o envelhecimento a curto prazo, as misturas foram usadas e então mantidas em estufa por um período de duas horas na temperatura de compactação antes de moldar os corpos de prova.



Figura 3.21: Misturador mecânico da COPPE utilizado nesta tese.

Após envelhecidas, as amostras foram compactadas em um compactador giratório Superpave (CGS), com aplicação de 100 giros a uma pressão de 600 kPa.



Figura 3.22: Compactador giratório Superpave da COPPE utilizado nesta tese.

3.3.2. Dosagem da MAF

As MAFs foram preparadas no mesmo misturador utilizado nas misturas de concreto asfáltico, e as amostras foram compactadas no CGS. Para as misturas G1, G2, G3 e M1, considerou-se um tamanho máximo de 1,18 mm para os agregados das MAFs. Já para a mistura G4 a MAF foi considerada como a parcela de agregados de dimensões inferiores a 0,30 mm, pois assim a MAF foi caracterizada no estudo original.

As dosagens das misturas MAF brasileiras foram realizadas seguindo o procedimento proposto por SOUZA *et al.* (2013), que pode ser resumido nos seguintes passos:

- Passo 1: Uma mistura CBUQ completa é preparada, e separada em três amostras. A quantidade mínima de cada material é derivada da norma AASHTO T209 (2010):

Tabela 3.4: Quantidade mínima das amostras que devem ser preparadas (SOUZA *et al.*, 2013).

Tamanho máximo nominal do agregado	Peso mínimo da amostra (g)
≥ 37,5	4000
19,0 a 25,0	2500
≤ 12,5	1500

- Passo 2: Estas amostras são envelhecidas em estufa, por duas horas a 135 ±5°C, de acordo com a norma AASHTO T209 (2010);
- Passo 3: As misturas são resfriadas por 30 minutos, e os possíveis grumos são, então, separados manualmente. Após o destorroamento dos grumos, o material é espalhado em uma superfície lisa e resfriado por mais 30 minutos;
- Passo 4: O material é fracionado nas peneiras N°4, N°8, N°16. Esferas de aço podem ser utilizadas para auxiliar o processo de fracionamento. As frações de material retido nas peneiras são denominadas de Grupo 1, 2 e 3, respectivamente. A fração de material passante na peneira N°16 fica denominada como Grupo 4;

- Passo 5: Cada grupo é então secado a temperatura de 110°C, depositado em um recipiente de massa (W_P), e a massa do recipiente com o grupo (W_{Mi}) é determinada;
- Passo 6: Os recipientes são levados ao forno de ignição a temperatura de 427°C para a extração do ligante;
- Passo 7: A nova massa do recipiente com cada grupo de material (W_{Ai}) é registrada;
- Passo 8: O teor de ligante de cada grupo é calculado a partir da equação 3.14:

$$P_{bi} = \frac{W_{Mi} - W_{Ai}}{W_{Mi} - W_P} \quad 3.14$$

Sendo i o número do grupo em questão.

- Passo 9: Fica então determinado o teor de ligante da MAF como o teor de ligante do grupo 4 (P_{b4}).

A mistura G4 foi originalmente dosada a partir do método proposto por KARKI (2010), onde o teor de ligante da MAF corresponde ao teor de ligante da dosagem do concreto asfáltico descontando-se o ligante absorvido pelos agregados graúdos (não pertencentes à MAF) e o filme de ligante de 12 um recobrindo os agregados.

3.3.3. Determinação de propriedades dos agregados

Ensaio de microindentação (OLIVER e PHARR 1992, 2004) foram realizados para a determinação do módulo de elasticidade das partículas de agregados. Os ensaios de microindentação foram realizados na COPPE, em um microindentador da marca CSM. A técnica consiste na indentação de uma superfície (a ser caracterizada) utilizando um material com propriedades mecânicas e características geométricas conhecidas (material indentador) (Figura 3.23). Durante a preparação, as amostras de agregado devem ser inicialmente embutidas em uma resina e, em seguida, a superfície a ser indentada deve ser lixada, buscando torná-la a mais plana possível, como ilustrado na Figura 3.24.

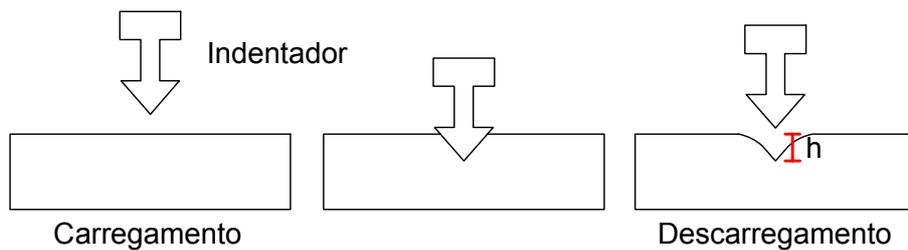


Figura 3.23: Esquema do processo de indentação.



Figura 3.24: Lixamento da amostra de agregado para indentação.

Este processo tem como objetivo evitar danos no equipamento de indentação e realizar uma medição de propriedades mais precisa (semelhante a um corpo de prova que deve possuir faces opostas paralelas durante um ensaio de compressão). A amostra é então fixada entre duas placas rígidas no equipamento de indentação, como ilustrado na Figura 3.25.



Figura 3.25: Amostra preparada para indentação.

Durante o processo, o indentador é pressionado contra a superfície planificada da amostra de agregado. A profundidade da penetração do indentador, h , é medida, e a área da indentação é determinada utilizando a geometria conhecida do indentador. O carregamento é plotado *versus* a profundidade de penetração durante o ensaio. A partir da parcela de descarregamento da curva, a rigidez de contato, S , é determinada e utilizada na estimativa do módulo de elasticidade do agregado, E . O processo é realizado automaticamente pelo indentador.

3.3.4. Determinação de propriedades viscoelásticas lineares das MAFs

Para a determinação das propriedades viscoelásticas lineares das MAFs, corpos de prova foram compactados em um CGS, com aproximadamente 90 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Destes, várias amostras com 50 mm de altura e 12 mm de diâmetro foram extraídas com uma sonda rotativa desenvolvida especialmente para este trabalho. O processo de extração foi estabelecido cuidadosamente para evitar danos nas amostras. Em resumo, dois fatores foram identificados como cruciais para o sucesso deste processo de extração e tiveram que ser ajustados, por tentativa e erro: o controle da velocidade de

descida e rotação da sonda e a aplicação contínua de água gelada para garantir o resfriamento da amostra.

Em seguida, pratos metálicos de 12 mm em diâmetro foram colados às extremidades das amostras e acoplados ao DSR, como ilustrado na Figura 3.26.



Figura 3.26: (a) extração de amostras MAF (b) amostras sendo ensaiadas no DSR.

O ensaio com amostras de MAF consistiu da aplicação de uma deformação torsional sinusoidal de 0,0065%, que resulta em um nível de deformação dentro dos limites de linearidade do comportamento viscoelástico do material. Os ensaios foram realizados em diferentes frequências (0,01 a 25 Hz) e temperaturas (5, 15, 25, 35 e 40°C). Considerando as MAFs como materiais termoreologicamente simples, o princípio da superposição tempo (ou frequência) - temperatura foi empregado para obter curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) em função da frequência angular (ω), que é definido como a razão entre as amplitudes de tensão e deformação cíclicas. A multiplicação de $|G^*|$ pelo cosseno do ângulo de fase (Δ) resultou no módulo cisalhante de armazenamento (G'), também em função de ω .

O método da colocação foi então adotado para ajustar os coeficientes da função analítica em forma de série de Prony do $G'(\omega)$ às curvas mestras obtidas, com base no modelo de Maxwell generalizado, como indicado na equação 3.15 (KIM *et al.*, 2003, 2005). Estes coeficientes foram usados como parâmetros de entrada no modelo computacional para a simulação do comportamento viscoelástico linear das MAFs.

$$G'(\omega) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^n \frac{G_i \omega^2 \rho_i^2}{\omega^2 \rho_i^2 + 1} \quad 3.15$$

onde:

$G'(\omega)$ = módulo cisalhante de armazenamento (Pa);

ω = frequência angular (rad/s);

G_{∞} = módulo de equilíbrio a um tempo longo de carregamento (Pa);

G_i = constantes de mola do modelo generalizado de Maxwell (Pa);

ρ_i = tempo de relaxação (s);

n = número de unidades de Maxwell no modelo generalizado de Maxwell.

3.3.5. Módulo dinâmico uniaxial

Serão descritos separadamente os procedimentos utilizados para a realização dos ensaios laboratoriais e suas respectivas simulações numéricas.

Os procedimentos de ensaio de módulo dinâmico uniaxial são descritos em várias normas, como a ASTM D3497, a AASHTO T342 e a futura norma Brasileira do DNIT, e consiste na aplicação de uma carga uniaxial do tipo *haversine* de compressão no sentido longitudinal de uma amostra cilíndrica, conforme ilustrado na Figura 3.27. A partir deste ensaio, são determinados o ângulo de fase (Δ), que representa a defasagem entre os picos de tensão e de deformação, e o módulo dinâmico, obtido a partir da relação entre picos de tensão e deformação (σ_0/ϵ_0).

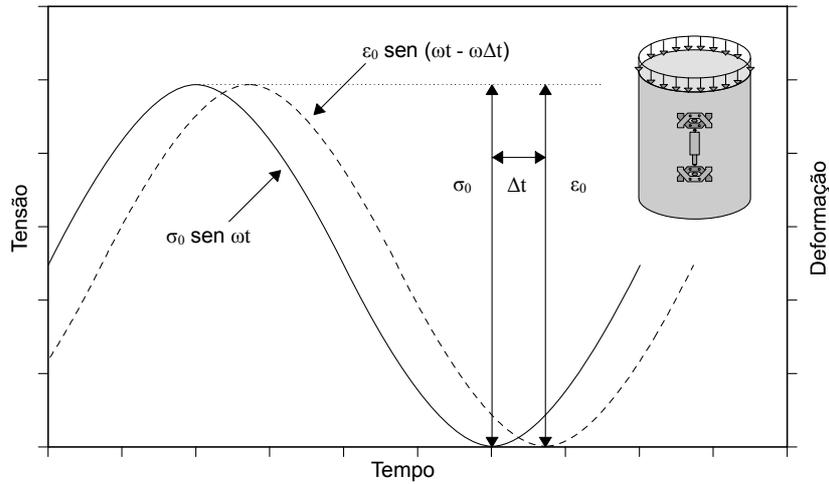


Figura 3.27: Pulso de tensão *haversine* aplicado no ensaio de módulo dinâmico (adaptado de NASCIMENTO, 2008).

Já o módulo complexo (E^*), por ser um número complexo, é composto de duas parcelas: a parcela real, denominada módulo de armazenamento (E') e a parcela imaginária, denominada módulo de perda (E''), como ilustrado na Figura 3.28. Quanto maior for a parcela real, menor será o ângulo de fase e mais recuperável serão as deformações no material.

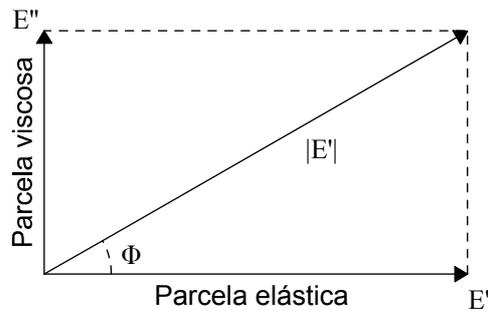


Figura 3.28: Representação do módulo complexo.

3.3.5.1. Ensaio laboratoriais

Os ensaios de módulo dinâmico das misturas G1, G2 e G3 foram realizados por PAZOS (2015) em uma prensa de ensaios universais da marca MTS, instalada no laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ. Para os ensaios, amostras foram compactadas em um CGS nas dimensões de 150 mm em diâmetro e 170 mm em altura.

Destas, foram extraídos núcleos de 100 mm de diâmetro. As extremidades destas amostras foram serradas, resultando em uma altura final de 150 mm. O volume de vazios dos núcleos foi de $7,0\% \pm 0,5\%$.

Os ensaios foram conduzidos em seis frequências (0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0; 25,0 Hz) e em cinco temperaturas (-10,0; 4,4; 21,1; 37,8; 54,0 °C), garantindo que a deformação na região central das amostras fosse mantida entre $50 \mu\epsilon$ e $100 \mu\epsilon$ (*microstrains*). As deformações no centro da amostra foram obtidas a partir da média das medidas de três LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) instalados na região central das amostras de altura igual a 100 mm, como ilustrado na Figura 3.29. Para cada mistura, foram ensaiadas três réplicas.



Figura 3.29: Instalação dos LVDTs na amostra de módulo dinâmico (PAZOS, 2015).

3.3.5.2. Modelagem computacional

Para as simulações de módulo dinâmico deste trabalho, foram obtidas propriedades dos agregados e das MAFs G1 a G4, de acordo com os procedimentos descritos nas seções 3.3.3 e 3.3.4.

Além das propriedades mecânicas dos constituintes, as suas características geométricas também devem ser consideradas adequadamente para a fabricação de amostras virtuais de concreto asfáltico. Neste trabalho, dois procedimentos foram adotados para este fim: digitalização e geração.

A digitalização foi realizada manualmente, conforme detalhado no item 2.2.2.1, e consistiu na moldagem de amostras utilizando o CGS, que foram posteriormente serradas e digitalizadas em um escâner de mesa. As imagens foram tratadas utilizando o programa AutoCAD 2016, onde os contornos dos agregados foram traçados manualmente. Como foram consideradas fases distintas para agregados e MAF, foi importante garantir que apenas agregados não pertencentes à MAF fossem traçados. Como nem sempre isto era possível, foi desenvolvido um programa para remover as partículas pertencentes à MAF, caso fossem manualmente traçadas por engano. A Figura 3.30 apresenta um exemplo de uma amostra digitalizada com vetores contornando os agregados. Para cada microestrutura escaneada, foram feitas análises digitais de imagens para a determinação de características como a granulometria e a fração de área.

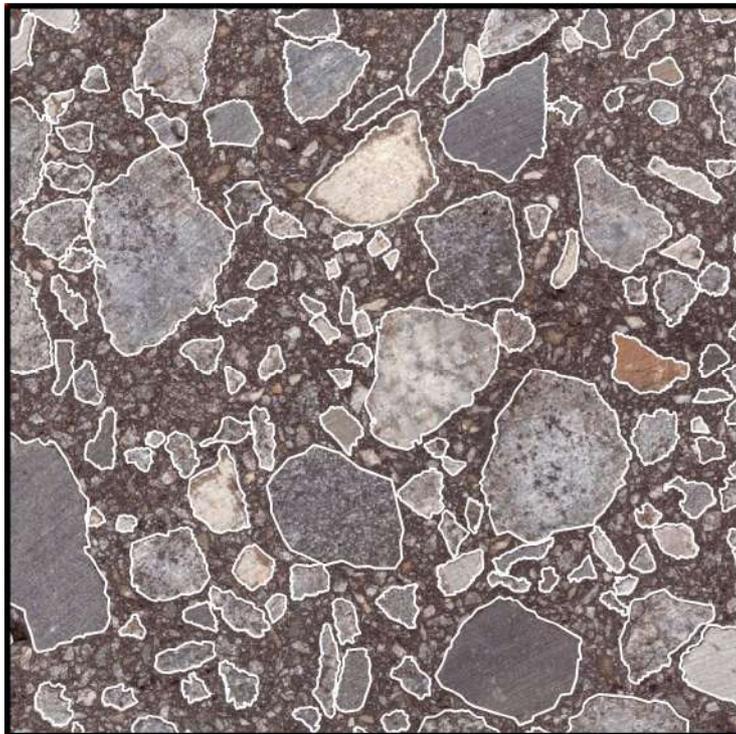


Figura 3.30: Exemplo de uma amostra de concreto asfáltico real digitalizada e vetorizada.

O segundo procedimento de fabricação de microestruturas baseou-se no programa gerador desenvolvido na presente pesquisa e detalhado no item 3.1.2. As microestruturas foram geradas utilizando propriedades de misturas reais de laboratório como parâmetros de entrada.

As microestruturas digitalizadas e geradas foram importadas pelo programa ABAQUS para serem discretizadas em malhas de elementos finitos e posteriormente simuladas em ensaios virtuais de módulo dinâmico. Nas simulações, as partículas de agregados e as MAFs foram consideradas como materiais elásticos lineares e viscoelásticos lineares, respectivamente. Simetria isotrópica foi também adotada para as propriedades dos dois materiais.

As condições de contorno foram aplicadas para controlar o deslocamento nas faces superior e inferior das amostras virtuais, como indicado na Figura 3.31. Os deslocamentos horizontal e vertical foram impedidos na face inferior, enquanto que uma carga compressiva do tipo *haversine* foi aplicada de maneira uniforme na face superior das amostras. Vale salientar que, durante estas simulações, a magnitude da carga *haversine* aplicada não afetou os valores de módulo dinâmico, já que elementos que permitiriam a modelagem de dano não foram inseridos na malha. Portanto, o ligante asfáltico se comportou como um material viscoelástico linear para qualquer magnitude de carga aplicada.

O deslocamento vertical médio dos nós do topo das amostras foi usado para calcular o módulo dinâmico, definido simplesmente pela razão entre a amplitude da tensão *haversine* e a amplitude da deformação *haversine*.

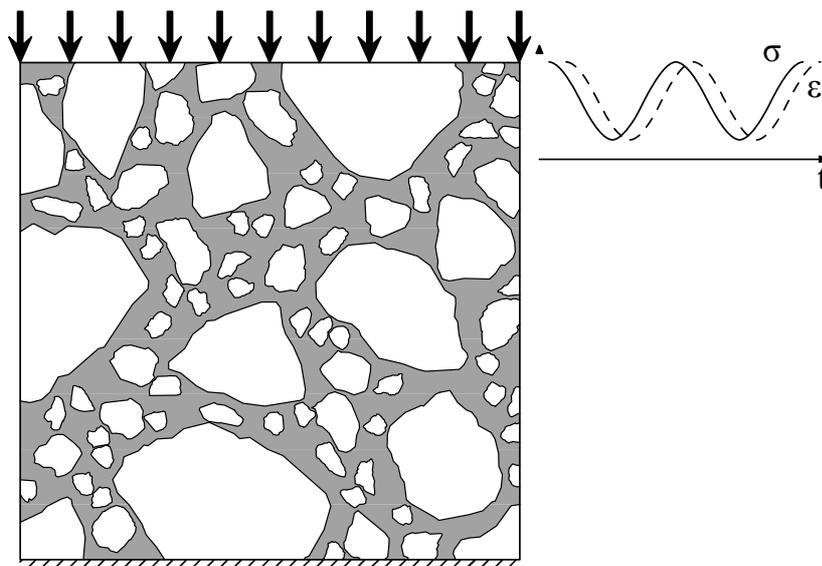


Figura 3.31: Esquema da simulação de módulo dinâmico realizada.

3.3.6. Fratura em ensaios de flexão biapoiados

Foram realizados ensaios de fratura com amostras SCB com velocidades de aplicação de carga e temperaturas variadas para a atualização e calibração do modelo coesivo de fratura dependente da taxa e da temperatura.

O ensaio SCB consiste basicamente de uma flexão com dois pontos de apoio e um de aplicação de carga. A amostra é semicircular e tem uma fenda guia, por onde se inicia a trinca. A carga é aplicada no topo da amostra e a reação nos apoios é medida, possibilitando a plotagem de curvas força-deslocamento. O ensaio SCB foi escolhido para a determinação das propriedades de fratura das misturas asfálticas por ser prático e eficiente, já que vários corpos de prova podem ser extraídos de amostras cilíndricas fabricadas no CGS ou extraídas no campo.

O comportamento viscoelástico da MAF cria uma complicação adicional na identificação de suas propriedades de fratura. Parte da energia obtida a partir do cálculo da área sob curvas experimentais força-deslocamento está relacionada, por exemplo, com a energia dissipada devido ao comportamento viscoelástico da MAF. Assim, os parâmetros de fratura ao longo da zona de processo de fratura devem ser identificados localmente e não a partir de resultados globais de força-deslocamento.

Baseado nesta observação, uma metodologia desenvolvida por ARAGÃO *et al.* (2014) que combina resultados de simulação numérica e de ensaios experimentais foi adotada nesta presente pesquisa. De acordo com ARAGÃO *et al.* (2014), a análise inversa para a obtenção de parâmetros de fratura a partir da comparação entre os resultados experimentais e de simulações numéricas é uma abordagem mais apropriada do que suposição feita por abordagens tradicionais de equivalência entre propriedades da zona de processo de fratura e parâmetros de fratura calculados com base em deformações médias de amostras em processo de fissuramento. Parâmetros de fratura, tais como energia de fratura, obtidos por estas abordagens tradicionais geralmente superestimam as propriedades de fratura reais porque diferentes fontes de dissipação de energia além da energia de fratura em si são erroneamente envolvidas nos cálculos.

A Figura 3.32 ilustra as etapas deste procedimento numérico-experimental. Em resumo, propriedades viscoelásticas lineares das MAFs são obtidas a partir de ensaios de varredura de frequência no DSR, enquanto que as propriedades de fratura são determinadas a partir de simulações de ensaios reais SCB realizados em laboratório. Nas simulações, as propriedades de fratura de um modelo coesivo são ajustadas até que se observe a correspondência entre curvas numéricas e experimentais de força-deslocamento. Por fim, as propriedades dos constituintes do concreto asfáltico são usadas como parâmetros de entrada no modelo de previsão do comportamento de fratura microestrutural do compósito.

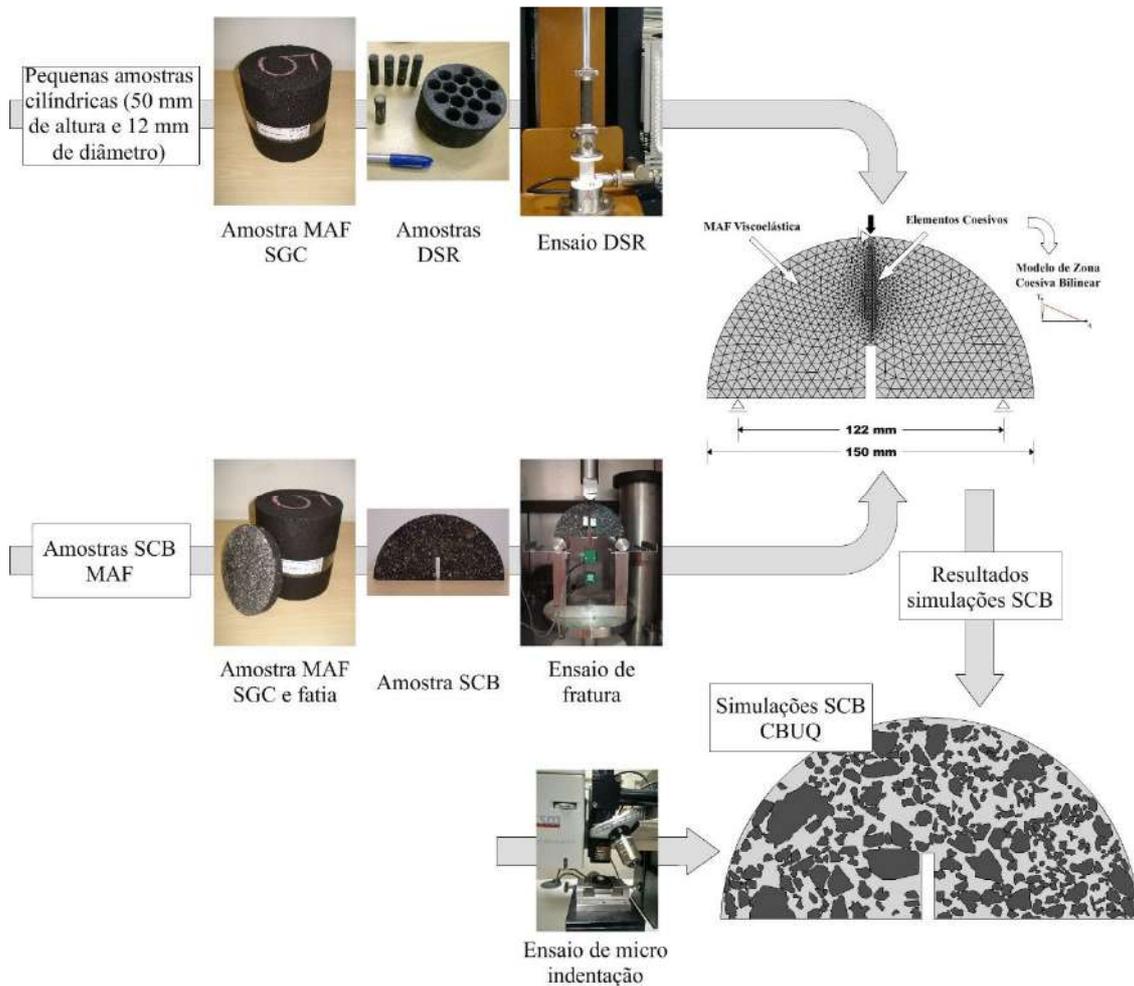


Figura 3.32: Resumo do procedimento numérico experimental adotado neste trabalho.

3.3.6.1. Ensaios laboratoriais

Amostras de MAF foram inicialmente fabricadas no CGS medindo 150 mm em diâmetro e 155 mm em altura. Em seguida, tais amostras foram utilizadas para a obtenção de corpos de prova para os ensaios de fratura. Amostras SCB foram obtidas cortando corpos de prova moldados no CGS, e abrindo uma fenda de 2,5 mm de largura e 25 mm de profundidade, conforme geometria apresentada na Figura 3.33. A espessura das amostras foi definida em 25 mm, de acordo com um estudo de ARAGÃO e KIM (2012), onde os autores observaram que, para esta espessura, não se observam níveis de tensão significativos na direção da espessura das amostras. Com isso, o esforço computacional de simulações em três dimensões pôde ser significativamente reduzido, já que o problema tridimensional pode ser simulado assumindo a hipótese de estado plano

bidimensional de tensões, dado que as amostras são suficientemente finas. Nesse caso, as amostras estão sujeitas a um estado plano de tensões na ponta da fissura, enquanto que a triaxialidade do estado de tensões no interior da seção é significativa em amostras espessas.

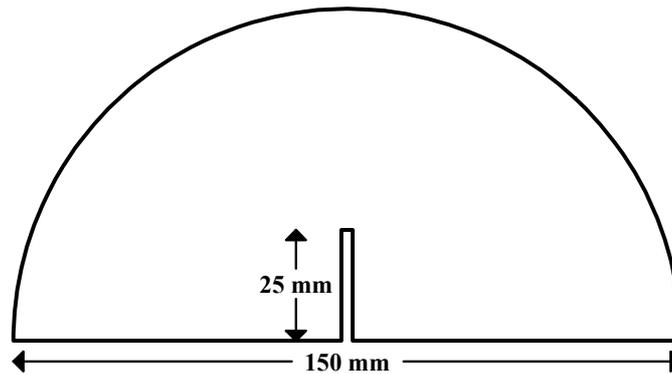


Figura 3.33: Geometria SCB utilizada.

Antes da realização do ensaio, amostras SCB individuais foram condicionadas na câmara de temperatura de uma máquina universal de testes até atingirem equilíbrio de temperatura. As temperaturas adotadas foram -10, 10 e 25°C. Para esse controle, uma amostra de sacrifício foi utilizada e sua temperatura interna foi medida com um termopar.

Após a etapa de condicionamento de temperatura, diversas taxas de carregamento foram aplicadas. O modo que a taxa foi controlada dependia do material da amostra. Para amostras de MAF foi controlada a taxa de abertura na ponta da trinca de modo que esta se formasse a uma taxa de 0,5; 1,0 ou 2,0 mm/min., em um processo iterativo conhecido como *feedback loop*, em que o movimento do atuador de carga é ajustado continuamente para garantir a aplicação da taxa de abertura desejada na fenda inicial. Para tal, a abertura da fenda inicial foi medida na região tipicamente denominada de ponta (ou *tip*, em inglês) da fenda inicial para fornecer a chamada *crack tip opening displacement* - *CTOD*. Medidas adicionais de abertura foram monitoradas na chamada boca (ou *mouth*, em inglês) da fenda inicial para fornecer a chamada *crack mouth opening displacement* - *CMOD*.

A escolha de CTOD (e não CMOD) para o controle da taxa de abertura das trincas baseou-se em pesquisas anteriores que demonstraram que em testes de fratura com taxas constantes de evolução do CMOD, as correspondentes taxas de evolução do CTOD não são constantes até que se atinja o pico de força (SONG *et al.*, 2008). Isso pode indicar que a taxa de evolução do CTOD só se torna constante quando há a formação de microfissuras a partir da coalescência de microfissuras. Assim, neste trabalho, uma taxa constante foi imposta ao CTOD para garantir que todas as amostras de MAF fossem submetidas à mesma taxa de propagação de trincas durante toda a duração dos ensaios.

Para monitorar a evolução do CTOD e do CMOD, sensores do tipo *clip-on gage* foram posicionados em placas metálicas tipicamente denominadas de *knife-edges*, fixadas nas amostras com cola de alta capacidade. A Figura 3.34 expõe uma amostra de SCB posicionada no interior da câmara da máquina universal de testes usada nesta pesquisa. Como se pode ver, um guia metálico foi empregado para garantir a centralização das amostras, de forma que a distância entre o seu centro e o centro de cada rolo metálico usado como apoio foi igual a 61 mm.

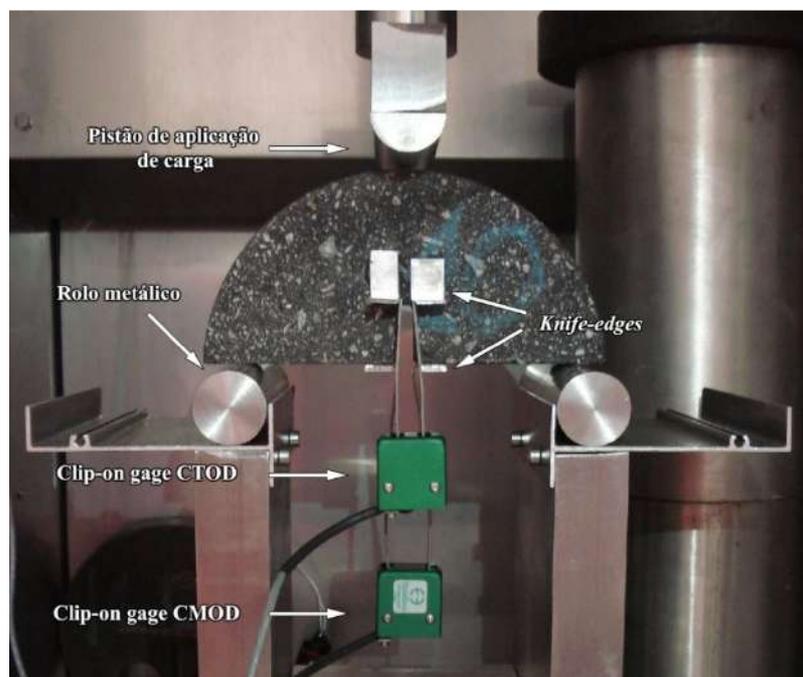


Figura 3.34: Amostra SCB preparada na prensa hidráulica para ensaio.



Figura 3.35: Exemplo do guia metálico sendo utilizado para a centralização de uma amostra.

Todas as medidas foram monitoradas até que a força de reação determinada pela célula de carga da máquina universal atingisse $0,3 \pm 0,02$ kN.

Com a conclusão dos ensaios de fratura em amostras MAF e da caracterização dos constituintes, ensaios de fratura SCB com amostras CBUQ foram realizados. Para amostras de CBUQ o controle da taxa de abertura da trinca foi diferente do utilizado em amostras MAF, sendo realizada direto no atuador. As taxas se mantiveram as mesmas e as medições de CMOD e CTOD foram realizadas. A geometria das amostras manteve-se idêntica à das amostras MAF apresentada na Figura 3.33.

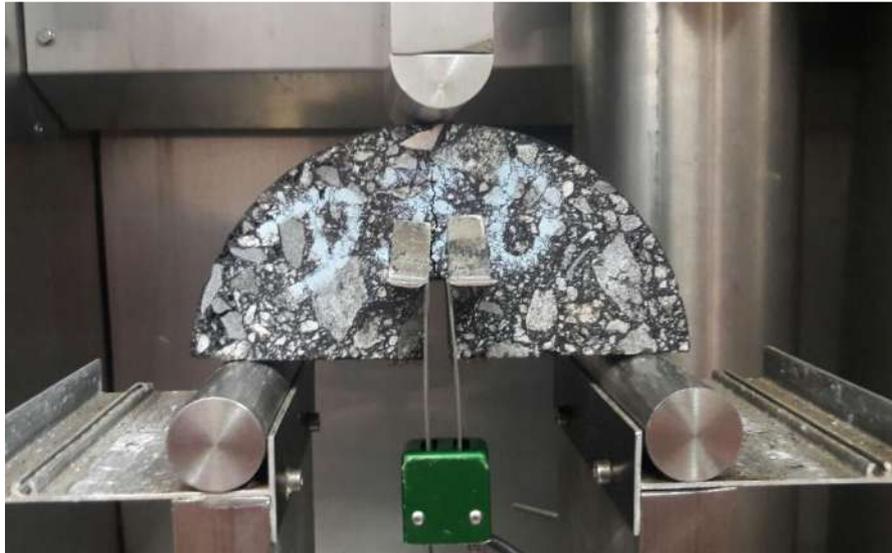


Figura 3.36: Amostra de CBUQ preparada e ensaiada na câmara térmica.

3.3.6.2. Modelagem computacional

A modelagem de fratura em misturas MAF foi baseada no método dos elementos finitos e no conceito de zonas coesivas de fratura. Amostras virtuais das diferentes geometrias avaliadas foram fabricadas e discretizadas para a geração de malhas de elementos finitos. Um estudo de convergência de malha foi realizado para reduzir erros numéricos relacionados ao nível de refinamento das malhas.

Nas simulações, considerou-se a aproximação de estado plano de tensão, o que permitiu que os problemas reais em três dimensões fossem simulados como problemas em duas dimensões. Essa aproximação foi possível devida à razoável homogeneidade das MAFs e reduziu o esforço computacional. A relativa homogeneidade das MAFs também justificou a aproximação de simetria isotrópica para as propriedades viscoelásticas lineares das MAFs nas amostras virtuais.

Elementos de zona coesiva de fratura foram introduzidos nas malhas em regiões potenciais de fratura para simular a formação e propagação de trincas ao longo das zonas coesivas de fratura. Entre os diferentes modelos de zona coesiva disponíveis na literatura, o modelo bilinear de tração-deslocamento foi selecionado devido a sua simplicidade e por

possibilitar a redução da compliância artificial a partir do ajuste do deslocamento efetivo, δ_i .

Os dois parâmetros (resistência e energia de fratura coesivas) foram ajustados durante as simulações até que observou-se correspondência entre os resultados numéricos e experimentais dos testes de fratura conduzidos em diferentes temperaturas e taxas de abertura de CTOD. Para definir um critério de correspondência entre os ensaios e as simulações, adotou-se um procedimento de otimização. Para cada curva de força-deslocamento experimental, coeficientes de uma série exponencial (eq. 3.16) foram primeiramente determinados para possibilitar uma representação matemática dos dados experimentais e a comparação com as curvas simuladas.

$$F = \sum_{i=1}^n A_i \cdot e^{B_i \cdot CTOD} \quad 3.16$$

onde:

CTOD = valores de CTOD medidos;

A_i, B_i = constantes matemáticas do modelo;

n = número de termos nas series (um valor de n = 8 foi adotado).

A Figura 3.37 ilustra o bom ajuste entre os valores dos resultados experimentais e o modelo matemático correspondente para uma temperatura e uma taxa de abertura de trinca, indicando que as constantes da série definida na equação 3.16 foram corretamente definidas.

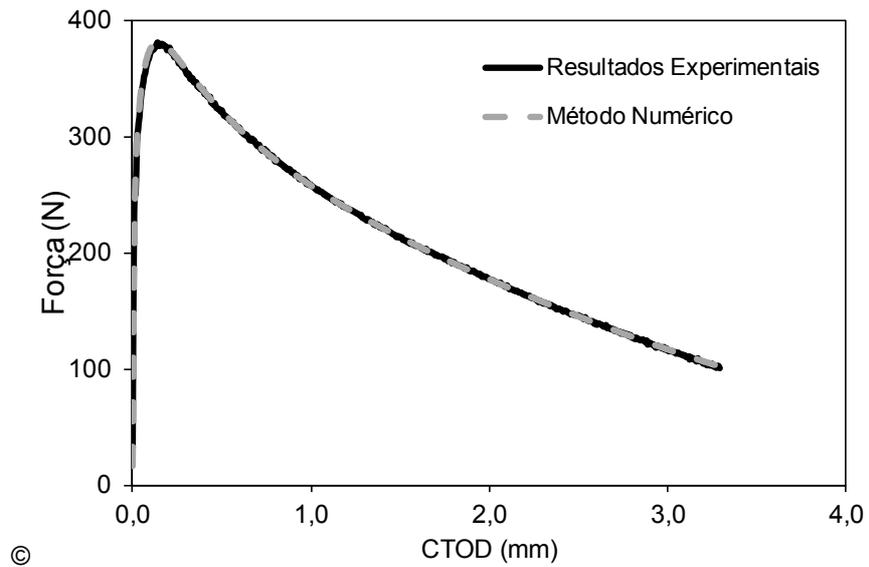


Figura 3.37: Ajuste da expressão matemática para representar as curvas de força-deslocamento dos ensaios laboratoriais.

Para cada um dos três parâmetros, adotou-se um critério de desvio de valores de no máximo 15%. Se dois dos três parâmetros apresentassem desvios inferiores a 15%, assumia-se que havia um bom ajuste entre os resultados experimentais e numéricos. A Figura 3.38 mostra um exemplo da boa correspondência encontrada entre os resultados numéricos e experimentais para um dos casos avaliados no trabalho.

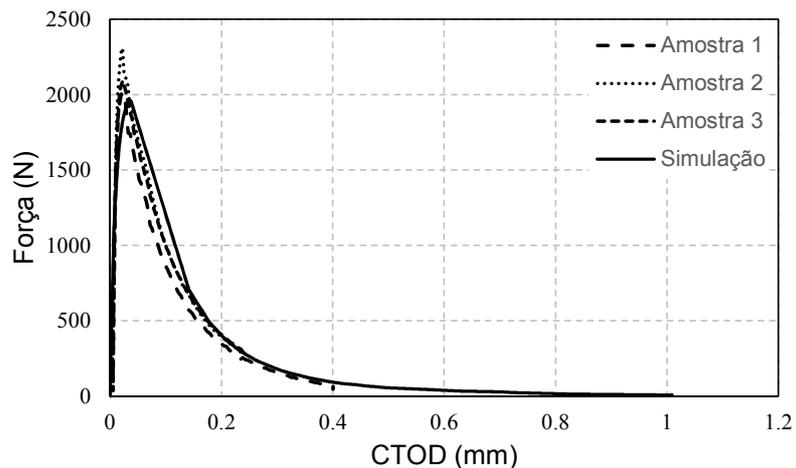


Figura 3.38: Exemplo de comparação de resultados experimentais e numéricos.

4. RESULTADOS

4.1. DOSAGENS E PROPRIEDADES BÁSICAS DOS MATERIAIS

Para esta pesquisa, diversas misturas de concreto asfáltico foram utilizadas. Nos itens a seguir serão apresentadas as propriedades volumétricas obtidas a partir das dosagens e as propriedades dos materiais envolvidos necessárias para a realização das análises numéricas.

4.1.1. Dosagens das misturas de concreto asfáltico

As propriedades volumétricas das misturas G1, G2, G3, G4 e M1 utilizadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades volumétricas das misturas de CBUQ utilizadas.

Propriedade	Medida				
	G1	G2	G3	G4	M1
Pb (%)	4,3	4,3	4,3	4,0	4,7
Vv (%)	3,8	3,6	3,8	3,9	3,8
VMA (%)	13,3	13,2	11,7	15,0	13,0
VFA (%)	71,6	73,0	67,0	73,9	71,0
D/B	1,0	1,1	1,1	-	0,9
%G _{mm} @N _{ini}	88,7	87,5	89,7	-	87,2
%G _{mm} @N _{max}	97,2	97,5	97,0	-	96,9

4.1.2. Dosagem das MAFs

A Tabela 4.2 apresenta os teores de ligante obtidos dos processos de dosagens das cinco MAFs avaliadas neste estudo.

Tabela 4.2: Teores de ligante determinados durante a dosagem das MAFs.

Mistura	Teor (%)
G1	8,0
G2	11,0
G3	10,6
G4	8,8
M1	13,3

4.1.3. Agregados

Os resultados de módulo de elasticidade dos agregados, determinados a partir de ensaios de microindentação, são mostrados na Tabela 4.3. O coeficiente de Poisson dos agregados da mistura G1 foi assumido como 0,2 (VALLEJO, 2002) e o da mistura G3 como 0,22 (VALLEJO, 2002). Para a mistura G2 foi considerada a combinação entre dos coeficientes das misturas G1 e G3. Para a mistura G4 foi assumido como 0,15 (BARKSDALE, 1993) e para a mistura M1 como 0,25 (VALLEJO, 2002). Os coeficientes de Poisson foram selecionados baseados no tipo de rocha utilizada. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson dos agregados foram considerados constantes e independentes da temperatura de simulação.

Tabela 4.3: Módulos de Young dos agregados usados na composição das MAFs.

Material	Módulo de Young (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
G1	71,26	6,00
G2	71,26 e 84,036	-
G3	84,04	-
G4	50,8	11
M4	46,10	6,85

4.1.4. MAF

As curvas mestras das MAFs das misturas G1, G2, G3 à 25°C e G4 à 21,1°C, determinadas a partir de ensaios de varredura de frequência em um reômetro de cisalhamento dinâmico, estão apresentadas na Figura 4.1. Como pode ser verificado, as misturas G1 e G2 apresentaram rigidezes semelhantes e superiores às misturas G3 e G4, sendo a G4 a mistura com a menor rigidez.

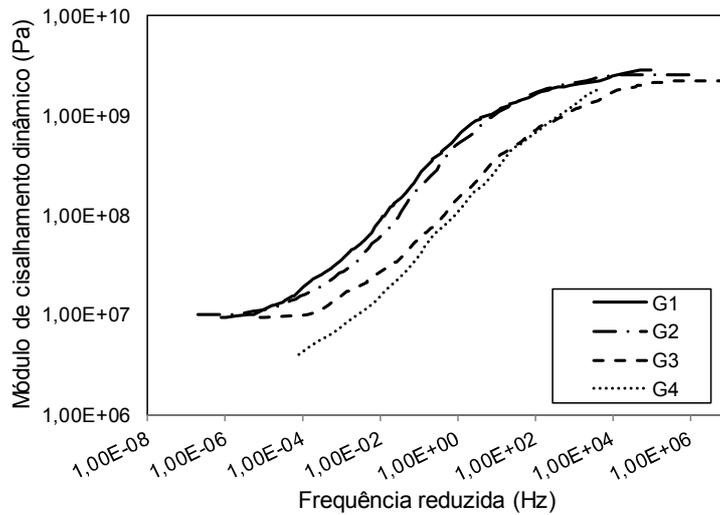


Figura 4.1: Curvas mestras de 25°C de módulo de cisalhamento dinâmico da MAFs G1, G2, G3 e G4.

As curvas mestras da mistura M1, para as temperaturas de -10, 10 e 25°C estão apresentadas na Figura 4.2.

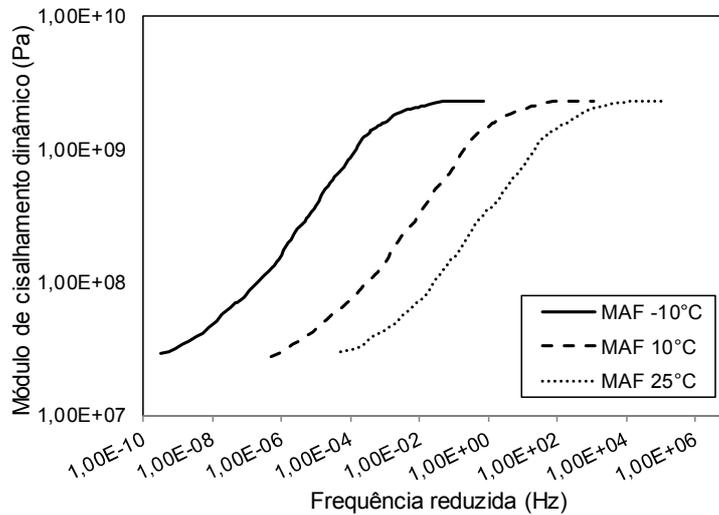


Figura 4.2: Curvas mestras a -10, 10 e 25°C de módulo de cisalhamento dinâmico da MAF M1.

A Tabela 4.4 e a Tabela 4.5 apresentam os coeficientes de séries de Prony determinados para representar as propriedades viscoelásticas lineares das MAFs, de acordo com o modelo de Maxwell generalizado. O coeficiente de Poisson foi assumido como constante e igual a 0,35.

Tabela 4.4: Coeficientes da série de Prony das MAFs G1, G2, G3 e G4.

Mistura	G1		G2		G3		G4	
Temperatura (°C)	25		25		25		21,1	
Parâmetros da série de Prony	ρ_i (s)	G_i (Pa)	ρ_i (s)	G_i (Pa)	ρ_i (s)	G_i (Pa)	ρ_i (s)	G_i (Pa)
1	8,21E-05	6,91E+08	2,00E-04	3,50E+08	1,47E-05	2,78E+08	1,00E-04	9,30E+08
2	8,21E-04	2,52E+08	2,00E-03	4,03E+08	1,47E-04	6,60E+08	1,00E-03	4,85E+08
3	8,21E-03	5,66E+08	2,00E-02	6,67E+08	1,47E-03	4,21E+08	1,00E-02	3,39E+08
4	8,21E-02	4,34E+08	2,00E-01	5,82E+08	1,47E-02	3,84E+08	1,00E-01	1,14E+08
5	8,21E-01	5,32E+08	2,00E+00	3,58E+08	1,47E-01	2,69E+08	1,00E+00	4,99E+07
6	8,21E+00	2,62E+08	2,00E+01	1,41E+08	1,47E+00	1,07E+08	1,00E+01	1,36E+07
7	8,21E+01	9,02E+07	2,00E+02	3,41E+07	1,47E+01	3,82E+07	1,00E+02	4,91E+06
8	8,21E+02	2,37E+07	2,00E+03	1,14E+07	1,47E+02	1,16E+07	1,00E+03	2,62E+06
9	8,21E+03	1,23E+07	2,00E+04	4,92E+06	1,47E+03	8,17E+06	-	-
10	8,21E+04	3,85E+06	2,00E+05	1,30E+06	1,47E+04	3,30E+05	-	-
∞	-	9,50E+06	-	1,00E+07	-	9,50E+06	-	3,50E+06

Tabela 4.5: Coeficientes da série de Prony da MAF M1 para -10, 10 e 25°C.

Mistura	M1					
Temperatura (°C)	-10		10		25	
Parâmetros da série de Prony	ρ_i (s)	G_i (Pa)	ρ_i (s)	G_i (Pa)	ρ_i (s)	G_i (Pa)
1	5,54E-01	1,82E+06	4,00E-03	2,01E+08	2,30E-04	6,14E+07
2	5,54E+00	7,32E+08	4,00E-02	2,83E+08	2,30E-03	5,52E+08
3	5,54E+01	7,92E+08	4,00E-01	8,21E+08	2,30E-02	7,71E+08
4	5,54E+02	4,06E+08	4,00E+00	5,62E+08	2,30E-01	4,10E+08
5	5,54E+03	1,55E+08	4,00E+01	2,15E+08	2,30E+00	1,83E+08
6	5,54E+04	4,39E+07	4,00E+02	7,48E+07	2,30E+01	1,04E+08
7	5,54E+05	2,64E+07	4,00E+03	2,53E+07	2,30E+02	2,69E+07
8	5,54E+06	9,58E+06	4,00E+04	1,28E+07	2,30E+03	1,27E+07
9	5,54E+07	6,57E+06	4,00E+05	9,17E+06	2,30E+04	9,16E+06
10	-	2,22E+07	-	2,22E+07	-	2,22E+07

4.2. GERADOR DE MICROESTRUTURAS DESENVOLVIDO

A seguir serão apresentados os resultados das atividades de verificação e validação do gerador de microestruturas desenvolvido. Para a validação as misturas reais G1, G2, G3 e G4 foram utilizadas, a verificação consistiu em analisar dados de entrada estipulados *versus* dados de saída resultantes.

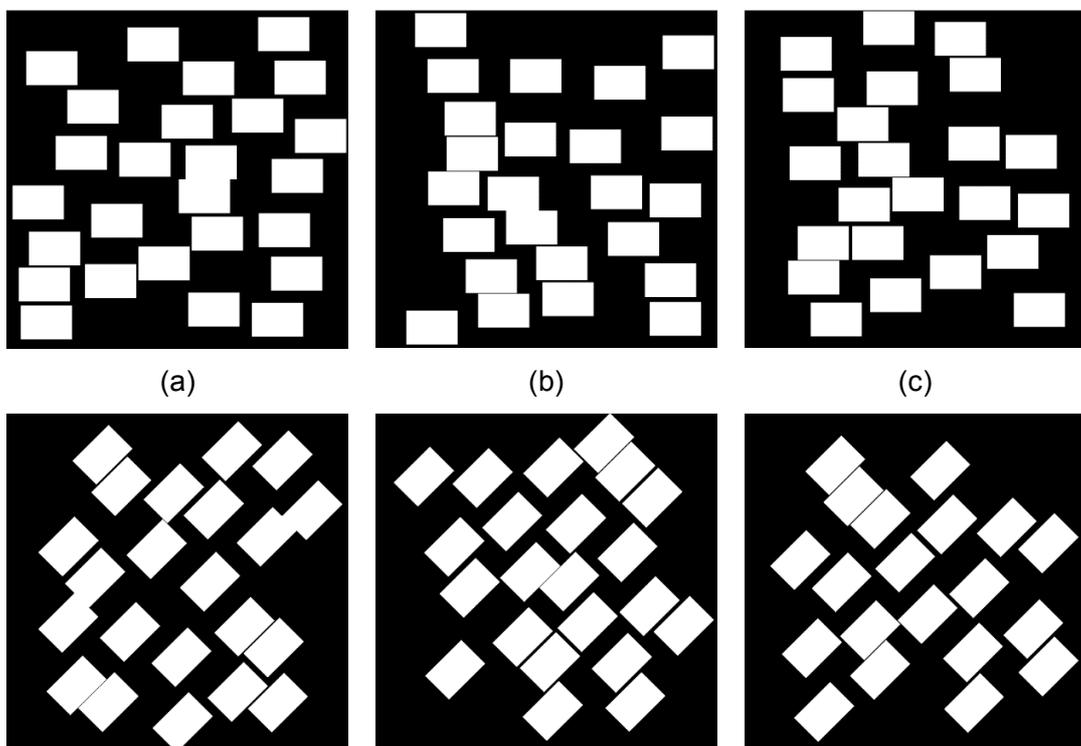
4.2.1. Verificação

4.2.1.1. Controle orientação das partículas e fração de área

Para verificar a capacidade do gerador de controlar a orientação das partículas e a fração de área ocupada pelas mesmas, nove microestruturas compostas de partículas

idealizadas com diferentes orientações foram fabricadas, como mostrado na Figura 4.3. As partículas foram inseridas de modo que não houvesse corte, ou seja, nenhuma partícula foi posicionada parcialmente dentro da área de geração. O tempo aproximado de geração de cada uma destas microestruturas foi de 3 segundos.

A Tabela 4.6 apresenta a orientação das partículas e a fração de área das imagens especificadas como parâmetros de entrada e os parâmetros medidos. A medição das orientações foi realizada no programa ImageJ e a das frações de área tanto no ImageJ quanto no AutoCAD 2016. É possível verificar que a variação da orientação foi menor do que 1% e a das frações de área foi inferior a 0,30% na análise a partir do ImageJ e inferior a 0,001% na análise a partir do AutoCAD 2016. Esta diferença entre os programas de verificação se deve essencialmente à maneira com que cada um trabalha com a imagem. Enquanto o AutoCAD 2016 é um programa vetorial, o ImageJ é um programa raster, então erros de aproximação são esperados. Ainda assim, os resultados indicam um ótimo controle do processo de geração por parte do gerador de microestruturas, o que indica que o gerador pode ser utilizado na correta especificação de características microestruturais de amostras virtuais, como será apresentado a seguir.



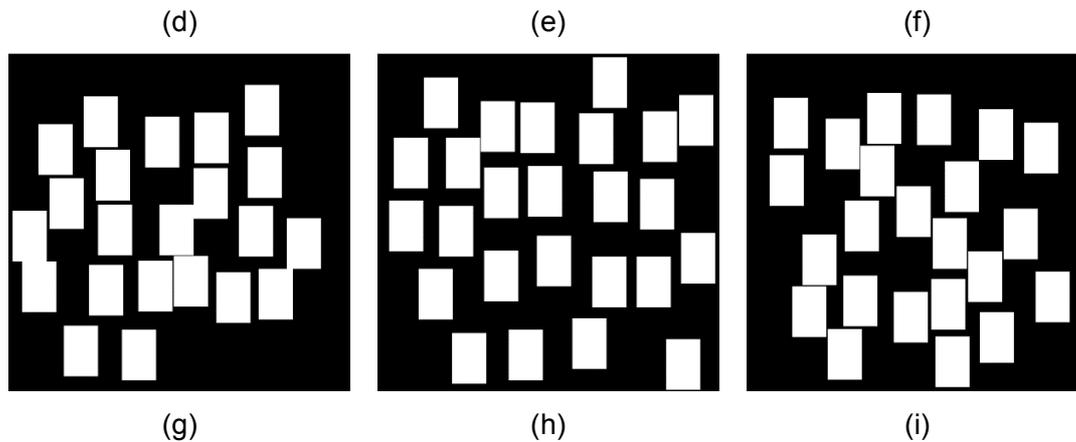


Figura 4.3: Microestruturas idealizadas com diferentes orientações de partículas: (a b c) 0°; (d e f) 45°; e (g h i) 90°.

Tabela 4.6: Comparação entre propriedades especificadas e determinadas.

Microestrutura	Orientação das partículas (°)		Fração de área das partículas (%)		
	Especificada	Determinada	Especificada	Determinada (ImageJ)	Determinada (AutoCAD)
ABC	0	0,67	50	49,9067	49,9995
DEF	45	45,31	50	49,8537	49,9996
GHI	90	90,80	50	49,8973	50,0001

4.2.1.2. Geração de microestruturas com imagens reais

A fim de demonstrar a capacidade do gerador de fabricar microestruturas com imagens de agregados reais, algumas microestruturas foram geradas. É importante lembrar que os agregados utilizados na geração foram primeiro peneirados, separados em grupos de partículas de dimensões semelhantes, e então escaneados no AIMS2. Cada grupo, dividido por tamanho de peneiras, foi armazenado em uma pasta separada no banco de dados do gerador, atrelada ao material de origem por um código identificador.

O número de partículas escaneadas variou com as dimensões das partículas. Para a caracterização morfológica de agregados, o manual do AIMS2 recomenda que ao menos 50 partículas sejam analisadas por peneira se os agregados forem maiores do que 4,75 mm e 150 partículas para agregados menores. Como indicado na Tabela 4.7, os requisitos mínimos especificados pelo AIMS2 foram satisfeitos de modo a garantir a representatividade do banco de dados do gerador.

Tabela 4.7: Número de partículas utilizada no banco de dados do gerador proposto.

Peneira (abertura da malha, mm)	Número de partículas
3/4" (19,00)	53
1/2" (12,50)	53
3/8" (9,50)	83
#4 (4,75)	261
#8 (2,36)	160

A Figura 4.4 apresenta exemplos de microestruturas de MAF fabricadas pelo gerador de microestruturas proposto utilizando diferentes parâmetros volumétricos, *i.e.*, fração de área dos agregados (FA), granulometria (GR), teor de ligante e volume de vazios. Como pode ser observado, uma das microestruturas virtuais contém 2% de vazios com formas quadrangulares. Apesar da forma quadrangular simplista ter sido adotada para os vazios, o programa desenvolvido neste trabalho também é capaz de gerar vazios com formas mais realistas, desde que o usuário forneça suas características geométricas e distribuição espacial na microestrutura. O usuário pode gerar vazios com formas aleatórias se desejar, assim como obter imagens de vazios a partir de tecnologias como tomografia computadorizada.

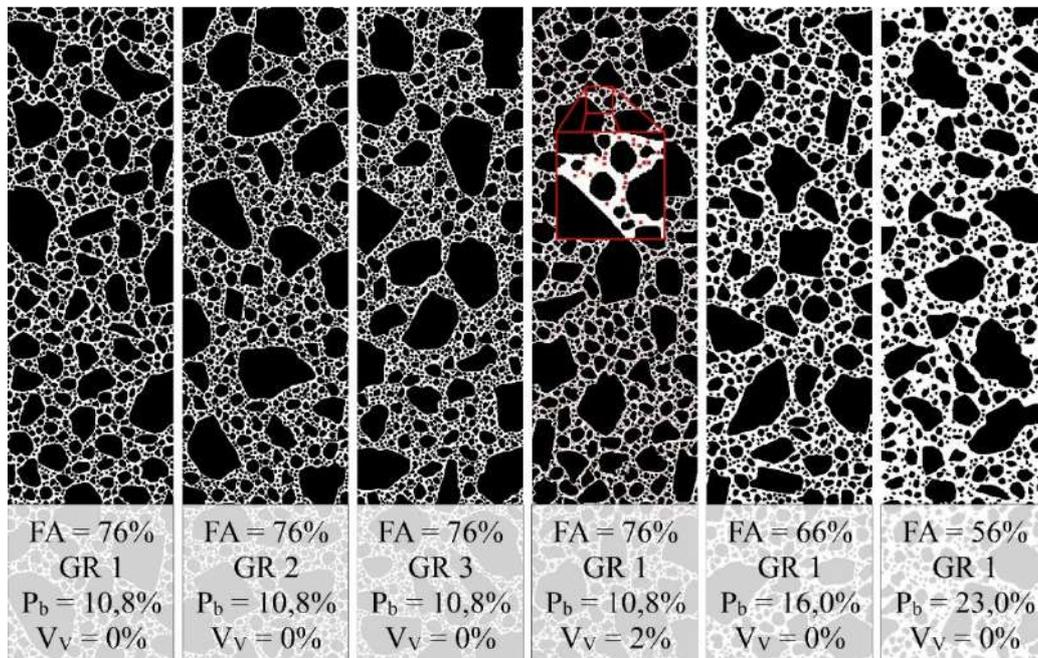


Figura 4.4: Amostras virtuais de MAF com características volumétricas variadas.

Na Tabela 4.8 estão especificados os parâmetros adotados na geração das amostras virtuais de MAF apresentadas na Figura 4.4. Como indicado na Tabela 4.8, um pequeno desvio entre a granulometria especificada e a gerada pode ser observado. Esta diferença é em geral inferior a 1% e se deve essencialmente ao corte das partículas situadas nas bordas das imagens das microestruturas geradas, o que pode ser verificado a partir da constatação de que em geral esta diferença é maior para partículas de dimensões maiores.

Tabela 4.8: Comparação entre granulometrias especificadas e efetivamente geradas.

Penciras	Fração de Área (%)									
	56,0		66,0		76,0					
	Granulometria 1						Granulometria 2		Granulometria 3	
	Especificado	Gerado	Especificado	Gerado	Especificado	Gerado	Especificado	Gerado	Especificado	Gerado
#16	14,0	13,4	17,0	17,6	19,0	19,1	29,0	30,2	34,0	34,1
#30	30,0	29,8	35,0	34,7	40,0	40,0	39,0	39,4	44,0	44,4
#50	43,0	43,1	51,0	50,8	59,0	58,9	54,0	54,5	55,0	55,4
#100	51,0	50,8	60,0	59,9	69,0	68,7	65,0	65,0	63,0	63,8
#200	56,0	56,0	66,0	65,9	76,0	75,6	76,0	75,5	76,0	75,5

4.2.1.3. Reprodução de granulometria e orientação de misturas reais

Para demonstrar a capacidade do gerador de reproduzir a distribuição por tamanho das partículas de agregados, uma análise utilizando dados de uma mistura densa de concreto asfáltico com a granulometria indicada na Tabela 4.9 foi realizada. É importante notar que para a geração da microestrutura, agregados menores do que 1,18 mm foram considerados como constituintes da fase da MAF e não foram explicitamente representados na microestrutura virtual. A fração volumétrica ocupada pelos agregados maiores do que 1,18 mm foi de 68%.

Neste estágio, a fração de área bidimensional foi considerada igual à fração volumétrica dos agregados da mistura preparada em laboratório, ou seja, 68%. Esta simplificação não necessariamente representa a relação real entre propriedades bidimensionais e tridimensionais, porém esta suposição não afeta a análise realizada nesta seção, uma vez que é uma análise puramente comparativa.

Tabela 4.9: Granulometria do material graúdo utilizado na análise.

Peneira (abertura da malha, mm)	Granulometria (cumulativa retida, %)
3/4" (19,00)	0,0
1/2" (12,50)	6,3
3/8" (9,50)	13,9
#4 (4,75)	35,4
#8 (2,36)	81,0
#16 (1,18)	100,0

A Figura 4.5 apresenta uma comparação entre a granulometria especificada e a obtida após a fabricação de amostras virtuais (média de três amostras). O desvio médio entre as duas granulometrias, *i.e.*, especificada e obtida, foi de apenas 5,0%. Na verdade, a variação da granulometria de amostra para amostra no laboratório pode até ser maior do que este valor. Desta maneira, a Figura 4.5 demonstra que o gerador proposto neste trabalho é capaz de reproduzir uma granulometria especificada com grande precisão.

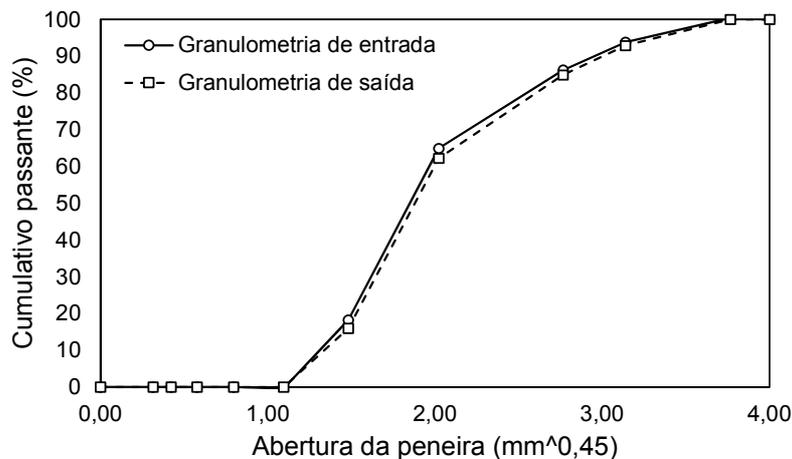


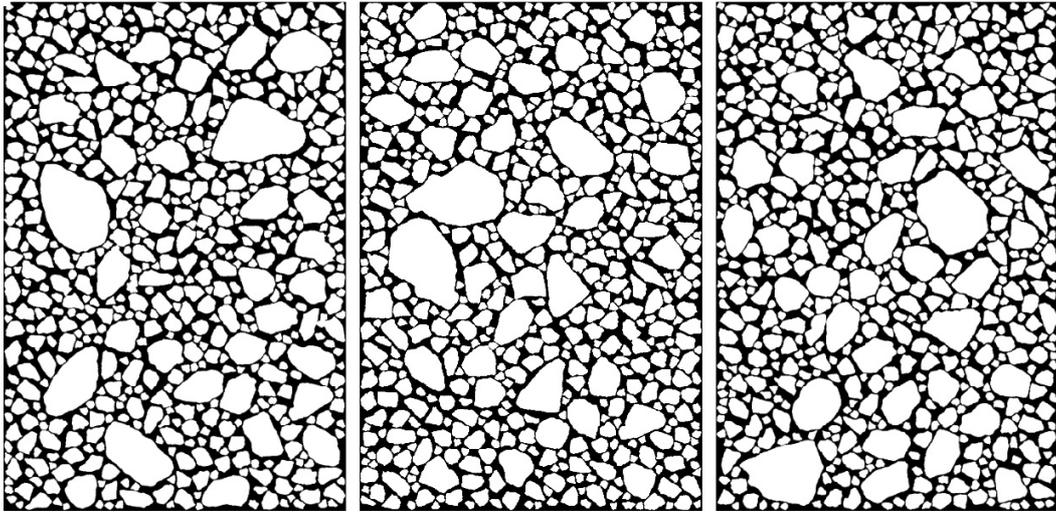
Figura 4.5: Comparação entre granulometria especificada e gerada no gerador de microestruturas.

Além da granulometria e da fração de área da mistura de concreto asfáltico real, a orientação dos agregados também foi determinada e utilizada como dado de entrada do gerador de microestruturas. A orientação dos agregados corresponde ao ângulo que cada agregado faz com o eixo horizontal. Durante a análise, foi computado e armazenado no banco de dados do programa o ângulo que cada partícula de amostras reais cortadas e escaneadas fazia com o eixo horizontal. A distribuição cumulativa para o ângulo de

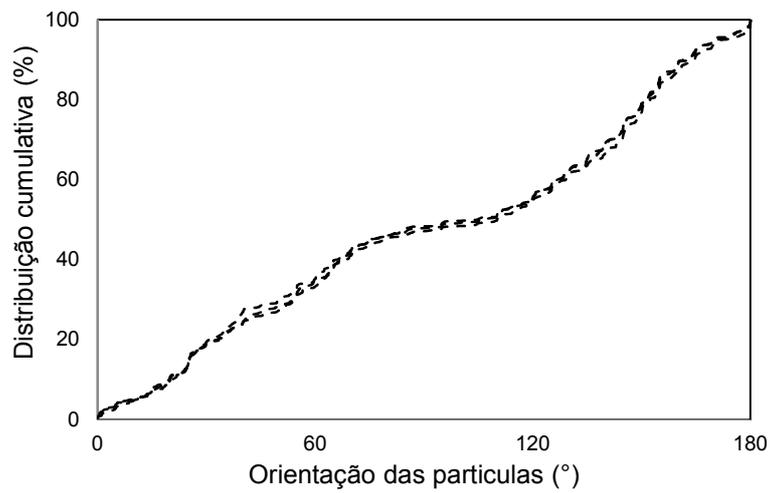
orientação de cada partícula foi determinada a partir do somatório do número de partículas orientadas naquele ângulo ao número de partículas orientadas em todos os ângulos menores do que o ângulo em questão. Assim, a distribuição cumulativa chegou a 100% para um ângulo de 180 graus.

Para demonstrar a habilidade do gerador proposto de reproduzir a distribuição da orientação das partículas da mistura original (dado de entrada no programa), três microestruturas bidimensionais foram obtidas a partir do processo de digitalização de amostras reais cortadas (90 mm de largura e 135 mm de altura). A média da distribuição das orientações determinada pelo ImageJ para as microestruturas de amostras reais foi utilizada como dado de entrada na geração das três microestruturas apresentadas na Figura 4.6a.

A Figura 4.6b apresenta as distribuições das orientações determinadas pelo programa ImageJ para as três microestruturas geradas virtualmente e ilustra a grande repetibilidade entre os resultados das diferentes amostras. Uma análise estatística revelou que a soma dos quadrados residuais (*sum of squared residuals*) entre as duas distribuições de orientações (média de três amostras reais e três virtuais) variou apenas 2,4% da soma dos ângulos reais das partículas.



(a)



(b)

Figura 4.6: Microestruturas asfálticas virtuais: (a) três imagens obtidas a partir de amostras laboratoriais reais; e (b) orientações das partículas das imagens.

4.2.1.4. Aplicabilidade

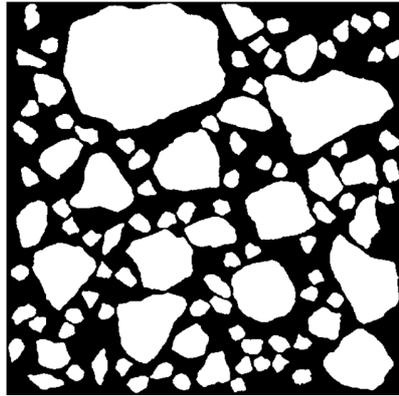
Para demonstrar a aplicabilidade da metodologia proposta, simulações numéricas bidimensionais de ensaios de módulo dinâmico de misturas de concreto asfáltico foram realizadas. A fim de se agilizar o processo de simulação, o conceito de RVE foi adotado para a geração das microestruturas. Quatro amostras virtuais de concreto asfáltico medindo 60 x 60 mm foram fabricadas utilizando o gerador de

microestruturas proposto, como ilustrado na Figura 4.7. A Tabela 4.10 apresenta as duas granulometrias adotadas na fabricação virtual das amostras. É importante notar que, como já explicado, os agregados de dimensões inferiores a 1,18 mm foram considerados parte integrante da MAF, o que representa a parcela preta das microestruturas apresentadas na Figura 4.7. Por simplicidade, vazios não foram explicitamente considerados, apesar do gerador ser capaz de considerar vazios, como já mencionado. Para as microestruturas deste estudo o tempo de geração foi de cerca de 7 segundos.

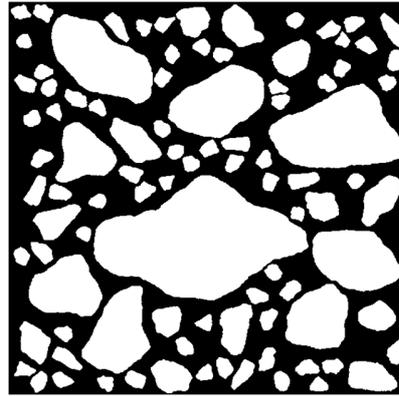
A Tabela 4.11 apresenta as propriedades viscoelásticas da MAF a 21°C e as elásticas dos agregados. Ainda, duas frações de área foram utilizadas na geração, *i.e.*, 66% e 86%.

Tabela 4.10: Granulometrias das microestruturas virtuais.

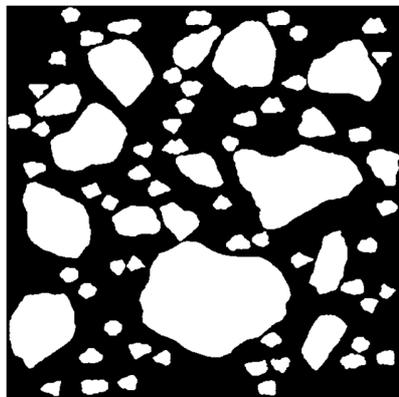
Peneira (abertura da malha, mm)	(Passante cumulativo, %)	
	Granulometria 1	Granulometria 2
3/4" (19.00)	100,0	100,0
1/2" (12.50)	83,2	88,1
3/8" (9.50)	76,4	81,0
#4 (4.75)	67,4	61,7
#8 (2.36)	49,5	52,2
#16 (1.18)	42,7	39,1



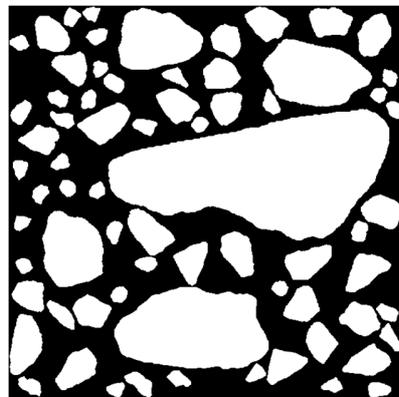
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.7: Quatro microestruturas virtuais de concreto asfáltico: (a) e (b) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 86% (duas réplicas); (c) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 66%; (d) granulometria 2 e fração de área dos agregados de 86%.

Tabela 4.11: Propriedades de entrada do material.

Agregados graúdos		
	Módulo (MPa)	Coefficiente de Poisson
	60,9	0,35

Matriz de agregados finos (@ 21°C)		
	Módulo* (MPa)	Viscosidade* (MPa . s)
1	2.509,8	0,251
2	1.310,5	1,311
3	914,2	9,142
4	308,5	30,851
5	134,7	134,673
6	36,7	367,461
7	13,3	1.325,622
8	7,1	7.069,515
∞	9,5	-

Simulações de ensaios de módulo dinâmico foram realizados conforme descrito no item 3.3.5.2. A Figura 4.8 apresenta as comparações entre as quatro amostras simuladas. As diferentes microestruturas estão identificadas pela suas respectivas frações de área e granulometrias. Por exemplo, a amostra “86 - GR2” possui uma fração de área de 86% e a granulometria 2 (detalhada na Tabela 4.10).

Das curvas mestras apresentadas na Figura 4.8, ambas as réplicas da mesma mistura, *i.e.*, amostras “86 - GR1”, apresentaram resultados muito semelhantes, como esperado. Resultados similares também foram observados na comparação entre as amostras “86 - GR1” e “86 - GR2”, que diferiram apenas na granulometria e tiveram a mesma fração de área. Por outro lado, a fração de área dos agregados influenciou significativamente a rigidez global da mistura. Como ilustrado na figura Figura 4.8, a amostra “66 - GR1” apresentou módulos dinâmicos em média 34% menores do que as demais amostras. Isto indica que as misturas com mais agregados tendem a se tornar mais rígidas do que as com menos agregados.

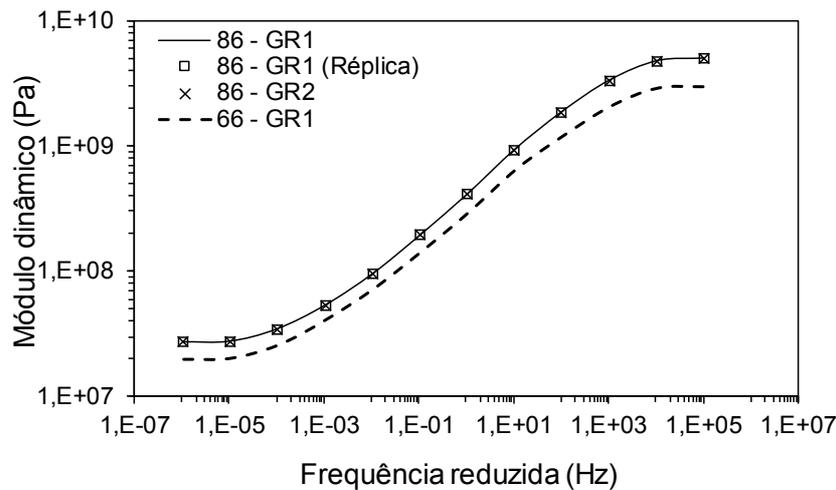


Figura 4.8: Resultados de módulo dinâmico à 21°C de amostras virtuais.

Além de permitir a simulação realista do comportamento mecânico de compósitos particulados como as misturas asfálticas a partir de informações dos seus constituintes, o modelo adotado para a simulação do comportamento microestrutural de amostras virtuais fabricadas pelo gerador desenvolvido nesta pesquisa também pode ser usado para análises detalhadas da distribuição de variáveis como tensões e deformações no interior das amostras. Estas informações podem ser úteis para a otimização da seleção dos materiais, já que análises prévias podem ser realizadas para estimar a deformabilidade e a concentração de tensões em diferentes pontos das amostras como função dos materiais adotados nas suas composições.

Para ilustrar esta característica da modelagem microestrutural, a Figura 4.9 apresenta distribuições de tensões Von Mises das quatro microestruturas simuladas. Na figura, as tensões foram normalizadas em relação à máxima tensão verificada nas simulações. Como observado, é nas partículas de agregados onde ocorre a maior concentração de tensões, especialmente em suas arestas. Isto era esperado devido à maior rigidez das partículas, especialmente em temperaturas intermediárias, como a adotada nestas simulações. Assim, amostras contendo mais agregados tendem a apresentar níveis de tensões superiores aos das amostras com menores quantidades de agregados.

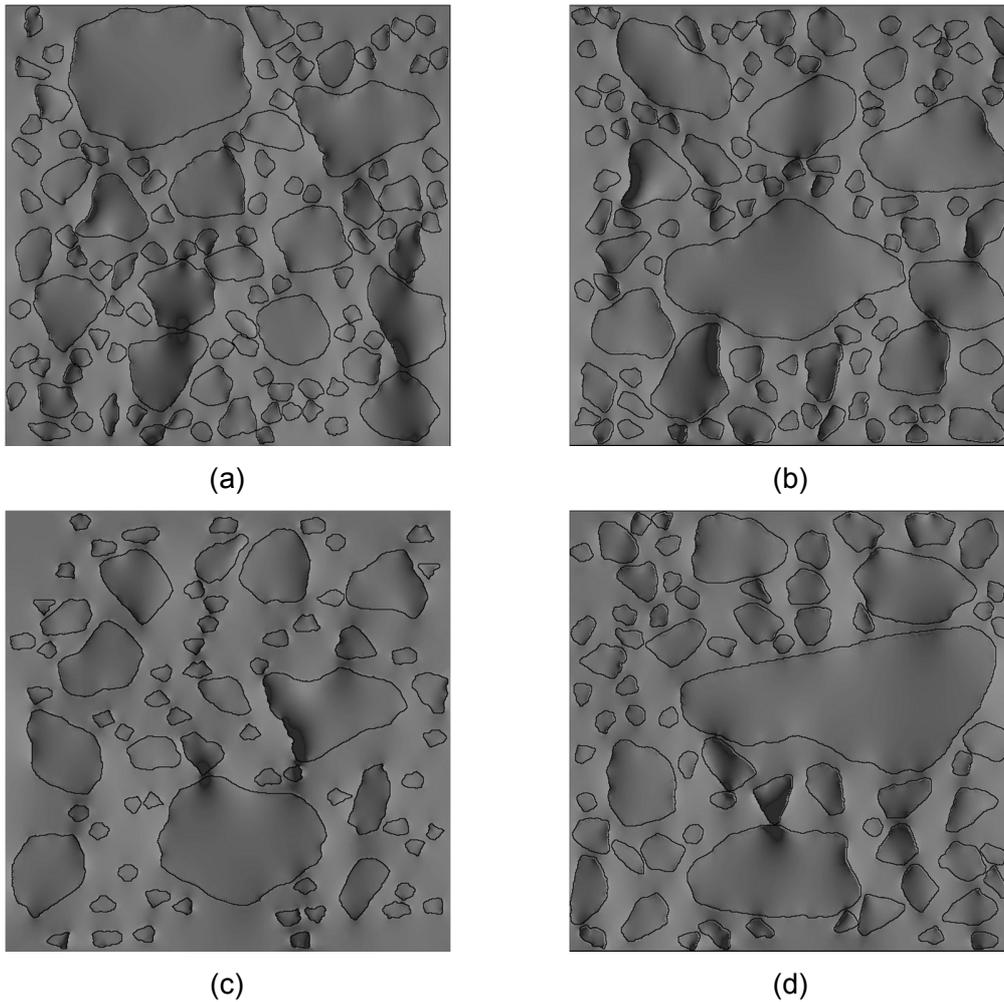


Figura 4.9: Distribuição das tensões nas microestruturas de quatro amostras virtuais de asfalto: (a) e (b) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 86% (duas réplicas); (c) granulometria 1 e fração de área dos agregados de 66%; (d) granulometria 2 e fração de área dos agregados de 86%.

4.2.2. Validação

O esforço de validação consistiu da comparação entre resultados de ensaios de módulo dinâmico realizados em laboratório com amostras reais e em simulações com amostras virtuais. Os ensaios de laboratório seguiram os procedimentos descritos no item 3.3.5.1 e as simulações numéricas os descritos no item 3.3.5.2.

Primeiramente, foram analisados os resultados obtidos na COPPE/UFRJ, ou seja, os das misturas G1, G2 e G3. Quatro microestruturas foram digitalizadas por mistura

e utilizadas nas simulações. A Figura 4.10 apresenta o processo de tratamento de uma das microestruturas referentes à mistura G1.

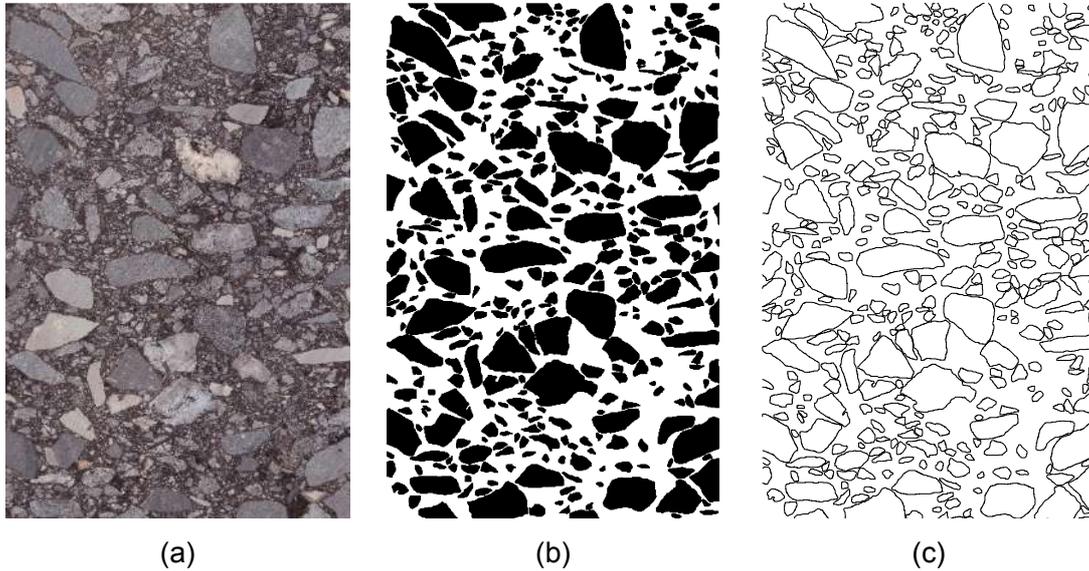


Figura 4.10: Tratamento de digitalização da microestrutura G1.

A Figura 4.11, a Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresentam as comparações dos resultados para as misturas G1, G2 e G3, respectivamente. Adicionalmente, a Figura 4.11 mostra que houve uma forte correspondência entre os resultados de módulo dinâmico obtidos em simulações de amostras escaneadas e fabricadas pelo gerador. Já a comparação entre módulos dinâmicos de amostras virtuais fabricadas com o gerador e módulos dinâmicos obtidos em laboratório indica, em geral, boa correspondência para as três misturas as frequências intermediárias e baixas de carregamento e um desvio para frequências mais elevadas. Estudos adicionais são necessários para identificar e corrigir as causas deste desvio em frequências mais altas.

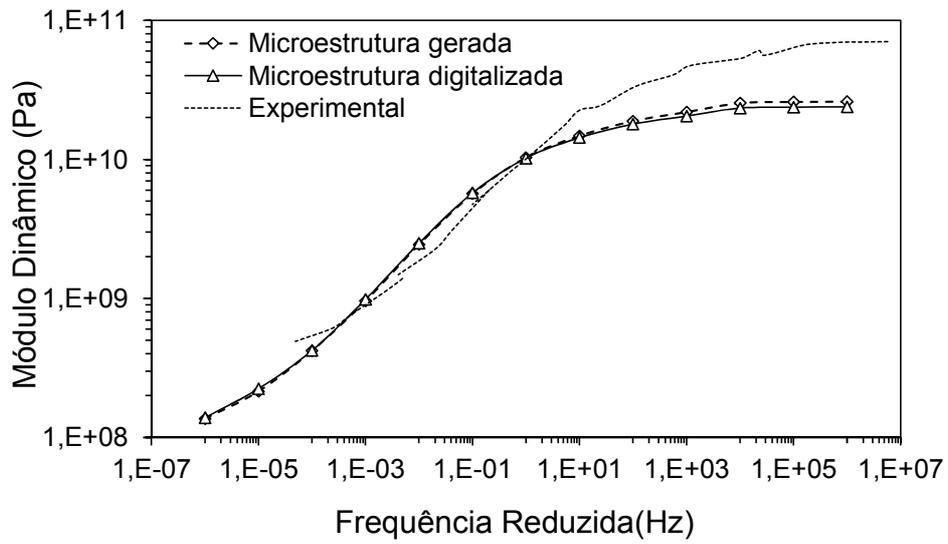


Figura 4.11: Resultados experimentais e numéricos da mistura G1 à 25°C.

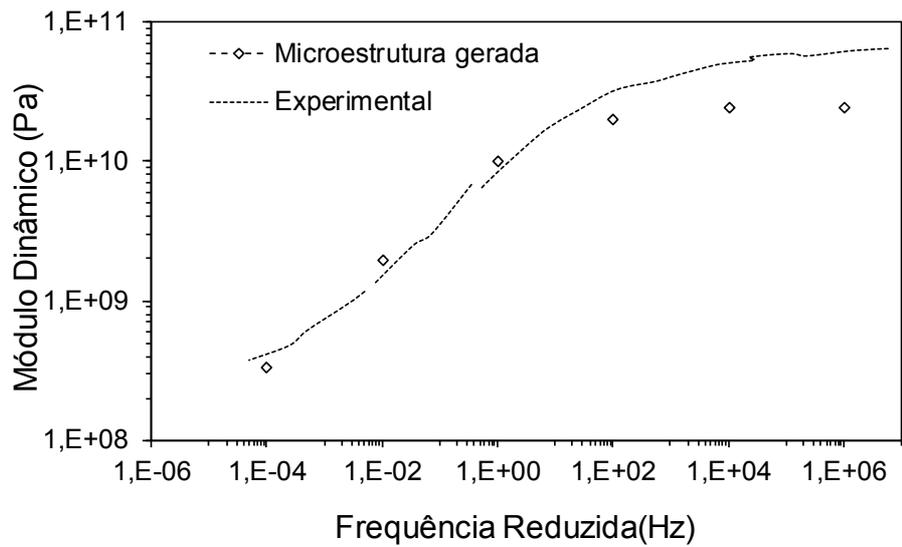


Figura 4.12: Resultados experimentais e numéricos da mistura G2 à 25°C.

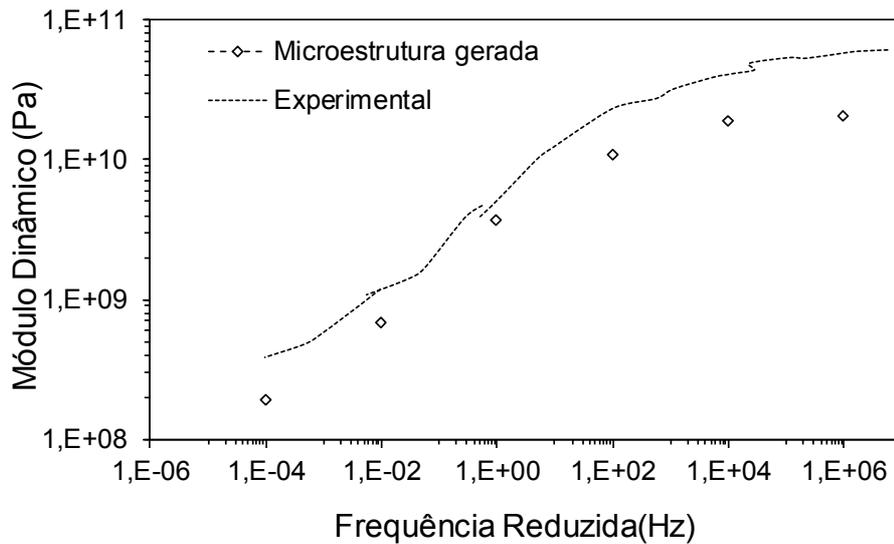


Figura 4.13: Resultados experimentais e numéricos da mistura G3 à 25°C.

Simulações adicionais também foram realizadas com amostras virtuais da mistura G4, que foram fabricadas considerando características de amostras escaneadas e usadas por ARAGÃO (2011) na *University of Nebraska* (Estados Unidos). A Figura 4.14 apresenta o elemento de volume representativo da microestrutura gerada.

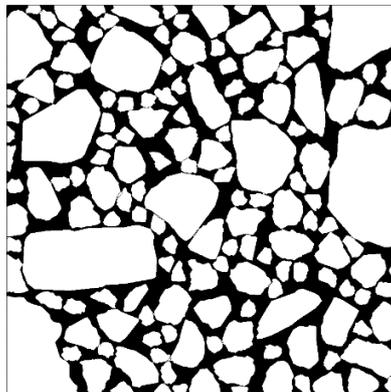


Figura 4.14: Microestrutura da mistura G4 gerada.

A Figura 4.15 apresenta os resultados dos ensaios de módulo dinâmico de laboratório e das simulações numéricas, tanto para as microestruturas digitalizadas por ARAGÃO (2011) quanto para as fabricadas com o gerador. Na figura, pode-se observar a forte correspondência entre os três resultados.

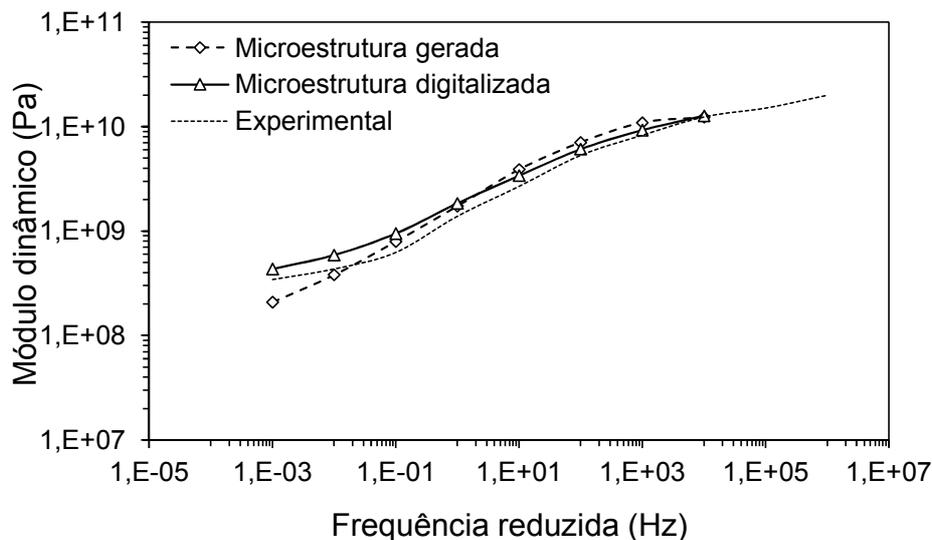


Figura 4.15. Resultados experimentais e numéricos da mistura G4 à 21,1°C.

4.3. MODELAGEM DO PROCESSO DE FRATURA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Além das simulações de módulo dinâmico, ensaios de fratura foram realizados considerando diferentes temperaturas e velocidades de carregamento usando amostras virtuais fabricadas pelo gerador. Esta seção apresenta o estudo de verificação do código implementado para representar um modelo de zona coesiva cujas propriedades de fratura variam com a temperatura e a velocidade de propagação das trincas. Um estudo adicional é também apresentado para demonstrar a aplicabilidade do gerador de amostras virtuais e do modelo microestrutural adotado nesta tese para simular o comportamento complexo de fratura de misturas asfálticas.

4.3.1. Verificação

A fim de se verificar a implementação do modelo de zona coesiva bilinear dependente de taxa de carregamento e da temperatura, um problema de tração uniaxial em barra foi simulado e o resultado foi comparado à sua solução analítica conhecida. Nesta atividade, foi simulada uma barra contendo um elemento coesivo entre dois elementos representando o material elástico simulado, como mostrado na Figura 4.16. Apesar de simples, este problema possibilita a compreensão do comportamento à fratura devido à presença do elemento coesivo, além de facilitar a identificação de possíveis erros durante a implementação do código.

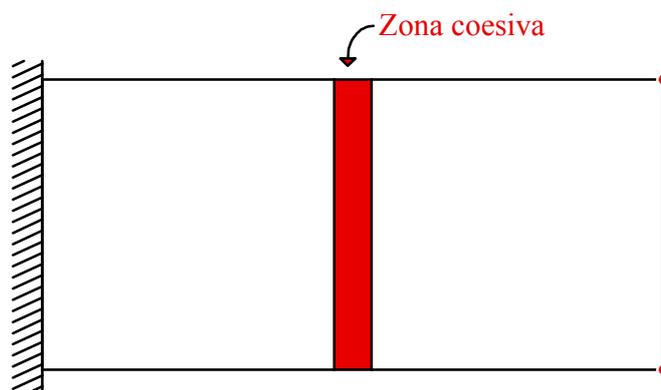


Figura 4.16: Problema simulado para a verificação do código implementado.

Diversas simulações foram realizadas usando o modelo de zona coesiva dependente da taxa de deslocamentos e da temperatura implementado. ARAGÃO (2011) já havia verificado a implementação da parte do código que trata da dependência das propriedades de fratura com a taxa de deslocamentos e, portanto, a verificação realizada neste projeto limitou-se à parte relacionada à temperatura. Durante as simulações, além da temperatura, foram modificados os modos de carregamento (modo I, modo II, e modo misto) e mantidas as demais variáveis constantes.

A Figura 4.17 mostra comparações entre os resultados de tração-deslocamento efetivo normalizado ($\lambda = \delta e / \delta_{\text{crítico}}$) previstos pelo modelo e obtidos a partir da solução analítica do problema para as diferentes condições de temperatura (10, 30 e 40°C) e modo de carregamento (modo I, modo II e modo misto) avaliadas. A equivalência entre os resultados indica que o modelo foi implementado com sucesso.

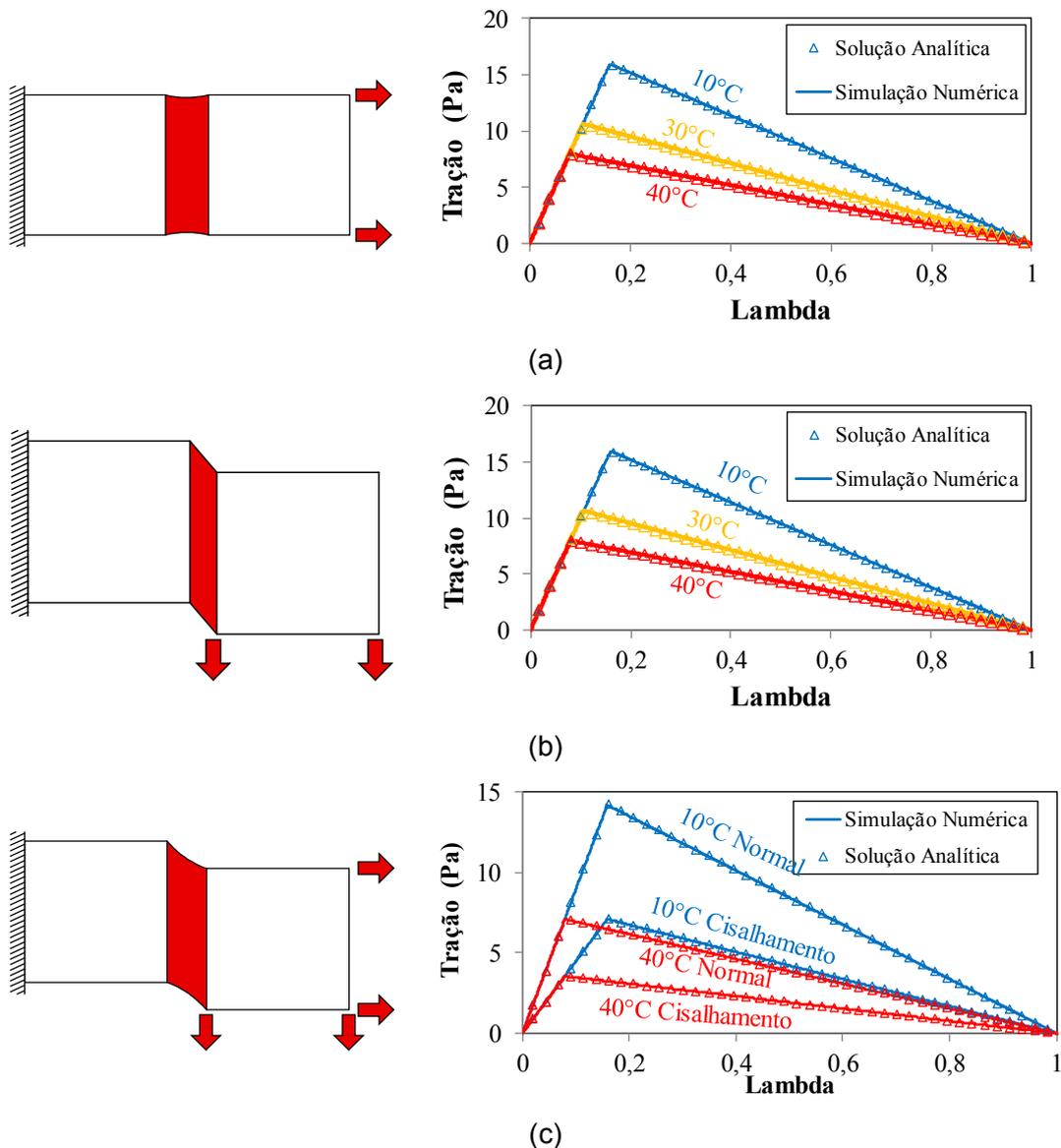


Figura 4.17: Verificação do código implementado neste trabalho considerando diferentes temperaturas e (a) modo I; (b) modo II; (c) modo misto de fratura.

4.3.2. Validação

Para a validação do modelo desenvolvido, simulações de fratura de concreto asfáltico com amostras SCB foram realizadas e os resultados comparados a resultados de ensaios reais, conduzidos em laboratório. A amostra virtual foi obtida a partir da geração de uma amostra utilizando o gerador de microestruturas desenvolvido, e está ilustrada na Figura 4.18.

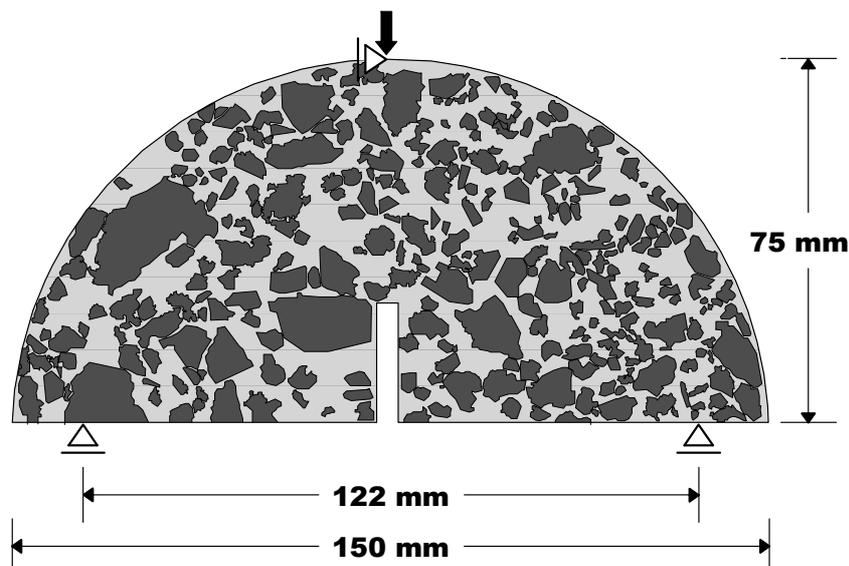


Figura 4.18: Amostra SCB gerada com o gerador desenvolvido.

A amostra foi discretizada com elementos triangulares de aproximadamente 1 mm de aresta, dimensão definida a partir de uma análise de convergência de malha. Foram inseridos elementos coesivos na região potencial de fratura, que mediu 20 por 45 mm. A malha da amostra, já preparada, pode ser visualizada na Figura 4.19.

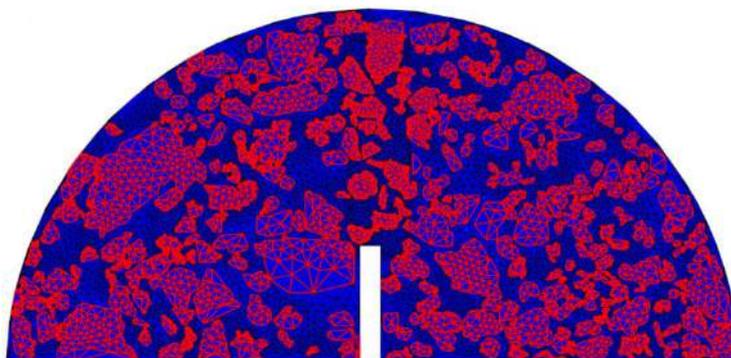


Figura 4.19: Amostra SCB de CBUQ com malha preparada.

Para ilustrar a importância da consideração da taxa e da temperatura no comportamento do material, simulações foram inicialmente realizadas considerando propriedades de fratura iguais para diferentes taxas de carregamento e temperaturas. Seguindo a metodologia numérico-experimental proposta por ARAGÃO *et al.* (2014) e descrita no item 3.3.6, a resistência à fratura de 32 kPa e a energia de fratura de 20 J/m²

foram determinadas para definir o modelo coesivo bilinear que resultou na equivalência entre curvas força - CTOD numérica e experimental para a temperatura de 17°C e a taxa de 0,5 mm/min.

A resistência de fratura e a energia coesiva obtidas foram então utilizadas em simulações para outras taxas e temperaturas, ou seja, 0,5; 1,0 e 2,0 mm/min., e 10; 17 e 25°C. A Figura 4.20 mostra uma comparação entre ensaios e simulações numéricas para 17°C, em diferentes taxas de carregamento, utilizando propriedades de fratura calibradas para 17°C e 0,5 mm/min. Já a Figura 4.21 mostra uma comparação entre ensaios e simulações numéricas a 0,5 mm/min., em diferentes temperaturas, utilizando propriedades de fratura calibradas para 17°C e 0,5 mm/min.

Pelas figuras, fica claro que o comportamento mecânico das misturas é influenciado pelas características únicas e complexas do ligante asfáltico, que dependem da taxa de carregamento e da temperatura, como já explicitado por KIM e ARAGÃO (2013). Desta maneira, a diferença observada entre as curvas numéricas e experimentais eram esperadas e indicam que para a correta simulação de fratura não só as propriedades viscoelásticas do material devem ser especificadas adequadamente, mas também as suas propriedades de fratura como funções da velocidade de propagação das trincas e da temperatura a que o material está submetido.

Então, adotando as equações originais de ESPINOSA e ZAVATTIERI (2003), novas simulações foram realizadas variando os parâmetros de temperatura conforme o ensaio que se buscava simular. Foi verificado, porém, que instabilidades numéricas (valores negativos das propriedades de fratura) estavam ocorrendo durante as simulações numéricas. A parcela da equação que comanda os efeitos da temperatura possui muitos parâmetros e é de difícil calibração. Assim, as equações foram ligeiramente modificadas para mitigar a instabilidade numérica e facilitar o processo de calibração. A forma final tomada pelas equações está apresentada nas equações 4.1 e 4.2.

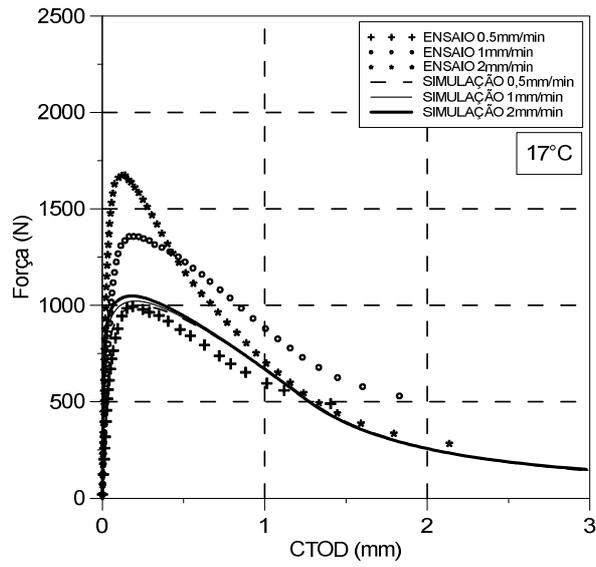


Figura 4.20: Comparação entre ensaios e simulações numéricas a 17°C utilizando propriedades de fratura calibradas para 17°C e 0,5 mm/min.

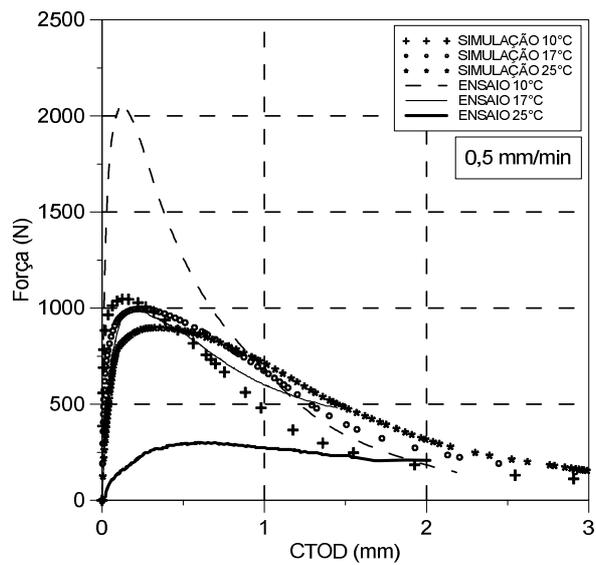


Figura 4.21: Comparação entre ensaios e simulações numéricas a 0,5 mm/min utilizando propriedades de fratura calibradas para 17°C e 0,5 mm/min.

$$T_{\max} = T_{\max}^0 \left(1 + \zeta_T \ln \left[\frac{\dot{\lambda} + \dot{\lambda}_0}{\dot{\lambda}_0} \right] \right) \quad 4.1$$

$$G_c = G_c^0 \left(1 + \zeta_G \ln \left[\frac{\dot{\lambda} + \dot{\lambda}_0}{\dot{\lambda}_0} \right] \right) \quad 4.2$$

Utilizando as equações 4.1 e 4.2, novas simulações foram realizadas para calibrar os parâmetros T_{\max}^0 , G_c^0 , ζ_T , ζ_G e $\dot{\lambda}_0$, das equações. Assim, para cada temperatura de ensaio uma combinação de parâmetros de calibração diferente deve ser utilizada. O processo de ajuste destes parâmetros mostrou-se extremamente laborioso, visto que para calibração dos parâmetros foram necessárias inúmeras simulações numéricas que despendiam muito tempo. A Tabela 4.12 apresenta o parâmetros de calibração adotados, ou seja, os que obtiveram o melhor ajuste com os ensaios laboratoriais.

Tabela 4.12: Parâmetros adotados para a simulação numérica.

Temperatura (°C)	T_{\max}^0 (Pa)	ζ_T	G_c^0 (J/m ²)	ζ_G	$\dot{\lambda}_0$
10	2500000	0,15	2000	1,2	4E-08
17	200000	4,5	200	10	4E-08
25	100000	6,5	100	10	4E-08

A Figura 4.22, a Figura 4.23 e a Figura 4.24 apresentam as curvas força – tempo dos ensaios laboratoriais e das respectivas simulações numéricas com os parâmetros que levaram a um melhor ajuste.

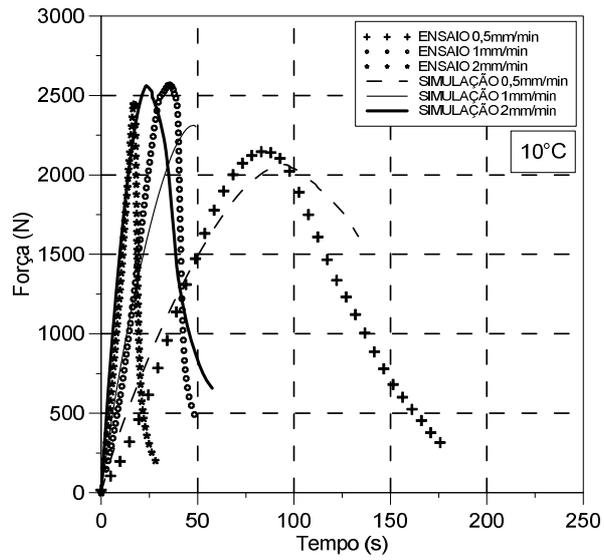


Figura 4.22: Ajuste de curvas de fratura a 10°C.

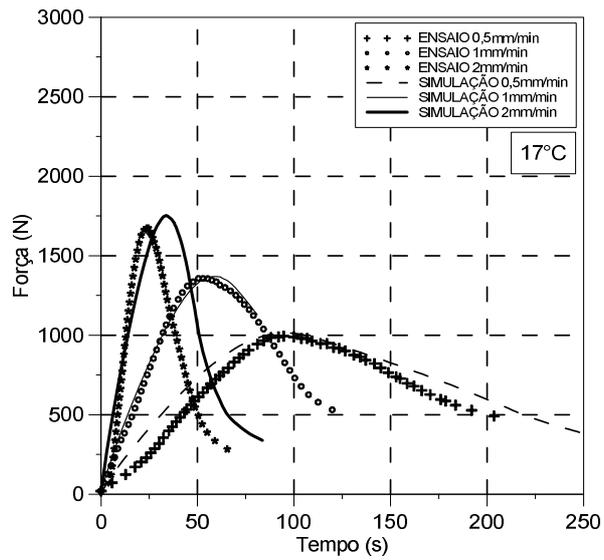


Figura 4.23: Ajuste de curvas de fratura a 17°C.

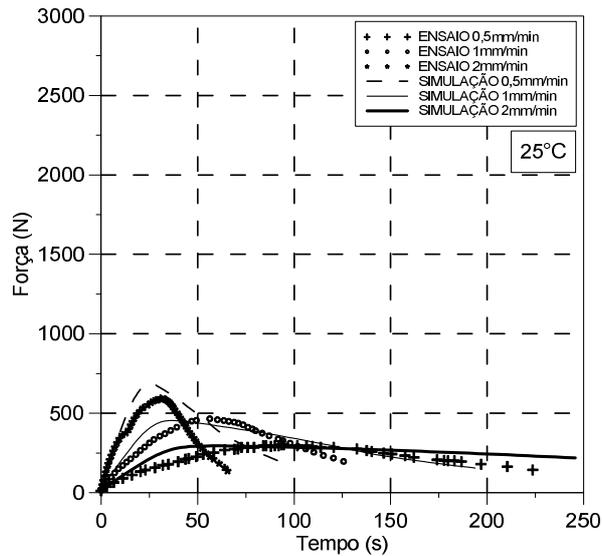


Figura 4.24: Ajuste de curvas de fratura a 25°C.

A partir dos resultados pode-se verificar que a utilização de parâmetros de calibração diferentes para cada temperatura possibilitou um melhor ajuste das curvas de simulação às curvas de ensaio.

Apesar da proximidade das curvas experimentais e laboratoriais, várias questões ainda permanecem. O processo de ajuste das curvas foi um processo de extrema complexidade e necessitou de diversas tentativas para a obtenção dos ajustes apresentados nas figuras. Isto está ligado às complexidades associadas ao material e ao seu processo de fratura, tais como: heterogeneidade, comportamento viscoelástico, utilização de uma subrotina de fratura em modo extrínseco com dependência da taxa de carregamento. As dificuldades relacionadas as simulações numéricas de fluidos viscosos já foram relatadas por diversos autores, e instabilidades numéricas são comuns e de superação altamente complexa, sendo ainda constante foco de estudos (FATTAL e KUPFERMAN, 2005; MUNIZ, SECCHI e CARDOZO, 2005).

Ainda, como já mencionado, a abordagem microestrutural oferece os benefícios da análise detalhada da distribuição de tensões e deformações nas microestruturas das misturas, como ilustrado na Figura 4.25. Também é possível verificar um acúmulo de tensões na ponta da trinca e um alívio de tensões nos pontos onde a trinca já se formou. Apesar destas características microestruturais serem intuitivamente previstas, o modelo

microestrutural permite uma análise detalhada e torna a abordagem computacional microestrutural uma ferramenta de grande potencial para permitir a seleção de materiais.

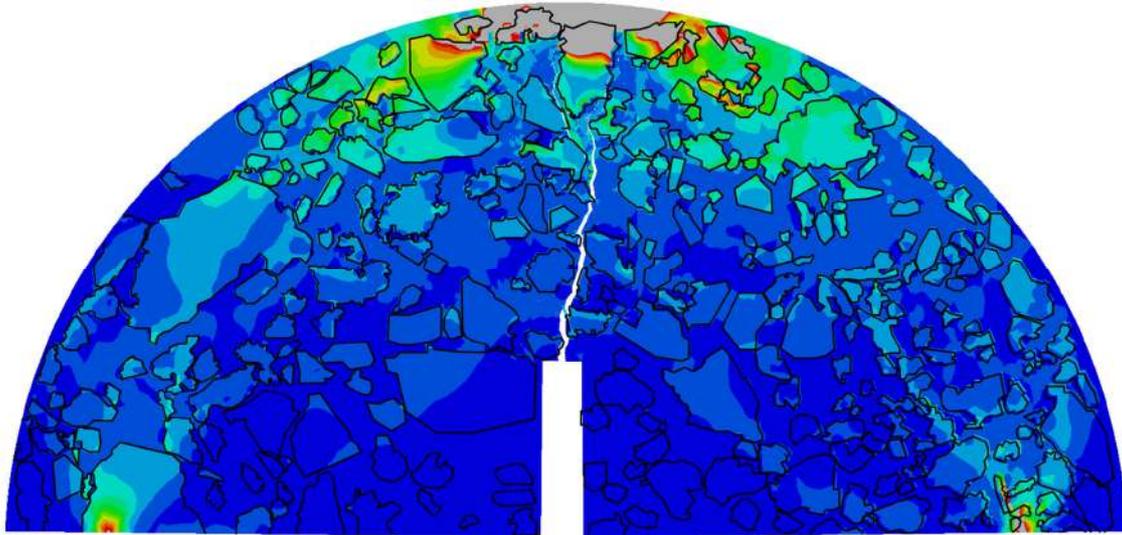


Figura 4.25: Distribuição das tensões (Von Mises) em uma amostra SCB ao fim de uma simulação de ensaio de fratura de concreto asfáltico.

4.3.3. Análise paramétrica das equações

Como mencionado, o processo de calibração dos parâmetros do modelo mostrou-se extremamente laborioso, e o ajuste nem sempre se mostrou adequado. A fim de se melhor compreender a influência dos parâmetros T_{\max}^0 , G_c^0 , ζ_T , ζ_C e $\dot{\lambda}_0$ das equações 4.1 e 4.2 no comportamento das amostras virtuais, uma análise paramétrica foi realizada. Para esta análise, os valores das

Tabela 4.13 foram considerados.

Buscando facilitar o processo de simulações numéricas, um código em C++ foi desenvolvido para executar as repetidas simulações, alterando apenas os parâmetros das equações a cada vez que a simulação era executada. Os resultados das simulações (cerca de 60 GiB) foram automaticamente movidos para uma pasta no computador, e então plotados em uma planilha eletrônica.

Tabela 4.13: Parâmetros utilizados na análise paramétrica do modelo.

Temperatura (°C)	T_{max}^0 (Pa)	ζ_T	G_c^0 (J/m ²)	ζ_G	$\dot{\lambda}_0$
10	1950000	0,205	1445	0,5	4E-08
	2000000	0,21	1450	0,55	4E-08
	2050000	0,215	1455	0,6	4E-08
17	429000	3,45	1015	4,65	4E-08
	430000	3,5	1020	4,7	4E-08
	431000	3,55	1025	4,75	4E-08
25	119000	5,45	435	6,25	4E-08
	120000	5,5	440	6,3	4E-08
	121000	5,55	445	6,35	4E-08

Os dados foram então analisados e os que melhor se encaixavam aos dados laboratoriais foram selecionados. Uma nova sequência de simulações, desta vez manual, foi realizada buscando obter um melhor ajuste. A Tabela 4.14 apresenta os parâmetros refinados e finais definidos para o melhor ajuste.

Tabela 4.14: Parâmetros da análise paramétrica ajustados.

Temperatura (°C)	T_{max}^0 (Pa)	ζ_T	G_c^0 (J/m ²)	ζ_G	$\dot{\lambda}_0$
10	2050000	0,21	1455	0,55	4E-08
17	429000	3,55	1015	4,75	4E-08
25	120500	5,5	445	6,3	4E-08

Os resultados das simulações para as três taxas e três temperaturas ensaiadas estão apresentados na Figura 4.26, na Figura 4.27 e na Figura 4.28.

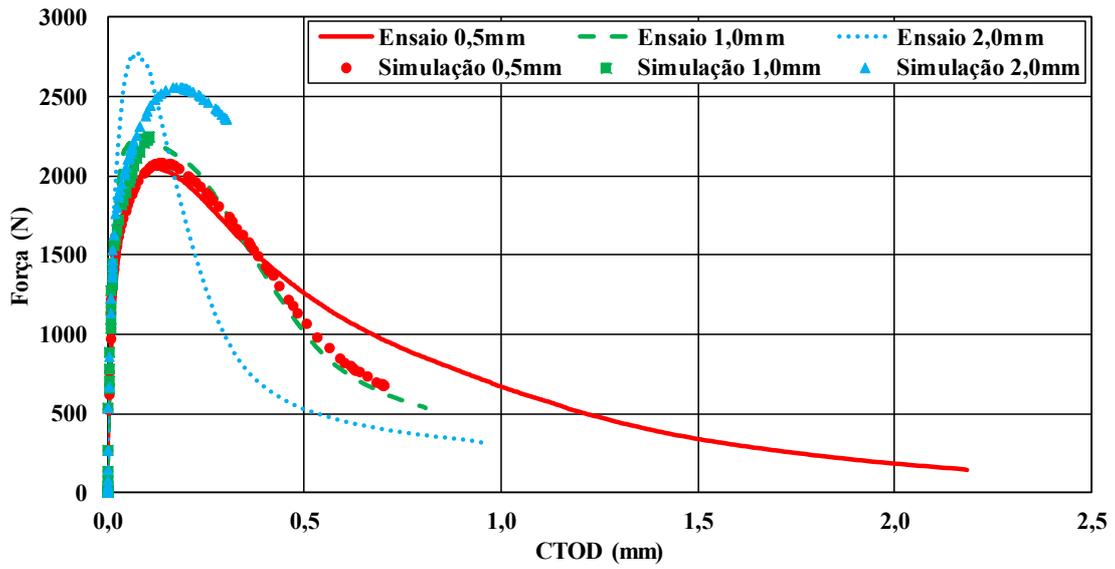


Figura 4.26: Resultados da análise paramétrica a 10 °C.

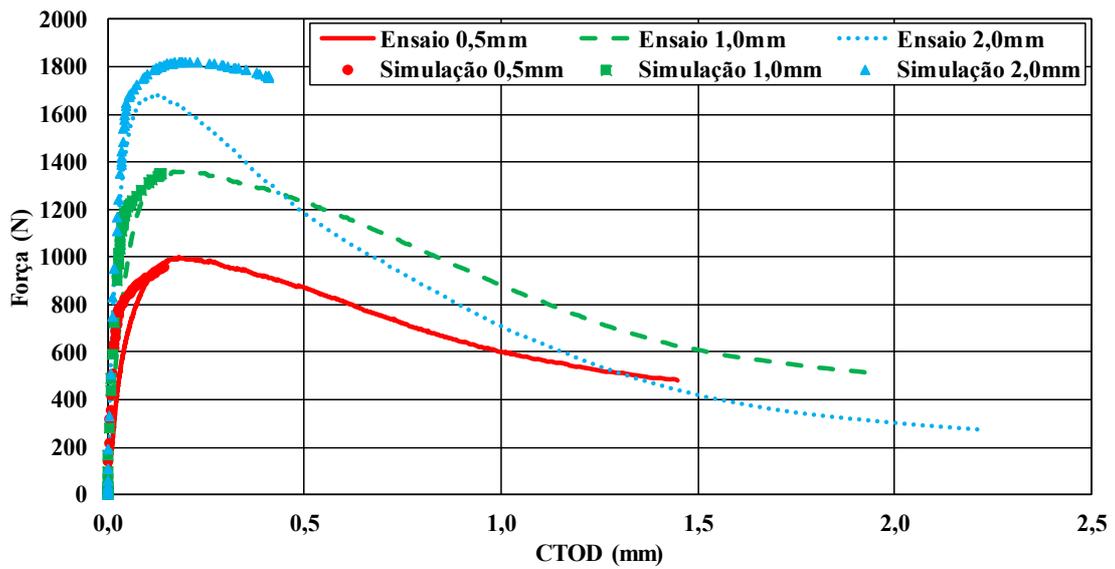


Figura 4.27: Resultados da análise paramétrica a 17 °C.

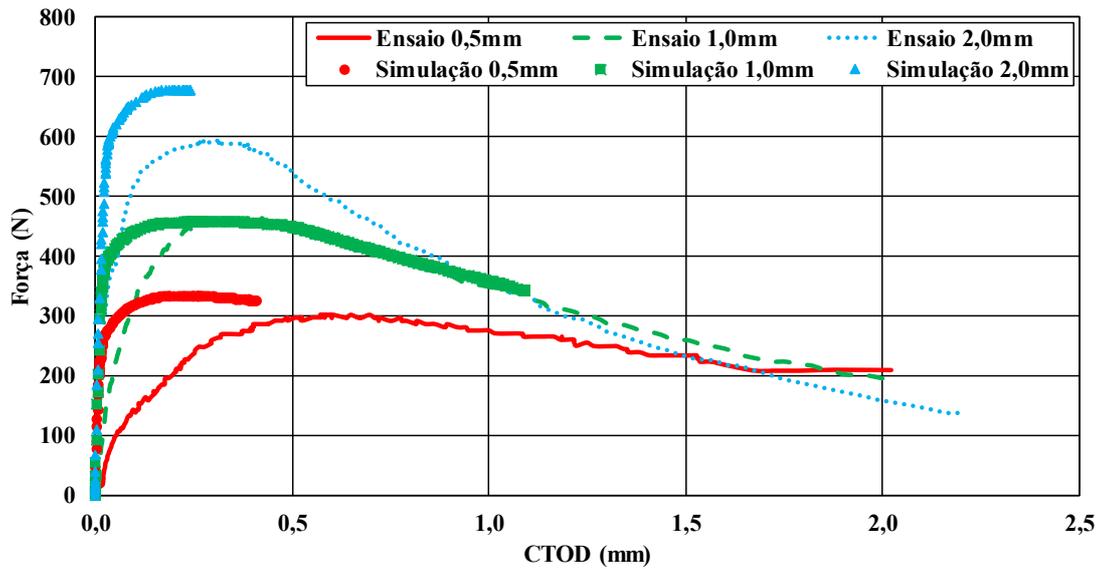


Figura 4.28: Resultados da análise paramétrica a 25 °C.

Os resultados dos estudos paramétricos mostraram que o comportamento das simulações com temperaturas altas foi muito diferente do comportamento real esperado. Para as temperaturas mais baixas, o comportamento das simulações já se mostrou mais equivalente aos resultados esperados, obtendo um bom ajuste. Desta forma, foi considerado inviável preparar uma equação única para os parâmetros de fratura, visto que o comportamento varia consideravelmente com a temperatura. A equação de ajuste teria de mudar com a temperatura, logo, não seria um ajuste único para o comportamento do material para qualquer taxa e temperatura.

5. CONCLUSÕES

Esta tese consistiu no desenvolvimento e verificação de uma metodologia para fabricar e analisar microestruturas virtuais bidimensionais de concreto asfáltico e no desenvolvimento de um modelo de zona coesiva dependente da taxa de separação e da temperatura da amostra. As principais conclusões para cada um dos objetivos principais são:

- Gerador de microestruturas

Diferentemente de outras metodologias em que um tratamento manual, subjetivo e demandante é necessário para o tratamento das amostras digitalizadas, a geração virtual proposta nesta tese torna possível a geração de microestruturas virtuais que fazem uso de imagens de agregados obtidas usando o equipamento AIMS2.

As microestruturas são geradas utilizando o programa com interface gráfica desenvolvido neste trabalho e que requer algumas propriedades que são geralmente especificadas como dados de entrada em um projeto de misturas asfálticas. O gerador também possibilita a geração de vazios na microestrutura, os quais podem ter a forma que o usuário assim desejar, ou seja, caso a forma dos vazios tiver sido determinada a partir de ensaios de tomografia por raios-X estas formas podem ser importadas para o gerador. Ainda, o usuário pode optar por importar a distribuição das partículas, o que é uma característica importante no comportamento do concreto asfáltico.

As microestruturas virtuais foram geradas de modo a espelhar amostras de concretos asfálticos reais. A capacidade do gerador de gerar microestruturas que se comparassem às reais foi verificada através da comparação de propriedades como orientação, fração de área e granulometria, mostrando que o gerador foi capaz de produzir microestruturas semelhantes às reais.

Simulações numéricas de módulo dinâmico foram realizadas para ilustrar a aplicabilidade do gerador e comparar as simulações a ensaios reais. Primeiramente foram analisadas as influências de propriedades geométricas da mistura asfáltica, como granulometria e fração de área. Também foram apresentadas as distribuições de tensões

na microestrutura, demonstrando que o modelo microestrutural possibilita estudos detalhados das tensões na microestrutura.

Os resultados foram comparados a resultados de ensaios laboratoriais. As microestruturas geradas ficaram muito próximas às microestruturas digitalizadas, e em geral apresentaram resultados muito semelhantes aos de laboratório.

Apesar de trabalhos adicionais serem necessários para garantir uma melhor representatividade, os resultados aqui apresentados indicam que a metodologia de geração desenvolvida pode vir a se tornar uma ferramenta eficiente para caracterizar o comportamento global das misturas asfálticas considerando características complexas e realistas dos constituintes das misturas.

- Modelo de zona coesiva dependente da taxa de separação e da temperatura

A utilização do modelo de ESPINOSA e ZAVATTIERI (2003) não se mostrou aplicável para os problemas analisados. Foram realizadas diversas alterações no modelo buscando resultados que melhor se assemelhassem ao comportamento das misturas asfálticas estudadas, porém não foi possível.

Decidiu-se, por fim, utilizar um modelo alternativo onde os parâmetros foram calibrados para temperaturas individuais. Instabilidades numéricas observadas durante as simulações indicaram que apesar da funcionalidade do modelo, ainda existem diversas barreiras que precisam ser debeladas. Apesar disto, com alguma dificuldade, os resultados obtidos indicaram um bom funcionamento do modelo desenvolvido quando este encontrava-se em sinergia com o restante do modelo computacional.

A partir dos resultados pôde-se verificar que a utilização de parâmetros de calibração diferentes para cada temperatura possibilitou um melhor ajuste das curvas de simulação às curvas de ensaio, evidenciando que o modelo numérico-experimental de caracterização do comportamento de misturas asfálticas a partir de suas características microestruturais pode tornar-se uma ferramenta eficiente.

O estudo paramétrico evidenciou a impossibilidade da realização de um ajuste único, em função da taxa e da temperatura, para os parâmetros de fratura, com o método utilizado. Uma outra equação ou algum modelo intrínseco ao Abaqus pode tornar a implementação possível.

A busca pelo contínuo aperfeiçoamento do modelo levará a ensaios virtuais que possam cada vez representar mais fielmente o comportamento de materiais reais, talvez reduzindo os processos suntuosos e demorados as vezes ligados a ensaios laboratoriais de grandes dimensões.

5.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Atualizar o gerador de microestruturas para incluir modelagem em três dimensões;
- Desenvolver uma metodologia simples e automatizada de escaneamento de partículas em três dimensões;
- Remover a necessidade de incorporação do programa Potrace e XnView ao gerador, migrando para a utilização das bibliotecas de OpenCV;
- Ampliar as capacidades do gerador, com a melhoria da interface e a inclusão de algoritmos como o de simplificação de polígonos de Ramer-Douglas-Peucker;
- Realizar simulações de módulo dinâmico em diferentes temperaturas de modo a avaliar a plasticidade da mistura asfáltica;
- Revisar e ampliar as capacidades do código dependente de taxa e temperatura, atualizando a equação e possivelmente o código de zona coesiva.

BIBLIOGRAFIA

ABBAS, A. M., MASAD, E., PAPAGIANNAKIS, T., SHENOY, A., 2005, "Modeling Asphalt Mastic Stiffness Using Discrete Element Analysis and Micromechanics-Based Modes", **International Journal of Pavement Engineering**, 6(2), 137-146.

ABBASCHIAN, R., ABBASCHIAN, L., REED-HILL, R. E., **Physical Metallurgy Principles**. Cengage Learning. 4 ed. 2009.

ALCIATORE, D. G., MIRANDA, R., **A winding Number and Point-in-Polygon Algorithm**. In: Technical report, Colorado State University, 1995.

ALLEN, D. H., SEARCY, C. R. 2001, "A Micromechanical Model for a Viscoelastic Cohesive Zone", **International Journal of Fracture**, 107, 159-176.

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

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO T209: Theoretical maximum specific gravity and density of hot mix asphalt. Washington D.C., Estados Unidos, 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO T 342-11: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington D.C., Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D3497-79: Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures, 2003.

ANDERSON, T. L., **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. Taylor & Francis. 3 ed. 2005.

ANDREI, D., WITCZAK, M. W., MIRZA, M. W. **Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic Complex Modulus of Asphalt Mixtures**. NCHRP 1-37, an Interim Report, University of Maryland, College Park, 1999.

ARAGÃO, F. T. S. KIM, Y. R., 2010, “Modeling Fracture and Failure of Heterogeneous and Inelastic Asphaltic Materials Using the Cohesive Zone Concept and the Finite Element Method”, In: **Proceedings of the 2010 ASCE GeoFlorida Congress: Advances in Analysis, Modeling & Design**. West Palm Beach, FL, 2662-2671.

ARAGÃO, F. T. S., 2011, *Computational microstructure modeling of asphalt mixtures subjected to rate-dependent fracture*. Tese de Doutorado, University of Nebraska – Lincoln, NE, Estados Unidos.

ARAGÃO, F. T. S., HARTMANN, D. A., PAZOS, A. R. G., KIM, Y. R., 2015, “Virtual Fabrication and Computational Simulation of Asphalt Concrete Microstructure”, **International Journal of Pavement Engineering**.

ARAGÃO, F. T. S., HARTMANN, D.A., KIM, Y. R., MOTTA, L. M. G., HAFT-JAVAHERIAN, M., 2014, “A Numerical-experimental Approach to Characterize Fracture Properties of Asphalt Mixtures at Low In-service Temperatures”, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 2447. TRB, National Research Council, Washington, D. C., 42-50

ARAGÃO, F. T. S., KIM, Y. R., KARKI, P., LITTLE, D. N., 2010, “Semi - Empirical, Analytical, and Computational Predictions of Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures”, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 2181, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 19-27.

ARAGÃO, F. T. S., KIM, Y. R., LEE, J., SOARES, J. B., 2009, “A Micromechanical Model for Predicting the Dynamic Modulus of Heterogeneous and Rate-Dependent Asphalt Concrete Mixtures”, In: **Proceedings of the IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentação e Projetos de Reforço**. Fortaleza, Brazil.

ARAGÃO, F. T. S., KIM, Y., 2012, "Mode I fracture characterization of bituminous paving mixtures at intermediate service temperatures", **Experimental Mechanics**, 52 (9), 1423-1434.

ARAGÃO, F. T. S., VARGAS, G. A. B., HARTMANN, D.A., OLIVEIRA, A.D., KIM, Y. R., 2017, "Characterization of Temperature- and Rate-Dependent Fracture Properties of Fine Aggregate Bituminous Mixtures Using an Integrated Numerical-Experimental Approach", **Engineering Fracture Mechanics**, 180, 195-212.

AYATOLLAHI, M. R., PIRMOHAMMAD, S., "Experimental Determination of Mode II Fracture Resistance in Asphalt Concretes", In: **13th International Conference on fracture**, China, Jun, 2013.

BARENBLATT, G. I., 1962, "Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture", **Advances in Applied Mechanics**, 7, 55-125.

BARI, J. & WITCZAK, M. W., 2006, "Development of A New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures", **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 75, 381-423.

BARKSDALE, R. D., **The aggregate handbook**. National Stone Association, Washington, D.C. 1993.

BRAZ, D., 1997., *Tomografia Computadorizada no Estudo da Mecânica da Fratura em Misturas Asfálticas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BUTTLAR, W. AND YOU, Z., 2001, "Discrete Element Modeling of Asphalt Concrete: Microfabric Approach", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1757, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 111-118.

CALLISTER Jr, W. D., RETHWISCH, D. G., **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Wiley. 9 ed. 2014.

CAMACHO, G., ORTIZ, M., 1996, "Computational Modeling of Impact Damage in Brittle Materials", **International Journal of Solids and Structures**, 33, 2899-2938.

CARO, S., CASTILLO, D., DARABI, M., MASAD, E., 2016, "Influence of Different Sources of Microstructural Heterogeneity on the Degradation of Asphalt Mixtures", **International Journal of Pavement Engineering**.

CASTELO BRANCO, V. T. F., 2008, *An Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixes Using the Dynamic Mechanical Analyzer*. Tese de Doutorado, Texas A&M University. College Station, TX, Estados Unidos.

CASTILLO, D., CARO, S., DARABI, M., MASAD, E., 2017, "Modelling Moisture-Mechanical Damage in Asphalt Mixtures Using Random Microstructures and a Continuum Damage Formulation", **Road Materials and Pavement Design**, v. 18.

CHAWLA, N., CHAWLA, K. K., 2006, "Microstructure-Based Modeling of the Deformation Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix Composites", **Journal of Material Science**, 41, 913-925.

CHRISTENSEN JR., D. W., PELLINEN, T., BONAQUIST, R. F., 2003, "Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete", **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 72, 97-121.

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

DAI, Q., SADD, M. H., PARAMESWARAN, V., SHUKLA, A., 2005, "Prediction of Damage Behaviors in Asphalt Materials Using a Micromechanical Finite-Element Model and Image Analysis", **Journal of Engineering Mechanics**, 131(7), 668-677.

DAI, Q., YOU, Z., 2007, "Micromechanical Finite Element Framework for Predicting Viscoelastic Properties of Asphalt Mixtures", **Materials and Structures**, 41, 1025-1037.

DUGDALE, D., 1960, "Yielding of Steel Sheets Containing Slits", **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, 8 (2), 100-104.

EINSTEIN, A., 1905., *Eine neue bestimmung der moleküldimensionen*. Tese. University of Zürich.

ESPINOSA, H. D., ZAVATTIERI, P. D., 2003, "A Grain Level Model for the Study of Failure Initiation and Evolution in Polycrystalline Brittle Materials. Part I: Theory and Numerical Implementation", **Mechanics of Materials**, 35, 333-364.

ESPINOSA, H., DWIVEDI, S., LU, H.C., 2000, "Modelling Impact Induced Delamination of Woven Fiber Reinforced Composites with Contact/Cohesive Laws", **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 183, pp. 259-290.

FATTAL, R., KUPFERMAN, R., 2005, "Time-dependent simulation of viscoelastic flows at high Weissenberg number using the log-conformation representation", **Journal of Non-Newtonian Fluid Mech**, 126, 23–37.

FOLEY, J. D., VAN DAM, A., FEINER, S. K., HUGHES, J. F., **Computer Graphics – Principles and Practice**. Addison-Wesley Publishing Company. 2 ed. 1996.

FORTES, C. **Apostila Mecânica da Fratura**. Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR. 2003.

GEUBELLE, P., BAYLOR, J., 1998, "Impact-Induced Delamination of Laminated Composites: A 2D Simulation", **Composites Part B - Engineering**, 29 (5), 589-602.

HARTMANN, D. A., ARAGÃO, F. T. S., PAZOS, A. G., "Simulação do comportamento mecânico de misturas asfálticas de agregados finos através da abordagem computacional microestrutural". In: **21º Encontro de Asfalto**. 2014.

HASHIN, Z., 1983, "Analysis of Composite Materials – A Survey", **Journal of Applied Mechanics**, v. 50, (Set).

HASHIN. Z., 1962, "The elastic moduli of heterogeneous materials", **Journal of Applied Mechanics**.

HASHIN. Z., 1965, "Viscoelastic behavior of heterogeneous media". **Journal of Applied Mechanics**. September 01.

HERBERT, M. J., JONES, C. B., 2001, "Contour Correspondence for Serial Section Reconstruction: Complex Scenarios in Paleontology", **Computers & Geosciences**, 27, 427-440.

HIRSCH, F., 2009., *Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaio de tração em disco circular com fenda*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

HOU, Y., DUMON, A., CULIÈRE, P., RACHIK, M., "Artificial Microstructure Generator for Dual-Phase Steels", In: **VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering**, Grécia, Jun, 2016.

HUANG, S., DI BENEDETTO, H., **Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 56. 2015.

IM, S., BAN, H., KIM, Y. R., 2014, "Characterization of Mode-I and Mode-II Fracture Properties of Fine Aggregate Matrix Using a Semicircular Specimen Geometry", **Construction and Building Materials**, v. 52. Pp. 413-421.

JAVAHERIAN, M. H., 2011., *Virtual microstructure generation of asphaltic mixtures*. Dissertação de mestrado. University of Nebraska.

KARKI, P., 2010, *Computational and experimental characterization of bituminous composites based on experimentally determined properties of constituents*. Dissertação de Mestrado. University of Nebraska – Lincoln.

KIM, H., BUTTLAR, W. G., 2005, "Micromechanical Fracture Modeling of Hot-Mix Asphalt Concrete Based on a Disk-Shaped Compact Tension Test", **Electronic Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 74E.

KIM, Y. R., ARAGÃO, F. T. S., ALLEN, D. H., LITTLE, D. N., 2010, "Damage Modeling of Bituminous Mixtures Considering Mixture Microstructure, Viscoelasticity, and Cohesive Zone Fracture", **Canadian Journal of Civil Engineering**, 37, 1125-1136

KIM, Y. R., LEE, J., LUTIF, J., 2010, "Geometrical Evaluation and Experimental Verification to Determine Representative Volume Elements of Heterogeneous Asphalt Mixtures", **Journal of Testing and Evaluation**, 38(6), 660-666.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N., 2004, "Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt Mastics", **Journal of Materials in Civil Engineering**, 122-132.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N., SONG, I., 2003, "Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1832.

KIM, Y. R., LUTIF, J. E. S., ALLEN, D. H., 2009, "Determining Representative Volume Elements of Asphalt Concrete Mixtures Without Damage", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 2127, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 52-59.

KIM, Y., ARAGÃO, F. T. S., "Microstructure modeling of rate-dependent fracture behavior in bituminous paving mixtures", **Finite Element in Analysis and Design**. 63, 23-32. 2013.

LAWN, B., **Fracture of Brittle Solids**. Cambridge Solid State Science Series. 2 ed. 1993.

LÓPEZ, J. M. M., 2010, *Modelagem do Trincamento de Misturas Asfálticas pelo Método dos Elementos Discretos*. Dissertação de Mestrado, PUC Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MACHADO, I. G., "Novos Paradigmas para Especificação de Juntas Soldadas", In: *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, 2012.

MASAD, E. A., **Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications**. In: Technical report, FHWA, 2005.

MASAD, E., CASTELO BRANCO, V. T. F., LITTLE, D. N., LYTTON, R., 2007, "A Unified Method for the Analysis of Controlled-Strain and Controlled-Stress Fatigue Testing", **International Journal of Pavement Engineering**, 9, 233-246.

MASAD, E., MUHUNTHAN, B., SHASHIDHAR, HARMAN, T., 1999, "Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis", **Journal of Computing in Civil Engineering (Special Issue on Image Processing)**, 13 (2), 88-95.

MASAD, E., TASHMAN, L., LITTLE, D., ZBIB, H., 2005, "Viscoplastic Modeling of Asphalt Mixes with the Effects of Anisotropy", **Damage and Aggregate Characteristics. Journal of Mechanics of Materials**, 37(12), 1242-1256.

MASAD, E., TASHMAN, L., SOMEDAVAN, N., LITTLE, D., 2002, "Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures", **Journal of Materials in Civil Engineering**, 14 (5), 374-383.

MELLO, M. M., 2008, *A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas*. Tese* de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

MISHNAEVSKY, L. L., 2005, "Automatic Voxel-based Generation of 3D Microstructural FE Models and its Application to the Damage Analysis of Composites", **Materials Science and Engineering**, pp. 11-23, (Jun).

MOSS, V. A., JENKINSON, D. M., ELDER, H. Y., 1990, "Automated Image Segmentation and Serial Section Reconstruction in Microscopy", **Journal of Microscopy**, 158 (2), 187-196.

MUNIZ, A. R., SECCHI, A. R., CARDOZO, N. S. M., 2005, "Uma Nova Metodologia para a Simulação de escoamentos de Fluidos Viscoelásticos", **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 15, nº 1, p. 53-58.

NASCIMENTO, L. A. H., 2008, *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

NEEDLEMAN, A., 1987, "A Continuum Model For Void Nucleation By Inclusion Debonding", **Journal of Applied Mechanics**, 54, 525-531.

OLIVER, W. C., PHARR, G. M., 1992, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments", **Journal of Materials Research**, v. 7, n. 6, (Jun).

OLIVER, W. C., PHARR, G. M., 2004, "Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology", **Journal of Materials Research**, v. 19, n. 1, (Jan).

PAPAGIANNAKIS, A. T., ABBAS, A., AND MASAD, E., 2002, "Micromechanical Analysis of Viscoelastic Properties of Asphalt Concretes", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1789, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 113-120.

PAZOS, A. G., 2015, *Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PUTANOWICZ, R., "Implementation of Pore Microstructure Model Generator and Pore Space Analysis Tools", In: **7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering**, 2015.

RASBAND W. S. ImageJ, U.S. National Institutes of Health - USA. Disponível em: imagej.nih.gov/ij/. Acesso em: Janeiro 2013.

REUSS, A., 1929, "Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbebingung für einkristalle", **Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**.

RICE, J. R., WANG, J. S., 1989, "Embrittlement of interfaces by solute segregation", **Material Science and Engineering**, 107, 23-40.

RODRIGUES, R.M., 1991, *Estudo do trincamento dos pavimentos*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil

ROMERO, P., MASAD, A., 2001, "Relationship Between the Representative Volume Element and Mechanical Properties of Asphalt Concrete", **Journal of Materials in Civil Engineering**, 13, 77-84.

SADD, M. H., DAI, Q., PARAMESWARAN, V., SHUKLA, A., 2003, "Simulation of Asphalt Materials Using a Finite Element Micromechanical Model with Damage Mechanics", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1832, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp. 86-95.

SCHNEIDER, C. A., RASBAND, W. S., ELICEIRI, K. W., 2012, "NIH Image to ImageJ: 25 Years of Image Analysis", **Nature Methods**, 9(7), 671-675.

SHUKLA, A., REVICHANDRAN, G., RAJAPAKSE, Y.D., **Dynamic Failure of Materials and Structures**. Springer. 1 ed. 2009.

SOARES, J. B., FREITAS, F. A., ALLEN, D. H., 2003, "Crack Modeling of Asphaltic Mixtures Considering Heterogeneity of the Material", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1832, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 113-120.

SOARES, R. F., ALLEN, D. H., LITTLE, D., BERTHELOT, C., "A Multi-Scale Computational Mechanics Model for Predicting Rutting in Asphaltic Pavement Subjected to Cyclic Mechanical Loading". In: **Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board**, Washington, D. C. 2014.

SONG, S. H., 2006, *Fracture of Asphalt Concrete: A Cohesive Zone Modeling Approach Considering Viscoelastic Effects*. Tese de Doutorado. Urbana, IL, Estados Unidos.

SONG, S. H., PAULINO, G. H., BUTTLAR, W. G., 2006, "A Bilinear Cohesive Zone Model Tailored for Fracture of Asphalt Concrete Considering Viscoelastic Bulk Material", **Journal of Engineering Fracture Mechanics**, 2829-2847.

SOUZA, L. T., 2009, *Investigation of Aggregate Angularity Effects on Asphalt Concrete Mixture Performance Using Experimental and Virtual Asphalt Samples*. Dissertação de Mestrado. University of Nebraska - Lincoln.

SOUZA, P., KASSEM, E., MASAD, E., LITTLE, D., 2013, "New Design Method of Fine Aggregates Mixtures and Automated Method for Analysis of Dynamic Mechanical Characterization Data", **Construction and Building Materials**, Vol. 41, pp. 216-23.

STROEVEN, P., SLUYS, L. J., GUO, Z., STROEVEN, M., 2006, "Virtual Reality Studies of Concrete". **Forma**, pp. 227-242, (Nov).

TASHMAN, L., MASAD, E., LITTLE, D. N., LYTTON, R. L., 2004, "Damage Evolution in Triaxial Compression Tests of HMA at High Temperatures", **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 73, 53-87.

THOMSON, R. D., HANCOCK, J. W., 1984, "Ductile Failure by Void Nucleation, Growth and Coalescence", *International Journal of Fracture*, v. 26.

TSCHOPP, M. A., WILKS, G. B., SPOWART, J. E., 2008, "Multi-scale Characterization of Orthotropic Microstructures", **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 16, n. 6, (Ago).

TVERGAARD, V., HUTCHINSON, J. W., 1992, "The Relation Between Crack Growth Resistance and Fracture Process Parameters in Elastic-Plastic Solids", **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 40 (6), 1377-1397.

UCHIC, M. D., 2011, "Serial Sectioning Methods for Generating 3D Characterization Data of Grain- and Precipitate-Scale Microstructures", **Computational Methods for Microstructure-Property Relationships**, 31-52.

VALLEJO, L.I.G., FERRER, M., ORTUÑO, L, OTEO, C, **Ingeniería Geológica**. Prentice Hall, Madrid, 1 ed. 2002.

VARGAS, G. A. B., 2016, *Caracterização Numérico-Experimental de Propriedades de Fratura de Misturas Asfálticas de Agregados Finos*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VOIGHT, W., 1887, "Theoretische studien über die elasticitätsverhältnisse der krystalle", **Konigl. Ges. D. Wiss.** 1887.

VOIGHT, W., 1889, "Ueber die beziehung zwischen den beiden elasticitätsconstanten isotroper korper. **Physik und Chemie**.

VOLOKH, K. Y. 2004, "Comparison Between Cohesive Zone Models", **Communications in Numerical Methods in Engineering**, 20, 845–856.

WAGONER, M. P., BUTTLAR, W. G., PAULINO, G. H, 2005, "Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture", **Society for Experimental Mechanics**. 45(3). 270-277. 2005b.

WANG, L. B., FROST, J. D., SHASHIDHAR, N., 2001, "Microstructure Study of WesTrack Mixes from X-Ray Tomography Images", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1767, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 85-94.

WANG, L., **Mechanics of Asphalt: Microstructure and Micromechanics**. McGraw-Hill Education. 1 ed. 2010.

WEN, H. KIM, Y. R., 2002, "Simple Performance Test for Fatigue Cracking and Validation with WesTrack Mixtures", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1789, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 66-72.

WILLIAMS, M., 1952, "Stress Singularities Resulting from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension". ASME **Journal of Applied Mechanics**, 19, 526-528.

XU, X. P., NEEDLEMAN, A., 1994, "Numerical Simulation of Fast Crack Growth in Brittle Solids", **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, 42 (9), 1397-1434.

YOU, Z. AND BUTTLAR, W. G., 2006, "Micromechanical Modeling Approach to Predict Compressive Dynamic Moduli of Asphalt Mixture Using the Distinct Element Method", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1970, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 73-83.

YOU, Z. e BUTTLAR, W. G., 2004, "Discrete Element Method to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures", **Journal of Materials in Civil Engineering**, ASCE, 140-146.

YOU, Z. e BUTTLAR, W. G., 2005, "Application of Discrete Element Modeling Techniques to Predict the Complex Modulus of Asphalt-Aggregate Hollow Cylinders Subjected to Internal Pressure", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1929, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 218-226.

YOU, Z., ADHIKARI, S., KUTAY, M. E., 2009, "Dynamic Modulus Simulation of the Asphalt Concrete Using the X-Ray Computed Tomography Images", **Materials and Structures**, 42(5), 617-630.

ZEHNDER, A., T., **Fracture Mechanics**. Springer Netherlands. v. 62. 2012.

ZHANG, P., 2003, *Microstructure Generation of Asphalt Concrete and Lattice Modeling of its Cracking Behavior Under Low Temperature*. Tese de Doutorado. North Carolina State University.

ZHU, Q., YVONNET, J., 2015, "An Incremental-iterative Method for Modeling Damage Evolution in Voxel-based Microstructure Models", **Computational Mechanics**, (Jan).

ZOLLINGER, C., 2005, *Application of surface energy measurements to evaluate moisture susceptibility of asphalt*. Dissertação de mestrado. Texas A&M University. College Station, TX, Estados Unidos.