

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE FLUÊNCIA ESTÁTICA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS VIA MEF: ESTUDO DA FASE AGREGADOS GRAÚDOS**

**MARCONE DE OLIVEIRA JUNIOR**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-311/18**

**BRASÍLIA/DF: 07/2018**


**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

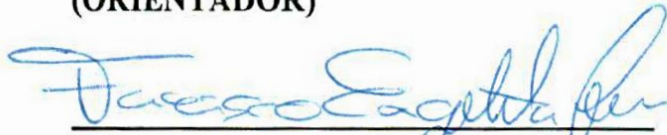
**ANÁLISE NUMÉRICA DE FLUÊNCIA ESTÁTICA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS VIA FEM: ESTUDO DA FASE AGREGADOS GRAÚDOS**

**MARCONE DE OLIVEIRA JUNIOR**

**DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.**

**APROVADA POR:**

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

  
\_\_\_\_\_  
**FRANCISCO EVANGELISTA JÚNIOR, Ph.D. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

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

**DATA: BRASÍLIA/DF, 13 JULHO de 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

DE OLIVEIRA JUNIOR, MARCONE

Análise numérica de fluência estática de misturas asfálticas via MEF: Estudo da fase Agregados Graúdos. [Distrito Federal] 2018

xv, 81 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- |                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| 1. Pavimentação                 | 2. Misturas Asfálticas |
| 3. Fluência estática            | 4. Agregados Graúdos   |
| 5. Método dos Elementos Finitos |                        |
| I. ENC/FT/UnB                   | II. Mestre             |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE OLIVEIRA JUNIOR, M. (2018). Análise numérica de fluência estática de misturas asfálticas via MEF: Estudo da fase Agregados Graúdos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82 p.

## CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Marcone de Oliveira Junior

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise numérica de fluência estática de misturas asfálticas via MEF: Estudo da fase Agregados Graúdos.

GRAU/ANO: Mestre/2018

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

---

Marcone de Oliveira Junior

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

marcone@outlook.com

## DEDICATÓRIA

*Dedico esta dissertação  
ao meu pai Marcone e minha mãe Wanilda.*

## AGRADECIMENTOS

Este é o resultado de um sonho perseguido com muito afinho, mas que não foi sonhado só por mim. Contribuir para o conhecimento atingido acerca do tema tratado é uma realização pessoal muito grande, mas que só foi possível graças à vontade de muitas outras pessoas. Minha sincera gratidão a vocês que se fizeram presentes:

Ao meu pai, Marcone, por ser o meu grande exemplo de vida digna e honesta. Sempre foi muito importante perceber a crença no poder transformador da educação daquele que é minha inspiração como pessoa.

À minha mãe, Wanilda, minha grande educadora, que se fez presente dia após dia, mesmo de longe, me lembrando que tenho um porto seguro. Obrigado por me ensinar valores de honra e dever, e por acreditar em mim.

Aos meus padrinhos, Geraldo e Beth, que se fizeram família em uma cidade nova e desafiadora. Muito obrigado pelo apoio.

Aos meus antigos e fieis amigos, Andreia, Juliana, Marina, Daniela, Priscilla, Luciana, Amanda, Bárbara, Liliane e Roberta, que mesmo distantes acompanharam esta trajetória, sempre me incentivando a dar passos largos. E aos amigos conquistados na Geotecnia, que fizeram esse período muito mais agradável e feliz: Humberto, Ana, Rogério, Thaís, Luisa, Débora e Bruna.

Agradeço especialmente ao meu orientador, professor Márcio Muniz de Farias. Meu muito obrigado por ser um orientador impecável e sempre a par das minhas dificuldades. Por ser sempre presente e inspirador, dando-me a visão de que o esforço é recompensador.

Aos colegas do INFRALAB, discentes e funcionários, companheiros diários em busca de conhecimento. Obrigado especial ao Medina, Letícia, Igor, Irvin e Manoel, que colaboraram imensamente me ajudando com a produção dessa dissertação.

Agradeço à CAPES pela concessão de bolsa ao longo dos dois anos de mestrado.

# **Análise Numérica de Fluência Estática de Misturas Asfálticas via MEF: Estudo da Fase Agregados Graúdos**

**Marcone de Oliveira Junior**

## **RESUMO**

A pesquisa objetiva desenvolver um modelo numérico que simule o comportamento de misturas asfálticas quanto à fluência estática. O material compósito é dividido em duas fases: Matriz de Agregados Finos e Agregados graúdos. Cada uma delas foi caracterizada experimentalmente, de forma a prover dados necessários para a caracterização de seus modelos constitutivos e características geométricas. A Matriz de Agregados Finos é caracterizada como um material viscoelástico a partir de dados da curva de Relaxação  $E(t)$ . Para isso, dados de ensaios de fluência estática foram analisados a fim de obter a curva de Fluência  $D(t)$  que, mediante um método de interconversão baseado na Lei de Potência, inter-relaciona-se com a função Relaxação  $E(t)$ . A obtenção dos parâmetros de entrada para a simulação em Elementos Finitos é feita aproximando-se uma curva de Prony à função. Para a fase Agregados Graúdos, o modelo é considerado elástico-linear, entretanto sua configuração geométrica torna a modelagem complexa. Um algoritmo de empacotamento de partículas do tipo frente de avanço é utilizado para gerar pacotes de partículas randômicos num domínio pré-definido, considerando características de forma e granulometria das partículas, além da fração de ocupação do volume pelos agregados. Aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF), foram realizados ensaios de fluência estática e recuperação no modelo numérico utilizando o programa ABAQUS que, após calibrados, apresentaram erros relativos muito baixos, validando o modelo desenvolvido. De posse do modelo validado, este foi utilizado para estudar características geométricas da fase Agregado Graúdo no comportamento da mistura asfáltica como um todo. Para isso, foram feitos dois estudos: o primeiro para avaliar a influência da forma das partículas e o segundo para avaliar a influência da granulometria das mesmas na evolução das deformações durante o ensaio de fluência estática. Observou-se, finalmente, que partículas menos cúbicas, mais alongadas e/ou lamelares resistem mais às deformações, visto que apresentam maior intertravamento entre elas no interior da mistura, e que partículas maiores, e com curvas de graduação mais densas, têm melhor desempenho quanto às deformações.

# Numerical Analysis via FEM of Static Creep in Hot Mix: Influence of the Coarse Aggregates

Marcone de Oliveira Junior

## ABSTRACT

The research aims to develop a numerical model that simulates the behavior of asphalt mixtures in terms of static creep. The composite material is divided into two phases: asphalt mastic and coarse aggregates. Each of them was characterized experimentally, in order to provide the necessary data for the characterization of its constitutive models and geometric characteristics. The Asphaltic Mastic is characterized as a viscoelastic material from data of the Relaxation curve  $E(t)$ . For this, data of static creep tests were analyzed in order to obtain the  $D(t)$  flow curve, which, through an interconversion method based on the Power Law, interrelates with the Relaxation function  $E(t)$ . Obtaining the input parameters for the Finite Element simulation is done by approaching a Prony curve to the function. For the Coarse Aggregates phase, the model is considered to be linear-elastic, however its geometric configuration makes modeling complex. A forward particle packing algorithm is used to generate random particle packets in a predefined domain, considering particle shape and particle size characteristics, as well as volume fraction occupied by aggregates. Applying the Finite Element Method (FEM), static creep and recovery tests were performed in the numerical model using the ABAQUS program, which, after calibration, showed very low relative errors, validating the developed model. With the validated model, this one was used to study the geometric characteristics of the Coarse Aggregates phase in the behavior of the asphalt mixture as a whole. For this, two studies were carried out: the first to evaluate the influence of the shape of the particles and the second to evaluate the influence of their granulometry on the evolution of the deformations during static creep test. Less cubic, elongated and/or lamellar particles were more resistant to deformations because they exhibit greater interlocking in the interior of the mixture, and larger particles with denser gradation curves have a better performance on the strength of the test piece to the deformations.

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	3
1.2	JUSTIFICATIVA .....	3
1.3	HIPÓTESE .....	3
1.4	OBJETIVOS .....	3
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1	VISCOELASTICIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	5
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO À FLUÊNCIA .	9
2.3	MODELOS MECÂNICOS DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS.....	12
2.4	O ESQUELETO SÓLIDO GRAÚDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	14
2.4.1	INFLUÊNCIA DA FORMA DAS PARTÍCULAS .....	14
2.4.2	INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS PARTÍCULAS.....	17
2.5	MODELAGEM NUMÉRICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	19
2.5.1	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	20
2.5.2	GERAÇÃO DE MODELOS MICROESTRUTURAIS 3D DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	22
2.5.3	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	26
2.5.4	AJUSTE DE DADOS EXPERIMENTAIS COM SÉRIES DE PRONY .....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	32
3.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	32
3.1.2	COLETA DE DADOS DA AAUQ E DO CBUQ .....	34
3.2	ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA E RECUPERAÇÃO ( <i>CREEP AND RECOVERY</i> ).....	34
3.2.1	INTER-RELAÇÃO ENTRE FUNÇÃO FLUÊNCIA E RELAXAMENTO .....	36
3.3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO .....	38
3.3.1	MODELOS CONSTITUTIVOS .....	39
3.3.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	41
3.3.3	GERAÇÃO DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO .....	42
3.3.4	CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	44
3.3.5	GERAÇÃO DA MALHA DO MODELO .....	45
3.3.6	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO.....	48



3.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FORMA DOS AGREGADOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA ..	49
3.5	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA ..	52
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	54
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE GRANULOMETRIA E FORMA.....	54
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....	56
4.3	INFLUÊNCIA DA FORMA DOS AGREGADOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA .....	61
4.4	INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA ..	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
5.1	CONCLUSÕES .....	74
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Faixas granulométricas de agregados para misturas asfálticas. (DNIT 031/2006 – ES).....	18
<b>Tabela 3.1.</b> Classificação da forma das partículas (ABNT NBR 6954 MB 894/1989 – modificado pelo autor). .....	33
<b>Tabela 3.2.</b> Valores dos coeficientes normalizados de módulo volumétrico e cisalhante. ....	41
<b>Tabela 3.3.</b> Análise de refinamento de malha. ....	46
<b>Tabela 3.4.</b> Características das malhas dos corpos de prova ensaiados na validação do modelo.....	47
<b>Tabela 3.5.</b> Dimensões adotadas para os agregados e suas relações de forma.....	49
<b>Tabela 4.1.</b> Valores finais de dimensões médias, em milímetros.....	56
<b>Tabela 4.2.</b> Relações entre dimensões e classificação da forma dos agregados. ....	56
<b>Tabela 4.3.</b> Análise da dispersão das curvas de deslocamentos dos ensaios.....	59
<b>Tabela 4.4.</b> Comparação entre resultados numéricos e experimental. ....	60
<b>Tabela 4.5.</b> Resultados de relações de forma e deslocamento máximo sob ensaio de fluência estática.....	62
<b>Tabela 4.6.</b> Análise de deslocamentos para diferentes formas de agregados graúdos sob ensaio de fluência estática. ....	68
<b>Tabela 4.7.</b> Resultados de deslocamentos máximos para diferentes granulometrias.....	71
<b>Tabela 4.8.</b> Relação entre $n$ e deslocamentos máximos. ....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Materiais componentes do CBUQ. ....	1
<b>Figura 2.1.</b> Representação esquemática das componentes de deformação em material viscoelastoplástico. (SIDES <i>et al.</i> , 1985, <i>apud</i> MELLO, 2008). ....	6
<b>Figura 2.2.</b> Resposta da tensão e da deformação a um ensaio com solicitação harmônica (Modificado - MELLO, 2008). ....	7
<b>Figura 2.3.</b> Plano complexo (Modificado - KIM, 2009). ....	7
<b>Figura 2.4.</b> Exemplo de determinação da Curva Mestre de mistura asfáltica (MELLO, 2008). ....	8
<b>Figura 2.5.</b> Curva típica $D(t)$ decorrente do ensaio de fluência sob carga estática (modificado - KIM, 2009). ....	10
<b>Figura 2.6.</b> Modelos mecânicos de (a) materiais viscoelásticos (b) Voight-Kelvin generalizado (c) Maxwell generalizado. (modificado - HUANG, 1993). ....	13
<b>Figura 2.7.</b> Quadro metodológico do processo de modelagem de problema físico. (modificado – RECAREY, 1999). ....	21
<b>Figura 2.8.</b> Relação entre diferentes escalas e técnicas de modelagem numérica. (modificado – KIM, 2007 <i>apud</i> GARCÍA, 2017). ....	21
<b>Figura 2.9.</b> Exemplos de microestruturas 2D utilizados para modelagem via MEF. (DAI e YOU, 2007). ....	23
<b>Figura 2.10.</b> Exemplos de microestruturas 2D utilizados para modelagem via MED. (DAI e YOU, 2007). ....	23
<b>Figura 2.11.</b> Amostras virtuais de misturas asfálticas fabricadas com diferentes orientações de partículas. (ARAGÃO <i>et al.</i> , 2015a). ....	24
<b>Figura 2.12.</b> Dois modelos de misturas asfálticas com diferentes quantidades de agregados. (XU <i>et al.</i> , 2010). ....	25
<b>Figura 2.13.</b> Visualização tridimensional de imagens de tomografia computadorizada de raios-X. (YOU <i>et al.</i> , 2009). ....	26
<b>Figura 2.14.</b> Estado final da fase agregados em corpos de prova digitais de misturas asfálticas. (LIU <i>et al.</i> , 2017b). ....	26
<b>Figura 2.15.</b> Passos gerais que são comuns a todos os algoritmos de empacotamento de frente de avanço. (VALERA <i>et al.</i> , 2015). ....	28
<b>Figura 2.16.</b> Efeito isolado dos coeficientes da série de Prony. (SOUSA e SOARES, 2007). ....	29
<b>Figura 3.1.</b> Fluxograma da Metodologia da Pesquisa. ....	31
<b>Figura 3.2.</b> Composição granulométrica da Faixa C. ....	32
<b>Figura 3.3.</b> Análise de forma com paquímetro. ....	33
<b>Figura 3.4.</b> Resultados experimentais obtidos de Rodrigues (2018): Curva de deslocamento x tempo. ....	35

<b>Figura 3.5.</b> Resultados experimentais obtidos de Rodrigues (2018): Curva de fluência $D(t)$ .	36
<b>Figura 3.6.</b> Ajuste polinomial de ordem 9 da função Fluência $D(t)$ .	37
<b>Figura 3.7.</b> Interconversão entre funções $D(t)$ e $E(t)$ .	38
<b>Figura 3.8.</b> Esquema da fase ESG.	39
<b>Figura 3.9.</b> Esquema do modelo numérico Placa Rígida + AA + ESG.	39
<b>Figura 3.10.</b> Ajuste da série de Prony à função Relaxação da MAF.	41
<b>Figura 3.11.</b> Composição granulométrica da parte graúda do centro da Faixa C.	43
<b>Figura 3.12.</b> Carregamentos e condições de contorno aplicados.	45
<b>Figura 3.13.</b> Elemento C3D10: tetraedro de 10 nós.	46
<b>Figura 3.14.</b> Exemplo de malha de um corpo de prova ensaiado.	47
<b>Figura 3.15.</b> Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo cúbicos.	50
<b>Figura 3.16.</b> Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo alongados.	50
<b>Figura 3.17.</b> Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo lamelares.	50
<b>Figura 3.18.</b> Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo alongados-lamelares.	51
<b>Figura 3.19.</b> Distribuição granulométrica dos agregados graúdos do centro e limites da Faixa C.	53
<b>Figura 4.1.</b> Histogramas com distribuição normal dos valores de (a) comprimento, (b) largura e (c) espessura das partículas.	55
<b>Figura 4.2.</b> Contorno de cores de deslocamentos verticais ao fim da fase de carregamento.	57
<b>Figura 4.3.</b> Faixas de deslocamentos no interior do CP contornando o ESG.	57
<b>Figura 4.4.</b> Concentração de tensões no interior do CP pós-carregamento.	58
<b>Figura 4.5.</b> Dispersão dos trinta ensaios numéricos com disposição aleatória dos ESG.	59
<b>Figura 4.6.</b> Comparação entre resultados experimental e numérico obtidos de ensaios de fluência estática.	59
<b>Figura 4.7.</b> Comparação entre curvas numérica e experimental de Fluência.	61
<b>Figura 4.8.</b> Influência do Fator de Forma e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.	63
<b>Figura 4.9.</b> Influência da Esfericidade e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.	63
<b>Figura 4.10.</b> Influência do Alongamento e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.	64
<b>Figura 4.11.</b> Influência da Planicidade e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.	64
<b>Figura 4.12.</b> Curvas de deslocamentos verticais de corpos de prova sob ensaio de fluência estática com diferentes Fatores de Forma.	65

<b>Figura 4.13.</b> Concentração de tensões entre partículas (a) alongadas-lamelares e (b) cúbicas. .....	66
<b>Figura 4.14.</b> Vetores de deslocamentos indicando intertravamento entre partículas (a) alongadas-lamelares e (b) cúbicas.....	67
<b>Figura 4.15.</b> Correlação entre Fator de Forma e deformação permanente.....	68
<b>Figura 4.16.</b> Curvas deslocamento <i>versus</i> tempo para ESG no centro da Faixa C.....	69
<b>Figura 4.17.</b> Curvas deslocamento <i>versus</i> tempo para ESG no limite inferior da Faixa C.....	70
<b>Figura 4.18.</b> Curvas deslocamento <i>versus</i> tempo para ESG no limite superior da Faixa C....	70
<b>Figura 4.19.</b> Curva deslocamento <i>versus</i> tempo de CPs com diferentes granulometrias. ....	71
<b>Figura 4.20.</b> Interpolações não-lineares de funções de potência para as curvas granulométricas estudadas.....	73

## LISTA NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

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

## LISTA DE SÍMBOLOS

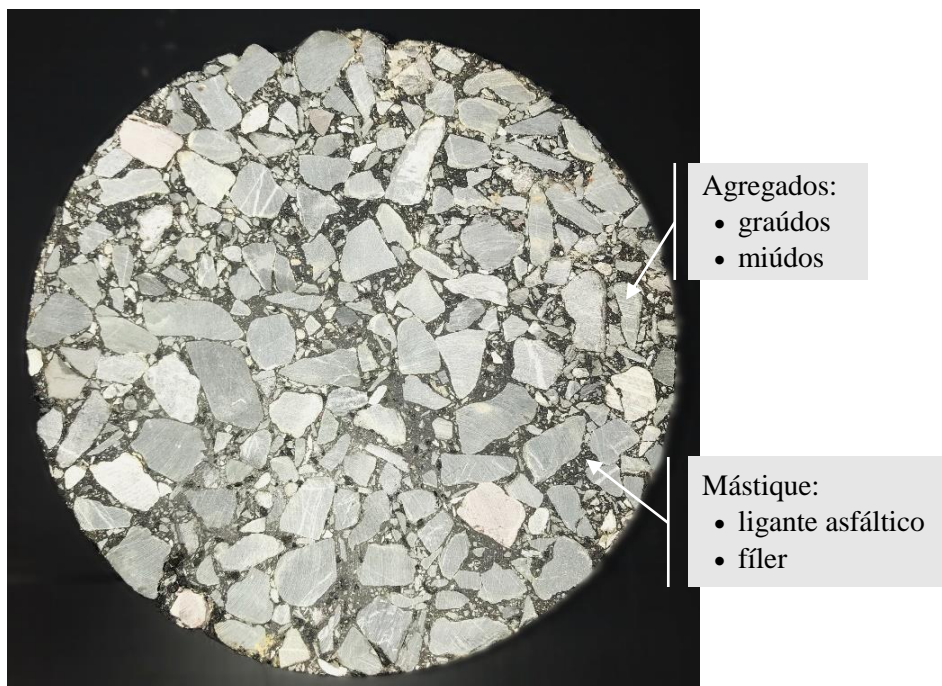
$D(t)$	Função Fluência (ou <i>Creep Compliance</i> )
$D_0$	Termo independente do tempo na Série de Prony de Fluência
$E$	Módulo de Young
$E(t)$	Função Relaxação
$E^*$	Módulo complexo
$ E^* $	Módulo dinâmico
$E_\infty$	Termo independente do tempo na Série de Prony de Relaxação
$G(t)$	Módulo de cisalhamento no tempo
$G^*$	Módulo cisalhante complexo
$ G^* $	Módulo cisalhante dinâmico
$K(t)$	Módulo volumétrico no tempo
$t$	Tempo
$t_{3600}$	Tempo ao final do carregamento no ensaio de fluência estática
$t_{4500}$	Tempo ao final do descarregamento no ensaio de fluência estática
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon_0$	Amplitude de deformação
$\delta$	Ângulo de fase
$\omega$	Frequência angular
$\sigma$	Tensão
$\tau_i$	Tempos de retardação
$\rho_i$	Tempos de relaxação
$\nu$	Coefficiente de Poisson

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUÇÃO

Pavimentos flexíveis são aqueles compostos por uma camada de concreto asfáltico na superfície, e no mínimo uma camada granular (base). Correspondem ao tipo de pavimento mais comumente utilizado em obras rodoviárias do Brasil, sendo a camada de rolamento constituída de materiais compósitos, ligados por um material betuminoso.

O CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) é uma mistura de Agregados Graúdos (G), Agregados Miúdos (M), Agregados de Enchimento ou Fíler (F) e Ligante Asfáltico (CAP), contendo ainda vazios (V) no seu interior preenchidos por ar. Pode-se, conforme evidencia García (2017), dividir a composição desse material de diferentes maneiras: (1) a primeira composta por agregados graúdos, miúdos e fíler mineral, a segunda composta pelo ligante asfáltico, e a terceira referente aos vazios; (2) agregados graúdos e miúdos compondo a primeira fase, a segunda composta por fíler mineral e ligante asfáltico (mástique), e a terceira referente aos vazios; (3) a primeira fase composta pelos agregados graúdos, a segunda composta por agregados finos, fíler e ligante asfáltico, e a terceira referente aos vazios. A Figura 1.1 apresenta a mistura e seus materiais constituintes.



**Figura 1.1.** Materiais componentes do CBUQ.



O comportamento de misturas asfálticas é genericamente viscoelastoplástico, devido aos materiais específicos de sua composição. Fatores como taxa, tempo e magnitude de carregamento, além da temperatura, podem afetar o comportamento do material, conferindo diferentes graus de importância para as parcelas elástica, plástica ou viscosa na representação do mesmo. O esqueleto sólido, quando isolado, tem uma resposta tipicamente elasto-plástica, enquanto que a Matriz de Agregados Finos é geralmente assumida como tendo uma resposta viscoelástica. Tanto os componentes plásticos, quanto os viscosos contribuem para o acúmulo de deformações permanentes, sendo que as primeiras (bem como as elásticas) ocorrem em fase com o carregamento, enquanto que a parte viscosa é defasada.

Segundo Kim (2009), o desempenho de um concreto asfáltico pode ser categorizado em dois principais tipos de danos: fadiga e deformações permanentes. Estas são causadas principalmente sob condições de altas temperaturas e/ou carregamentos lentos, enquanto que aquelas podem ser causadas por cargas repetidas ou carregamentos térmicos. O comportamento e o desempenho quanto a essas deformações são afetados por fatores como tempo e taxa de carregamento, temperatura, estado de tensões, tipo de carregamento, idade e umidade da amostra.

A capacidade de carga de um concreto asfáltico advém, principalmente, do intertravamento e do atrito de contato entre agregados. O mástique responde pela cimentação para manter as partículas de agregado unidas (Zeleeuw, 2008). É importante, então, conhecer as propriedades desses materiais a fim de obter um modelo coerente que possa retratar o desempenho da mistura. Além disso, as proporções e distribuições dos materiais também devem ser tomadas em consideração, visto que determinam o tipo de comportamento (elástico, viscoso ou plástico) que deve se sobressair.

Ao longo do tempo, o entendimento do comportamento de misturas asfálticas passou a ser estudado com a utilização de ferramentas numéricas, como o Método dos Elementos Finitos e/ou o Método dos Elementos Discretos. A criação de um modelo numérico que represente o complexo comportamento de misturas asfálticas é, por si só, um trabalho relevante, mas a utilização dele para previsão de danos e para auxílio no dimensionamento de pavimentos torna-se de grande valia para a área da pavimentação. Além disso, a possibilidade de estudar a influência de parâmetros que definem os materiais no comportamento da mistura contribui enormemente para o entendimento do CBUQ.

## **1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

O problema científico a ser investigado se resume no seguinte questionamento: É possível, utilizando um modelo computacional em Elementos Finitos, entender e simular o comportamento do concreto asfáltico quanto à fluência tomando em conta as propriedades dos materiais componentes?

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

A presente pesquisa se insere no estudo e compreensão do comportamento real das misturas asfálticas submetidas a esforços externos. Um melhor entendimento numérico do concreto asfáltico propiciaria previsões de comportamento do material de forma mais rápida e menos onerosa, visto que ensaios de laboratório, apesar de numerosos na área da Pavimentação, demandam muito tempo para gerarem resultados. O desenvolvimento de um modelo mais realista acarretaria em informações mais acuradas acerca do desempenho do pavimento sob condições reais, além de prover relações entre propriedades dos materiais, geométricas e/ou constituintes, e parâmetros do modelo, aplicando conceitos de mecânica.

## **1.3 HIPÓTESE**

A principal hipótese deste trabalho é de que seja possível simular o comportamento de misturas asfálticas quanto à fluência, a partir de parâmetros geométricos e dos modelos constituintes dos materiais que as compõem, utilizando ferramentas computacionais como o Método dos Elementos Finitos (FEM).

## **1.4 OBJETIVOS**

O principal objetivo desta pesquisa é confirmar a hipótese de que é possível simular o comportamento do concreto asfáltico em três dimensões (3D), considerando as propriedades viscoelásticas da argamassa, e a forma e disposição dos agregados graúdos. Busca-se aprofundar o conhecimento fundamental do comportamento de misturas e propiciar o desenvolvimento de modelos mais realistas. Para tanto, objetiva-se ainda desenvolver e aplicar tecnologias de modelagem numérica em nível de escala de grãos para simulações de ensaios em misturas asfálticas, como o de fluência por compressão uniaxial estática.

A partir dos resultados, pretende-se estudar a influência de parâmetros geométricos da fase Esqueleto Sólido Graúdo (ESG) no comportamento da mistura como um todo, no que diz respeito à sua capacidade de resistir a deformações impostas por carga estática. São analisadas a forma e a granulometria de agregados graúdos na contribuição para a resistência às deformações de corpos de prova de CBUQ comprimidos uniaxialmente por uma carga constante.

## **1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho é estruturado em seis capítulos, conforme segue:

- Capítulo 1: Trata-se de uma introdução ao tema tratado, além de apresentar o problema o qual a pesquisa pretende solucionar, a hipótese levantada e os objetivos da mesma;
- Capítulo 2: Neste capítulo, apresenta-se a bibliografia suporte ao trabalho realizado, com foco na caracterização viscoelástica de misturas asfálticas, além de analisar o estado da arte no que diz respeito à modelagem numérica de materiais betuminosos como o CBUQ;
- Capítulo 3: Apresenta-se a metodologia do estudo, passando pela caracterização dos materiais, por meio de ensaios experimentais e desenvolvimento de dados bibliográficos, e chegando à modelagem numérica de um modelo, que deve ser validado. Em seguida, explica-se como foram comparados parâmetros de forma e granulometria e seus efeitos no comportamento mecânico da mistura;
- Capítulo 4: Apresentam-se os resultados obtidos da caracterização experimental e dos ensaios numéricos, para validação do modelo e para estudo de parâmetros geométricos da fase ESG;
- Capítulo 5: As conclusões da pesquisa são apontadas e sugestões para trabalhos futuros são feitas.

# CAPÍTULO II

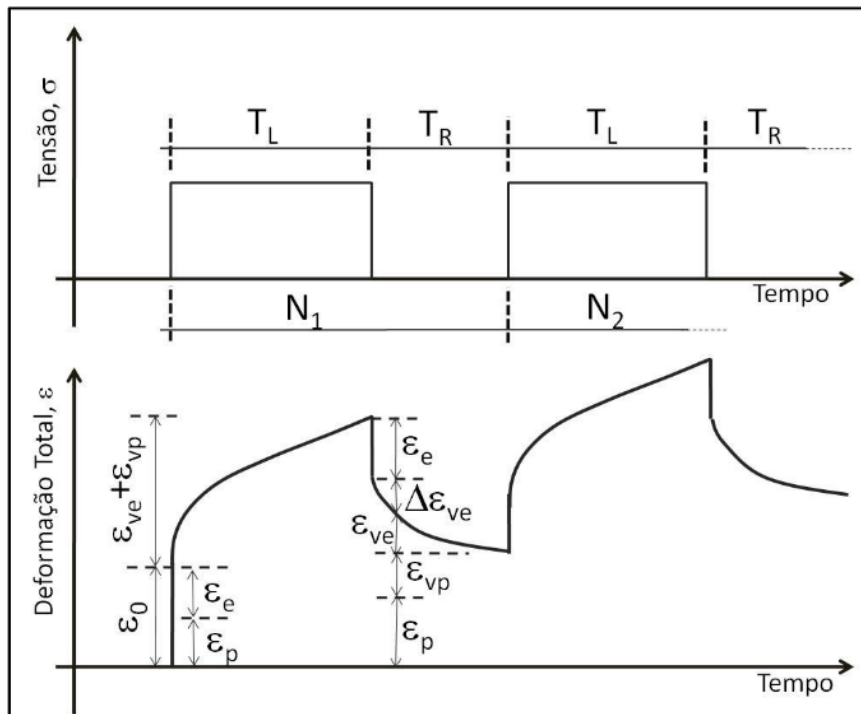
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo faz uma revisão da bibliografia necessária para subsidiar o conhecimento teórico para desenvolvimento do trabalho. Trata-se, primeiramente, de conceitos ligados ao material analisado, qual seja o concreto betuminoso usinado a quente, incluindo seu comportamento viscoelástico e composições.

Em seguida, abordam-se aspectos da modelagem numérica como ferramenta de análise do comportamento de misturas asfálticas, tratando das ferramentas e conceitos necessários para prover seu funcionamento. São apresentados modelos até então já concebidos e faz-se um estudo crítico acerca dos mesmos.

### 2.1 VISCOELASTICIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas asfálticas são comumente classificadas como um material viscoelástico. Pesquisas como as de Collop *et al.* (2007), Silva (2009), entre outras, reiteram a importância de se considerar o efeito do comportamento viscoelástico do ligante no material composto. Entretanto, o comportamento desse material é ainda mais complexo, visto que agrega ainda parcelas plásticas às elásticas e viscosas na resposta a solicitações externas. Esse tipo de reação não-linear tem sido estudada por diversos autores, como Sides *et al.* (1985), Kim e Little (1990), Lu e Wright (1998), entre outros, e modelos constitutivos que consideram todas as parcelas de deformação já foram propostos por alguns deles. A separação dessas parcelas é exemplificada pela curva de fluência, apresentada na Figura 2.1. O material viscoelástico, ao ser solicitado por uma tensão  $\sigma$  constante por um tempo  $T_L$ , responde inicialmente com uma deformação  $\varepsilon_0$ , de natureza elástica ( $\varepsilon_e$ ) e plástica ( $\varepsilon_p$ ). Em seguida, deformações viscoelásticas ( $\varepsilon_{ve}$ ) e viscoplásticas ( $\varepsilon_{vp}$ ) se desenvolvem ao longo do tempo de carregamento. Na fase de descarregamento, ocorre instantaneamente uma recuperação da parcela elástica, e posteriormente da parcela viscoelástica ao longo do tempo  $T_R$ .



**Figura 2.1.** Representação esquemática das componentes de deformação em material viscoelastoplástico. (SIDES *et al.*, 1985, *apud* MELLO, 2008).

Lu e Wright (1998) resumiram os modelos constitutivos de misturas asfálticas em um contexto uniaxial, para o período  $N_i$  do ensaio de fluência, por meio de funções do tipo polinomial ou funções de potência. Para um contexto multidimensional, as deformações elásticas são definidas por uma matriz de compressibilidade (ou compliância), tomando em conta o módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

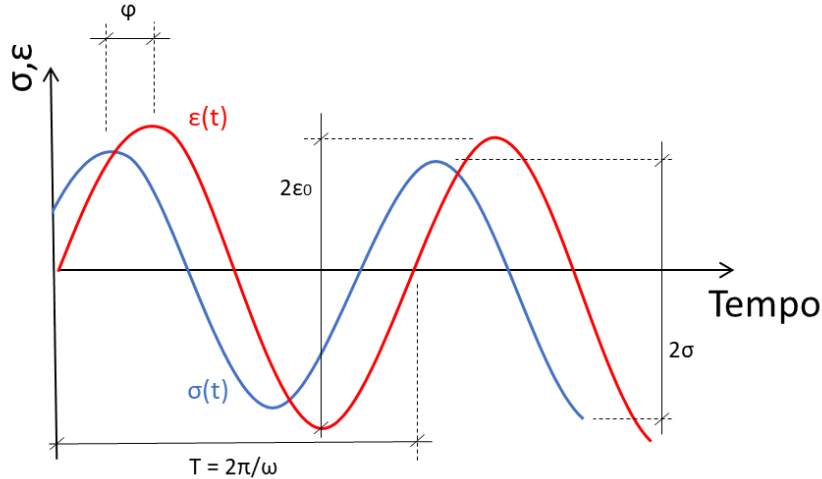
Fatores como magnitude, tempo e taxa do carregamento, além da temperatura, influenciam no grau de importância de cada parcela de deformação apresentada. Segundo Kim (2009), em seu trecho linear, os materiais podem ser caracterizados por pelo menos duas propriedades: a resistência total à deformação e a distribuição relativa dessa resistência entre a parte elástica e a parte viscosa.

Em situações nas quais o material viscoelástico é submetido a solicitações harmônicas, ou oscilatórias, esses podem ser classificados pelo seu módulo dinâmico ( $E^*$ ) e ângulo de fase ( $\varphi$ ). O modelo indica que, para uma deformação imposta do tipo senoidal, conforme a Eq. 2.1, a resposta das tensões segue a Eq. 2.2. Observa-se que a resposta de tensão é defasada pelo ângulo de fase, conforme esquematiza a Figura 2.2.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

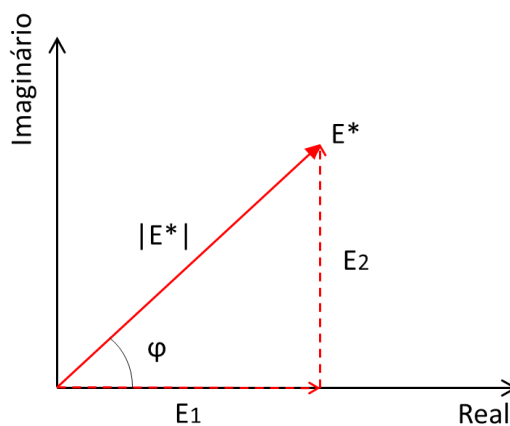
$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

sendo  $\varepsilon_0$  a amplitude de deformação,  $\sigma_0$  a amplitude de tensão,  $\omega$  a frequência angular e  $\varphi$  o ângulo de fase.



**Figura 2.2.** Resposta da tensão e da deformação a um ensaio com solicitação harmônica (Modificado - MELLO, 2008).

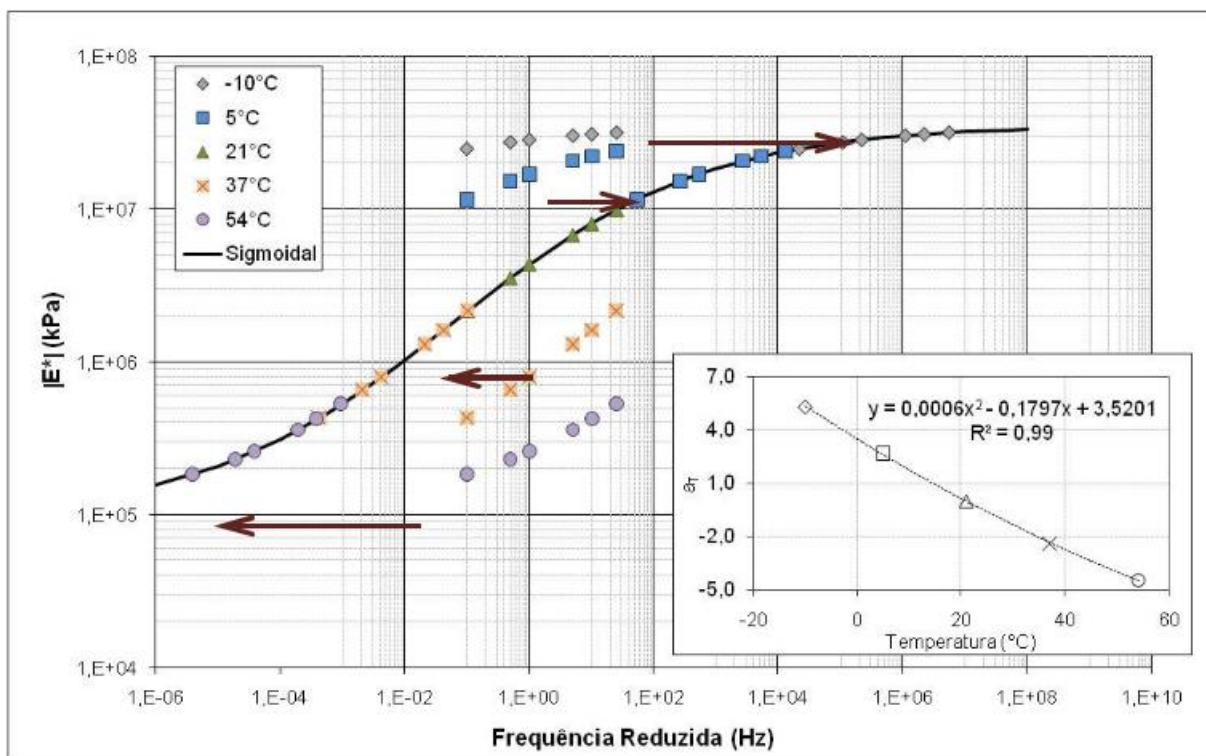
O módulo complexo, por se tratar de um número complexo, possui duas partes: real e imaginária. Conforme ilustra a Figura 2.3, a parte real do módulo ( $E_1$ ) é chamada de módulo de armazenamento, enquanto a parte imaginária ( $E_2$ ) representa o módulo de perda. Materiais perfeitamente elásticos apresentam ângulo de fase  $\varphi = 0^\circ$ , enquanto materiais viscosos possuem  $\varphi = 90^\circ$ . A razão entre as amplitudes de tensão e deformação define o módulo dinâmico  $|E^*|$ .



**Figura 2.3.** Plano complexo (Modificado - KIM, 2009).

O comportamento de misturas asfálticas é influenciado, sob solicitações harmônicas, pela frequência de solicitação e pela temperatura de referência. A obtenção do módulo dinâmico

de um material viscoelástico pode ser feita ainda pela construção da chamada Curva Mestre, considerando a superposição dos fatores tempo e temperatura no comportamento das misturas. A baixas temperaturas ou altas frequências, segundo Kim (2009), valores de  $|E^*|$  altos e valores de  $\phi$  próximos a  $0^\circ$  representam a natureza elástica do comportamento do asfalto. Conforme aumenta-se a temperatura, ou diminui-se a frequência,  $|E^*|$  diminui continuamente, enquanto  $\phi$  aumenta, o que representa uma diminuição da resistência à deformação e menor elasticidade (menor capacidade de armazenar energia). A Curva Mestre pode ser construída por meio de translações de curvas obtidas para várias temperaturas, sob frequências maiores, a fim de diminuir o tempo despendido com a construção de uma curva completa sob várias frequências. A Figura 2.4 ilustra uma Curva Mestre de misturas asfálticas para temperatura de referência igual a  $21^\circ\text{C}$ .



**Figura 2.4.** Exemplo de determinação da Curva Mestre de mistura asfáltica (MELLO, 2008).

A rigidez do concreto asfáltico é influenciada por características como a espessura do mástique, a idade, componentes de umidificação e secagem da energia superficial, além da fluência da mistura. Esta última pode ser obtida pela análise de resultados de um ensaio simples de fluência estática, e permite caracterizar o material de forma muito mais rápida e prática.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO À FLUÊNCIA

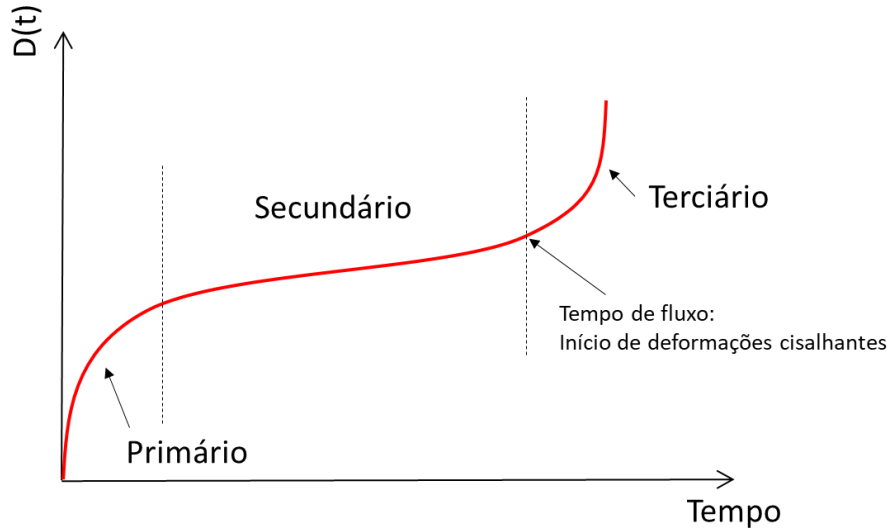
O ensaio de fluência e recuperação por compressão uniaxial estática tem como objetivo propiciar um entendimento do potencial de a mistura asfáltica de desenvolver deformações permanentes. A Função Fluência  $D(t)$  é utilizada para caracterizar o comportamento viscoelástico das misturas, sendo gerada através de um ensaio no qual aplica-se uma carga de compressão estática constante ( $\sigma$ ) em corpos de prova e registra-se a evolução das deformações  $\varepsilon(t)$  por um período de tempo pré-determinado.

O *NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) Report 465*, produzido nos Estados Unidos da América, não normatiza o ensaio de fluência estática e recuperação, entretanto apresenta um procedimento sugerido para a realização do mesmo. No Brasil, não há uma norma que uniformize a realização do ensaio, embora haja um procedimento comumente utilizado por ser um ensaio simples e vastamente praticado. Rotineiramente, emprega-se uma carga uniaxial vertical de 100 kPa em um corpo de prova moldado pela metodologia *Marshall* ou *Superpave*, por exemplo, por um período de 3600 segundos. Posteriormente, retira-se a carga por 900 segundos para recuperação das deformações.

São medidos, durante o ensaio, os valores de deslocamentos axiais ao longo do tempo. De posse desses dados, divididos pela altura inicial do corpo de prova, têm-se as deformações ao longo do tempo. A função Fluência  $D(t)$  pode ser então obtida dividindo-se as deformações ao longo do tempo pela tensão constante aplicada.

A Figura 2.5 apresenta uma curva típica obtida a partir de um ensaio de fluência estática. A curva pode ser separada em três partes principais, segundo Kim (2009): *creep* primário, *creep* secundário e fluxo terciário.





**Figura 2.5.** Curva típica  $D(t)$  decorrente do ensaio de fluência sob carga estática (modificado - KIM, 2009).

Os parâmetros da curva de fluência, ou seja, a interseção e a inclinação do “creep” secundário permitem distinguir os componentes dependentes e não dependentes do tempo de resposta das deformações (WITCZAK *et al.*, 2002). Valores de interseções mais altas indicam um menor módulo de elasticidade (ou seja, maior fluência) e leva a maiores deformações permanentes, e vice-versa. Além disso, a inclinação da região estável mostra a taxa de deformação permanente das misturas de concreto asfáltico (ZELELEW, 2008). Um maior aumento da tendência de fluxo do material no fluxo terciário ocorre sob volume constante, segundo Kim (2009). O tempo de fluxo  $F_t$  é o tempo de início de deformações cisalhantes sob volume constante. Esse valor pode ainda ser visto como o ponto de mínimo na representação da taxa de tendência de fluência *versus* o tempo de carregamento.

Na busca pela caracterização da viscoelasticidade do concreto asfáltico, a parcela da resposta viscoplástica pode ser ignorada, de forma a permitir a representação do material por meio de integrais de Superposição de Boltzmann, ou integrais hereditárias. A relação constitutiva de materiais viscoelásticos lineares, sem considerar o envelhecimento, entre tensão e deformação pode ser definida pelas Eq. 2.3 e 2.4, discutidas e obtidas por diversos estudos sobre a teoria da viscoelasticidade (FERRY, 1980; TSCHOEGL, 1989; CHRISTENSEN, 2003).

$$\sigma_{ij} = \int_0^t E_{ijkl}(t - \tau) \cdot \frac{d\varepsilon_{kl}}{d\tau} d\tau \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \int_0^t D_{ijkl}(t - \tau) \cdot \frac{d\varepsilon_{kl}}{d\tau} d\tau \quad (2.4)$$

sendo  $\sigma$  a tensão,  $\varepsilon$  a deformação,  $E$  a função Relaxação,  $D$  a função Fluência,  $t$  o tempo transcorrido e  $\tau$  a variável auxiliar de integração.

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

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

A execução de um ensaio de relaxação é mais complexa que o de fluência, visto que equipamentos mais robustos são necessários para a manutenção de uma deformação constante. De acordo com Huang (1993), sob uma tensão constante, a curva de flexibilidade à fluência pode ser expressa como o inverso do módulo de Young. Entretanto, segundo Kim (2009), isso só seria possível se o concreto asfáltico fosse puramente elástico. Devido à natureza viscoelástica da mistura, essa afirmação só é válida sob o domínio da transformada de Laplace. A relação entre  $D(t)$  e  $E(t)$ , considerando o efeito viscoelástico, sob carregamento uniaxial, sem efeitos de envelhecimento, condições isotérmicas, é representada por:

$$1 = \int_0^t E(t - \tau) \frac{dD(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.6)$$

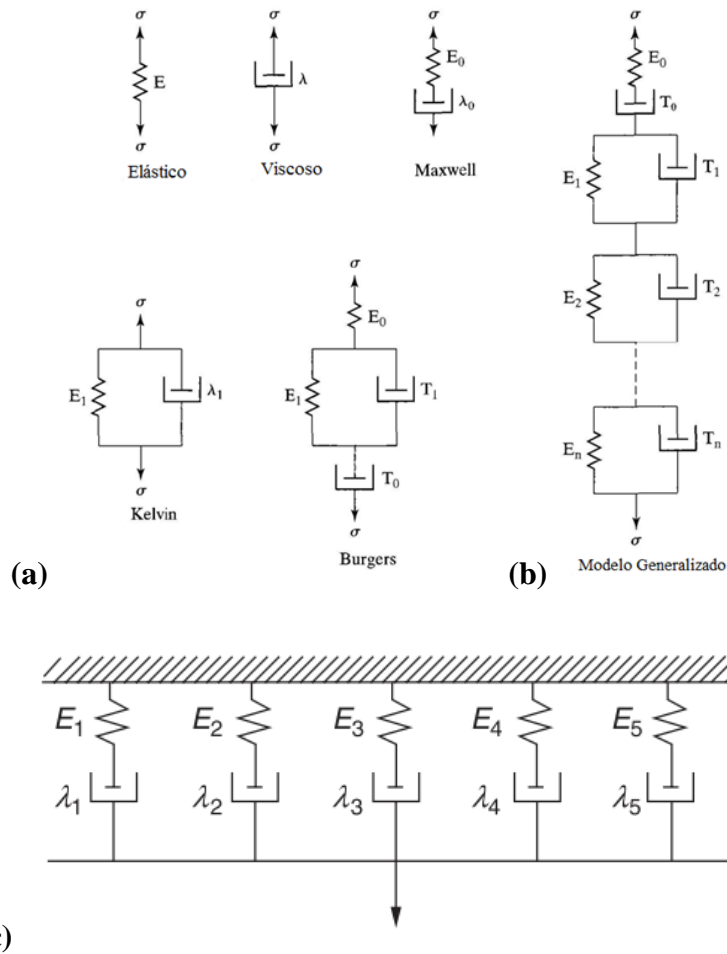
Funções lineares de materiais viscoelásticos contêm, basicamente, as mesmas informações sobre as propriedades de relaxação e de fluência (PARK e KIM, 1999). Devido à facilidade de realização de testes de fluência, ao contrário dos ensaios de relaxação sob deformação constante, é interessante obter o módulo de relaxação através de uma interconversão entre sua função e a função Fluência. Numerosos métodos de interconversão entre as funções foram propostos por Hopkins e Hamming (1957), Leaderman (1958), Denby (1975), Christensen (1982) e Park e Kim (1999), sendo que os últimos autores compararam a eficácia das funções de interconversão apresentadas. Materiais viscoelásticos lineares são perfeitamente representados por modelos matemáticos de leis de potências simples e, nesse caso, o método de interconversão baseado na Lei de Potência leva a uma relação exata (PARK e KIM, 1999).

Park e Kim (1999) analisam métodos de interconversão Quase-Elásticas, baseadas na Lei de Potência, de Christensen (1982) e de Denby, além de apresentarem um novo método aproximado. Dentre os apresentados, seus estudos mostraram que as interconversões baseadas na Lei de Potência apresentam a melhor aproximação dos resultados exatos. O método trata as

funções de Fluência e Relaxação como funções de potência, aproximando a interrelação entre  $E(t)$  e  $D(t)$  quando estas estão representadas graficamente em escalas log-log. Para as regiões da curva nas quais as funções  $E(t)$  e  $D(t)$  são próximas a retas, a interconversão mostra-se extremamente acurada.

### **2.3 MODELOS MECÂNICOS DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS**

Além da caracterização de materiais viscoelásticos utilizando-se uma curva de fluência, há ainda aquela realizada a partir de modelos mecânicos. Tem-se que o comportamento desse tipo de material é dependente do tempo de aplicação do carregamento. Modelos mecânicos viscoelásticos são formados, em geral, por molas e amortecedores. A Figura 2.6(a) apresenta diferentes deles, para caracterização desse tipo de material. Os modelos mais simples combinam apenas uma mola e um amortecedor. O modelo de Maxwell os combina em série, enquanto o modelo de Kelvin os combina em paralelo. O modelo reológico complexo de misturas asfálticas pode ser, então, assemelhado a respostas de combinações de elementos simples para os quais são conhecidas suas respostas (HUANG, 1993).



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

Qualitativamente, um material viscoelástico é muito bem representado por um modelo de Burger, segundo Huang (1993). Entretanto, quantitativamente um único modelo de Kelvin não é suficiente para representar as deformações retardatárias resultantes de um período de tempo maior, o que pode implicar na necessidade de um maior número de modelos de Kelvin. Geralmente é possível caracterizar o material viscoelástico pela função Relaxação  $E(t)$  utilizando um modelo generalizado de Maxwell, constituído por modelos de Maxwell em paralelo, conforme a Figura 2.6(c). A função é obtida pela aproximação de uma série de Prony, ou Dirichlet, que resulta em:

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\left(\frac{t}{\rho_i}\right)} \quad (2.7)$$

sendo  $E(t)$  o módulo de relaxação,  $E_{\infty}$  o módulo de equilíbrio a tempo infinito,  $n$  o número de termos da série de Prony, e  $E_i$  e  $\rho_i$  termos da série de Prony.

Para representar a função Fluência  $D(t)$ , utiliza-se comumente o modelo generalizado de Kelvin-Voigt, representado na Figura 2.6(b), que consiste em uma mola, um amortecedor e  $n$  elementos Voigt conectados em série. A função obtida da aproximação de uma série de Prony é:

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^n D_i \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\rho_i}} \right] \quad (2.8)$$

sendo  $D(t)$  a fluência,  $D_0$  o módulo de fluência inicial (*glassy compliance*),  $n$  o número de termos da série de Prony, e  $D_i$  e  $\rho_i$  termos da série de Prony.

Simulações numéricas de materiais viscoelásticos no programa de Elementos Finitos ABAQUS utilizam como parâmetro de entrada para caracterização do modelo constitutivo viscoelástico parâmetros de coeficiente volumétrico e cisalhante obtidos da série de Prony aproximada a uma função Relaxação  $E(t)$ , normalizados pelo seu maior valor. De posse desses valores, a simulação numérica passa a representar o comportamento da curva utilizada como entrada no modelo.

## 2.4 O ESQUELETO SÓLIDO GRAÚDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Atribui-se ao esqueleto sólido graúdo (ESG) o papel de conferir rigidez às misturas asfálticas, de forma a resistir às deformações. Simplificada a uma matriz elástica linear, com um módulo de rigidez muito maior que àquele da Matriz de Agregados Finos, os agregados graúdos absorvem grande parte da tensão aplicada, e resistem às deformações geradas.

Características físicas do ESG, como forma, angularidade, textura superficial e tamanho influenciam a resistência a deformações permanentes de misturas de concreto asfáltico. Isso ocorre devido à importância que essas características têm sobre as propriedades de fricção e intertravamento entre as partículas de agregado. A interação agregado-agregado e suas propriedades físicas possuem efeitos significativos na rigidez simulada de misturas de concreto asfáltico (BUTTLAR e YOU, 2001).

### 2.4.1 INFLUÊNCIA DA FORMA DAS PARTÍCULAS

A morfologia das partículas de agregado graúdo, junta a outras características como graduação, tamanho, aderência, entre outras, governam o modo como essas partículas interagem com outras e com a Matriz de Agregados Finos. Essas interações definem como a

mistura vai resistir a deformações impostas e, portanto, interferem diretamente nas propriedades mecânicas do material.

Existem diversas maneiras de se caracterizar a forma e as dimensões de materiais particulados. Partículas tridimensionais podem assumir formatos com irregularidades que, na maioria das vezes, são difíceis de serem reproduzidas como modelos tridimensionais. Uma maneira de se caracterizar a forma deste tipo de material é através das razões de aspecto, valores adimensionais que têm o objetivo de relacionar as dimensões características de uma partícula (AL-ROUSAN *et al.*, 2006; RE CAREY *et al.*, 2017). Três coeficientes muito utilizados se referem ao alongamento, planicidade e angularidade. Para a aplicação específica na análise de forma de agregados, estes valores representam, respectivamente, o quão alongado, plano e irregular é o formato do agregado (FARIAS *et al.*, 2017). Na análise de um meio particulado, estes três valores devem ser calculados para cada partícula e tratados estatisticamente a fim de se definir um valor que represente o conjunto total de partículas.

Arasan *et al.* (2011) e Morfa *et al.* (2017) apresentam uma metodologia de caracterização da forma das partículas em três dimensões. A descrição de agregados trata-se de tarefa bastante complexa, em geral realizada utilizando-se de parâmetros genéricos, chamados de dimensões equivalentes. As dimensões das partículas (comprimento, largura e espessura) são utilizadas para a caracterização da forma das partículas utilizando parâmetros como o fator de forma, esfericidade, alongamento, planicidade, entre outros.

O estudo da influência da forma das partículas, classificando-as segundo as definições anteriores, foi feito por diversos autores, de distintas maneiras e considerando diferentes parâmetros de resistência mecânica das misturas. Aho *et al.* (2001) estudaram o efeito de agregados graúdos alongados-lamelares na compactação em campo de misturas asfálticas. Os autores concluíram que agregados com alta porcentagem de alongados-lamelares são altamente degradados durante o transporte, sendo que esses atingem uma quantidade estável de alongados-lamelares no momento em que chegam à pavimentadora. Essa degradação é influenciada pela abrasão característica do material. Além disso, concluíram que ocorre um maior desgaste dos agregados com o uso de compactadores giratórios do que no campo sob condições normais.

Rocco e Elices (2009) estudaram o efeito da forma dos agregados nas propriedades mecânicas de um concreto simples, que pode ser análogo ao comportamento de concretos asfálticos. Observaram que maiores energias de fratura e módulos de elasticidade são obtidos

utilizando agregados mais angulares, e que na resistência à tração a forma dos mesmos não tem grande influência.

Arasan *et al.* (2011) pesquisaram a correlação entre a forma dos agregados e as propriedades mecânicas de concretos asfálticos. Na busca pela quantificação das propriedades morfológicas dos agregados, foi utilizado o processamento digital de imagem (*Digital Image Processing*, em inglês), que se mostrou uma ferramenta muito útil. Foram encontradas grandes correlações entre algumas das relações de forma estudadas e as propriedades mecânicas dos concretos asfálticos. Agregados graúdos mais esféricos são desejáveis por conferirem maior estabilidade às misturas. Agregados mais alongados-lamelares resultam em misturas menos estáveis, porém mais resistentes a deformações permanentes.

Bessa *et al.* (2015) também estudaram a influência de propriedades de forma de agregados no comportamento de misturas de CBUQ. A partir de concretos asfálticos com agregados de diferentes texturas superficiais e mineralogias, mas classificações de forma muito semelhantes, os autores concluíram que os diferentes materiais apresentaram comportamento mecânico muito semelhantes para fluência dinâmica, módulo resiliente e tração indireta. Foi possível inferir que devido às composições de agregados serem muito semelhantes quanto à forma, a mineralogia e textura superficiais não tiveram grande influência no comportamento mecânico das misturas.

Hu *et al.* (2015) pesquisaram a influência de partículas de agregados no mástique e nos vazios de concretos asfálticos. Foi utilizado o *software* Matlab para processar imagens de tomografia de raios-X de CPs de concreto asfáltico e, posteriormente, criar modelos de elementos triangulares para os agregados. As misturas foram, então, ensaiadas em Elementos Finitos com o programa Abaqus para simular ensaios de fluência e recuperação. Os autores concluíram que ocorre concentração de tensão nas regiões mais angulares dos agregados, e que as deformações no mástique asfáltico são extremamente afetadas pelos agregados graúdos.

Pazos *et al.* (2015) também avaliaram a influência de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas, utilizando agregados do tipo seixo rolado e pedra britada. As caracterizações morfológicas foram feitas utilizando um sistema de análise por imagem (*AIMS 2*). Observaram que o sistema utilizado pôde gerar medidas diretas e mais confiáveis que sistemas de medida tradicionais, mais subjetivos. Os autores concluíram que há forte correlação entre propriedades de textura de agregados e a resistência das misturas aos danos por acúmulo de deformações permanentes e fratura. Além

disso, sugeriram que, considerando níveis de tráfego de até 10 milhões de Cargas Equivalentes de Eixo Padrão, é possível utilizar misturas contendo seixo rolado, e que a adição de seixos rolados a misturas de agregados britados pode resultar em misturas similares ou superiores às aquelas contendo somente agregados britados.

Os estudos de Castillo *et al.* (2017) avaliaram o papel do Índice de Angularidade (IA) e do Índice de Forma (IF) na resposta mecânica e degradação de misturas asfálticas, utilizando análises computacionais. Foi utilizado um algoritmo de geração de microestruturas de CBUQ randômicas, controlando os valores de IA e de IF. As misturas foram submetidas a ensaios de tração, com foco na área danificada dos CPs e na resposta macromecânica das microestruturas. Composições de agregados com maiores IF apresentaram, em geral, menores áreas danificadas. Além disso, valores maiores de IA dos agregados levaram a maiores áreas danificadas. Valores maiores de IA e de IF aumentam a dispersão dos módulos nas misturas, aumentando as incertezas da degradação mecânica de misturas de CBUQ. Os autores destacaram que o IA e o IF não só influenciam a resposta macromecânica e os processos de dano interno em misturas de concreto asfáltico, mas também a incerteza relativa a suas quantificações.

Zhou *et al.* (2017) também estudaram a influência da forma de partículas de agregados na performance das misturas utilizando simulações com Elementos Discretos, utilizando agregados com forma de elipsoides unindo esferas e simulando o desempenho triaxial de esqueletos de CBUQ. Os autores concluíram que partículas mais cúbicas e parte das alongadas, próximas às cúbicas, são desejáveis para uma maior resistência das misturas de concreto asfáltico.

#### **2.4.2 INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS PARTÍCULAS**

A composição de concretos asfálticos, no Brasil, deve satisfazer aos requisitos do quadro apresentado na Tabela 2.1, com as respectivas tolerâncias no que diz respeito à granulometria (DNER-ME 083/98). A faixa usada deve ser aquela cujo diâmetro máximo é inferior a 2/3 da espessura da camada. Os tamanhos dos agregados variam dependendo dos diferentes propósitos das misturas asfálticas. Para camadas de rolamento, são indicadas as Faixas B e C, sendo a Faixa C mais corriqueiramente utilizada no país.



**Tabela 2.1.** Faixas granulométricas de agregados para misturas asfálticas.  
(DNIT 031/2006 – ES)

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Benson (1967) estudou as referências bibliográficas sobre entre outros efeitos, aquele relativo ao tamanho dos agregados sobre as propriedades das misturas betuminosas. Em suma, o autor conclui que o tamanho máximo de agregados (TMN) é importante no tocante à resistência ao deslizamento do pavimento, à porcentagem de asfalto necessária à mistura, e à trabalhabilidade e economia do concreto asfáltico. Além disso, a graduação dos agregados influencia a resistência e rigidez da mistura e sua permeabilidade.

Brown e Bassett (1989) também exploraram os efeitos do tamanho máximo nominal de agregados nas propriedades de misturas asfálticas. Tem-se que as tendências dos dados estudados mostram que o aumento do tamanho do TMN aumenta a qualidade da mistura no que diz respeito ao desempenho de fluência, módulo resiliente e resistência à tração, mas sem grandes efeitos sob a estabilidade Marshall. Ensaio de fluência estática mostraram maior rigidez e menores deformações permanentes para amostras compostas por agregados com TMN maiores. Ainda, os autores mostram que o aumento do TMN leva a reduções de custos de misturas devido à economia de conteúdos de cimentos asfálticos.

Liu *et al.* (2017) estudaram os efeitos do tamanho máximo nominal de agregados no desempenho de misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. As análises foram feitas por estudos laboratoriais de trilha de roda, permeabilidade e flexão de vigas. Os autores mostraram que menores TMN conduzem a maiores vazios no agregado mineral (VAM) e vazios preenchidos com asfalto. Maiores TMN aumentaram a resistência a deformações permanentes e diminuíram a resistência a fraturas a baixas e médias temperaturas. Menores TMN diminuíram a taxa de permeabilidade de misturas de SMA e aumentaram a resistência a desintegração. Foi sugerido, ainda, que misturas com menores agregados graúdos devem ser usados para camadas mais impermeáveis, enquanto misturas com maiores agregados devem ser usadas como revestimento de pavimentos asfálticos que necessitem de maior resistência às deformações permanentes sob altas temperaturas.

Barroso (2018) avaliou a dosagem e o desempenho de concretos asfálticos comumente utilizados na execução de pavimentos no estado de Goiás, considerando as características da região. No que tange às características de granulometria dos agregados, a autora observou que grandes problemas relativos à capacidade de recobrimento do mástique, tamanhos de agregados, e má compactação foram encontrados em misturas que atendem a Faixa C do DNIT. Misturas com agregados compondo a Faixa B, entretanto, apresentaram melhor comportamento. Ambas as faixas levaram a misturas não indicadas para rodovias com tráfego intenso. Isso porque todas elas apresentaram grandes limitações quanto às deformações permanentes.

## **2.5 MODELAGEM NUMÉRICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

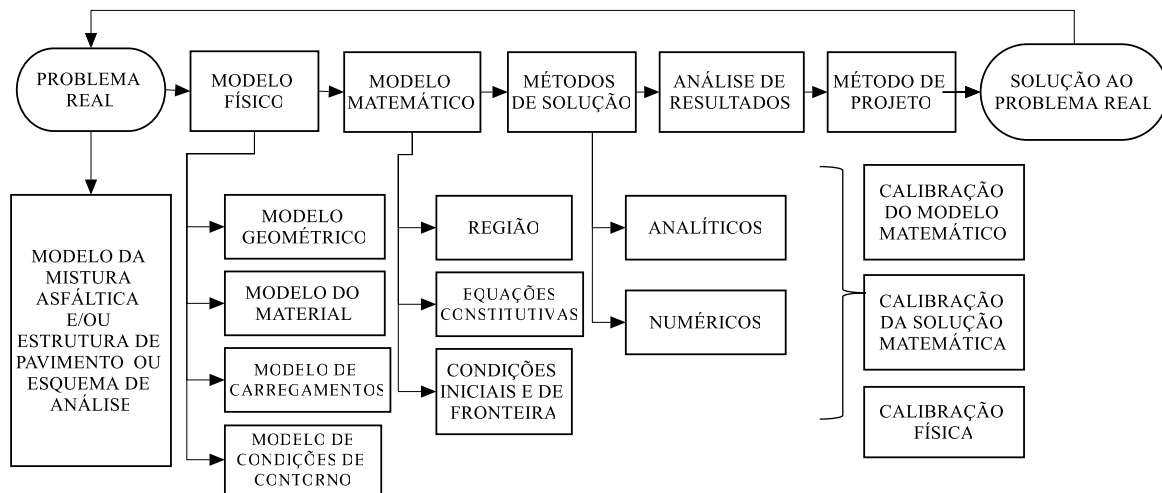
Alguns autores desenvolveram, com o advento de métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos e/ou o Método dos Elementos Discretos, modelos computacionais que simulam misturas asfálticas. Trata-se de modelagem complexa, visto que o concreto asfáltico é um material heterogêneo, com matriz viscoelástica onde são incrustadas partículas de forma, disposição e tamanhos aleatórios. Há, então, dois problemas principais a serem contornados para a criação de um modelo virtual de uma amostra de concreto asfáltico: a definição do modelo constitutivo da matriz viscoelástica e a geração de um pacote de partículas representando os agregados.

A modelagem numérica de misturas asfálticas depende, além da disponibilidade de tecnologias avançadas, do objetivo da simulação. O estudo do comportamento viscoelástico do

material vem sendo feito por diversos autores de forma a simular o módulo dinâmico (YOU *et al.*, 2009; ARAGÃO *et al.*, 2011; DAI, 2011). Outros estudos buscaram a simulação numérica de ensaios laboratoriais que caracterizem os danos comuns em misturas de concreto asfáltico. Dai e You (2007) e Xu *et al.* (2010) criaram modelos numéricos para simulação de ensaios de fluência estática, prevendo propriedades de rigidez e de resistência a deformações permanentes de concretos asfálticos. Outros autores objetivaram o estudo do fraturamento em corpos de prova de misturas asfálticas submetidos a ensaios deste tipo (KIM *et al.*, 2010; ARAGÃO e KIM, 2014; ARAGÃO *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2014). Recentemente, García (2017) implementou um modelo contínuo no programa ABAQUS no qual simula o comportamento de misturas asfálticas sob um ensaio de fluência à carga constante, adicionando esferas de aço à mistura em substituição aos agregados graúdos para estudar a influência da fase Matriz de Agregados Finos no compósito. Os resultados mostraram boa convergência da modelagem em elementos contínuos para um modelo no qual a forma e o direcionamento dos agregados não são considerados, bem como a interação entre os materiais do mástique e dos agregados graúdos. Cada autor desenvolveu sua metodologia de criação da microestrutura do concreto asfáltico, utilizando de ferramentas de Elementos Finitos e/ou Elementos Discretos.

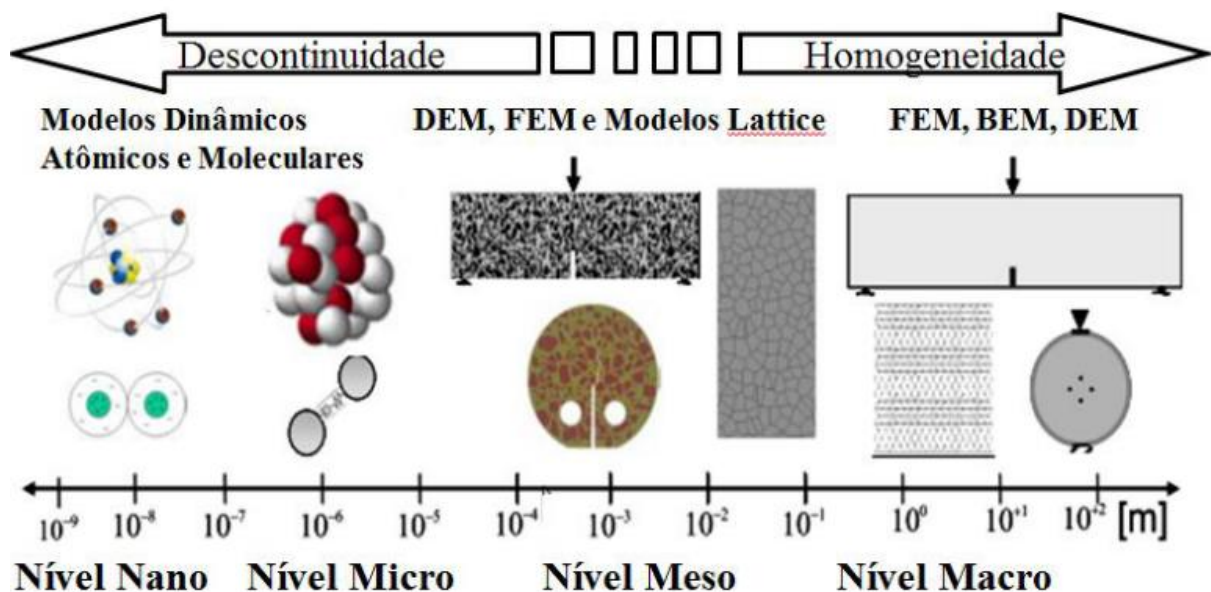
### **2.5.1 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Há duas abordagens mecânicas possíveis para a modelagem de alterações no comportamento tensão-deformação de misturas de concreto asfáltico: a micromecânica e a contínua (KIM, 2009). O Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui-se no processo de aproximação do comportamento de um meio contínuo através de “elementos finitos” que se comportam de maneira aproximada ao meio real, dito “discreto”. A modelagem de problemas de engenharia segue uma sequência lógica, que relaciona o problema real, o modelo físico, o modelo matemático, os métodos de solução, de planejamento, a análise dos resultados e por fim, a solução do problema. A sequência convencional está apresentada na Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Quadro metodológico do processo de modelagem de problema físico. (modificado – RE CAREY, 1999).

A análise da eficácia dessa aproximação é dada pelas faixas de aplicabilidade do modelo numérico, que são diretamente relacionadas com a escala de observação (GARCÍA, 2017). A Figura 2.8 exemplifica a aplicabilidade dos diferentes métodos de modelagem numérica de acordo com a escala de modelagem necessária para o que se pretende simular. Observa-se que modelos contínuos têm dificuldades para simular ensaios de natureza discreta, nos quais ocorre abertura de trincas, por exemplo. É possível fazê-lo utilizando o MEF, entretanto o modelo deve ser enriquecido com ferramentas que acrescentem descontinuidades à formulação.



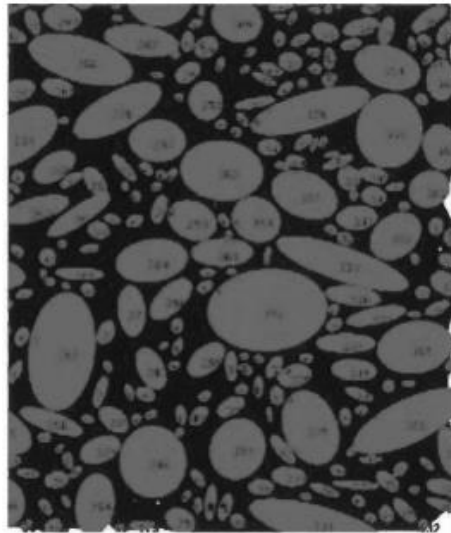
**Figura 2.8.** Relação entre diferentes escalas e técnicas de modelagem numérica. (modificado – KIM, 2007 *apud* GARCÍA, 2017).

Na abordagem contínua, ou mecânica do dano contínuo, o corpo danificado é representado como um contínuo homogêneo em escala muito maior que o tamanho das fissuras. O estado do dano é quantificado por variáveis de estado internas no contexto de processos irreversíveis de termodinâmica, ou seja, a progressão do dano é governada por uma lei apropriada de evolução do dano (KIM, 2009). Os parâmetros de dano possuem um embasamento matemático com respaldo físico em função da variação da curva de tensão–deformação do material, mas não existem estudos que relacionem os fenômenos que ocorrem fisicamente na escala micro com a variação com o desempenho dos materiais na escala macro (GARCÍA, 2017).

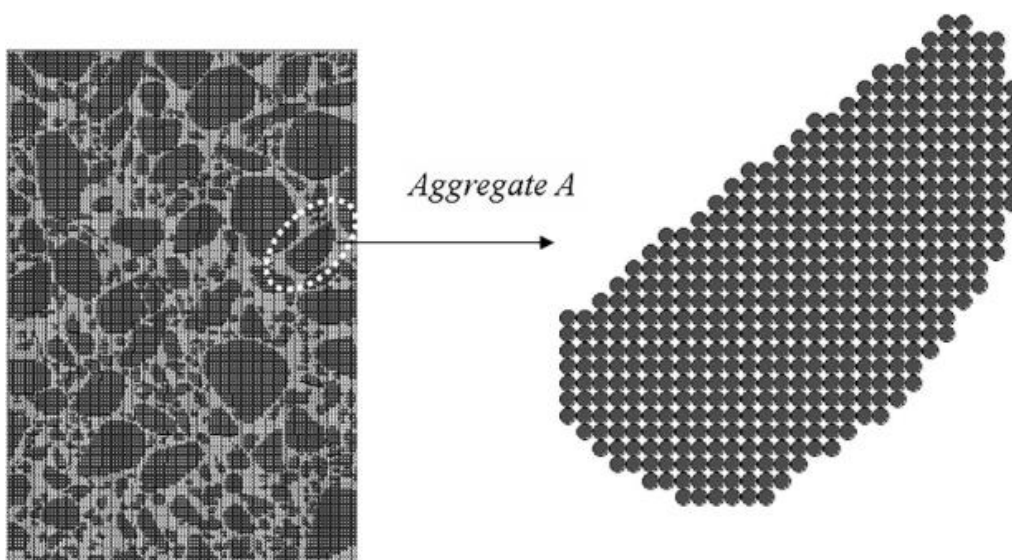
### **2.5.2 GERAÇÃO DE MODELOS MICROESTRUTURAIS 3D DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

A modelagem numérica de um corpo de prova de uma mistura asfáltica constitui um processo complexo devido à identificação real de sua microestrutura interna. Nos últimos anos, a utilização de tomografias computadorizadas de raios X tornou-se uma tecnologia viável na geração de imagens tridimensionais reais da microestrutura de misturas asfálticas. Um modelo 3D pode apresentar a posição real e as formas das diferentes fases do concreto asfáltico.

Dai e You (2007) criaram modelos virtuais de misturas asfálticas com microestruturas geradas a partir de imagens bidimensionais escaneadas de seções de corpos de prova. Os autores utilizaram de ferramentas de Elementos Finitos (MEF) e também de Elementos Discretos (MED). Para a modelagem contínua, os agregados foram aproximados a elipses dispostas e dimensionadas conforme a imagem escaneada da face. Na modelagem discreta, os agregados foram construídos unindo círculos de forma a preencherem os espaços correspondentes a cada material. A Figura 2.9 e Figura 2.10 exemplificam a microestrutura em duas dimensões geradas para a modelagem com o MEF e com o MED, respectivamente. Concluíram que ambas representaram bem o comportamento experimental do concreto asfáltico sob ensaio de fluência estática.



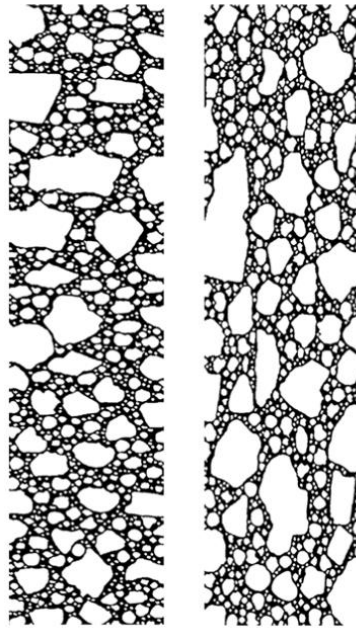
**Figura 2.9.** Exemplos de microestruturas 2D utilizados para modelagem via MEF. (DAI e YOU, 2007).



**Figura 2.10.** Exemplos de microestruturas 2D utilizados para modelagem via MED. (DAI e YOU, 2007).

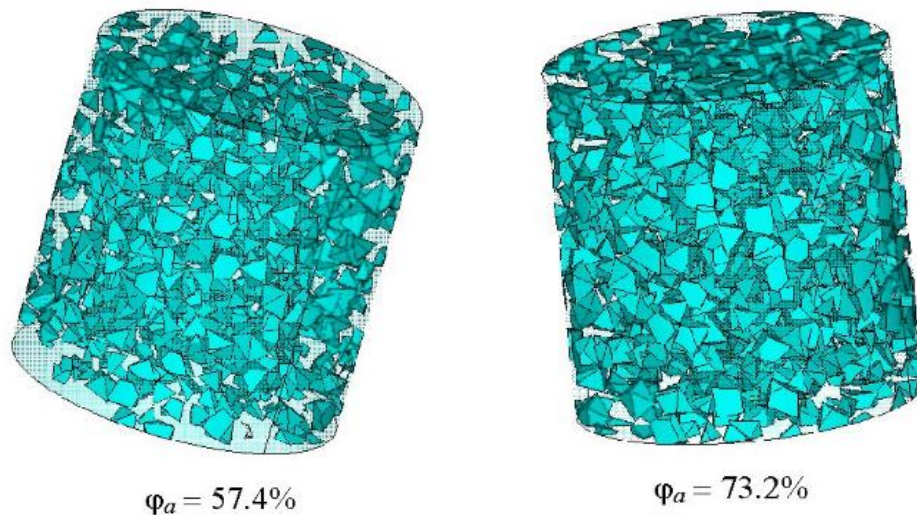
Aragão *et al.* (2015a, 2015b) apresentam uma metodologia de análise microestrutural para quantificar características volumétricas fundamentais de amostras virtuais de misturas asfálticas, como granulometria, fração de área e orientação das partículas agregadas. Neste método, um banco de dados é construído a partir de imagens de agregados no equipamento *Aggregate Image Measurement System 2 (AIMS 2)* e usado para a fabricação de amostras virtuais a partir de informações fornecidas pelo usuário sobre características de dosagem das misturas, que incluem as massas específicas e teores de agregados e ligante, o volume de vazios e a granulometria dos agregados. São criadas, então, amostras virtuais 2D de misturas asfálticas

que podem ser simuladas numericamente. A Figura 2.11 apresenta amostras de misturas de misturas asfálticas fabricadas com diferentes orientações de partículas.



**Figura 2.11.** Amostras virtuais de misturas asfálticas fabricadas com diferentes orientações de partículas. (ARAGÃO *et al.*, 2015a).

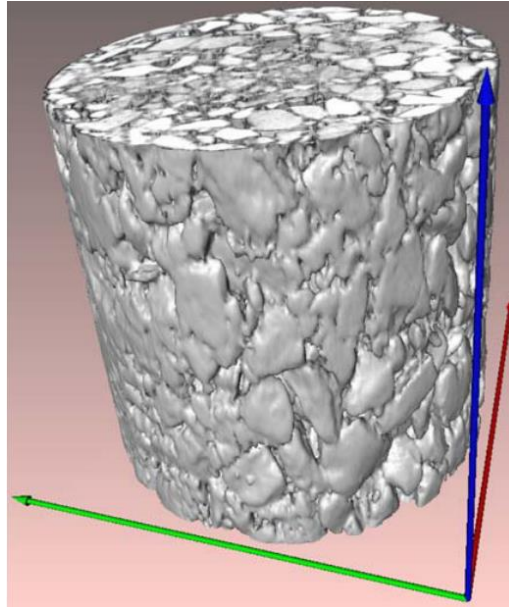
Xu *et al.* (2010) propuseram um novo algoritmo de geração de microestruturas de concreto asfáltico com alto teor de agregados. O algoritmo gera poliedros de formas arbitrárias que constituem os agregados no interior da mistura asfáltica em dois passos: geração de agregados e empacotamento. Após gerados os agregados com poliedros construídos a partir de triângulos, esses são alocados e empacotados de forma a posicioná-los randomicamente e sem haver sobreposições de partículas. A Figura 2.12 exemplifica corpos de prova gerados a partir da técnica descrita com diferentes teores de agregados na mistura.



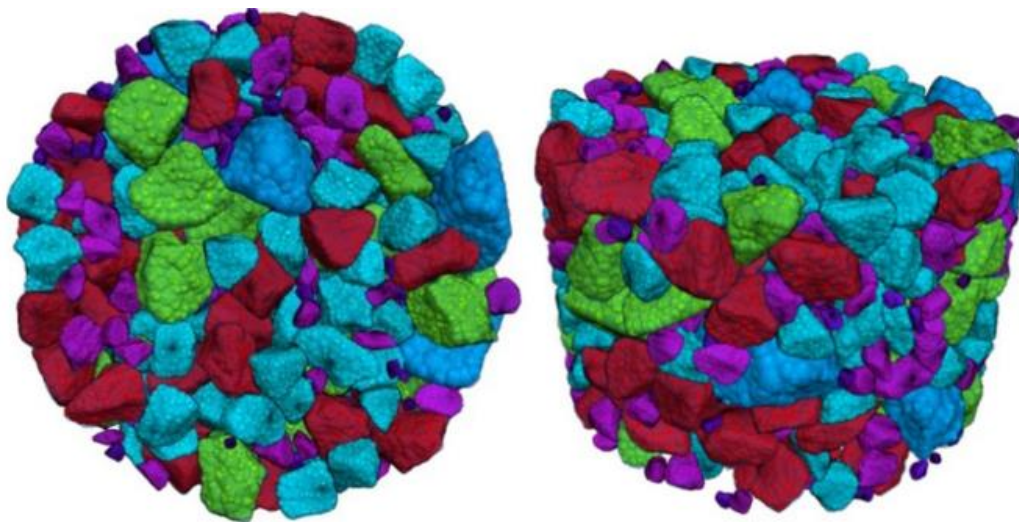
**Figura 2.12.** Dois modelos de misturas asfálticas com diferentes quantidades de agregados. (XU *et al.*, 2010).

Numerosos autores utilizaram tomografias computadorizadas de raios-X para obterem uma representação microestrutural de corpos de prova de misturas asfálticas em três dimensões (YOU *et al.*, 2009; DAI, 2011; WANG *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2017b). Trata-se de uma técnica não-destrutiva de aquisição da representação dos materiais no interior do CP por meio da união de vários cortes bidimensionais ao longo do comprimento do mesmo. De posse dos dados obtidos pela tomografia de raios-X, os autores desenvolveram e/ou utilizaram algoritmos capazes de processá-los e interpretá-los, construindo o modelo 3D. A representação real e precisa é alcançada e deve ser modelada para o programa de elementos finitos utilizando algoritmos específicos. A Figura 2.13 exemplifica um corpo de prova visualizado através da técnica de aquisição de imagens por tomografia de raios-X. Já a Figura 2.14 mostra um corpo de prova digital construído a partir de dados processados para simulações via MED.





**Figura 2.13.** Visualização tridimensional de imagens de tomografia computadorizada de raios-X. (YOU *et al.*, 2009).



**Figura 2.14.** Estado final da fase agregados em corpos de prova digitais de misturas asfálticas. (LIU *et al.*, 2017b).

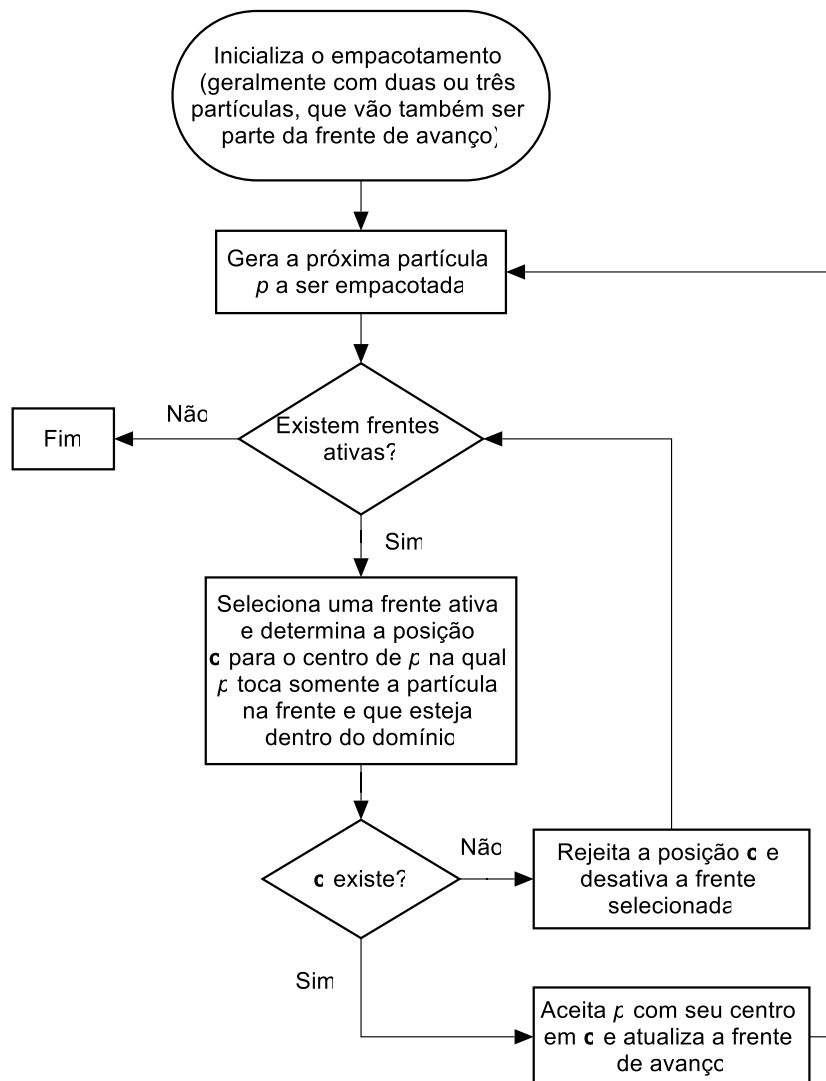
### 2.5.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O empacotamento de partículas é um processo bastante difundido na modelagem numérica via Método dos Elementos Discretos (MED). Trata-se de uma técnica de geração de uma configuração inicial de partículas realista, na qual o volume que delimita as partículas deve ser preenchido o máximo possível. Em geral, um pacote de partículas deve considerar as seguintes características: densidade, conectividade, homogeneidade e isotropia. Entretanto, ao se estender a técnica para outros tipos de uso, como por exemplo o de geração de um pacote de

partículas que represente os agregados graúdos no interior de um corpo de prova de mistura asfáltica, essas características não se aplicam estritamente. Busca-se, nesse caso, um pacote de partículas que considere a granulometria e a forma das partículas, além da fração de volume de ocupação pelas mesmas. Esse pacote pode ser criado de forma realista, utilizando de imagens reais de tomografia computadorizada de raios-X, e/ou randômica, de forma a posicionar as partículas de forma aleatória, rotacionando-as também de forma aleatória para que não estejam alinhadas.

Bagi (2005) divide os algoritmos de empacotamento em basicamente dois tipos: algoritmos dinâmicos e construtivos. Os primeiros são baseados em simulações de Elementos Discretos. São bastante custosos computacionalmente, devido à necessidade do movimento de cada partícula ser calculado para a geração do pacote inicial. Um exemplo seria o empacotamento gerado por deposição gravitacional de partículas. Já os métodos construtivos são baseados em cálculos geométricos e, portanto, são abordagens mais eficientes. Estes últimos podem ainda ser divididos em métodos de frente de avanço, nos quais partículas são geradas sequencialmente em suas posições finais, em contato com duas ou três outras partículas, e em métodos de inibição sequencial.

Segundo Valera *et al.* (2015), nos métodos de frente de avanço, as partículas são geradas nas suas posições finais em contato com uma partícula da frente de avanço e com outra(s) partícula(s) adicionais, não necessariamente na frente de avanço. O método cria partículas ao redor umas das outras, determinando todas as possíveis posições onde novas partículas podem ser localizadas. Cada algoritmo define o tipo de frente de avanço, de acordo com formulações matemáticas específicas. A Figura 2.15 exemplifica os passos comuns aos algoritmos de frente de avanço.



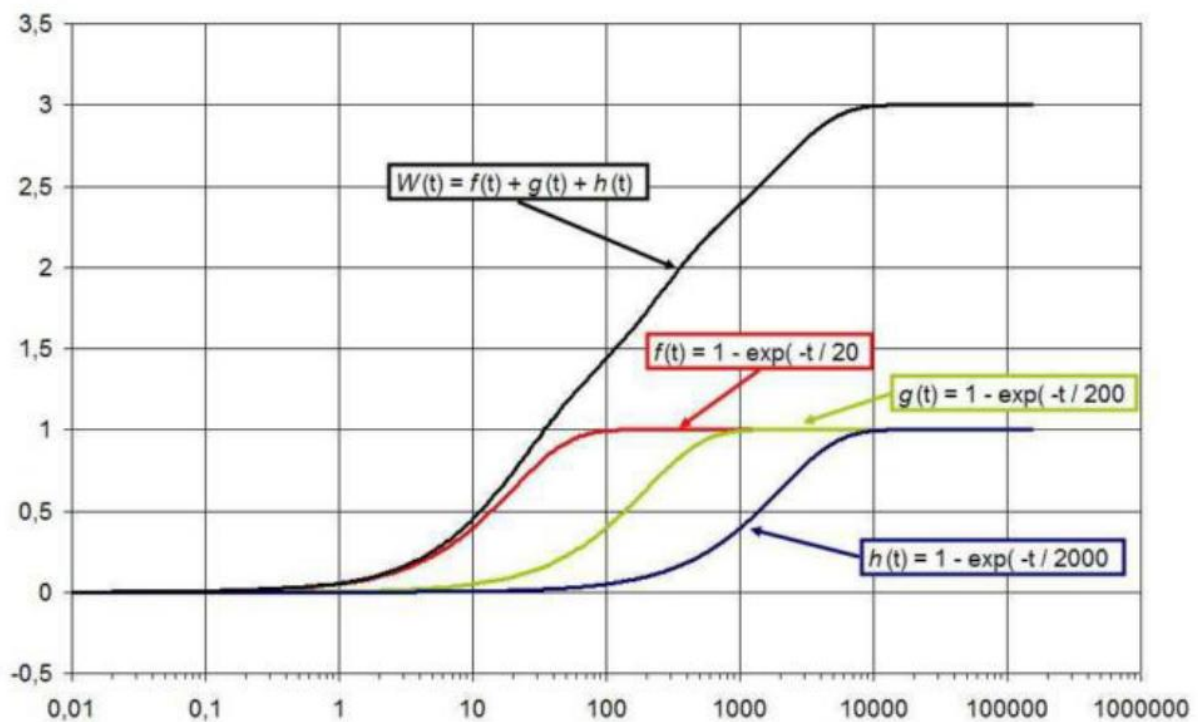
**Figura 2.15.** Passos gerais que são comuns a todos os algoritmos de empacotamento de frente de avanço. (VALERA *et al.*, 2015).

Pérez Morales *et al.* (2011) e Valera *et al.* (2015) desenvolveram um algoritmo do tipo frente de avanço de empacotamento de partículas inicialmente esféricas, mas posteriormente enriquecido, incluindo outras formas tridimensionais, como paralelogramos e tetraedros. O algoritmo considera uma distribuição granulométrica de partículas predefinida e uma porosidade a ser alcançada. Ao empacotar poliedros, o algoritmo desliza um poliedro móvel ao redor de um fixo, obtendo um invólucro poliedro ainda mais complexo, cuja forma é determinada pela forma do fixo e do móvel. O centroide  $c$  do poliedro móvel descreve um polígono que é a face do poliedro invólucro. Antes de cada passo, é necessário verificar se é possível fazê-lo sem que haja sobreposição dos poliedros. Dessa forma, os poliedros são alocados de forma randômica e sem que haja sobreposições. O algoritmo pode ser utilizado para gerar pacotes de paralelogramos num domínio definido, seguindo uma distribuição

granulométrica e uma fração de volume predefinidos, possibilitando seu uso para geração de microestruturas da fase agregados incrustados em um meio de matriz de agregados finos.

#### 2.5.4 AJUSTE DE DADOS EXPERIMENTAIS COM SÉRIES DE PRONY

Similar à transformada de Fourier, a série de Prony extrai informações de um sinal uniformemente amostrado e constrói uma série de exponenciais complexas ou sinusoidais. Assim, é possível extrair componentes como frequência, amplitude, fase e amortecimento de sinais. Desenvolvido por Schapery (1961), segundo Huang (1993), o Método da Colocação constitui-se no mais comum dentre os usados para ajustar séries de Prony. Neste método, para valores de tempos de relaxação ou retardação ( $\tau_i$  ou  $\rho_i$ ) são calculados valores de  $D_i$  e  $E_i$  resolvendo um sistema específico de equações. A quantidade de equações do sistema deve ser igual ao número de elementos da série de Prony. O tamanho da série de Prony, segundo Sousa e Soares (2007), é determinado pela escala da variável tempo  $t$ , devido à influência de somente duas décadas logarítmicas para cada termo da série como demonstrado pela Figura 2.16. A determinação da quantidade de termos da série é feita calculando-se a margem de variação de  $t$ , da qual subtrai-se entre as potências de dez do maior e do menor tempo em notação científica e acrescenta-se 1 (um) ao resultado.



**Figura 2.16.** Efeito isolado dos coeficientes da série de Prony. (SOUSA e SOARES, 2007).

Os tempos  $\tau_i$  ou  $\rho_i$  podem, segundo Schapery (1982), *apud* Sousa e Soares (2007), ser separados por uma década logarítmica, entretanto curvas experimentais com muito ruído podem acarretar em instabilidades numéricas, gerando termos dependentes negativos. Para evitar tal problema, sugere-se que seja feita uma pré-suavização dos dados experimentais antes do ajuste da série de Prony. Park e Kim (2001) sugerem a pré-suavização com uma série de lei de potência modificada.

O ajuste dos valores experimentais por série de Prony pode ser realizado utilizando-se do Método da Colocação por Mínimos Quadrados Linear (MQL), no qual utiliza-se uma regressão que permite estimar o nível de significância dos parâmetros estimados (GARCÍA, 2017).

# CAPÍTULO III

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

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

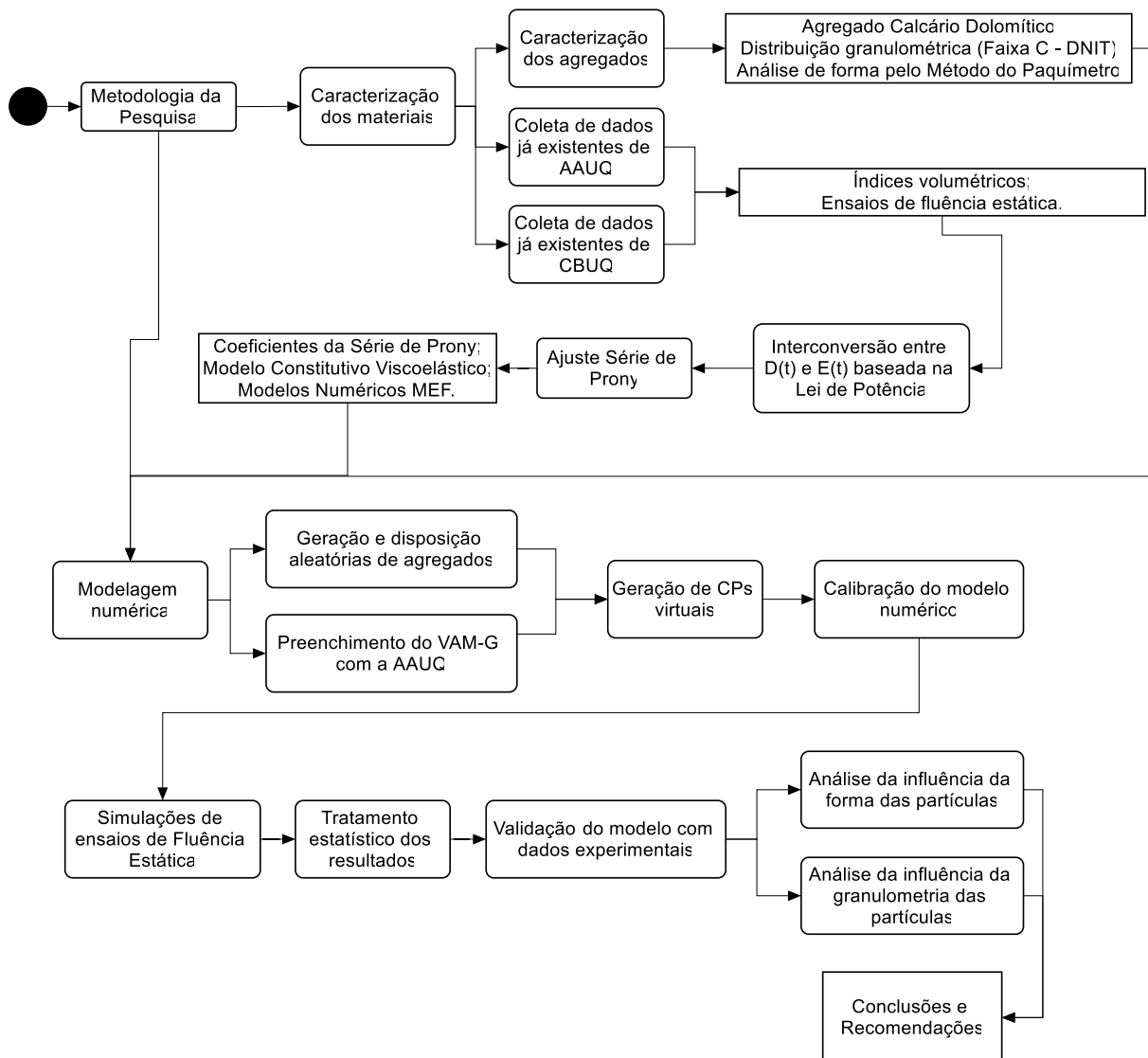


Figura 3.1. Fluxograma da Metodologia da Pesquisa.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais estudados para a construção do modelo numérico de misturas asfálticas são descritos a seguir, quais sejam os agregados graúdos, e as misturas de argamassa asfáltica do tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) e de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Salienta-se que os dados experimentais brutos coletados tanto da AAUQ quanto do CBUQ foram retirados do trabalho de Rodrigues (2018), também realizados no INFRALAB/UnB com o mesmo material pétreo analisado nesta pesquisa.

#### 3.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

O agregado utilizado para a confecção da mistura consiste em um calcário dolomítico comumente encontrado na região do Distrito Federal para preparação de misturas asfálticas. O material foi caracterizado a fim de prover dados necessários para sua inclusão na simulação numérica de um concreto asfáltico. Para isso, objetivou-se construir uma composição granulométrica que atenda à Faixa C, normatizada pelo DNIT 031/2006, e cujos centro e limites inferior e superior são mostrados pela Figura 3.2. Para o presente trabalho, somente a parte graúda da distribuição granulométrica, retida na peneira de 4,8 mm, será implementada como uma fase constituinte da mistura asfáltica.

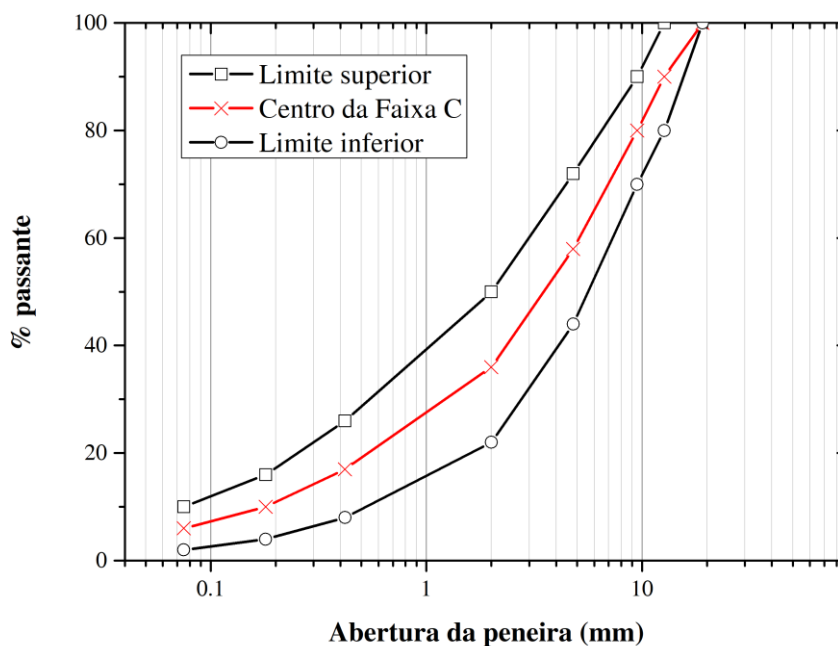


Figura 3.2. Composição granulométrica da Faixa C.

Com o objetivo de avaliar a forma do agregado graúdo, a ABNT NBR 7809 (1983) define o índice de forma como uma média da relação entre comprimento e espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que compõe a mistura (Faixa C). Atendendo às recomendações da norma anterior, foram feitas as medidas de comprimento, largura e espessura de 200 grãos de agregado graúdo, em quantidades proporcionais às frações granulométricas encontradas no peneiramento da amostra.

Ao final do processo de medição, são obtidos, utilizando um paquímetro, como ilustrado pela Figura 3.3, o comprimento (*a*), a largura (*b*) e a espessura (*c*) dos agregados, conforme a norma ABNT NBR 6954 MB 894 (1989).



**Figura 3.3.** Análise de forma com paquímetro.

Esse método trata a avaliação da forma de maneira mais aprofundada que somente pela análise do Índice de Forma. Para a classificação da forma, segundo essa norma, são determinadas e relacionadas entre si as razões  $b/a$  e  $c/b$ . A Tabela 3.1 resume a classificação das partículas.

**Tabela 3.1.** Classificação da forma das partículas (ABNT NBR 6954 MB 894/1989 – modificado pelo autor).

Média das relações $b/a$ e $c/b$	Classificação
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongada
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar



### **3.1.2 COLETA DE DADOS DA AAUQ E DO CBUQ**

As misturas asfálticas utilizadas nesse trabalho são compostas por duas fases: esqueleto sólido graúdo (ESG) e Matriz de Agregados Finos (MAF). Os ensaios de fluência estática e recuperação na matriz de agregados finos foram realizados por Rodrigues (2018) e serão utilizados neste trabalho para a modelagem da fase MAF, integrante do modelo completo. Na composição da mesma foi utilizado um ligante asfáltico CAP 50/70 e, no modelo numérico, as especificações e características volumétricas do material adotado no referido trabalho foram seguidas, além do mesmo processo de realização do ensaio.

Utilizando-se de uma interconversão baseada na Lei de Potência, obtém-se também a função Relaxação  $E(t)$ . De posse dessa função, é possível caracterizar a fase no modelo numérico a partir dos parâmetros retirados da mesma e apresentados na seção de modelagem numérica do capítulo.

Também do trabalho de Rodrigues (2018) foram retirados resultados de parâmetros volumétricos do CBUQ e do ensaio de fluência estática do mesmo. Os parâmetros volumétricos permitem estimar a ocupação volumétrica dos agregados graúdos no modelo, e a curva de deslocamento x tempo obtida no experimento permite validar o modelo numérico desenvolvido no presente trabalho, ao comparar os resultados.

### **3.2 ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA E RECUPERAÇÃO (*CREEP AND RECOVERY*)**

O ensaio de compressão uniaxial é realizado sob uma temperatura de aproximadamente 25 °C, com aplicação de carga estática uniformemente distribuída de 100 kPa durante 3600 s, com posterior descarregamento por 900 s para análise do retorno elástico do material. Os deslocamentos verticais do topo do corpo de prova são registrados ao longo do tempo do ensaio, permitindo o cálculo das deformações verticais. Ao final do ensaio de fluência estática, é obtida a evolução das deformações uniaxiais do corpo de prova, em função do tempo de aplicação da carga. Pode-se, então, encontrar os valores de módulos de compressibilidade à fluência (*creep compliance*)  $D(t)$  dividindo-se as deformações uniaxiais pela tensão constante aplicada.

O ensaio permite medir os deslocamentos uniaxiais do corpo de prova ao longo do tempo de aplicação da carga estática. A partir dos valores de deslocamento, é possível obter as deformações do corpo de prova pela seguinte função:

$$\varepsilon(t) = \frac{\delta(t)}{h_{CP}} \quad (3.1)$$

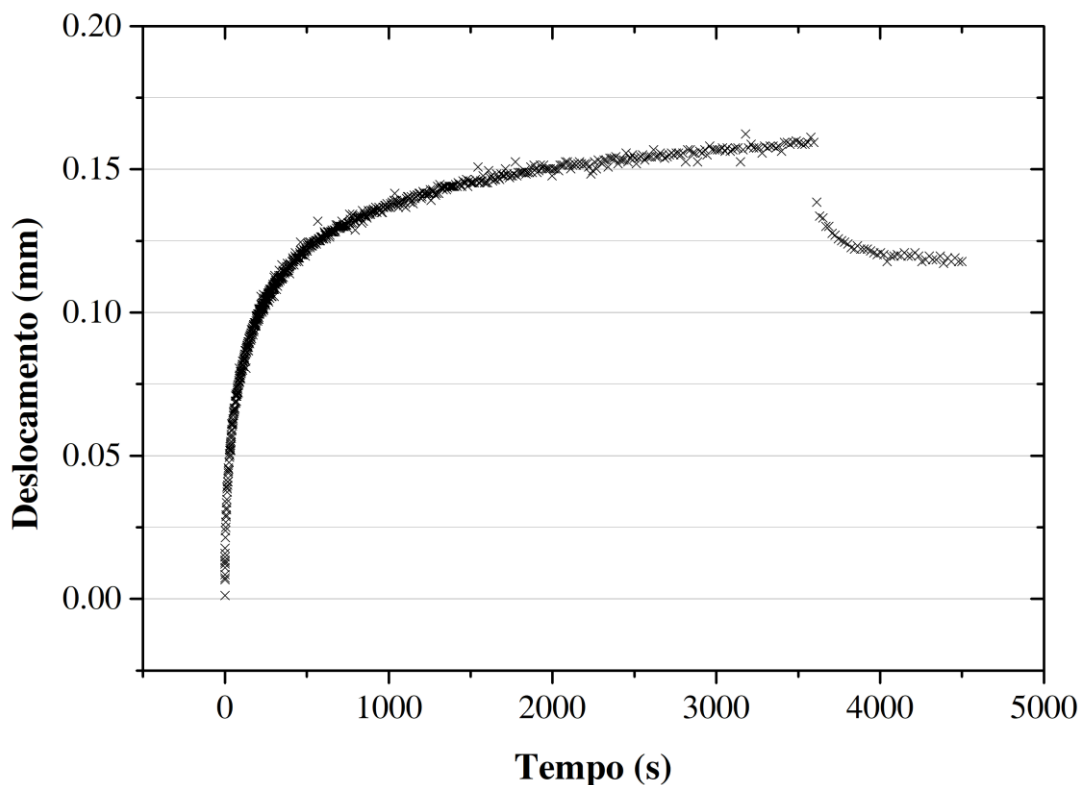
sendo:  $\varepsilon(t)$  as deformações ao longo do tempo,  $\delta(t)$  os deslocamentos ao longo do tempo, e  $h_{CP}$  a altura inicial do corpo de prova.

A partir das deformações, é possível construir a curva de fluência estática, utilizando a função:

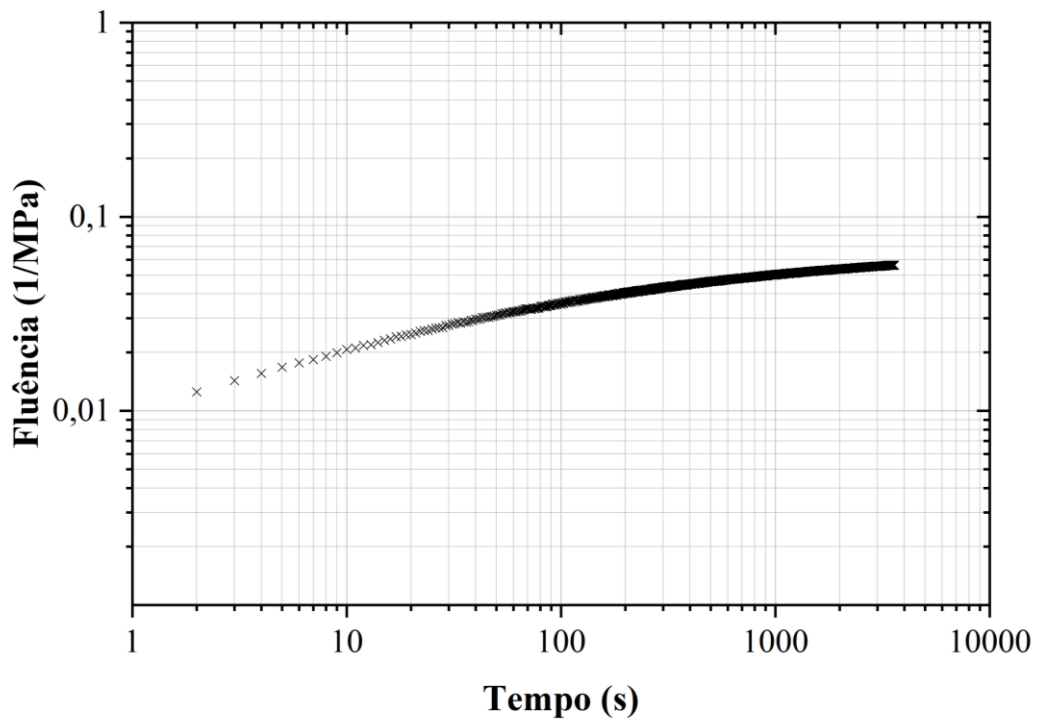
$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (3.2)$$

sendo:  $D(t)$  a função fluência e  $\sigma$  a tensão constante aplicada.

O ensaio de fluência estática com recuperação realizado por Rodrigues (2018) gerou os resultados médios de deslocamento *versus* tempo apresentados na Figura 3.4 **Figura 3.5** a partir de três réplicas. De posse dos valores de deformação obtidos a partir dos deslocamentos, pode-se gerar uma curva de fluência, apresentada na Figura 3.5, em escala log x log.



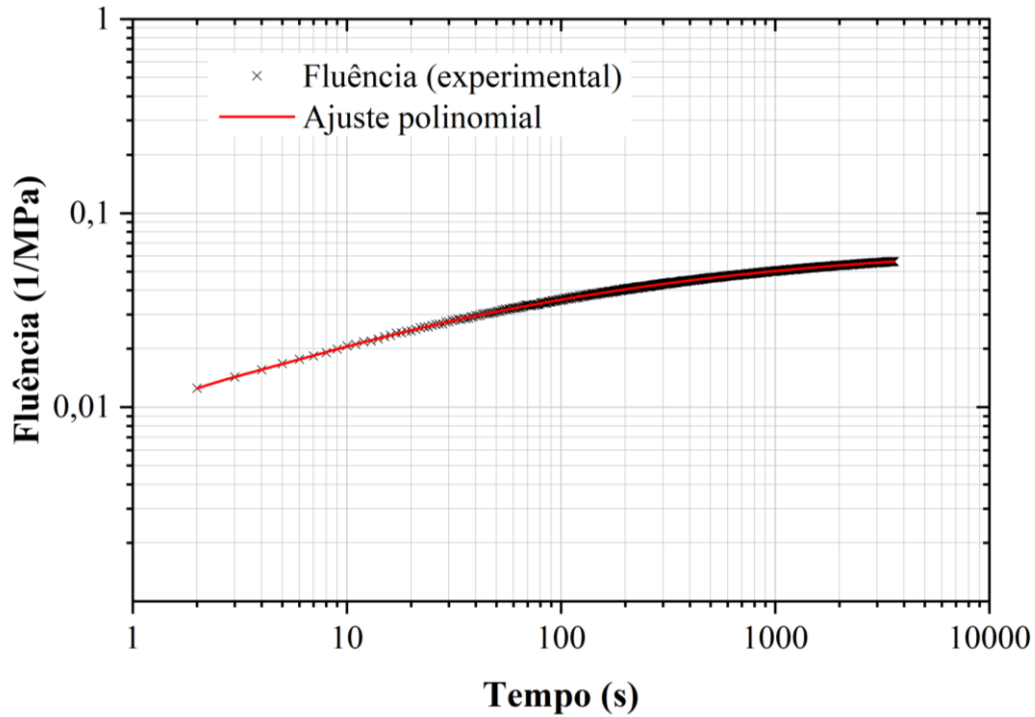
**Figura 3.4.** Resultados experimentais obtidos de Rodrigues (2018): Curva de deslocamento x tempo.



**Figura 3.5.** Resultados experimentais obtidos de Rodrigues (2018): Curva de fluência  $D(t)$ .

### 3.2.1 INTER-RELAÇÃO ENTRE FUNÇÃO FLUÊNCIA E RELAXAMENTO

Inicialmente, foi feita uma aproximação de um polinômio de ordem alta (utilizou-se um polinômio de grau 9) para a obtenção da função Fluência  $D(t)$ , apresentada na Figura 3.6. Após, é necessária, para fins da modelagem numérica, a obtenção da função Relaxação  $E(t)$  para a caracterização do material viscoelástico no programa de Elementos Finitos. No presente trabalho, foi adotada a Inter-relação baseada na Lei de Potência para interconverter as funções devido a sua eficácia de aproximação.



	A	B	C	D
1	Equação	$y = \text{Intercept} + B1*x^1 + B2*x^2 + B3*x^3 + B4*x^4 + B5*x^5 + B6*x^6 + B7*x^7 + B8*x^8 + B9*x^9$		
2	Peso	Sem peso		
3	Soma residual dos quadrados	0.00226		
4	R <sup>2</sup>	0.99966		
5			Valor	Erro Padrão
6	Compliance	Interseção	-2.08581	0.03814
7		B1	0.99884	0.29213
8		B2	-2.02595	0.8789
9		B3	3.15448	1.39944
10		B4	-2.89896	1.3241
11		B5	1.63963	0.78262
12		B6	-0.58131	0.29195
13		B7	0.12611	0.06681
14		B8	-0.01532	0.00856
15	B9	7.99051E-4	4.70642E-4	

**Figura 3.6.** Ajuste polinomial de ordem 9 da função Fluência  $D(t)$ .

Segundo Park e Kim (1999), o método consiste nas seguintes formas de leis de potência para o módulo de relaxação e fluência, respectivamente:

$$E(t) = E_1 t^{-n} \quad (3.3)$$

$$D(t) = D_1 t^n \quad (3.4)$$

sendo:  $E_1$ ,  $D_1$ , e  $n$  constantes positivas.

A partir das equações 3.3 e 3.4, tem-se a seguinte relação, apresentada por Leaderman (1958):

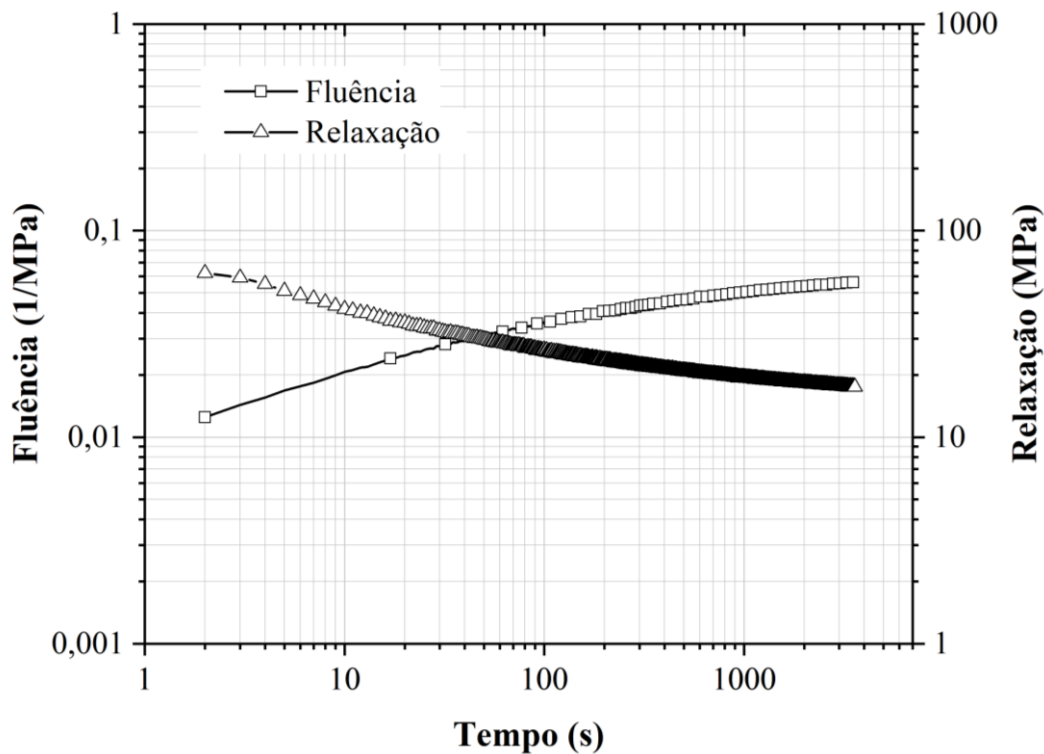
$$E(t)D(t) = \frac{\sin n\pi}{n\pi} \quad (3.5)$$

sendo:  $n$  a inclinação da reta da função de partida  $E(t)$  ou  $D(t)$  em escala log-log, ou seja:

$$n = \left| \frac{d \log F(\tau)}{d \log \tau} \right|_{\tau=t} \quad (3.6)$$

sendo:  $F(\tau)$  a função de partida, seja  $E(\tau)$  ou  $D(\tau)$ .

A inter-relação apresentada, segundo Park e Kim (1999), leva a interconversões exatas. Utilizado o método acima, a fase MAF passa a ser perfeitamente representada mecanicamente compondo seu modelo constitutivo, obtendo-se funções  $D(t)$  e  $E(t)$  plotadas na Figura 3.7.

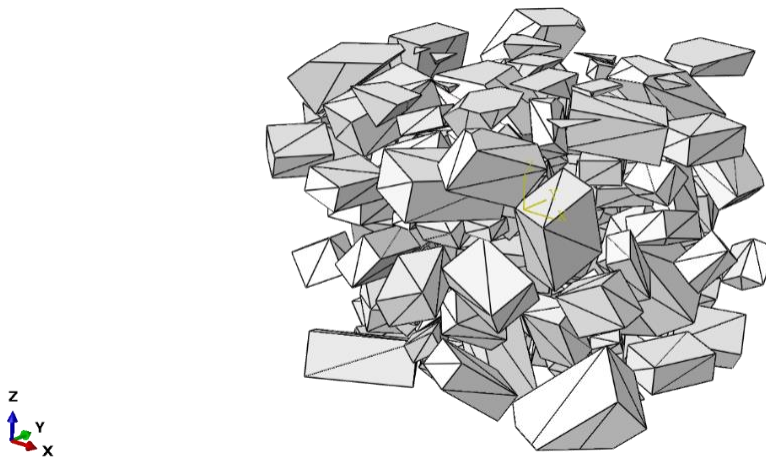


**Figura 3.7.** Interconversão entre funções  $D(t)$  e  $E(t)$ .

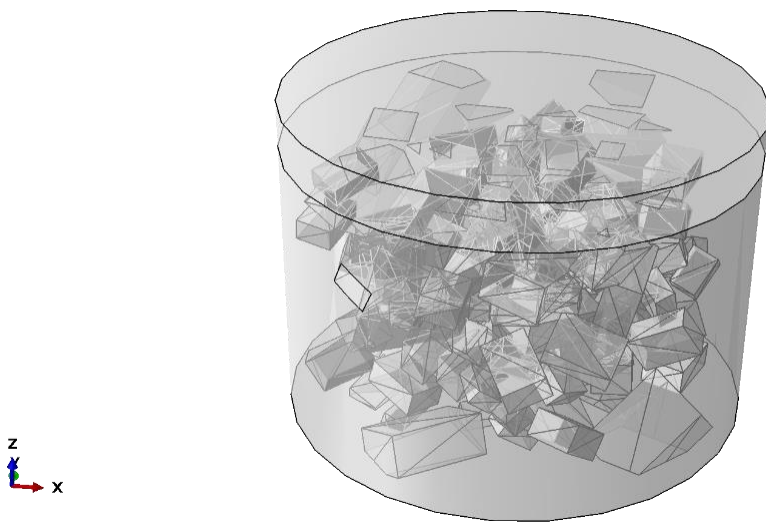
### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

Procura-se descrever o comportamento do CBUQ dividido em duas fases constituintes, quais sejam a Matriz de Agregados Finos, viscoelástica; e o Esqueleto Sólido Graúdo, ilustrado na Figura 3.8, elástico. Para isso, o programa de elementos finitos ABAQUS CAE foi utilizado

para a modelagem tridimensional de corpos de prova, de forma a representar o mais próximo possível a realidade dos mesmos. O modelo é formado, basicamente, por um cilindro composto pela matriz de agregados finos, no qual são incrustados agregados com forma aproximada à real, sob uma placa rígida onde são aplicados os carregamentos, conforme ilustra a Figura 3.9.



**Figura 3.8.** Esquema da fase ESG.



**Figura 3.9.** Esquema do modelo numérico Placa Rígida + AA + ESG.

### 3.3.1 MODELOS CONSTITUTIVOS

O modelo é composto por duas fases, conforme especificado anteriormente, a MAF e o ESG. Cada uma delas é definida conforme seu comportamento mecânico. Para os agregados constituintes do ESG, foi empregado um modelo elástico-linear para caracterizar o calcário dolomítico, com um módulo de rigidez  $E = 60$  GPa e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,25$ , valores

sugeridos, dentro de uma faixa aceitável, por Farmer (1983). Para a MAF, empregou-se um modelo viscoelástico definido pelos parâmetros constitutivos dependentes da série de Prony da função Relaxação  $E(t)$ . Para a representação de um comportamento isotrópico no programa Abaqus, são necessárias relações entre o módulo cisalhante e volumétrico, de forma análoga a materiais elásticos:

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \quad (3.7)$$

$$K(t) = \frac{E(t)}{3(1-2\nu)} \quad (3.8)$$

sendo:  $G(t)$  o Módulo de cisalhamento no tempo;  $K(t)$  o Módulo volumétrico no tempo, e  $\nu$  o coeficiente de Poisson, constante no tempo.

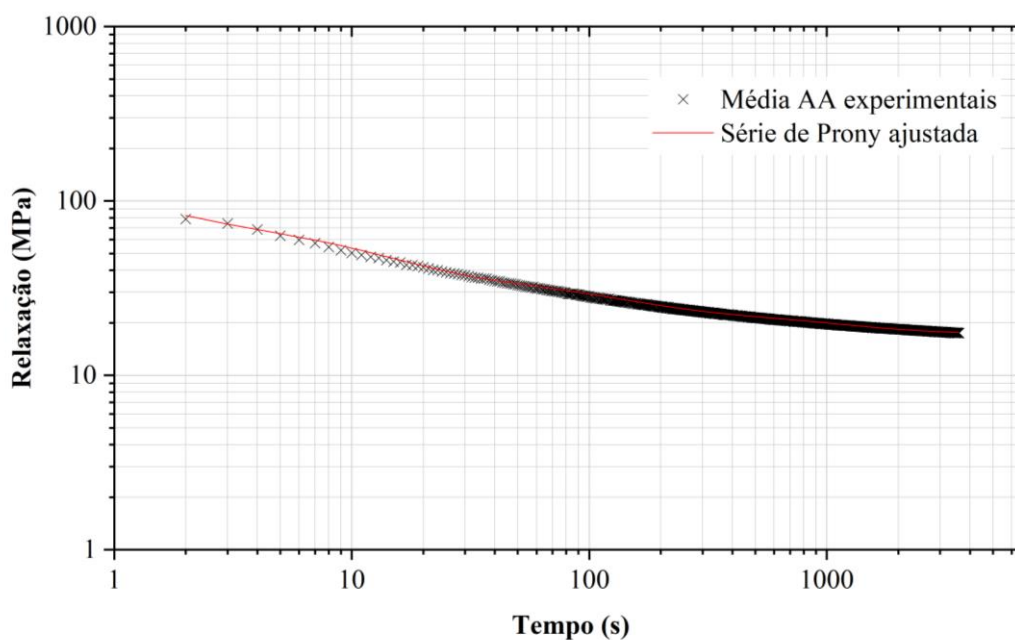
Para a caracterização do material viscoelástico no programa ABAQUS, foi aproximada uma série de Prony da função Relaxação  $E(t)$  pelo Método da Colocação por Mínimos Quadrados Linear (MQL). Silva (2009) desenvolve a definição da função de mínimos quadrados para a função Relaxação  $E(t)$  e chega à seguinte equação:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M e^{\frac{-t_k}{\rho_i}} e^{\frac{-t_k}{\rho_j}} E_i = \sum_{k=1}^M (E(t_k) - E_{\infty}) e^{\frac{-t_k}{\rho_j}} \quad (i = j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M) \quad (3.9)$$

Já a obtenção dos termos dependentes para a função Fluência  $D(t)$  pelo método da colocação por mínimos quadrados lineares é feita segundo a seguinte equação:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \left(1 - e^{\frac{-t_k}{\tau_j}}\right) \left(1 - e^{\frac{-t_k}{\tau_i}}\right) D_j = \sum_{k=1}^M (D(t_k) - D_0) \left(1 - e^{\frac{-t_k}{\tau_i}}\right) \quad (i = j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M) \quad (3.10)$$

Desta, foram extraídos seus coeficientes de módulo de relaxação cisalhante ( $G_i$ ), normalizados pelo módulo de relaxação cisalhante instantâneo ( $G_0$ ), e de módulo volumétrico elástico ( $K_i$ ), normalizados pelo módulo volumétrico elástico instantâneo ( $K_0$ ). A Figura 3.10 mostra a regressão realizada para a média das curvas de Relaxação obtidas através da interconversão da MAF utilizando a série de Prony. Os valores encontrados para a MAF em questão estão apresentados na Tabela 3.2, relativos a tempos de retardação ( $\tau_i$ ) de 1, 10, 100 e 1000 segundos.



**Figura 3.10.** Ajuste da série de Prony à função Relaxação da MAF.

**Tabela 3.2.** Valores dos coeficientes normalizados de módulo volumétrico e cisalhante.

$G_i$	$K_i$	$\tau_i$
0,433	0,433	1
0,293	0,293	10
0,105	0,105	100
0,048	0,048	1000

### 3.3.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico desenvolvido apresenta simplificações do modelo real, visto que resume a composição a duas fases (ESG + AAUQ), condicionando a influência de vazios e dos agregados miúdos ao comportamento da matriz de agregados finos como um todo. Além disso, a forma das partículas componentes do ESG é unificada e aproximada, ignorando efeitos decorrentes da heterogeneidade dos agregados. A compensação da influência dessas simplificações é feita na calibração do modelo realizada no programa ABAQUS.

Observou-se que tão mais próximas as características dos agregados sólidos virtuais são daquelas dos agregados reais, mais próximos são os resultados numéricos dos experimentais. Na definição do modelo viscoelástico da MAF no programa ABAQUS, além dos parâmetros normalizados de módulo volumétrico e cisalhante obtidos da série de Prony aproximada da



função Relaxação  $E(t)$ , utiliza-se conjuntamente o valor do módulo de elasticidade do material, definido como o módulo de relaxação a tempo infinito ( $E_\infty$ ). A experimentação do modelo mostrou que esse valor é proporcional à magnitude do deslocamento ao final do carregamento, entretanto não influencia no comportamento da curva. Assim sendo, o valor de  $E_{\infty \text{ car}}$  foi determinado como 15 MPa, apesar do ajuste da série de Prony indicar um  $E_\infty$  igual a 17,47 MPa. Esse foi estabelecido conforme tentativas feitas de forma a aferir um deslocamento realista para calibrar o modelo.

Além disso, observou-se que, para a fase de descarregamento, o programa ABAQUS adota o módulo de relaxação a tempo infinito ( $E_{\infty \text{ desc}}$ ) como o mesmo do carregamento, o que de fato não acontece. Para contornar isso, a simulação foi realizada em duas etapas: (1) acomodamento e carregamento, e (2) descarregamento.

Com base nos resultados experimentais, observou-se que o comportamento da curva no descarregamento é muito similar ao carregamento, guardadas as proporções de magnitude. Estimou-se, então, a partir dos dados experimentais, um novo módulo  $E_\infty$  para o descarregamento, como um módulo proporcional ao do carregamento, conforme:

$$E_{\infty \text{ desc}} = E_{\infty \text{ car}} \cdot \frac{\delta_{900}}{\delta_{3600} - \delta_{4500}} \quad (3.11)$$

sendo:  $E_{\infty \text{ desc}}$  o módulo de relaxação a tempo infinito da etapa de descarregamento,  $E_{\infty \text{ car}}$  o módulo de relaxação a tempo infinito da etapa de carregamento,  $\delta_{900}$  o deslocamento para  $t = 900$  s,  $\delta_{3600}$  o deslocamento para  $t = 3600$  s (fim do carregamento) e  $\delta_{4500}$  o deslocamento para  $t = 4500$  s (fim do descarregamento).

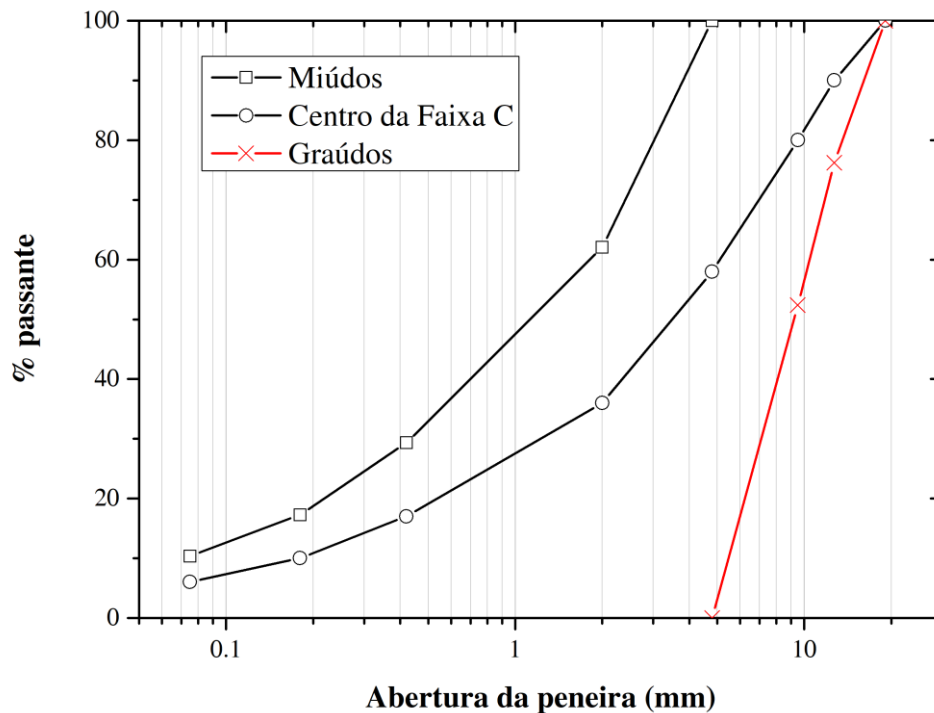
Com base em testes realizados para determinação do valor de  $E_{\infty \text{ desc}}$ , determinou-se um  $E_{\infty \text{ desc}} = 3,2 \cdot E_{\infty \text{ car}}$ . Tem-se, então, para o material ensaiado e validado, um  $E_{\infty \text{ desc}}$  igual a 48 MPa. A simulação do modelo considerando diferentes  $E_\infty$  em carregamento e descarregamento permitiu uma melhor representação desses estágios realizados no ensaio de fluência estática.

### 3.3.3 GERAÇÃO DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO

Para a construção do esqueleto sólido graúdo (ESG), foi adotada uma técnica de geração randômica de agregados. Para isso, utilizou-se um algoritmo apresentado por Pérez Morales *et al.* (2011) e Valera *et al.* (2015), do tipo frente de avanço, que produz um empacotamento de partículas aleatório, respeitando parâmetros de entrada definidos pelo usuário. O código é

abastecido com características necessárias ao empacotamento e cria, como saída, o pacote de partículas.

Define-se, inicialmente, a forma das partículas a serem geradas como paralelogramos, com suas dimensões médias de comprimento, largura e espessura obtidos pela análise de forma. A partir dessas medidas, são especificadas as razões de forma da partícula padrão, ou seja, todas as partículas da composição possuirão essas mesmas razões de aspecto, devidamente dispostas e magnificadas a fim de obter a composição granulométrica estabelecida no *input* do algoritmo. A composição adotada na validação deste trabalho atende à parte graúda do centro Faixa C do DNIT, conforme especificado anteriormente e ilustrado pela Figura 3.11.



**Figura 3.11.** Composição granulométrica da parte graúda do centro da Faixa C.

A partir da curva granulométrica da amostra de agregados graúdos, constrói-se a composição virtual considerando a probabilidade de uma partícula se inserir dentro de cada faixa granulométrica presente na amostragem. O algoritmo gera partículas no espaço definido por um cilindro com dimensões correspondentes ao corpo de prova Marshall, quais sejam 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura, de forma a ocupar o volume interior especificado sem haver superposição das mesmas. Além disso, foi definida a porosidade do pacote de partículas. Considerando a mistura com vazios do agregado mineral (VAM) de 13,4% conforme dados

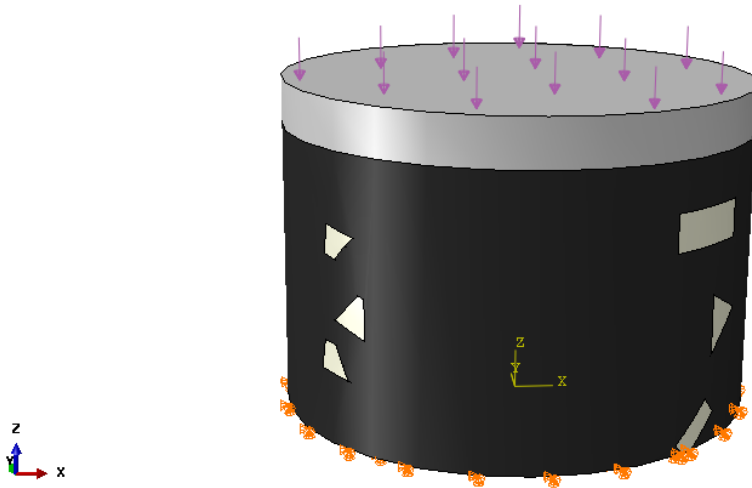
experimentais de Rodrigues (2018), tem-se uma ocupação de 86,6% de agregados minerais, da qual 21,3% destes correspondem aos agregados graúdos. Assim, 18,4% do volume da mistura é composta por agregados graúdos, e o restante compõe os vazios do agregado mineral graúdo VAM-G, correspondente a 81,6%, o qual será preenchido com a MAF. De posse desse valor, foi calculada a porosidade do pacote como 0,816, equivalente a um índice de vazios de 4,43 calculado para o mesmo.

O pseudocódigo inicializa o empacotamento com três partículas, gera uma nova partícula a ser empacotada, seleciona uma frente ativa e determina a posição na qual a partícula se estabelecerá de acordo com a porosidade e distribuição granulométrica, checa se a partícula nessa posição se sobrepõe a outras existentes e, se isso não ocorre, aceita a partícula gerada, voltando a gerar novas partículas (Valera *et al.*, 2015 e Pérez Morales *et al.*, 2016). O arquivo de saída gerado corresponde a uma lista de partículas e as coordenadas de seus vértices. Com o auxílio de outro algoritmo implementado, essas coordenadas são lidas e interligadas, de forma a construir o conjunto de partículas em um formato compatível com o programa AutoCAD, o qual permite criar um arquivo no formato “.igs”, suportado como parte importada pelo programa ABAQUS, para a composição das partículas em três dimensões.

### **3.3.4 CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO**

O objetivo da análise numérica é simular um ensaio de fluência estática em um corpo de prova do tipo Marshall de uma mistura asfáltica já especificada. Para isso, são aplicados carregamentos e condições de contorno no modelo para a realização da simulação, conforme detalha-se a seguir.

As condições de contorno definidas no modelo correspondem a restrições de deslocamento, permitindo o giro, nos três eixos (X, Y e Z). A aplicação das mesmas foi feita na superfície de base do cilindro, considerando o topo como a placa rígida (tipo *Shell*), onde são aplicados os carregamentos. Estes são divididos em dois passos (*Steps*): acomodamento e carregamento propriamente dito. Ambos os passos são do tipo viscoelástico, com integração implícita e explícita para análises do domínio do tempo. Para o acomodamento inicial, foi aplicado um carregamento estático de 5 kPa durante 10 segundos, e para o carregamento, aplicou-se um carregamento estático de 100 kPa durante 3600 segundos. A Figura 3.12 resume os carregamentos e condições de contorno aplicados.



**Figura 3.12.** Carregamentos e condições de contorno aplicados.

### 3.3.5 GERAÇÃO DA MALHA DO MODELO

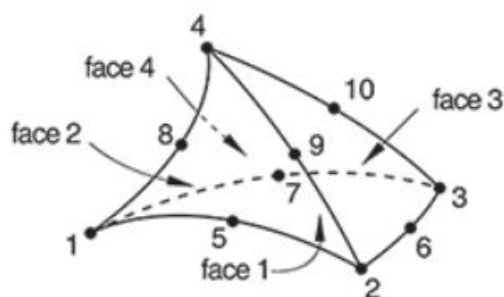
A complexidade da geometria do modelo, visto que há uma disposição aleatória dos paralelogramos representando as partículas no espaço delimitado pelo corpo de prova, exige um refinamento maior da malha de elementos finitos. Quanto menores os agregados a serem representados, menores serão os elementos necessários para gerar uma malha satisfatória no modelo. Embora a modelagem dos agregados, neste trabalho, restrinja-se à parcela graúda da distribuição granulométrica da Faixa C, ou seja, materiais retidos na peneira de 4,8 mm, a geração da malha exigiu um nível de refinamento considerável.

A malha, concebida no programa ABAQUS, é dividida em duas partes: nós locais, mais próximos uns dos outros, e nós globais, mais distantes e, portanto, menos refinados. Devido à complexidade da região onde estão presentes as partículas de agregados por serem pequenos e orientados aleatoriamente, a esta são designados vértices dos elementos locais distantes 5 mm entre eles. Enquanto para o entorno das partículas, delimitado pelo corpo de prova Marshall de 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura, são designados elementos com vértices distantes em 10 mm entre si. Distâncias maiores que as apresentadas foram testadas e não permitiram que fosse possível gerar a malha, ou geraram malhas grosseiras, enquanto distâncias menores não geravam alterações significativas nos resultados, e tornavam o curso computacional muito maior, conforme mostrado na Tabela 3.3 para simulações de um mesmo corpo de prova. Acrescenta-se aqui que as simulações foram realizadas em um hardware composto por um Processador Intel® Core™ i7-47-90 e 32 GB de memória RAM.

**Tabela 3.3.** Análise de refinamento de malha.

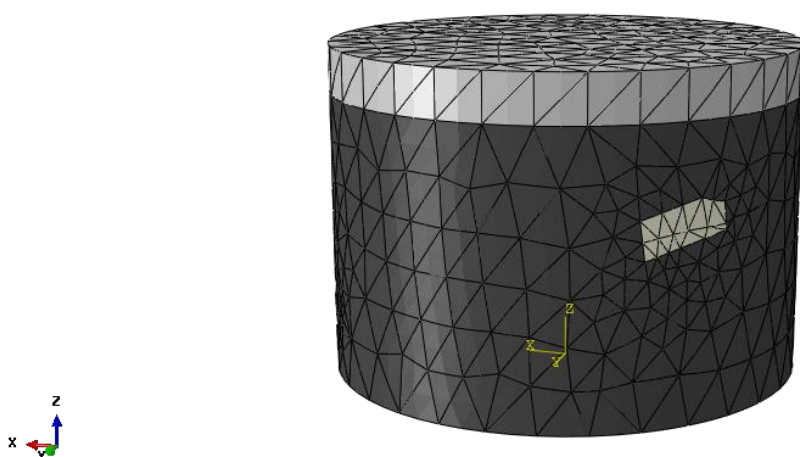
Distância entre nós globais [mm]	Distância entre nós locais [mm]	Deslocamento máximo [mm]	Tempo computacional para simulação [s]
10	5	0,163559	2777,4
6	3	0,164524	12598,0

O tipo de elemento estabelecido foi o C3D10, ilustrado na Figura 3.13, um elemento tetraédrico quadrático tridimensional de 10 nós. A escolha se deve simplesmente à necessidade de um elemento mais versátil devido à complexidade geométrica do modelo, sendo o C3D10 o único tipo de elemento que possibilitou a geração da malha implementado no programa ABAQUS.



**Figura 3.13.** Elemento C3D10: tetraedro de 10 nós.

A Figura 3.14 ilustra a malha de um dos corpos de prova ensaiados, com distância entre vértices de nós globais igual a 10 mm e de nós locais igual a 5 mm. Na Tabela 3.4 a seguir apresentam-se as características necessárias e utilizadas das malhas de elementos finitos de cada um dos trinta corpos de prova simulados para a validação do modelo. Salienta-se que em um dos corpos de prova, devido à heterogeneidade das disposições das partículas, incluindo proximidade entre elas, necessitou-se de uma malha mais refinada, com distâncias entre nós menores.



**Figura 3.14.** Exemplo de malha de um corpo de prova ensaiado.

**Tabela 3.4.** Características das malhas dos corpos de prova ensaiados na validação do modelo.

Malha	Número de elementos	Número de nós	Distância entre vértices globais [mm]	Distância entre vértices locais [mm]
CP-1	43622	60305	10	5
CP-2	48098	66916	10	5
CP-3	44162	60892	10	5
CP-4	44375	61311	10	5
CP-5	46206	64052	10	5
CP-6	46130	63587	10	5
CP-7	45224	62774	10	5
CP-8	44308	61008	10	5
CP-9	44085	61102	10	5
CP-10	44355	61323	10	5
CP-11	47142	65231	10	5
CP-12	49229	68096	10	5
CP-13	47090	65315	10	5
CP-14	43808	60420	10	5
CP-15	41716	57592	10	5
CP-16	47785	66420	10	5
CP-17	47278	65369	10	5

Malha	Número de elementos	Número de nós	Distância entre vértices globais [mm]	Distância entre vértices locais [mm]
CP-18	47144	65647	10	5
CP-19	45179	62768	10	5
CP-20	67671	93047	8	4
CP-21	46775	65094	10	5
CP-22	49064	68252	10	5
CP-23	44344	61331	10	5
CP-24	44504	61656	10	5
CP-25	42963	59326	10	5
CP-26	45587	63486	10	5
CP-27	41172	56525	10	5
CP-28	43821	60612	10	5
CP-29	46743	64635	10	5
CP-30	42158	58047	10	5

### 3.3.6 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO

A fim de validar o modelo numérico desenvolvido, foram realizadas trinta simulações, mantendo-se parâmetros de forma, granulometria, volume de ocupação de agregados no corpo de prova, além dos modelos constitutivos, porém variando as posições das partículas de forma randômica. Pretendeu-se, com essa repetibilidade, obter uma representatividade estatística aceitável.

Foram registrados os deslocamentos verticais no centro do topo da placa sobre os corpos de prova durante a simulação numérica. A placa rígida acima do CP não se deforma, mas pode girar devido à disposição dos agregados dentro da amostra. Adotando-se os deslocamentos verticais no centro do topo da placa rígida, tende-se a representar o deslocamento médio da superfície. Assim, a curva de progressão de deslocamentos ao longo do tempo de cada corpo de prova é criada e, com a média de trinta curvas, compara-se os resultados numéricos e experimentais.

Os resultados de ensaios de fluência estática realizados por Rodrigues (2018) no laboratório INFRALAB, sob as mesmas condições ensaiadas, foram utilizados para validar o modelo desenvolvido. A simplificação da representação dos agregados reais no modelo

numérico utilizando de uma forma padrão sob uma disposição aleatória permite facilitar a aplicabilidade do método. Dessa forma, é possível, de forma relativamente rápida, replicar o ensaio tantas vezes quantas forem necessárias.

### 3.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FORMA DOS AGREGADOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA

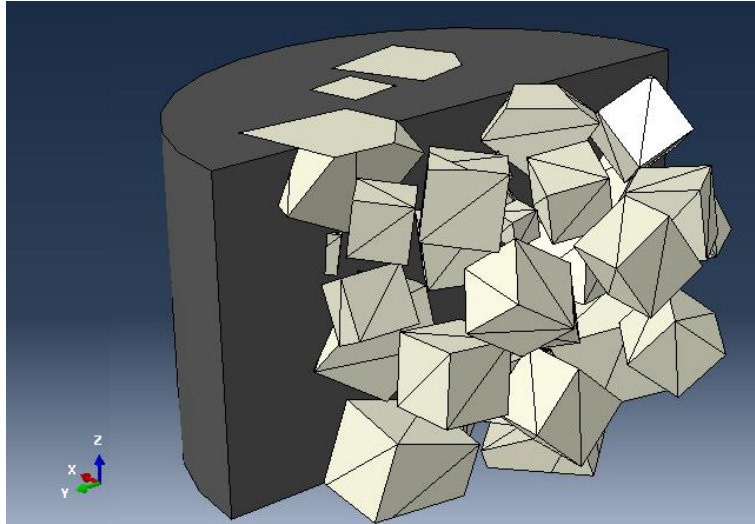
Após validado o modelo, este pôde ser utilizado para estudar a influência dos agregados graúdos na mistura a partir da variabilidade de suas características. Inicialmente, foram analisados oito agregados característicos com diferentes dimensões, classificados conforme a ABNT NBR 6954 MB 894/1989: cúbicos, alongados, lamelares e alongado-lamelares. A Tabela 3.5 apresenta as dimensões adotadas e suas relações de forma, sendo *A* o comprimento, *B* a largura e *C* a espessura da partícula.

**Tabela 3.5.** Dimensões adotadas para os agregados e suas relações de forma.

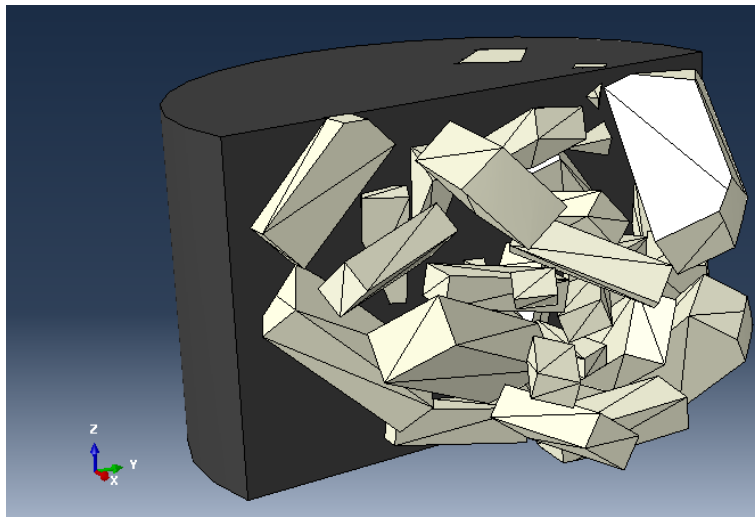
Teste	<i>A</i> [mm]	<i>B</i> [mm]	<i>C</i> [mm]	Classificação
1	0,5	0,5	0,5	Cúbico
2	0,5	0,4	0,3	Cúbico
3	1	0,4	0,25	Alongado
4	0,8	0,3	0,2	Alongado
5	0,8	0,5	0,2	Lamelar
6	1	0,6	0,2	Lamelar
7	1	0,4	0,15	Alongado-Lamelar
8	1	0,35	0,1	Alongado-Lamelar

Para cada modelo com agregados de determinada forma, foram feitas cinco simulações numéricas, de forma a obter a progressão dos deslocamentos sob ensaios de fluência estática. Os corpos de prova contendo cada tipo de partícula estão exemplificados nas Figura 3.15 a Figura 3.18. A partir das médias de deslocamentos máximos de cada forma, foi possível estabelecer uma relação entre elas e definir quais delas têm melhor desempenho no que tange as deformações permanentes de pavimentos e quais aspectos de forma têm melhor relação com a fluência da mistura.

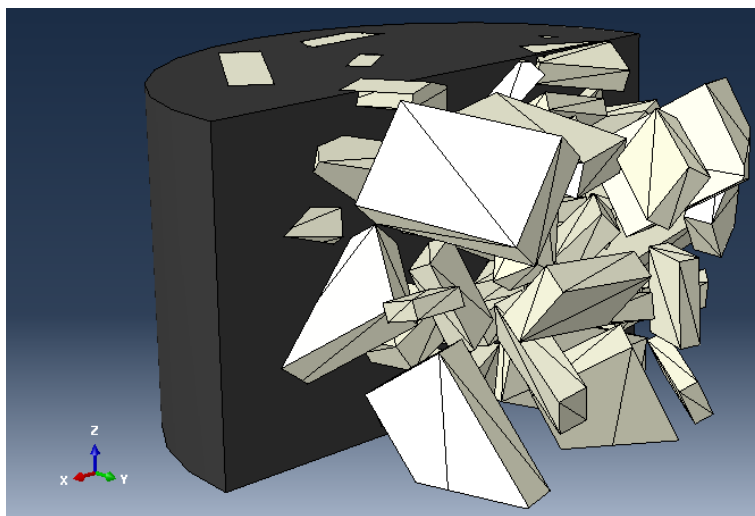




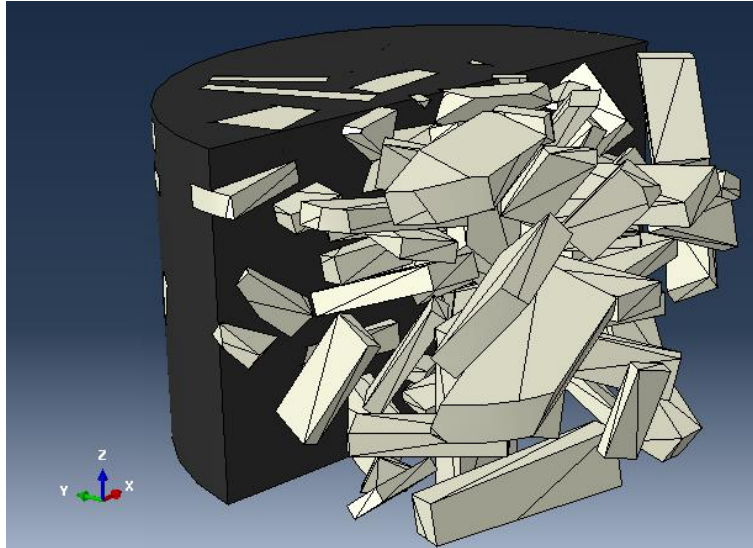
**Figura 3.15.** Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo cúbicos.



**Figura 3.16.** Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo alongados.



**Figura 3.17.** Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo lamelares.



**Figura 3.18.** Exemplos de corpos de prova (cortados) com agregados do tipo alongados-lamelares.

Foram feitas correlações entre parâmetros de forma e deslocamentos do CP ensaiado. Utilizando-se da notação para as dimensões  $C$ ,  $L$  e  $E$ , sendo  $C \geq L \geq E$ , são definidos a seguir os parâmetros referidos.

O Fator de forma é comumente utilizado para caracterizar a forma, sendo igual a 1 para partículas perfeitamente cúbicas.

$$\text{Fator de Forma} = \frac{E}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (3.12)$$

A esfericidade caracteriza o nível de simetria e de também o nível de semelhanças a uma esfera, sendo ela a relação entre a área superficial e o volume de uma esfera com a mesma superfície da partícula.

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{L \cdot E}{C^2}} \quad (3.13)$$

O alongamento quantifica a relação entre o comprimento e a largura da partícula, medindo quão longa é ela, num intervalo de 0 a 1, de menos a mais alongada.

$$\text{Alongamento} = 1 - \frac{L}{C} \quad (3.14)$$

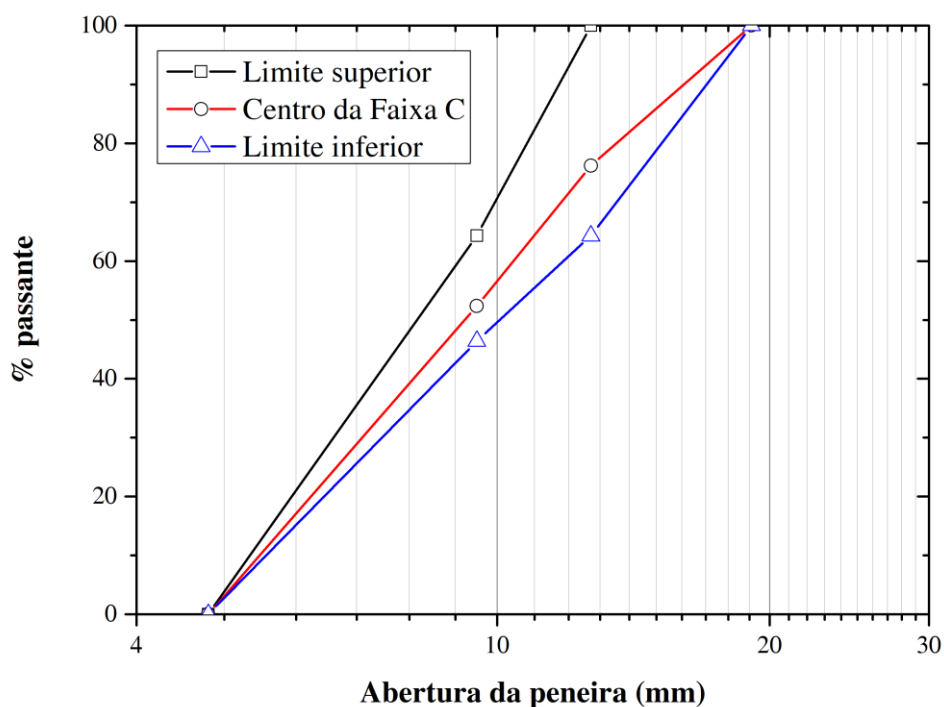
A planicidade da partícula descreve o quão plana, ou lamelar, é ela, utilizando a razão entre a largura e a espessura da partícula.

$$\text{Planicidade} = 1 - \frac{E}{L} \quad (3.15)$$

### **3.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA**

Utilizando o modelo validado, também foi possível avaliar o comportamento de misturas asfálticas moldadas com agregados graúdos no centro e nos limites da Faixa C do DNIT. A faixa foi utilizada por ser indicada para camadas de rolamento de pavimentos asfálticos. Além disso, para os corpos de prova tipo Marshall simulados, os tamanhos máximos nominais dos agregados das faixas A e B tornam-se muito grandes para uma distribuição realista utilizando o algoritmo de empacotamento.

Simulações numéricas de ensaios de fluência estática foram realizadas em corpos de prova cujos agregados graúdos possuem distribuição granulométrica no centro e nos limites inferior e superior da Faixa C. Para cada uma das três análises, foram ensaiados cinco corpos de prova para haver boa representatividade. A Figura 3.2 já apresentada mostra as distribuições granulométricas aqui tratadas, enquanto a Figura 3.19 apresenta a distribuição dos graúdos do centro e limites realmente simulados no modelo numérico para análise da influência da granulometria.



**Figura 3.19.** Distribuição granulométrica dos agregados graúdos do centro e limites da Faixa C.

Para simular as três situações, as distribuições são inseridas no *input* do algoritmo de empacotamento que gera a distribuição das partículas. O mesmo interpreta a informação segundo a porcentagem de partículas que se inserem em cada fração entre peneiras, e monta um pacote de agregados aleatoriamente. Dessa forma, as três distribuições granulométricas podem ser comparadas e podem permitir o entendimento do comportamento da mistura asfáltica segundo o tamanho dos agregados.

# CAPÍTULO IV

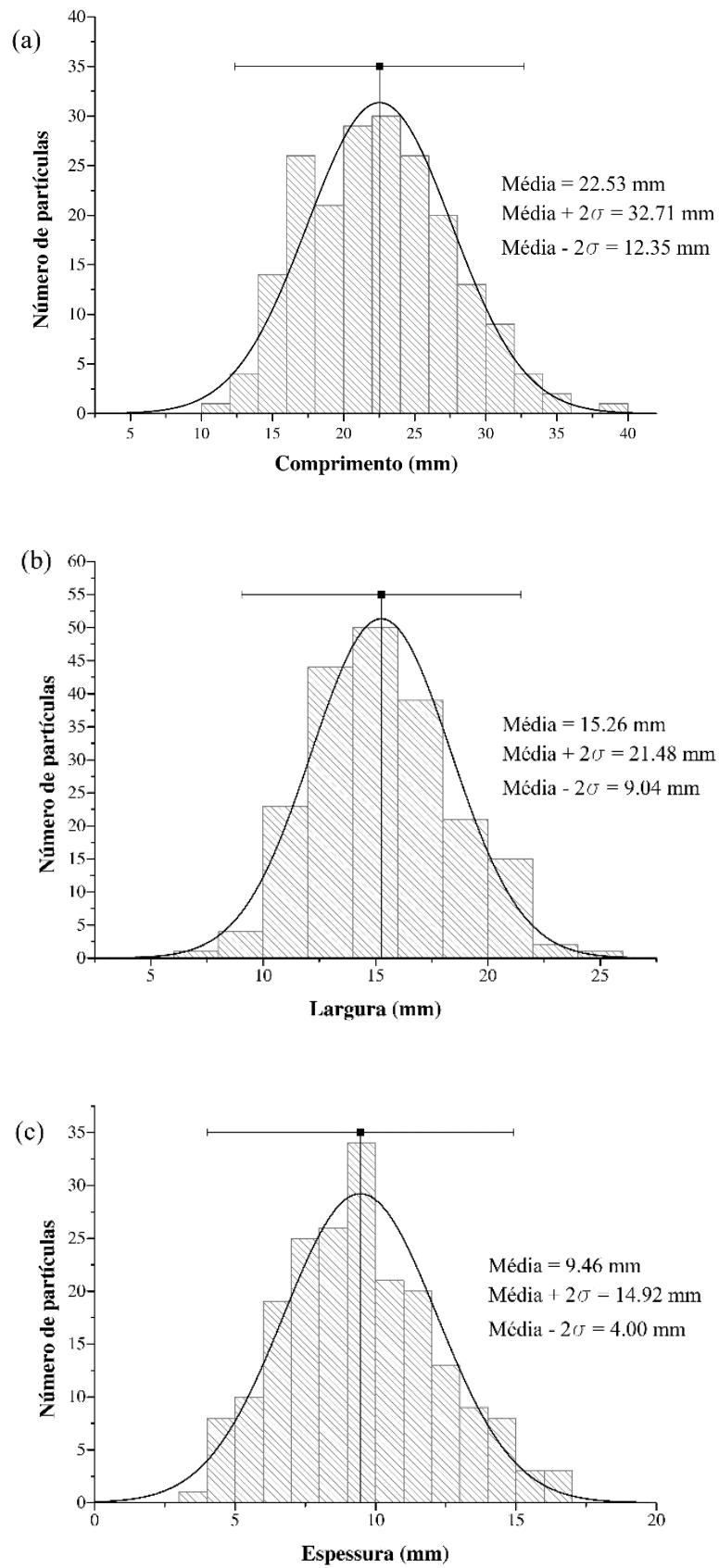
## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados do trabalho são apresentados no presente capítulo, desde a caracterização dos materiais modelados até a validação do modelo numérico e aplicação do mesmo na avaliação da influência dos agregados graúdos na mistura asfáltica. A investigação passou pela construção do modelo numérico compatível com a heterogeneidade do material estudado, e em seguida os resultados de simulações de ensaios de fluência estática e recuperação são apresentados e comparados com aqueles dos ensaios em laboratório. De posse do modelo validado, características de forma e granulometria dos agregados graúdos são estudadas e discutidas suas influências na deformação permanente de camadas de CBUQ.

### 4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE GRANULOMETRIA E FORMA

A fim de validar o modelo numérico, o modelo experimental deve ser devidamente descrito para que a simulação seja o mais realista possível. Para tanto, a matriz de agregados finos, submetida ao ensaio de fluência estática, foi caracterizada segundo sua função Relaxação, obtida a partir da função Fluência. A caracterização da mesma é apresentada no capítulo referente à Metodologia da pesquisa, visto que advém do trabalho experimental de Rodrigues (2018).

Além da MAF, foi necessário um estudo experimental da fase agregados graúdos da mistura. Este foi realizado de forma a prover, a partir de um conjunto de agregados que atende ao centro da Faixa C, já apresentado na Figura 3.2, uma descrição da forma média dos mesmos. Os resultados das medidas de comprimento, largura e espessura estão expressos nos histogramas da Figura 4.1. Foram encontrados valores médios de 22,53 mm, 15,26 mm e 9,46 mm para as medidas, respectivamente. Os desvios-padrões das medidas, na ordem exposta, são 5,09 mm, 3,11 mm e 2,73 mm.



**Figura 4.1.** Histogramas com distribuição normal dos valores de (a) comprimento, (b) largura e (c) espessura das partículas.

De posse desses dados, foram excluídos os *outliers*, com confiabilidade de 95%, ou mais ou menos duas vezes o desvio padrão, de forma a rejeitar grãos pouco representativos. Encontraram-se, assim, novos valores médios, apresentados na Tabela 4.1. A Tabela 4.2 resume as relações encontradas, que permitem classificar os agregados como cúbicos, em média. Encontrou-se um valor de Índice de Forma de 2,39. O valor não é exatamente próximo de 1, que seria o de uma partícula perfeitamente cúbica, porém é aceitável visto que é inferior a 3, valor máximo de referência segundo a ABNT NBR 7809 (2006).

**Tabela 4.1.** Valores finais de dimensões médias, em milímetros.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Média	22,15	14,97	9,27
Desvio	4,62	2,83	2,50

**Tabela 4.2.** Relações entre dimensões e classificação da forma dos agregados.

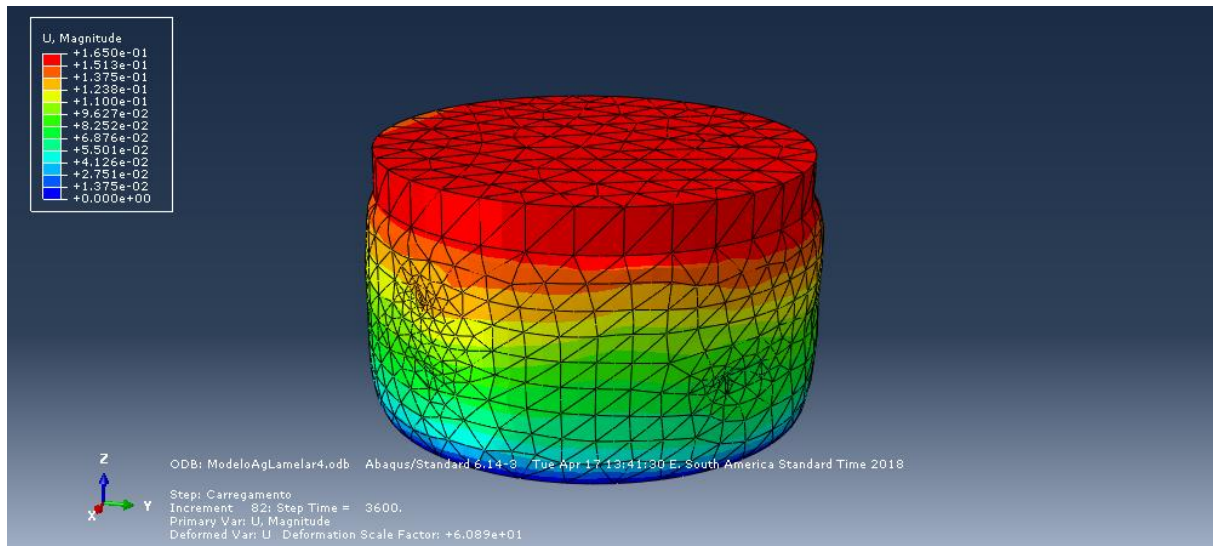
Relação	Valor	Classificação
$b/a$	0,68	
$c/b$	0,62	Cúbica
Índice de forma = $a/c$	2,39	

## 4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

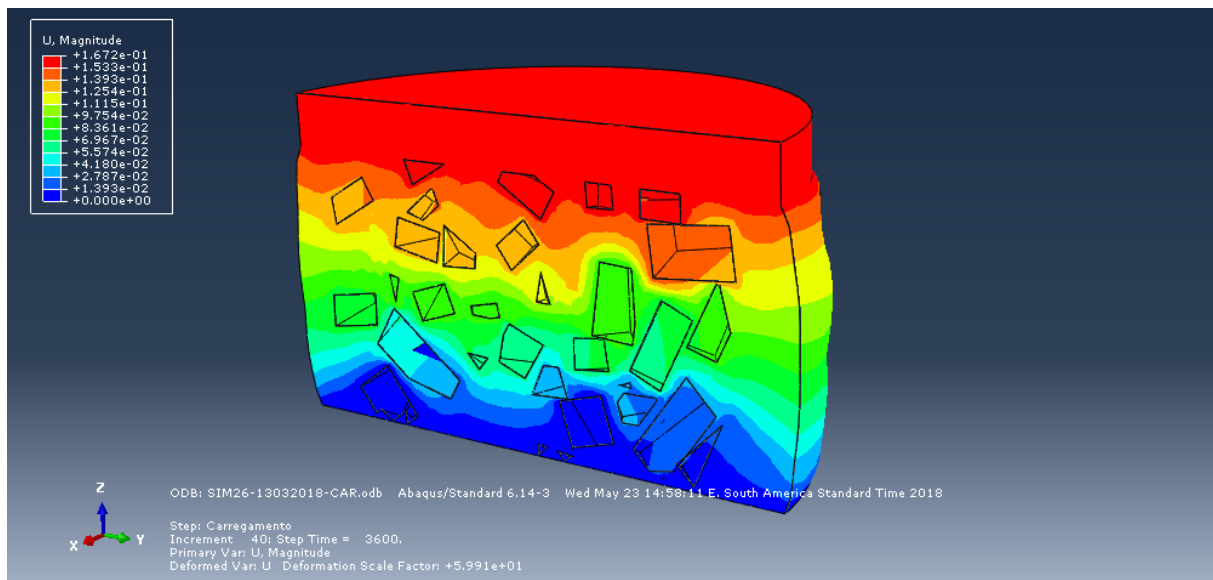
Os modelos numéricos foram desenvolvidos e calibrados conforme apresentou-se na Metodologia do presente trabalho, caracterizando tanto o comportamento viscoelástico da MAF, quanto o elástico do esqueleto sólido graúdo. Foram realizadas 30 simulações de ensaios de fluência estática e recuperação a partir do modelo constituído pelas duas fases (MAF + ESG). Cada simulação manteve as mesmas características da MAF, e foi variada, aleatoriamente, apenas a disposição dos agregados constituintes do ESG, fixando a forma e a distribuição granulométrica dos mesmos.

A Figura 4.2 mostra, em faixas de cores, a evolução dos deslocamentos verticais ao fim da fase de carregamento de um corpo de prova. Observa-se que os deslocamentos aumentam de baixo para cima, visto que os materiais absorvem os mesmos ao longo do corpo de prova. Já na Figura 4.3, é possível observar que regiões preenchidas pelos agregados, contornadas por

uma linha preta, deslocam-se menos verticalmente, sem se deformarem, devido à maior rigidez do calcário em relação à MAF. Tais valores se prolongam verticalmente nas regiões livres de agregados na seção observada. Vale ressaltar que a figura não mostra a extensão dos agregados no sentido normal à seção apresentada, o que indica que os contornos diferem para cada seção de corte do corpo de prova.



**Figura 4.2.** Contorno de cores de deslocamentos verticais ao fim da fase de carregamento.

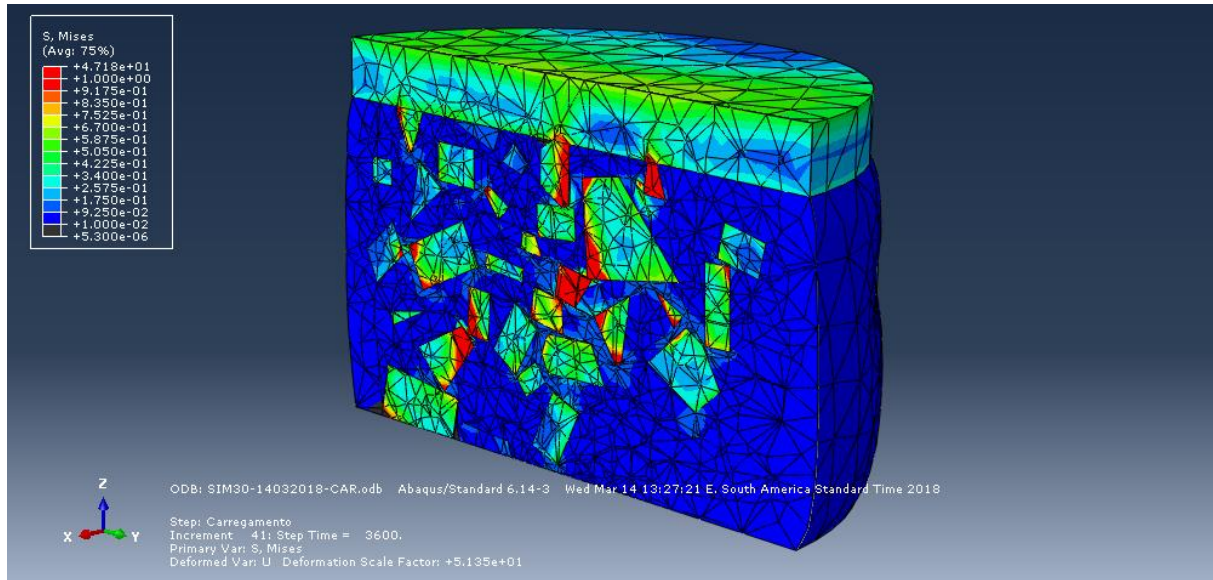


**Figura 4.3.** Faixas de deslocamentos no interior do CP contornando o ESG.

É possível ainda perceber, ao analisar a Figura 4.4, que a concentração de tensões nos agregados, em regiões de maiores contatos entre eles, fica evidente. As regiões com maior presença do ESG ficam mais carregadas, enquanto regiões onde predominam a MAF se deslocam mais facilmente, sem concentrar maiores tensões. Isso ocorre devido à diferença entre



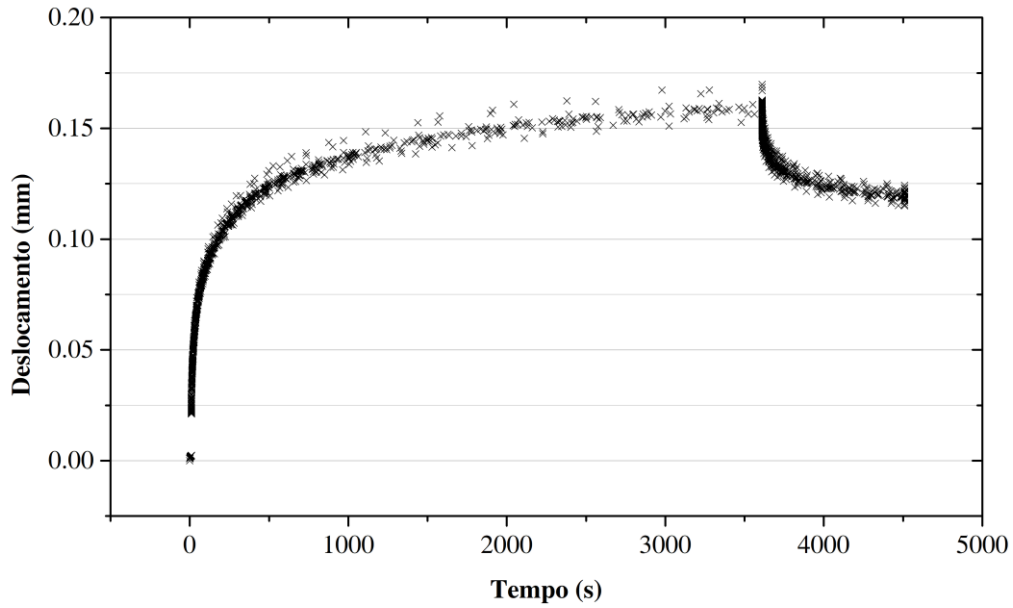
rigidezes dos agregados e da MAF, sendo os primeiros responsáveis por resistirem ao esforço imputado, e a segunda, com papel principal de aglutinador e de ligação do ESG, deforma-se mais facilmente. Na avaliação da deformação permanente do material betuminoso, é interessante salientar que o emaranhado de partículas resistindo às tensões tem papel importante.



**Figura 4.4.** Concentração de tensões no interior do CP pós-carregamento.

Os deslocamentos são medidos no centro do diâmetro da placa rígida, de forma a eliminar o efeito da inclinação da mesma, que pode ocorrer conforme o CP se deforma de forma diferente devido à maior ou menor presença do ESG em determinada região de seu interior. As curvas de evolução dos deslocamentos estão apresentadas na Figura 4.5, que mostra uma dispersão pequena dos resultados, apesar das disposições randômicas dos agregados. A análise das curvas permite avaliar estatisticamente os resultados, conforme resume a Tabela 4.3.

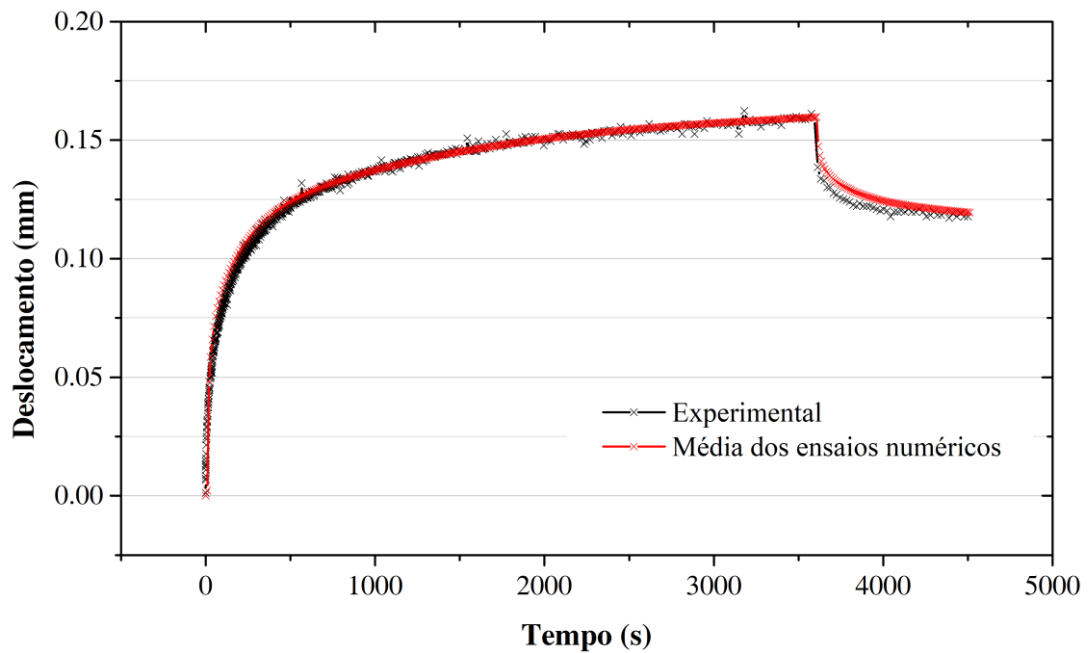
A partir da média das múltiplas curvas obtidas das simulações numéricas, os resultados numéricos puderam ser comparados com os experimentais, conforme Figura 4.6. Nota-se que as curvas são praticamente coincidentes, apresentando boa coincidência tanto no valor de deslocamento máximo obtido aos 3600 segundos, quanto no final do descarregamento, aos 4500 segundos. Além disso, o formato da curva numérica é muito similar ao da curva experimental, o que demonstra uma boa aproximação da Série de Prony ajustada à função Relaxação dos resultados experimentais da MAF. Tais aspectos permitem concluir que as simulações numéricas representam de forma fidedigna o comportamento experimental do concreto asfáltico, validando o modelo proposto.



**Figura 4.5.** Dispersão dos trinta ensaios numéricos com disposição aleatória dos ESG.

**Tabela 4.3.** Análise da dispersão das curvas de deslocamentos dos ensaios.

$\bar{\delta}_{3600}$ [mm]	$\delta_{3600 \text{ máx}}$ [mm]	$\delta_{3600 \text{ min}}$ [mm]	Desvio Padrão [mm]	Erro Padrão [mm]
0,15976	0,16981	0,15306	0,00361	0,0006599



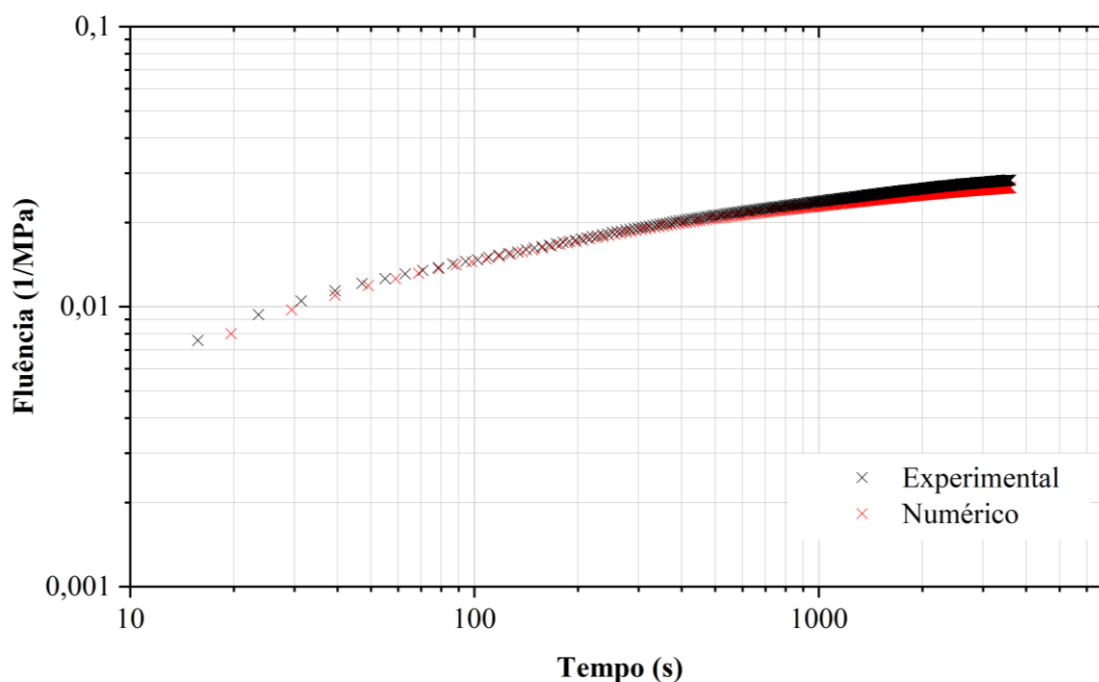
**Figura 4.6.** Comparação entre resultados experimental e numérico obtidos de ensaios de fluência estática.

A Tabela 4.4 apresenta o comparativo entre as duas curvas de forma quantitativa e estatística. Observam-se erros relativos muito baixos entre as curvas, o que mostra que o modelo numérico eficientemente simulou tanto o carregamento quanto o descarregamento dos corpos de prova sob ensaio de fluência e recuperação. Assim, é possível estimar tanto a geração de deslocamentos máximos, quanto a de deformações permanentes, não recuperadas ao longo do tempo de descarregamento. Percebe-se que os deslocamentos recuperáveis equivalem a 25% do deslocamento máximo, ou seja, os resultados numéricos e experimentais apontam uma deformação permanente da ordem de 75% ao final do ensaio de *creep*, para as amostras avaliadas.

**Tabela 4.4.** Comparação entre resultados numéricos e experimental.

Curva	$\delta_{3600}$ [mm]	$\delta_{4500}$ [mm]
Média dos ensaios numéricos	0,15976	0,11947
Experimental	0,15934	0,11783
Erro relativo	0,26%	1,39%

Desenvolvendo as curvas de progressão de deslocamentos dos corpos de prova numérica e experimental, é possível obter as curvas de módulo de compressibilidade à fluência (*Creep Compliance*), apresentadas na Figura 4.7. Observa-se que ambas as curvas são bastante coincidentes, o que mostra a eficácia do modelo desenvolvido. A partir da curva de Fluência, é possível entender a evolução de deformações ao longo do tempo, em décadas logarítmicas.



**Figura 4.7.** Comparação entre curvas numérica e experimental de Fluência.

A obtenção da curva de fluência ao longo do tempo, segundo Huang (1993) além de servir como “input” na análise de sistemas viscoelásticos, permite estimar a profundidade de deformações permanentes de camadas betuminosas. A partir de um modelo calibrado como o desenvolvido, é possível variar características da mistura asfáltica no modelo numérico para estimar o desempenho mecânico do material, provendo informações importantes para o dimensionamento de pavimentos.

#### **4.3 INFLUÊNCIA DA FORMA DOS AGREGADOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA**

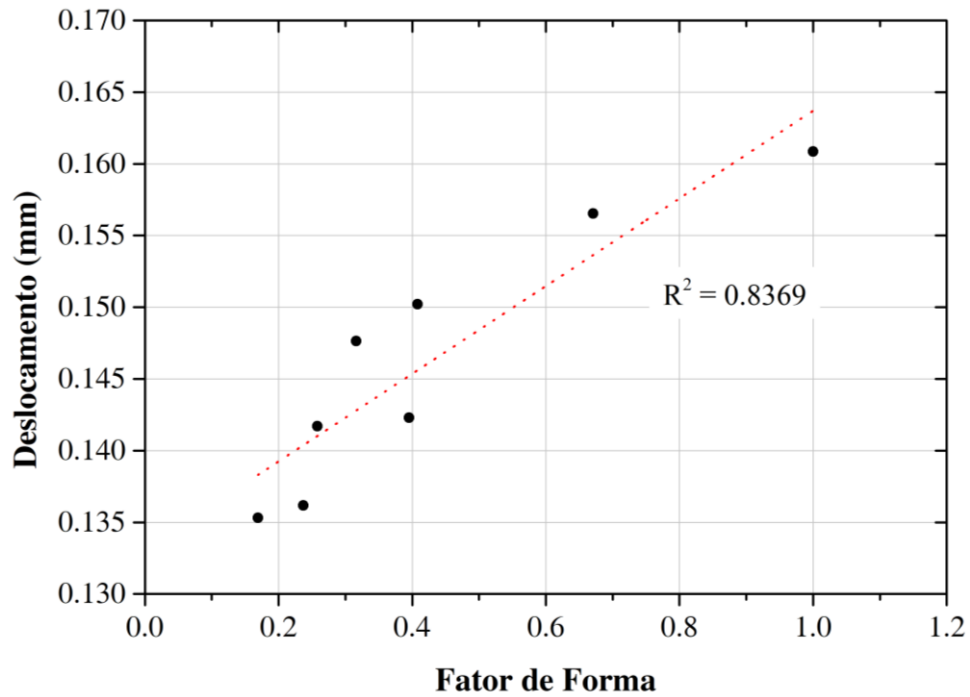
O modelo numérico desenvolvido, já calibrado quanto aos parâmetros constitutivos das fases, foi utilizado para analisar de que maneira a forma dos agregados graúdos influencia na evolução de deformações verticais no corpo de prova de concreto asfáltico. Para tanto, foram ensaiados corpos de prova com ESG constituídos por agregados de diferentes classificações quanto às formas. Conforme a Tabela 3.5 apresentada na Metodologia, as dimensões dos agregados foram variadas a fim de se obter oito diferentes relações de forma. Levou-se em conta os seguintes aspectos de forma dos agregados: Fator de Forma, Esfericidade, Alongamento e Planicidade. Para cada teste, foram realizadas cinco simulações para a obtenção

da média entre os resultados de deslocamento máximo, ao final da fase de carregamento. As médias estão apresentadas na Tabela 4.5, juntas às suas relações de forma.

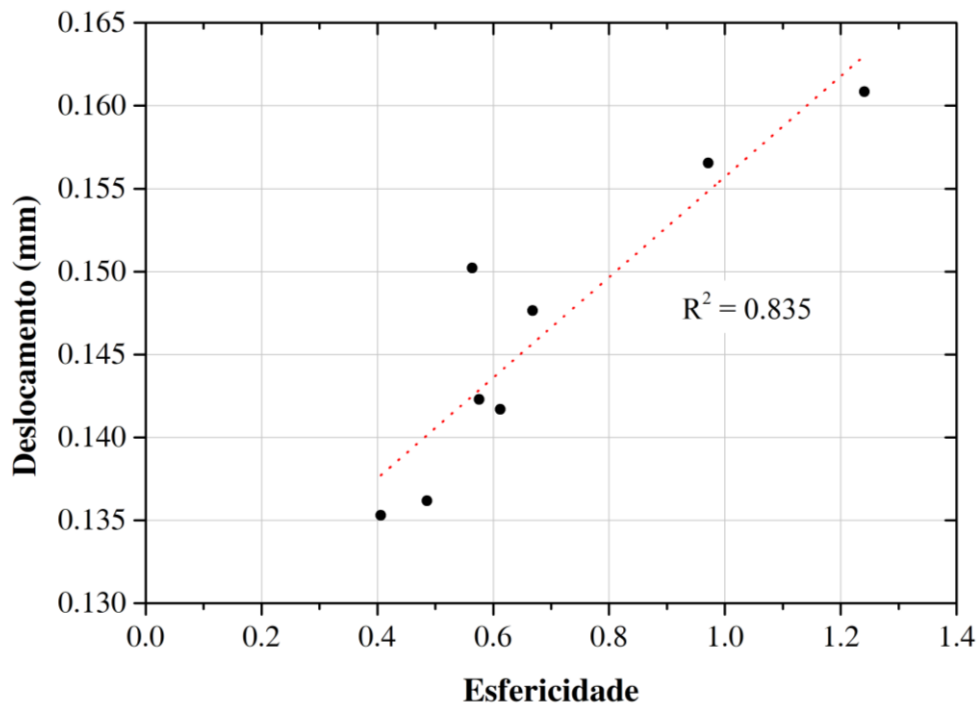
**Tabela 4.5.** Resultados de relações de forma e deslocamento máximo sob ensaio de fluência estática.

Teste	Classificação	Fator de Forma	Esfericidade	Alongamento	Planicidade	$\delta_{\text{máx}}$
1	Cúbico	1,000	1,241	0,000	0,000	0,1609
2	Cúbico	0,671	0,971	0,200	0,250	0,1565
3	Alongado	0,395	0,576	0,600	0,375	0,1502
4	Alongado	0,408	0,564	0,625	0,333	0,1423
5	Lamelar	0,316	0,668	0,375	0,600	0,1477
6	Lamelar	0,258	0,612	0,400	0,667	0,1417
7	Alongado- Lamelar	0,237	0,486	0,600	0,625	0,1362
8	Alongado- Lamelar	0,169	0,406	0,650	0,714	0,1353

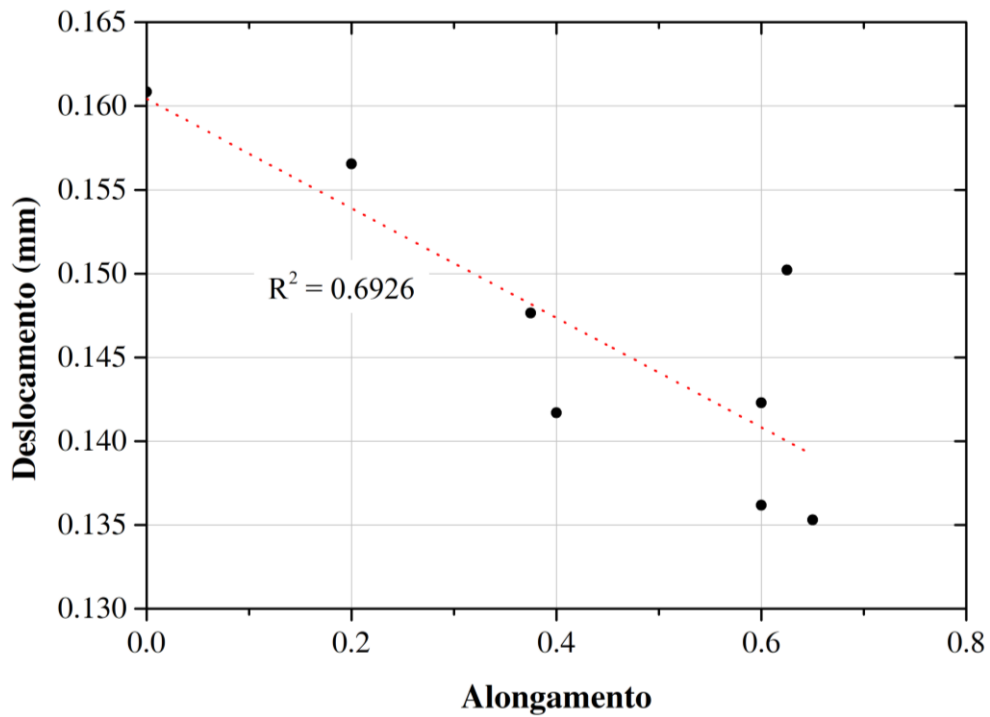
A partir dos resultados, foi possível observar a influência das relações de forma dos agregados na deformação permanente do concreto asfáltico. As Figura 4.8 a 4.11 apresentam a influência de Fator de Forma, Esfericidade, Alongamento e Planicidade no deslocamento máximo apresentado ao fim da fase de carregamento do corpo de prova. Observa-se uma melhor correlação entre o Fator de Forma e a Esfericidade das partículas de agregado e a evolução dos deslocamentos do corpo de prova ao final do carregamento estático. Pode-se concluir que maiores valores de Fator de Forma e de Esfericidade dos agregados levam a maiores deslocamentos e, conseqüentemente, maiores deformações no concreto asfáltico. Além disso, embora os coeficientes de correlação entre Alongamento ou Planicidade e deslocamentos máximos sejam menores, valores maiores de coeficientes de alongamento e planicidade tendem a diminuir os deslocamentos máximos.



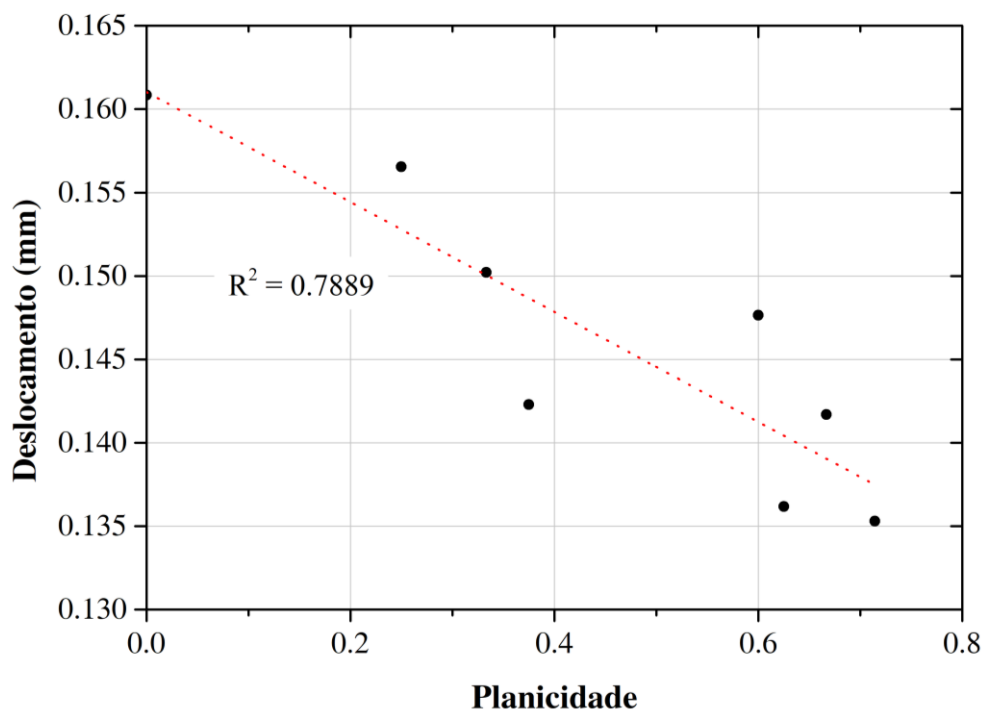
**Figura 4.8.** Influência do Fator de Forma e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.



**Figura 4.9.** Influência da Esfericidade e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.

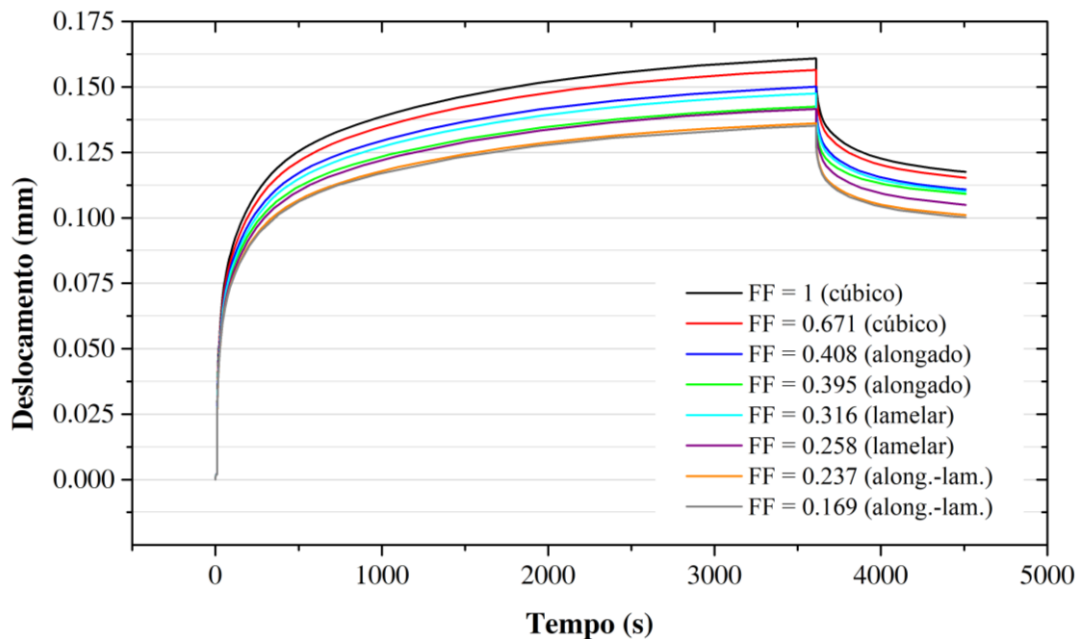


**Figura 4.10.** Influência do Alongamento e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.



**Figura 4.11.** Influência da Planicidade e deslocamento máximo de CPs sob ensaio de fluência estática.

É interessante notar que a diferença entre os resultados de deslocamentos máximos ao final do carregamento chega a 18,9%, o que mostra a grande influência da forma dos agregados na progressão de deformações permanentes. A Figura 4.12 apresenta as curvas médias para todos os testes, de acordo com o Fator de Forma das partículas.

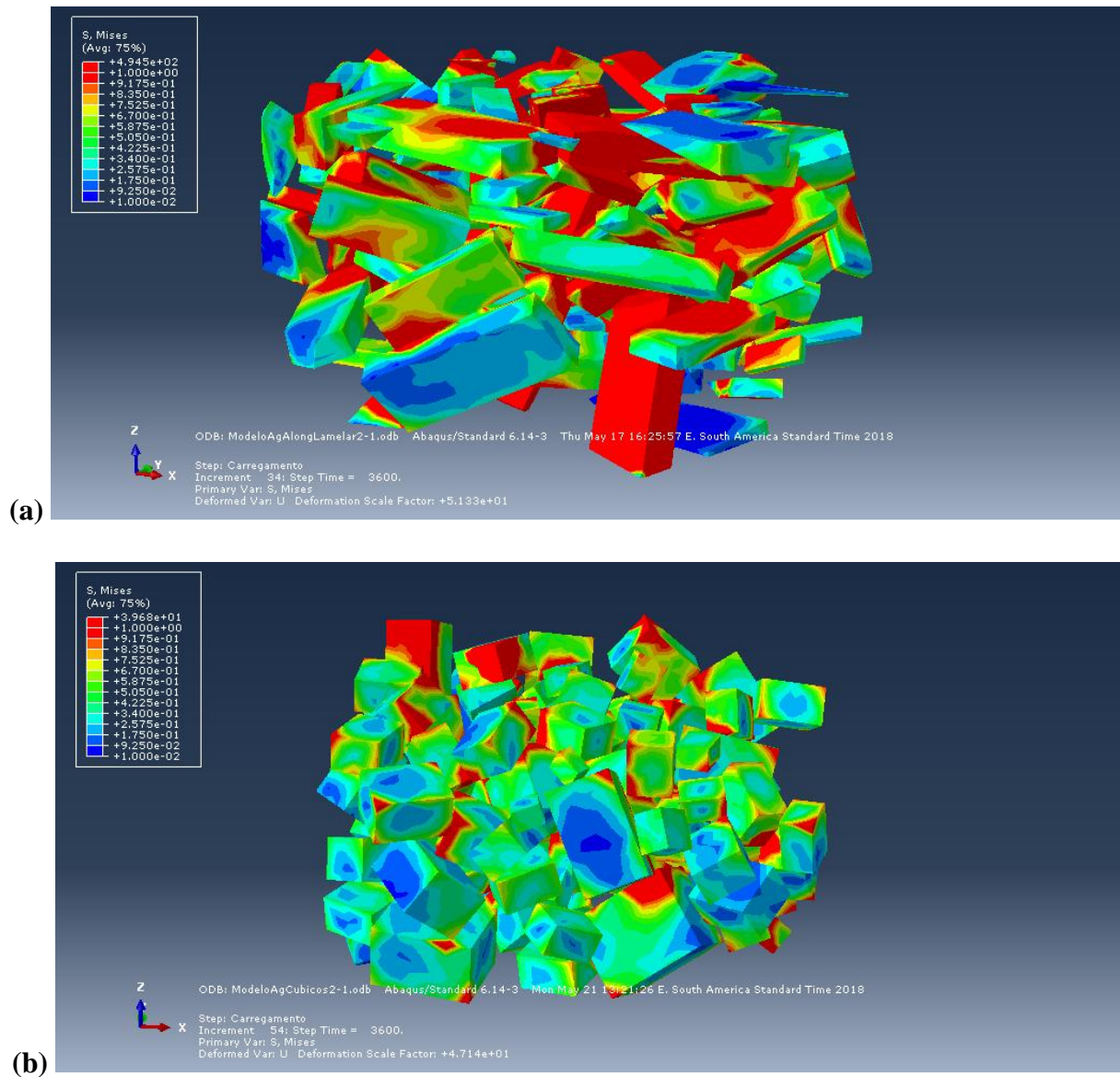


**Figura 4.12.** Curvas de deslocamentos verticais de corpos de prova sob ensaio de fluência estática com diferentes Fatores de Forma.

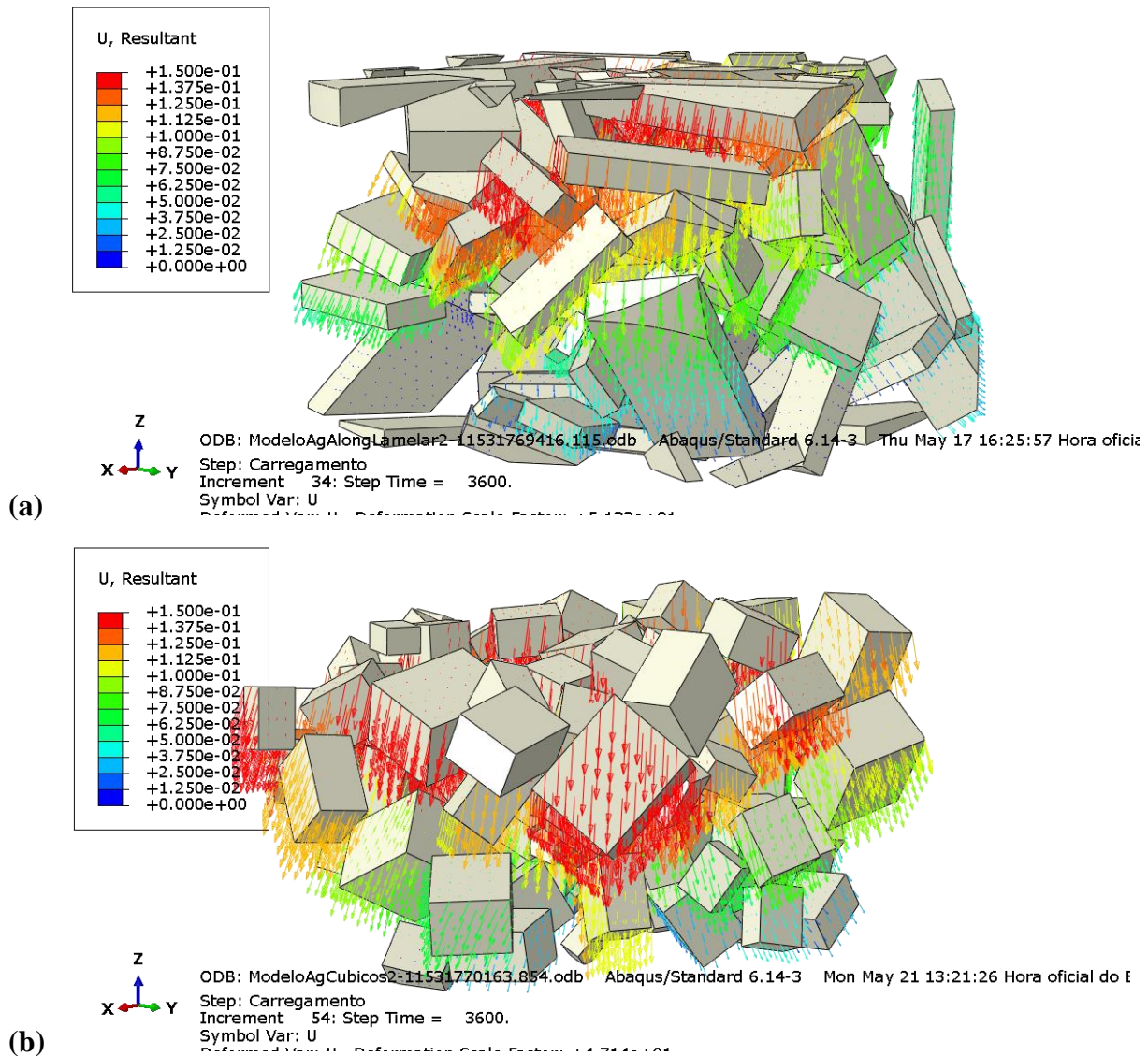
É possível inferir que esqueletos sólidos graúdos contendo partículas menos esféricas, e mais alongadas/planas conferem um maior emaranhado entre os agregados, visto que sua disposição aleatória leva a inferir um maior intertravamento entre as partículas. Percebe-se, na Figura 4.13, que ocorre um aumento de tensões nos contatos entre partículas, quando estas são alongadas-lamelares (a), em comparação com partículas cúbicas (b). Já a Figura 4.14 mostra os vetores de deslocamentos dos nós de agregados alongado-lamelares (a) e cúbicos (b) após o carregamento. É possível notar deslocamentos maiores (vetores vermelhos) para agregados cúbicos, o que permite inferir um maior intertravamento entre partículas alongadas-lamelares a partir de uma medida direta (deslocamentos). Outros autores já sugeriram que partículas mais angulares, menos arredondadas, tendem a ter desempenho melhor segundo sua capacidade de resistir à fluência (XU *et al.*, 2010; ZELELEW, 2008; PAZOS *et al.*, 2015; ROCCO e ELICES, 2009). Os resultados apresentados nesta pesquisa concordam, sob todos os aspectos analisados, com os experimentais apresentados por Arasan *et al.* (2011) a respeito da influência da forma dos agregados na fluência do concreto asfáltico. Segundo esses autores, isso pode ser resultado



de uma maior fragilidade e menor potencial de reorientação de agregados mais planos e/ou alongados. Apesar desses tipos de agregados resultarem em uma maior dificuldade de compactação e serem mais susceptíveis a esforços de fadiga, contribuem para uma maior resistência à deformação.



**Figura 4.13.** Concentração de tensões entre partículas (a) alongadas-lamelares e (b) cúbicas.

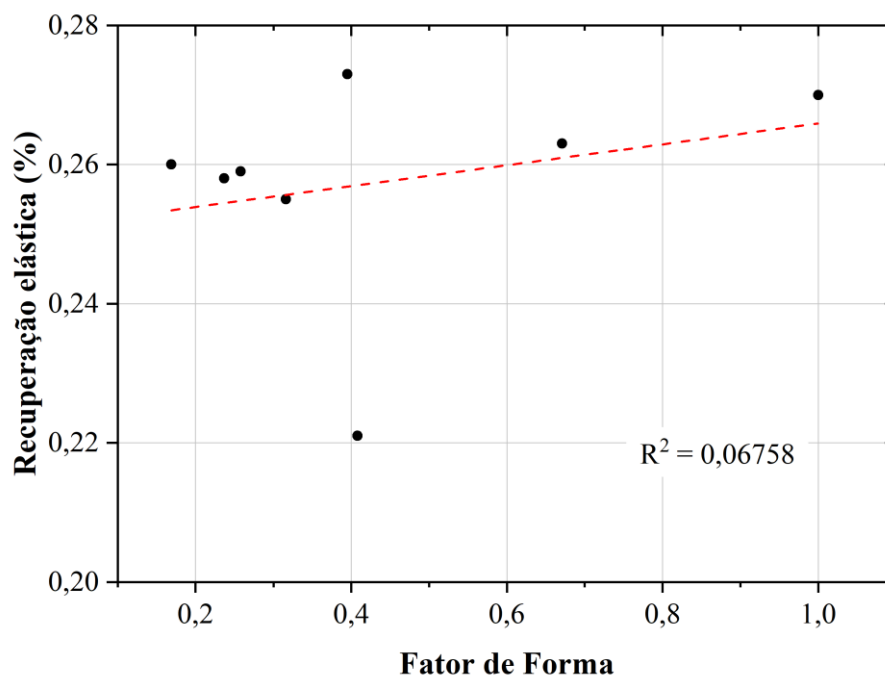


**Figura 4.14.** Vetores de deslocamentos indicando intertravamento entre partículas (a) alongadas-lamelares e (b) cúbicas.

A fim de avaliar a recuperação elástica dos testes segundo suas diferentes formas, a Tabela 4.6 apresenta a diferença entre os deslocamentos ao final do descarregamento e ao final do carregamento. A avaliação da deformação plástica permanente variando a forma não é muito conclusiva, com baixa correlação conforme mostra a Figura 4.15. Isso sugere que a variação da forma não implica em variações significativas de deformações permanentes geradas.

**Tabela 4.6.** Análise de deslocamentos para diferentes formas de agregados graúdos sob ensaio de fluência estática.

Teste	$\delta_{3600}$ [mm]	$\delta_{4500}$ [mm]	$\frac{\delta_{3600} - \delta_{4500}}{\delta_{3600}}$ [%]
1	0,1609	0,1175	27,0%
2	0,1565	0,1153	26,3%
3	0,1502	0,1092	27,3%
4	0,1423	0,1108	22,1%
5	0,1477	0,1101	25,5%
6	0,1417	0,1050	25,9%
7	0,1362	0,1011	25,8%
8	0,1353	0,1001	26,0%
		Média	25,7%

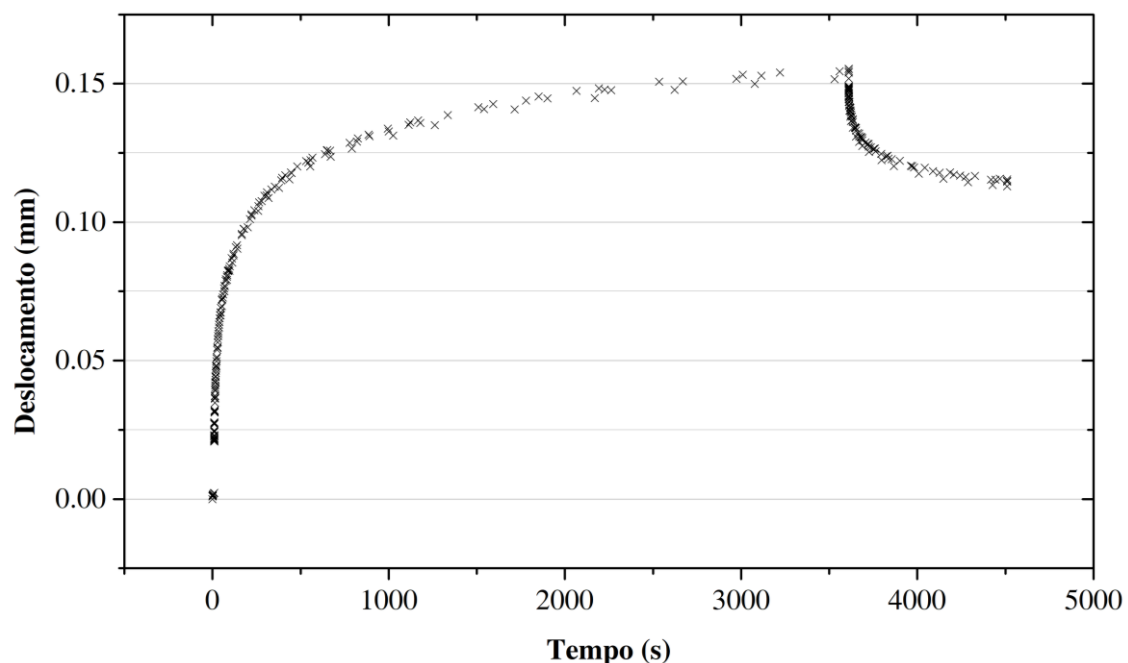


**Figura 4.15.** Correlação entre Fator de Forma e deformação permanente.

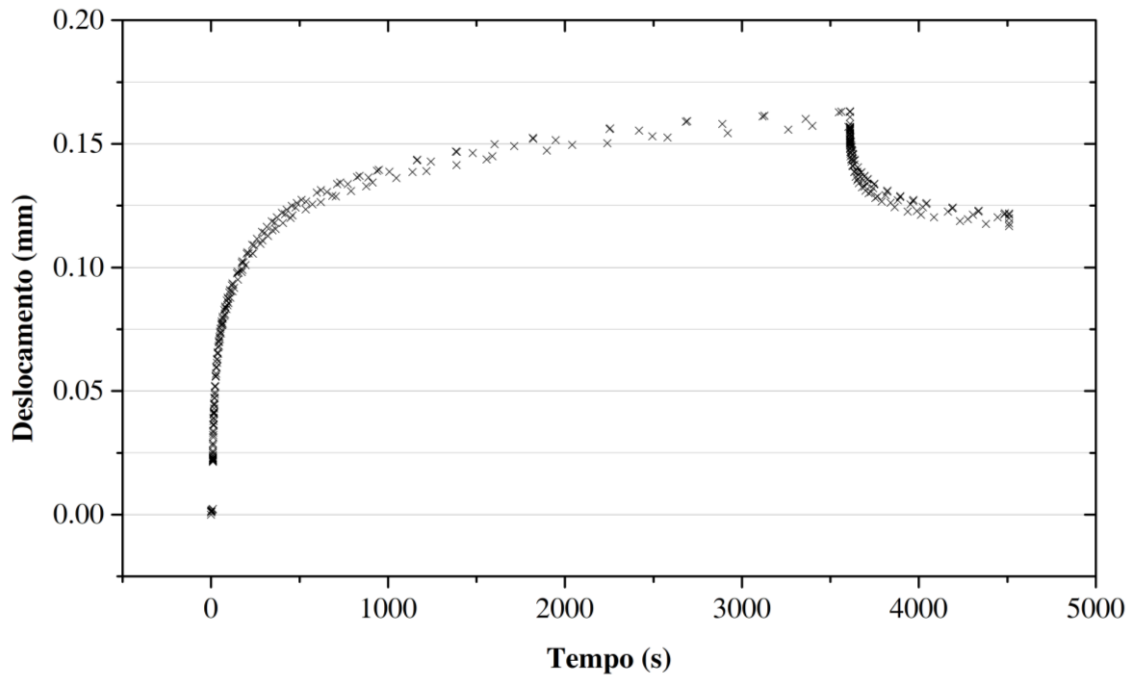
#### 4.4 INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA PROGRESSÃO DE DESLOCAMENTOS SOB ENSAIO DE FLUÊNCIA ESTÁTICA

Na abordagem da fase ESG e sua influência na formação de deformações permanentes no concreto asfáltico, foi analisada também interferência do tamanho dos agregados e a qualidade de sua graduação. Para tanto, foram feitas análises similares às anteriores, porém fixando a forma das partículas e alternando a distribuição granulométrica das mesmas. Os ensaios de fluência estática foram simulados em corpos de prova contendo ESG com curvas granulométricas correspondentes ao centro, e aos limites inferior e superior da Faixa C do DNIT, conforme representado na Figura 3.19 da Metodologia. A escolha dessas três curvas se deve ao fato de que, para as dimensões de CP simuladas, as Faixas A e B do DNIT impossibilitavam uma geração de partículas densa pelo algoritmo utilizado.

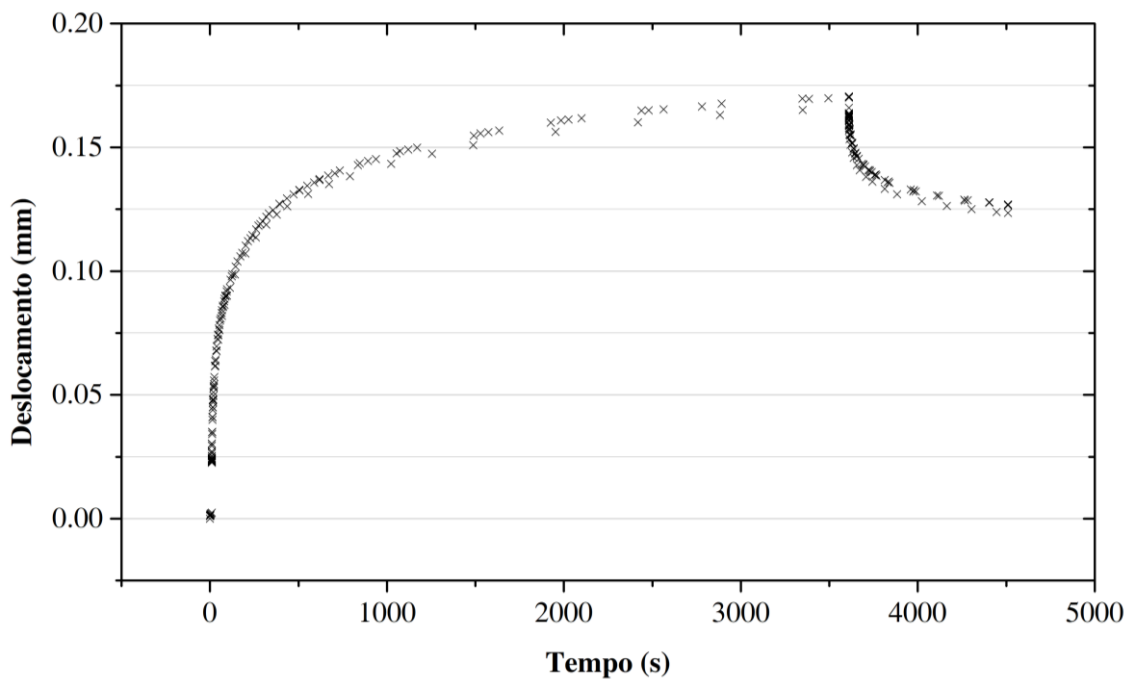
Para cada curva granulométrica ensaiada, foram realizados cinco testes, a fim de eliminar o efeito da variação da disposição dos agregados no interior da mistura. As Figuras 4.16 a 4.18 apresentam as curvas de deslocamento *versus* tempo dos cinco testes de cada análise, a fim de apresentar a baixa dispersão das mesmas.



**Figura 4.16.** Curvas deslocamento *versus* tempo para ESG no centro da Faixa C.

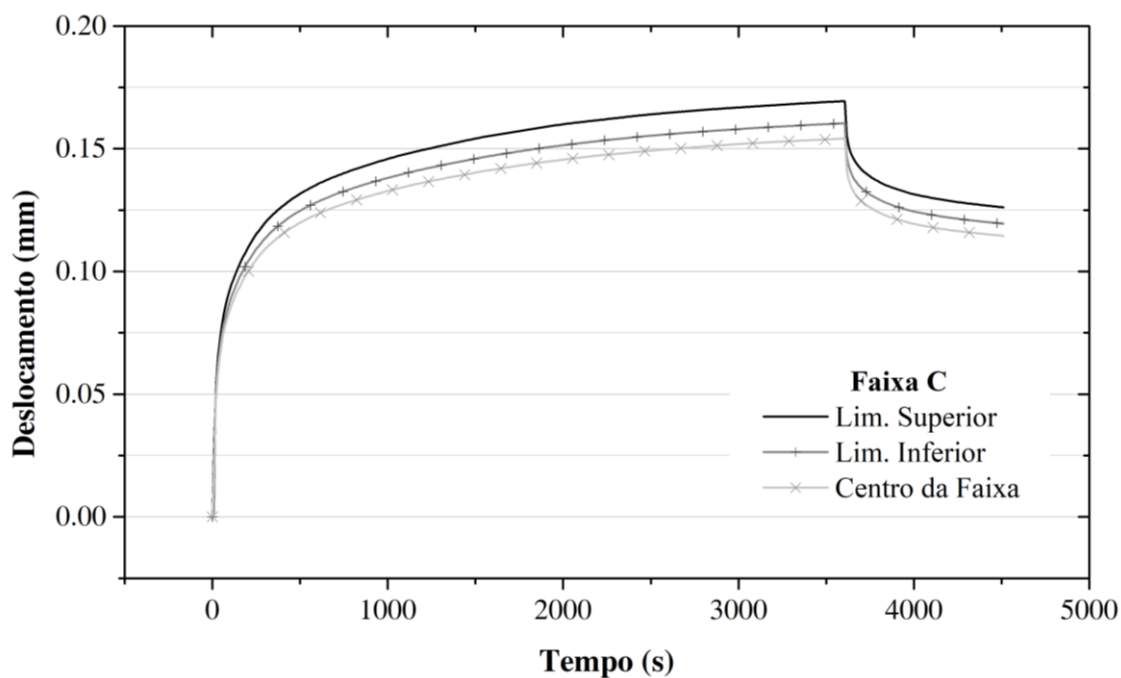


**Figura 4.17.** Curvas deslocamento *versus* tempo para ESG no limite inferior da Faixa C.



**Figura 4.18.** Curvas deslocamento *versus* tempo para ESG no limite superior da Faixa C.

Após as simulações dos cinco testes para cada distribuição granulométrica de agregados graúdos estudada, foram construídas curvas médias, conforme apresentado na Figura 4.19. Os resultados mostram que o cenário no qual os deslocamentos foram menores corresponde ao centro da Faixa C, enquanto que os limites inferior e superior tiveram maiores deslocamentos, nessa ordem.



**Figura 4.19.** Curva deslocamento *versus* tempo de CPs com diferentes granulometrias.

A Tabela 4.7 resume os valores absolutos encontrados ao final do carregamento e do descarregamento, e as respectivas recuperações elásticas. É possível notar que a recuperação elástica do CP para os três casos é extremamente semelhante, não sendo possível inferir tendências dependendo da granulometria do ESG.

**Tabela 4.7.** Resultados de deslocamentos máximos para diferentes granulometrias.

Ensaio	$\delta_{3600}$ [mm]	$\delta_{4500}$ [mm]	$\frac{\delta_{3600} - \delta_{4500}}{\delta_{3600}}$ [%]
Centro da Faixa	0,1542	0,1145	25,7%
Limite Inferior	0,1604	0,1195	25,5%
Limite Superior	0,1694	0,1261	25,6%
		Média	25,6%

O comportamento das curvas quanto às suas inclinações ao longo do tempo é idêntico, o que permite inferir que as diferenças no esqueleto sólido graúdo pouco importam nesse sentido. Entretanto, quando se trata da magnitude dos deslocamentos, observa-se fortemente a influência do ESG ao alterarem-se as distribuições granulométricas. Alguns fatores podem explicar o melhor comportamento de misturas cujo ESG é distribuído granulometricamente seguindo o centro, o limite inferior e o limite superior da Faixa C, respectivamente.

Primeiramente, reitera-se que as curvas analisadas correspondem à parcela graúda da Faixa C, somente. Tem-se que o limite superior da faixa C possui, como dimensão máxima de agregados, 12,7 mm, enquanto as outras distribuições chegam a 19,1 mm. Sabe-se que agregados de maiores dimensões induzem maior rigidez à mistura e, portanto, essa diferença de tamanho máximo por si só já é um fator que influencia o comportamento encontrado. Além disso, é interessante analisar a graduação das curvas. Para isso, foi aproximada a seguinte função potência às curvas, desenvolvida por Fuller e Thompson (1907):

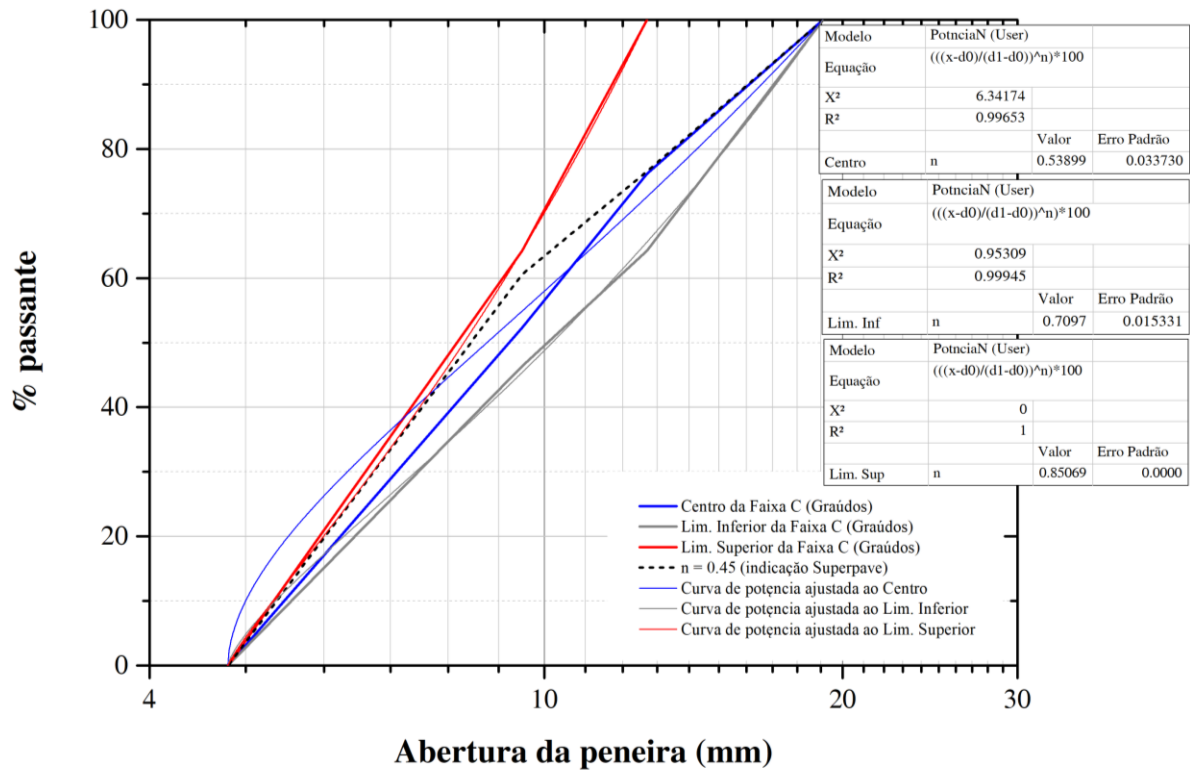
$$P(d) = \left(\frac{d-d_0}{D-d_0}\right)^n \quad (4.2)$$

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

Segundo os autores, para uma maior densidade do pacote de partículas,  $n$  deve ser aproximadamente igual a 0,5. A metodologia *Superpave* inclusive recomenda, para adoção da curva granulométrica completa, considerando agregados miúdos e graúdos,  $n \approx 0,45$  para uma mistura bem graduada e, portanto, densa. Para as três curvas adotadas neste estudo, foram aproximadas as funções potências, de forma a determinar o valor de  $n$  que mais se aproxima a elas. A Figura 4.20 apresenta as aproximações não-lineares e seus respectivos valores de  $n$ , resumidos na Tabela 4.8.

Conforme esperado, os valores de  $n$ , do mais próximo ao mais distante de 0,5, foram encontrados para o ESG no centro da faixa, no limite inferior e no limite superior. Isso mostra que a mistura composta no centro da faixa C é mais densa que as outras e, portanto, resiste melhor às deformações impostas ao corpo de prova sob ensaio de fluência estática, visto que as partículas de agregados preenchem de maneira mais eficiente os VAM-G.





**Figura 4.20.** Interpolações não-lineares de funções de potência para as curvas granulométricas estudadas.

**Tabela 4.8.** Relação entre  $n$  e deslocamentos máximos.

Ensaio	$n$	$\delta_{3600}$ [mm]
Centro da Faixa	0,5390	0,1542
Limite Inferior	0,7097	0,1604
Limite Superior	0,8507	0,1694



# CAPÍTULO V

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo tem por objetivo enunciar as conclusões alcançadas por esta pesquisa, de forma a sintetizar o conhecimento obtido. São feitas, ainda, sugestões para pesquisas futuras a fim de complementar e elucidar pontos deste trabalho.

### 5.1 CONCLUSÕES

A modelagem numérica do concreto asfáltico no presente trabalho adotou algumas simplificações para a concepção do modelo. Primeiramente, o material foi dividido em duas fases: Matriz de Agregados Finos (MAF) e esqueleto sólido graúdo (ESG). A primeira delas engloba o fíler, o ligante asfáltico, os agregados miúdos e os vazios, visto que a influência de cada um desses materiais está incorporada ao comportamento caracterizado da MAF. Já a segunda fase, correspondente aos agregados graúdos, responsáveis por conferir rigidez à mistura, foi simplificada de forma a caracterizá-la por sua forma média, classificada como cúbica, seguindo razões de forma encontradas experimentalmente, seguindo especificações da Norma ABNT NBR 7809 (1983).

A representação do esqueleto sólido graúdo no modelo pode seguir diversos procedimentos. Idealmente, a disposição dos agregados no modelo numérico deveria seguir exatamente aquela encontrada nos corpos de prova reais ensaiados, entretanto isso demandaria o uso de tomografias de Raios-X, além de algoritmos computacionais capazes de representar em três dimensões as localizações e contornos exatos das partículas no meio da matriz de agregados finos. A fim de simplificar esse procedimento, foi implementado um pseudocódigo computacional que fosse capaz de gerar um empacotamento de partículas com a forma de um paralelogramo de razões entre lados compatíveis com as encontradas experimentalmente. O algoritmo, utilizando-se de um empacotamento do tipo frente de avanço, segue especificações de forma, tamanho (curva granulométrica), porosidade do pacote (VAM-G), e gera um conjunto aleatório de partículas dispostas num domínio pré-fixado, sem que elas se sobreponham no espaço. Considerando que o pacote de partículas é randômico, e não segue exatamente a

disposição real, sugere-se a realização de simulações com um grande número de pacotes de partículas, a fim de eliminar o efeito da aleatoriedade por meio de tratamentos estatísticos.

De posse das definições geométricas do corpo de prova, do ESG e, por conseguinte, da MAF, busca-se a caracterização dos modelos constitutivos das fases constituintes. Os agregados calcários são considerados materiais elásticos, sendo necessário apenas de seu módulo de elasticidade para caracterizá-lo no programa ABAQUS. Entretanto, para a matriz de agregados finos necessita-se de uma definição de suas características viscoelásticas. Utilizando-se de resultados de ensaio de fluência estática de corpos de prova de MAF, busca-se a curva de Relaxação do material. Para isso, foi utilizado o método de interconversão baseado na Lei de Potência e, de posse da função  $E(t)$ , aproxima-se uma Série de Prony, a fim de caracterizar o comportamento da mesma. O *software* ABAQUS requer, como parâmetro de entrada para o modelo constitutivo de materiais viscoelásticos, coeficientes normalizados de módulo volumétrico e cisalhante obtidos da Série de Prony aproximada à função Relaxação. Caracterizados e calibrados os modelos constitutivos e geométricos dos materiais, pode-se construir o corpo de prova virtual a ser ensaiado.

A grande aleatoriedade dos agregados no interior do corpo de prova induz a um maior refinamento da malha necessária para a simulação em Elementos Finitos. De posse do CP já com a malha definida, o mesmo é ensaiado de forma a aplicar uma carga estática de 100 kPa por 3600 s, com posterior descarregamento por 900 s. Depois de realizadas 30 simulações com diferentes ESG, as evoluções dos deslocamentos ao longo do tempo do ensaio são apresentadas e a média das curvas representa o modelo, em geral. Os resultados médios dos ensaios numéricos são comparados aos resultados médios dos ensaios experimentais e o modelo é validado, com erro relativo entre numérico e experimental igual a 0,26% ao final do carregamento, e 1,39% ao final do descarregamento.

De posse do modelo validado, é possível utilizá-lo para estudar a influência de parâmetros do modelo. Objetivou-se analisar características geométricas da fase ESG, de maneira a entender como a forma e a granulometria das partículas de agregados graúdos interferem nos deslocamentos do corpo de prova sob ensaio de fluência estática. Para avaliar a influência da forma das partículas, foram gerados agregados com diferentes relações de forma, passando por todas as classificações, para que fossem obtidos coeficientes de correlação entre os deslocamentos e as relações de forma. Foram analisados o Fator de Forma, a Esfericidade, o Alongamento e a Planicidade das partículas, e concluiu-se que, dentre esses, o Fator de Forma

é a relação que melhor se correlaciona com a fluência da mistura, sendo que foi possível observar que partículas mais cúbicas se deformam mais durante a fase de carregamento.

Para a avaliação da influência da granulometria dos agregados graúdos na fluência de misturas asfálticas, foram ensaiados CPs graduados conforme o centro e limites inferior e superior da Faixa C do DNIT. Como o ESG referente ao centro da Faixa C possuiu o melhor comportamento quanto à evolução das deformações, foi possível concluir que, conforme esperado, misturas mais bem graduadas e com agregados maiores resistem mais à fluência.

O modelo construído, devidamente calibrado e validado a partir de dados experimentais, mostra-se extremamente satisfatório para o estudo e análise de parâmetros do concreto asfáltico e suas fases constituintes. No presente estudo, foi possível entender a influência da forma e da granulometria dos agregados graúdos na resistência à fluência da mistura, entretanto, a gama de possibilidades de variações possíveis de serem feitas é vasta. O modelo pode ainda, se devidamente enriquecido, simular outros ensaios, além do ensaio de fluência estática.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Inicialmente, sugere-se a adaptação de um algoritmo que gere um empacotamento de partículas que possam variar a forma, de modo a incluir diferentes angulosidades e gerar, dessa forma, maior intertravamento.

Para a construção de um modelo mais realista e diminuir efeitos passíveis de calibração no modelo numérico, sugere-se ainda a caracterização real dos agregados constituintes, utilizando-se de técnicas como a tomografia de raios-X.

Pode ser importante, também, incluir os vazios do concreto asfáltico como uma fase do modelo, considerando uma distribuição não uniforme, visto que correspondem a partes com maior deformabilidade.

Implementar uma *User Material* (UMAT) para contemplar, em uma única simulação, as fases de carregamento e descarregamento, alterando o  $E_{\infty}$  no momento de troca entre os estágios.

Realizar simulações numéricas utilizando-se de outras abordagens, como o Método dos Elementos Discretos (DEM) e/ou o Método Estendido dos Elementos Finitos (XFEM), para avaliar outros tipos de dano, como o trincamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1983) NBR 7809: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_ (1989) NBR 6954: lastro padrão: determinação da forma do material. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_ (2000) NBR NM 27: Agregados – Redução de amostra de campo para ensaios de laboratório. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AHO, B., VAVRIK, W. & CARPENTER, S. (2001). Effect of flat and elongated coarse aggregate on field compaction of hot-mix asphalt. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 1761(01): 26–31.
- ARAGÃO, F.T.S., HARTMANN, D.A., KIM, Y.-R., MOTTA, L.M.G. & JAVAHERIAM, M.H. (2014). A numerical-experimental approach to characterize fracture properties of asphalt mixtures at low in-service temperatures. *Transp. Res. Board 93rd Annu. Meet.* January 12-16, Washington, D.C., : 1–17.
- ARAGÃO, F.T.S., HARTMANN, D.A., PAZOS, A.R.G. & KIM, Y.-R. (2015a). Virtual fabrication and computational simulation of asphalt concrete microstructure. *Int. J. Pavement Eng.*, (July 2015): 1–12.
- ARAGÃO, F.T.S., HARTMANN, D.A., VARGAS, G.A.B., PAZOS, A.R.G. & KIM, Y.-R. (2015b). Modelagem computacional microestrutural: uma alternativa para a caracterização do comportamento mecânico de misturas asfálticas. *XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET*, Ouro Preto, Brasil (1): 288-299.
- ARAGÃO, F.T.S. & KIM, Y.-R. (2014). Modeling the effects of constituent properties on the mechanical behavior of asphalt mixtures. *Transp. Res. Rec.*, (2403): 1–12.
- ARAGÃO, F.T.S., KIM, Y., KARKI, P. & LITTLE, D.N. (2011). Semiempirical, analytical, and computational predictions of dynamic modulus of asphalt concrete mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2181(1): 19–27.
- ARASAN, S., YENERA, E., HATTATOGLU, F., HINISLIOGLUA, S. & AKBULUTA, S. (2011). Correlation between shape of aggregate and mechanical properties of asphalt concrete. *Road Mater. Pavement Des.*, 12(2): 239–262.

- BAGI, K. (2005). An algorithm to generate random dense arrangements for discrete element simulations of granular assemblies. *Granul. Matter*, 7(1): 31–43.
- BARROSO, L.X. (2018). Avaliação da dosagem e do comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos em Goiás. Dissertação de Mestrado, PPG-GECON, UFG, Goiânia, GO, 73p.
- BENSON, F.J. (1967). Effects of aggregate size , shape , and surface texture on the properties of bituminous mixtures — a literature survey : 12–22.
- BESSA, I.S., BRANCO, V.T.F.C., SOARES, J.B. & NETO, J.A.N. (2015). Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt. *Am. Soc. Civ. Eng.*, 27(2001).
- BROWN, E.R. & BASSETT, C.E. (1989). The effects of maximum aggregate size on properties of asphalt aggregate mixes (July).
- BUTTLAR, W.G. & YOU, Z. (2001). Discrete element modeling of asphalt concrete: microfabric approach. *Transp. Res. Rec.*, 1757(1): 111–118.
- CASTILLO, D., CARO, S., DARABI, M. & MASAD, E. (2017). Influence of aggregate morphology on the mechanical performance of asphalt mixtures. *Road Mater. Pavement Des.*, 0(0): 1–20.
- CHRISTENSEN, R.M. (2014). *Theory of viscoelasticity , an introduction*. Academic Press Inc., New York, USA, 364p.
- DAI, Q. (2011). Two- and three-dimensional micromechanical viscoelastic finite element modeling of stone-based materials with x-ray computed tomography images. *Constr. Build. Mater.*, 25(2): 1102–1114.
- DAI, Q. & YOU, Z. (2007). Prediction of creep stiffness of asphalt mixture with micromechanical finite-element and discrete-element models. *J. Eng. Mech.*, 133(2): 163–173.
- DENBY, E.F. (1975). A note on the interconversion of creep, relaxation and recovery. *Rheol. Acta*, 14(7): 591–593.
- DNER (1998) DNER-ME 083/98: Agregados – análise granulométrica. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, Rio de Janeiro.

- DNIT (2006) DNIT 031/06-ES: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes, Rio de Janeiro.
- FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M.; BEJA, I. A. (2017). Agregados para a Construção Civil. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Ed. G.C. Isaia. 3ªed. São Paulo, IBRACON, 2017. v. 2.
- FARMER, I. (1983). Engineering behaviour of rocks. Eng. Geol., 2nd edn. Chapman and Hall Ltd, London, 19.
- FULLER, W.B. & THOMPSON, S.E. (1907). The Law of Proportioning Concrete. Transactions, ASCE, Vol. 59, 67-118.
- GARCÍA, L.M. (2017). Influência da argamassa asfáltica na fluência de uma mistura idealizada. Dissertação de Mestrado, PPG, UnB, Brasília, DF, 114p.
- HOPKINS, I.L. & HAMMING, R.W. (1957). On creep and relaxation. J. Appl. Phys., 28(8): 906–909.
- HU, J., QIAN, Z., WANG, D. & OESER, M. (2015). Influence of aggregate particles on mastic and air-voids in asphalt concrete. Constr. Build. Mater., 93.
- HUANG, Y.H. (1993). Pavement analysis and design. Pearson Education, NJ, USA, 775p.
- 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. Can. J. Civ. Eng., 37(8): 1125–1136.
- KIM, Y.. R. & LITTLE, D.N. (1990). One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete 116(4): 751–772.
- KIM, Y.R. (2009). Modeling of Asphalt Concrete. ASCE Press. New York, USA, 460p.
- LEADERMAN, H. (1958). “Viscoelasticity phenomena in amorphous high polymeric systems.” Rheology, Vol. II, F. R. Eirich, ed., Academic, New York.
- LIU, H., HAO, P. & XU, J. (2017a). Effects of nominal maximum aggregate size on the performance of stone matrix asphalt. Appl. Sci., 7(2): 126.
- LIU, Y., ZHOU, X., YOU, Z., YAO, S., GONG, F. & WANG, H. (2017b). Discrete element modeling of realistic particle shapes in stone-based mixtures through matlab-based imaging process. Constr. Build. Mater., 143: 169–178.

- LU, Y. & WRIGHT, P.J. (1998). Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures. *Comput. Struct.*, 69(2): 139–147.
- MELLO, L.G.R. (2008). O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado, PPG, UnB, Brasília, DF, 263p.
- MORFA, C.A.R., CORTÉS, L.A., FARIAS, M.M., PÉREZ MORALES, I., VALERA, R.R. & NAVARRA, E.O.I. Systemic characterization and evaluation of particle packings as initial sets for discrete Element Simulation. *Comp. Part. Mech.* (2018) 5: 319.
- PARK, S.W.S. & KIM, Y.R. (1999). Interconversion between relaxation modulus and creep compliance for viscoelastic solids. *J. Mater. Civ. Eng.*, (February): 76–82.
- PAZOS, A.G., ARAGÃO, F.T.S. & MOTTA, L.M.G. (2015). Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas : 147.
- PÉREZ MORALES, I., FARIAS, M.M. de, VALERA, R.R., MORFA, C.R. & CARVAJAL, H.E.M. (2011). Contributions to the generalization of advancing front particle packing algorithms. *Proc. 2011 Am. Control Conf.*, (March): 1885–1891.
- ROCCO, C.G. & ELICES, M. (2009). Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. *Eng. Fract. Mech.*, 76(2): 286–298.
- RODRIGUES, I.A. (2018). Análise do Dano em Mistura de Agregados Finos (MAF). Dissertação de Mestrado, PPG, UnB, Brasília, DF.
- SIDES, A., UZAN, J. & PERL, M. (1985). Comprehensive viscoelasto-plastic characterization of sand-asphalt compressive and tensile cyclic loading. *J. Test. Eval.*, 13(1): 49–59.
- SILVA, H.N. (2009). Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas : operacionalização computacional e análise pelo método dos elementos finitos : 190.
- VALERA, R.R., PÉREZ MORALES, I., VANMAERCKE, S., MORFA, C.R., CORTÉS, L.A. & CASAÑAS, H.D.G. (2015). Modified algorithm for generating high volume fraction sphere packings. *Comput. Part. Mech.*, 2(2): 161–172.
- WANG, H., HUANG, Z., LI, L., YOU, Z. & CHEN, Y. (2014). Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on x-ray ct microstructure images. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, 1(1): 55–61.

- WITCZAK, M.W., KALOUSH, K., PELLINEN, T., EL-BASYOUNY, M. & QUINTUS, H. Von. (2002). Simple Performance Test for Superpave Mix Design. Design.,
- XU, R., YANG, X.H., YIN, A.Y., YANG, S.F. & YE, Y. (2010). A three-dimensional aggregate generation and packing algorithm for modeling asphalt mixture with graded aggregates. *J. Mech.*, 26(2): 165–171.
- YOU, Z., ADHIKARI, S. & KUTAY, M.E. (2009). Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the x-ray computed tomography images. *Mater. Struct.*, 42(5): 617–630.
- ZELELEW, H. (2008). Simulation of the permanent deformation of asphalt concrete mixtures using discrete element method (dem). (May): 271.
- ZHOU, C., ZHANG, M., LI, Y., LU, J. & CHEN, J. (2017). Influence of particle shape on aggregate mixture's performance: dem results. *Road Mater. Pavement Des.*, 0(0): 1–15.