

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DA MESOESCALA DO CONCRETO
CONSIDERANDO A VISCOELASTICIDADE**

ELLON BERNARDES DE ASSIS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA-DF: DEZEMBRO – 2018

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

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DA MESOESCALA DO
CONCRETO CONSIDERANDO A VISCOELASTICIDADE**

ELLON BERNARDES DE ASSIS

ORIENTADOR: FRANCISCO EVANGELISTA JUNIOR

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA-DF, DEZEMBRO –2018

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

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DA MESOESCALA DO
CONCRETO CONSIDERANDO A VISCOELASTICIDADE**

ELLON BERNARDES DE ASSIS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof.º Francisco Evangelista Junior, *Ph.D.* (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof.ª Michéle Dal Toé Casagrande, *D.Sc.* (ENC-UnB)
(Examinador interno)

Eng.º Carlos Valbson dos Santos Araújo, *MSc.* (PECC-UnB)
(Examinador externo)

BRASÍLIA-DF, DEZEMBRO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

ASSIS, ELLON BERNARDES DE

Modelagem computacional da mesoescala do concreto considerando a viscoelasticidade. [Distrito Federal] 2018.

xiii, 61p., 210 x 297 mm x (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Viscoelasticidade	2. Concreto
3. Mesoescala	4. Método dos Elementos Finitos
I. ENC/FT/UnB	II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSIS, E. B. (2018). Modelagem computacional da mesoescala do concreto considerando a viscoelasticidade. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ellon Bernardes de Assis

TÍTULO: Modelagem computacional da mesoescala do concreto considerando a viscoelasticidade

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2018

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

Ellon Bernardes de Assis
Faculdade de Tecnologia
CEP: 70910-900 Brasília – DF – Brasil
e-mail: ellonber@hotmail.com

Dedico esse trabalho aos meus pais, Eliseu e Maria Neusa, e ao meu querido irmão, Eliseu Henrique. Pelo amor, cuidado e apoio constante.

AGRADECIMENTOS

A Deus que a todo momento me sustenta e me dá as forças que não tenho.

Aos meus pais, Eliseu e Maria Neusa, agradeço pela confiança e por me apoiar sempre. Agradeço por sonhar comigo e pelo valor que deram para minha educação. São minha inspiração em todo o momento.

Ao meu querido irmão, Eliseu Henrique, agradeço por sempre me deixar um pouco mais feliz. Sua sinceridade, alegria, extroversão e inteligência me inspiram.

À Universidade de Brasília pelo apoio acadêmico prestado, especialmente com os editais de fomento a iniciação científica, com apoio da CAPES, CNPq e FAPDF.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, pela dedicação em transmitir seus conhecimentos e nos inspirar na vida acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, Francisco Evangelista Junior, agradeço por ter me orientado durante 4 anos ao longo da graduação e ter sido vital para minha inclusão no mundo da pesquisa científica. Agradeço pelo apoio e confiança depositada em mim.

Ao GETEC-UnB e ao professor Marcos Honorato, por ter sido um amigo, inspiração e fonte de oportunidades preciosas durante a graduação. Os seus conselhos e conversas certamente contribuíram muito para meu crescimento profissional e acadêmico.

Ao Carlos Valbson, pelo apoio durante o desenvolvimento do TCC.

Aos amigos conquistados até aqui pelo apoio e companheirismo, especialmente em momentos difíceis. Agradeço aos amigos parceiros de graduação, os quais tive o privilégio de trabalhar e aprender juntos.

À Jéssica Ribeiro, por me apoiar em todos os momentos, por ter seu carinho e inteligência ao meu lado esse trabalho foi mais leve.

RESUMO

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA MESOESCALA DO CONCRETO CONSIDERANDO A VISCOELASTICIDADE

Autor: Ellon Bernardes de Assis

Orientador: Francisco Evangelista Junior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – UnB

Brasília, Dezembro de 2018

A previsão do comportamento do concreto ao longo do tempo é um dado importante para garantir a vida útil desejada às estruturas. Nesse sentido, a determinação da função fluência do concreto é fundamental para avaliar as deformações e deslocamentos de estruturas ao longo do tempo de modo a garantir a segurança e permitir sua adequada utilização. Nesse aspecto, o estudo do concreto através de modelos que considerem sua heterogeneidade permite analisar a influência de suas diferentes fases, o que promove um entendimento mais profundo dos mecanismos que definem o comportamento em macroescala. O presente trabalho analisa a fluência do concreto levando em consideração a sua natureza compósita. Para tanto, simulações são realizadas utilizando o Método dos Elementos Finitos e considerando o comportamento elástico dos agregados graúdos envoltos em argamassa com comportamento viscoelástico. O modelo em elementos finitos tridimensionais consiste em um corpo de prova cilíndrico submetido à compressão. Os passos do algoritmo para geração automatizada de modelos tridimensionais da mesoestrutura do concreto considerando agregados poliédricos são apresentados no trabalho. Inicialmente foram construídos modelos para análise da influência do volume de agregados. Além disso é proposta uma metodologia para retroanálise e determinação da função fluência da argamassa e pasta de cimento a partir de dados experimentais do concreto. Por fim, é realizada uma retroanálise para estimativa do módulo de elasticidade dos agregados do concreto a partir de dados experimentais de fluência do concreto e da argamassa. Os resultados mostram que o aumento do volume de agregados diminui tanto as deformações instantâneas quanto o percentual de deformação adicional devido a fluência. Usando a metodologia de retroanálise foi possível estimar a função fluência da argamassa e pasta de cimento. Por outro lado, a escolha do módulo de elasticidade dos agregados foi considerada uma grande fonte de incerteza nas análises, carecendo de estudos mais detalhados. O estudo mostrou o potencial da metodologia usada para geração da mesoestrutura do concreto e seu uso na pesquisa sobre fluência.

Palavras chave: função fluência; viscoelasticidade; concreto; heterogeneidade

ABSTRACT

COMPUTATIONAL MODELING OF CONCRETE AT MESOSCALE TAKING INTO ACCOUNT VISCOELASTICITY

Author: Ellon Bernardes de Assis

Supervisor: Francisco Evangelista Junior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – UnB

Brasília, December 2018

The prediction of concrete behavior over time is an important information to guarantee the desired lifespan of structures. In this aspect, the evaluation of concrete creep compliance is primordial to assess the structure strain and displacement over time so that use is appropriate. In this aspect, the study of concrete using models that take account its heterogeneity allows the analysis of influences from its different phases, this leads to a further understanding of mechanisms that define macroscale behavior. This work analyze the concrete creep taking into consideration its composite nature. For that, simulations are performed using Finite Element Method and taking account the elastic behavior of coarse aggregates surrounded by mortar with viscoelastic behavior. The three dimensional finite element model is composed by a cylindrical specimen under compression load. The steps for automatic generation of three-dimensional models of concrete's mesostructure using polyhedron aggregates are presented in this work. At first, it was built models for the analysis of aggregate volume influence. Besides that, a methodology is proposed for retro-analysis and calculation of mortar and cement paste creep compliance using concrete creep experimental data. Lastly, a retro-analysis is done for estimation of elastic modulus of concrete's aggregates using experimental creep data of concrete and mortar. The results shows that the increase of coarse aggregates decrease the instantaneous strain and the percent of additional strain due to creep. Using retro-analysis methodology it was possible to estimate mortar and cement paste creep compliance. However, the choice of aggregate's elastic modulus was a major uncertainty factor in the analysis thus it is suggested further detailed studies. The study showed the potential of the methodology of concrete's mesostrucutre generation and its application in the research about creep.

Keywords: creep compliance; viscoelasticity; concrete; heterogeneity

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação.....	2
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Viscoelasticidade	4
3.2. Modelagem do concreto em mesoescala	7
3.2.1. Wriggers e Moftah (2006).....	8
3.2.2. Lavergne <i>et al.</i> (2015).....	11
3.2.3. Das, Maroli e Neithalath (2016).....	17
3.2.4. Bary, Bourcier e Helfer (2017)	22
4. METODOLOGIA	27
4.1. Script para geração dos modelos	27
4.2. Modelo 1 – Influência do volume de agregados graúdos	33
4.3. Modelo 2 – Retroanálise para determinação de $E(t)$ e $J(t)$ da matriz	34
4.3.1. Modelo 2a – Concreto Numérico	36
4.3.2. Modelo 2b – Argamassa Numérica	38
4.4. Modelo 3 – Retroanálise para estimativa de E do agregado	39
5. RESULTADOS	42
5.1. Resultados e Análise – Modelo 1	42
5.2. Resultados e Análise – Modelo 2	45
5.2.1. Modelo 2a – Concreto Numérico.....	45
5.2.2. Modelo 2b – Argamassa Numérica	48
5.2.3. Resumo dos resultados do modelo 2.....	51
5.3. Resultados e Análise – Modelo 3	52
5.4. Limitações dos modelos	54

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluência e recuperação. Adaptado de Lakes (2009)	5
Figura 2 – Relaxação e recuperação. Adaptado de Lakes (2009).....	5
Figura 3 – Modelo generalizado de Maxwell (ARAÚJO, 2018)	7
Figura 4 – Modelo generalizado de Kelvin (ARAÚJO, 2018).....	7
Figura 5 – Modelos de mesoestrutura do concreto. a) $V_{agreg} = 20\%$ b) $V_{agreg} = 40\%$ c) $V_{agreg} = 60\%$ (WRIGGERS; MOFTAH, 2006)	10
Figura 6 – Propriedades homogeneizadas usando a Curva de Fuller (WRIGGERS; MOFTAH, 2006).....	11
Figura 7 – Microestrutura gerada: a) unimodal, b) bimodal e c) concreto (LAVERGNE et al., 2015).....	13
Figura 8 – Resultados das curvas de fluência. a) Carregamento hidrostático b) Carregamento cisalhante (LAVERGNE et al., 2015).....	15
Figura 9 – Impacto da zona de transição na fluência (LAVERGNE et al., 2015).....	16
Figura 10 – Microestrutura do ERA. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016).....	18
Figura 11 – Efeito da fronteira, a) Carregamento b) Concentrações de tensão. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016)	19
Figura 12 – Condições de contorno periódicas para deformação ε_{22} aplicada (DAS; MAROLI; NEITHALATH, 2016)	19
Figura 13 – Influência do módulo de Young (E) dos agregados na tensão do conjunto, onde $\varepsilon_{22}=0,12\%$. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016).....	21
Figura 14 - Influência do volume de agregados na tensão do conjunto, onde $\varepsilon_{22}=0,12\%$. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016).....	21
Figura 15 – Mesoestrutura para 50% volume de agregados a) Agregado isotrópico b) Agregado achatado. Adaptado de Bary, Bourcier e Helfer (2017).....	23
Figura 16 – Deformação longitudinal para 40% em volume de agregados considerando diferentes condições de contorno. a) $e_{transição} = 0,2 \mu\text{m}$ b) $e_{transição} = 20 \mu\text{m}$. Adaptado de Bary, Bourcier e Helfer (2017)	25
Figura 17 – Deformações obtidas numericamente (símbolos) e analiticamente (linhas) para 50% de agregados e espessura da zona de transição indicada. Adaptado de Bary, Bourcier e Helfer (2017)	26
Figura 18 – Fluxograma função <i>inclusion_generator()</i>	28
Figura 19 – Processo de posicionamento (WRIGGERS; MOFTAH, 2006).....	29

Figura 20 – Fluxograma do script para posicionamento de agregados – <i>distribution_generator()</i>	31
Figura 21 – Fluxograma da função <i>curva_granu()</i> , responsável por coordenar a geração de agregados de acordo com a curva granulométrica	32
Figura 22 – Geometria típica dos modelos, eixos em mm a) Exemplo de agregado b) Distribuição dos agregados c) Detalhe seção no cilindro.....	32
Figura 23 - Função de relaxação adotada para argamassa	33
Figura 24 - Função Fluência, $J(t)$, calculada a partir da simulação	42
Figura 25 - Função Fluência Normalizada, $J(t)/J(0)$	43
Figura 26 – Deformação mínima principal. a) Elástica (t = 0) b) Elástica + Fluência (t = 100 dias)	44
Figura 27 – Módulo de relaxação experimental e numérico do concreto para diferentes $E_{arg}(t)$	46
Figura 28 – Função fluência experimental e numérica do concreto para diferentes $J_{arg}(t)$	47
Figura 29 – Função fluência, $J(t)$, para diferentes modelos com o mesmo volume de agregados e curva de relaxação da Arg-3.....	48
Figura 30 – Módulo de relaxação estimado (Arg-3) e da argamassa numérica para diferentes $E_{pasta}(t)$	50
Figura 31 - Função fluência da argamassa estimada e argamassa numérica para diferentes $J_{pasta}(t)$	51
Figura 32 – Curva $E(t)$ do concreto e curvas calculadas para a argamassa e pasta.....	51
Figura 33 – Curva $J(t)$ do concreto e curvas calculadas para a argamassa e pasta	52
Figura 34 – Módulo de relaxação para o concreto C4 experimental e os modelos numéricos testados com diferentes E_{agreg}	52
Figura 35 – Função fluência para o concreto C4 experimental e os modelos numéricos testados com diferentes E_{agreg}	53
Figura 36 – Módulo de relaxação para diferentes modelos utilizando $E_{agreg} = 40$ GPa	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades elásticas da argamassa e agregado (WRIGGERS; MOFTAH, 2006)	9
Tabela 2 - Dados do modelo viscoelástico da pasta de cimento. Adaptado de Lavergne <i>et al.</i> , (2015)	14
Tabela 3 – Propriedades dos materiais (DAS; MAROLI; NEITHALATH, 2016)	18
Tabela 4 – Parâmetros do modelo de Maxwell para a matriz (BARY; BOURCIER; HELFER, 2017).....	24
Tabela 5 - Curva granulométrica dos agregados	34
Tabela 6 – Dados dos materiais constituintes do concreto REF 0,367	35
Tabela 7 – Curva granulométrica agregado graúdo. Adaptado de Francinete Silva Junior (2017)	35
Tabela 8 – Curva granulométrica agregado miúdo. Adaptado de Francinete Silva Junior (2017)	35
Tabela 9 – Traço em massa, concreto REF 0,367. Adaptado de Francinete Silva Junior (2017)	35
Tabela 10 – Relaxação em termos de série de Prony regredida a partir de dados experimentais	36
Tabela 11 – Dados do modelo 2a – Concreto Numérico	37
Tabela 12 – Dados do modelo 2b – Argamassa Numérica	39
Tabela 13 – Dados dos materiais constituintes do concreto C4. Adaptado de Ward, Neville e Singh (1969)	40
Tabela 14 – Curva granulométrica agregado graúdo. Adaptado de Ward, Neville e Singh (1969)	40
Tabela 15 – Traço em massa, concreto C4. Adaptado de Ward, Neville e Singh (1969).....	40
Tabela 16 – Relaxação em termos de série de Prony regredida a partir de dados experimentais	41
Tabela 17 – Dados do modelo 3 – Concreto numérico C4	41
Tabela 18 – Comparação percentual da fluência com aumento de agregados	43
Tabela 19 –Análise elástica para estimativa inicial de E_0^{arg} , valor adotado sombreado	45
Tabela 20 –Análise elástica para estimativa inicial de E_{inf}^{arg} , valor adotado sombreado	45
Tabela 21 – Parâmetros de Prony estimados para $E_{arg}(t)$	46
Tabela 22 –Análise elástica para estimativa inicial de E_0^{pasta} , valor adotado sombreado	49

Tabela 23 –Análise elástica para estimativa inicial de $E_{\text{inf}}^{\text{pasta}}$, valor adotado sombreado	49
Tabela 24 – Parâmetros de Prony estimados para $E_{\text{pasta}}(t)$	50

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é um material que apresenta comportamento dependente do tempo. Essa característica do material demanda atenção quanto ao seu uso estrutural. O surgimento de deformações e tensões ao longo do tempo deve ser estimada e seus efeitos na integridade estrutural devem ser avaliados.

A fluência é um fenômeno presente no comportamento do concreto de cimento Portland. Ela se caracteriza pelo aumento de deformações sob tensão constante ao longo do tempo. Diversos trabalhos ao longo das últimas décadas buscaram estimar e prever as deformações lentas devido à fluência a partir da composição do concreto. De forma concisa, a fluência do concreto depende em grande parte do comportamento viscoelástico da pasta de cimento Portland e de deformações adicionais devido à variação de umidade nos poros do concreto.

A fluência deve ser considerada em projeto de estruturas de concreto armado e protendido. Os códigos normativos trazem formulações simplificadas para levar em conta as deformações adicionais ao longo do tempo. Entretanto, o projetista deve ter em mente que existem tipologias estruturais mais suscetíveis aos impactos da fluência. A recomendação técnica da RILEM (União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais de Construção, Sistemas e Estruturas) a respeito de fluência, a qual foi produzida por grupo técnico liderado por Zdeněk P. Bažant, propõe a seguinte classificação das estruturas com base em sua sensibilidade à fluência (RILEM TECHNICAL COMMITTEE TC-242-MDC, 2015).

Nível 1. Vigas de concreto armado, pórticos e lajes com vãos inferiores a 20 m e alturas até 30 m, fundações de concreto simples, muros de contenção.

Nível 2. Vigas ou lajes protendidas de vãos até 20 m, edifícios altos com até 100 m de altura.

Nível 3. Vigas caixão de vãos médios, pontes estaiadas ou em arco com vãos até 80 m, tanques, silos, pavimentos, revestimento de túneis.

Nível 4. Viga caixão protendida de vãos longos, pontes estaiadas ou em arco; grandes pontes construídas em múltiplas etapas através da junção de partes (balanços sucessivos); grandes barragens de gravidade, em arco ou contrafortes; torres de resfriamento; grandes telhados em casca; edifícios muito altos.

Nível 5. Pontes com vãos recordes, vasos e contenções nucleares, grandes estruturas offshore, grandes torres de resfriamento, telhados em cascas finas de vão recorde, pontes em arco esbeltas de vãos recorde, edifícios extremamente altos.

Devido à sua alta sensibilidade, a Rilem Technical Committee TC-242-MDC (2015) propõe que estruturas de nível 4 e 5 sejam analisadas através de algoritmo incremental considerando a função fluência do concreto.

O erro de estimativa da fluência pode ter consequências drásticas como o colapso da Ponte KB em Palau no ano de 1996 (BAŽANT; YU; LI, 2012). A Ponte apresentou deslocamentos excessivos e perda de protensão significativa com 18 anos de idade e após intervenção malsucedida, entrou em colapso. Esse acidente acendeu o alerta sobre o estudo da fluência do concreto, sobretudo a fluência de longa idade. Assim, pesquisas continuaram a ser realizadas para refinar os modelos existentes de previsão de fluência com base em dados existentes de deslocamentos de pontes. Como resultado, recentemente, Bažant em conjunto com comitê da RILEM propôs um refinamento de seu conhecido modelo B3 (RILEM TECHNICAL COMMITTEE TC-242-MDC, 2015).

No estudo do concreto é importante lembrar que ele se trata de um material compósito, extremamente heterogêneo em suas diferentes escalas, e seu comportamento depende diretamente das propriedades de seus constituintes. Assim, para entendimento da fluência do concreto, é necessário compreender a influência de cada fase do concreto. Considerando o concreto em mesoescala, ele pode ser caracterizado como sendo constituído de agregados graúdos envoltos em argamassa. A revisão bibliográfica (Capítulo 2) dessa monografia explora a literatura que utiliza simulação computacional do concreto em mesoescala para estudar como parâmetros em escalas menores afetam as propriedades do concreto em macroescala. Esse estudos ajudam na análise de fenômenos como a não-linearidade do concreto, fluência e retração.

1.1. Motivação

A utilização de simulação numérica é uma grande ferramenta na medida em que ela permite a análise de muitas variáveis, as quais em ensaios reais podem ser difíceis de avaliar ou implica em alto custo. Assim, o uso da simulação pode ajudar no entendimento do problema e orientar ensaios os quais são utilizados como validação do modelo numérico.

Por outro lado, a consideração da mesoestrutura dos materiais, considerando assim sua heterogeneidade, permite entender os mecanismos que envolvem as diferentes fases e geram o comportamento em macroescala do material.

Assim, a simulação numérica dos materiais considerando o comportamento de suas fases em mesoescala e microescala é uma importante ferramenta para o estudo da mecânica dos materiais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é implementar um modelo computacional em elementos finitos capaz de simular a viscoelasticidade do concreto considerando a heterogeneidade da sua mesoestrutura.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos para que se alcancem o objetivo geral são:

- Gerar distribuição e forma de agregados representativas da mesoestrutura do concreto;
- Automatizar a geração do modelo tridimensional em elementos finitos para vários volumes de agregados;
- Avaliar a influência do volume de agregados no comportamento de fluência do concreto;
- Avaliar a influência do módulo de elasticidade dos agregados no comportamento de fluência do concreto;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Teoria da Viscoelasticidade é comumente usada para definir o modelo constitutivo de materiais que apresentam deformações dependentes do tempo, isto é, um comportamento híbrido de sólido elástico e líquido viscoso. A seção 3.1 apresenta os conceitos fundamentais da viscoelasticidade.

Para análise da fluência do concreto através de simulação computacional foi realizada revisão bibliográfica acerca dos conceitos relevantes de modo a atingir os objetivos propostos. A simulação computacional do concreto considerando sua mesoescala é abordada em diversos trabalhos na literatura. A seção 3.2 explora alguns desses trabalhos, suas premissas e variáveis importantes. Essa análise é importante para definir as características do modelo a ser proposto bem como suas limitações

3.1. Viscoelasticidade

Materiais viscoelásticos são aqueles que apresentam características de sólidos elásticos lineares e também características de fluidos Newtonianos (CHRISTENSEN, 1982). Dessa forma, esses materiais apresentam variação de suas propriedades no decorrer do tempo sob carregamento. A Figura 1 ilustra o comportamento de materiais viscoelásticos sob tensão constante σ_0 no tempo. O surgimento de uma tensão aplicada provoca uma deformação elástica instantânea, no entanto, durante o tempo há um incremento de deformação caracterizando o fenômeno da fluência. Mecanismo similar ocorre no descarregamento, no qual há uma recuperação de deformação ao longo do tempo devido à parcela viscosa.

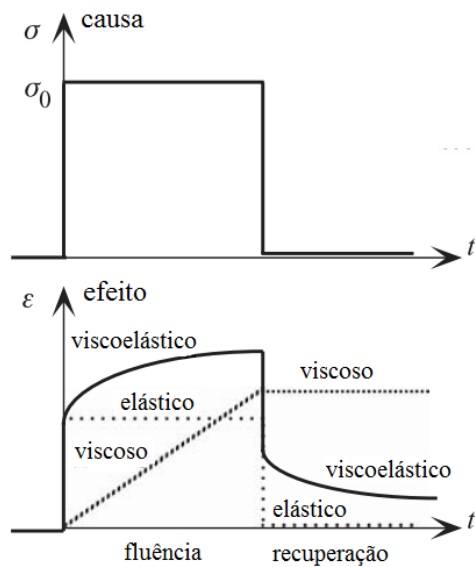


Figura 1 – Fluência e recuperação. Adaptado de Lakes (2009)

Por outro lado, a Figura 2 ilustra o comportamento de um material viscoelástico sob deformação constante ϵ_0 ao longo do tempo. O surgimento de uma deformação provoca o surgimento de tensão instantaneamente caracterizando a parcela elástica do material, no entanto ao longo do tempo há uma diminuição da tensão caracterizando o fenômeno da relaxação. Após o descarregamento há também um período de recuperação das tensões ao longo do tempo.

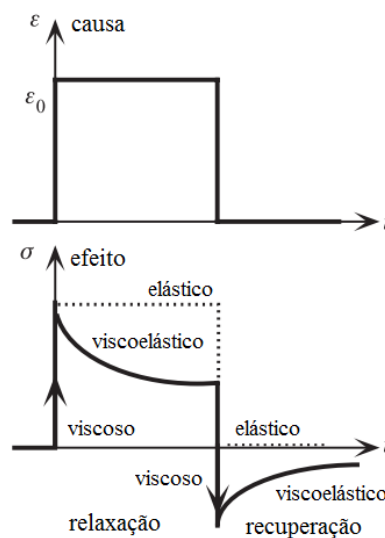


Figura 2 – Relaxação e recuperação. Adaptado de Lakes (2009)

Os materiais viscoelásticos são caracterizados pelo módulo de relaxação, $E(t)$, e função fluência, $J(t)$. O módulo de relaxação indica a variação da tensão do material ao longo do tempo

sob deformação constante unitária. Já a função fluência indica a variação da deformação do material ao longo do tempo sob tensão constante. As equações constitutivas de um material viscoelástico são dadas pela Equação 1 e Equação 2.

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (\text{Equação 1})$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (\text{Equação 2})$$

Onde t é o tempo no referencial escolhido e τ é a variável de integração.

As funções $E(t)$ e $J(t)$ são parâmetros do material que devem ser obtidos experimentalmente. No entanto, é difícil realizar ensaios de relaxação do material e comumente realiza-se ensaios de fluência obtendo-se $J(t)$. Para fazer a conversão de $J(t)$ para $E(t)$ existem uma série de métodos descritos na literatura (CHRISTENSEN, 1982; LAKES, 2009).

A representação matemática dos resultados experimentais das funções fluência e relaxação é feita através do auxílio de funções de regressão. Essas funções podem ser descritas em termos dos modelos generalizados de Maxwell e Kelvin. Esses modelos são expressos na forma de somatórios conhecidos como séries de Prony (LAKES, 2009). O modelo de Maxwell consiste num par “mola – amortecedor” conectado em série, já o modelo generalizado se trata de M pares conectados em paralelo com uma mola como ilustra a Figura 3. A relaxação pode ser expressa em termos do modelo generalizado de Maxwell de acordo com a Equação 3.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^M E_i e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, E_∞ é o módulo do material totalmente relaxado, ou seja, após um longo tempo. E_i é o módulo da parcela elástica de cada par “mola – amortecedor”. ρ_i são os tempos de relaxação do material. Esses parâmetros são determinados a partir de regressão dos dados experimentais.

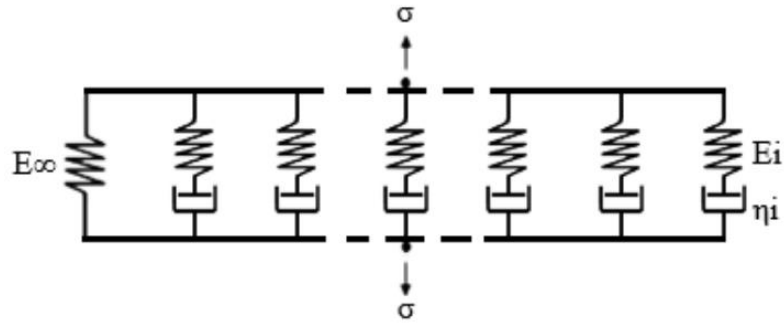


Figura 3 – Modelo generalizado de Maxwell (ARAÚJO, 2018)

Por outro lado, o modelo de Kelvin consiste num par “mola – amortecedor” conectado em paralelo, já o modelo generalizado se trata de M pares conectados em série com uma mola como ilustra a Figura 4. A função fluência pode ser expressa através do modelo generalizado de Kelvin de acordo com a Equação 4.

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^M \frac{1}{E_i} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde, E_0 é o módulo do material no tempo 0. τ_i são os tempos de retardação do material. Esses parâmetros são determinados a partir de regressão dos dados experimentais.

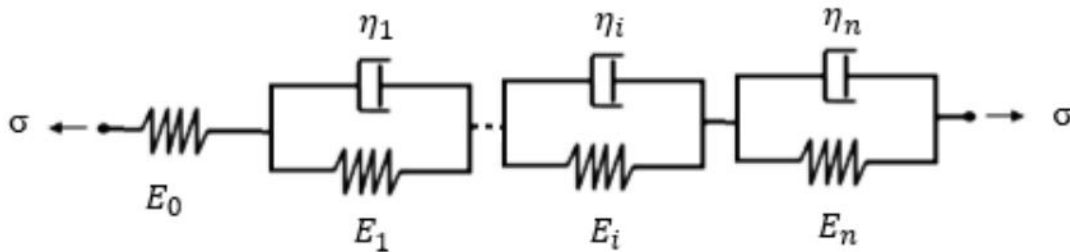


Figura 4 – Modelo generalizado de Kelvin (ARAÚJO, 2018)

3.2. Modelagem do concreto em mesoescala

A caracterização de materiais compósitos a partir de propriedades de seus componentes foi objeto de vários trabalhos. Estudos de inclusões dispersas num outro material chamado de matriz foram feitos através de diversos modelos analíticos e semi-analíticos tais como Hashin e Shtrikman (1963), Mori e Tanaka (1973), entre outros. Esses estudos buscaram aplicar conceitos da mecânica dos meios contínuos para chegar em soluções acerca das propriedades de materiais compostos de inclusões dispersas numa matriz. A aplicação desses conceitos não se restringiram a um material específico, como o concreto, mas se estendem a este.

Com o desenvolvimento da computação e de métodos numéricos para resolução dos problemas da mecânica dos meios contínuos foi possível realizar trabalhos de simulação do material considerando sua heterogeneidade. Diversos trabalhos estudaram o concreto em mesoescala através de simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos (WITTMANN; ROELFSTRA; SADOUKI, 1985; SADOUKI; WITTMANN, 1988; WITTMANN; SADOUKI; STEIGER, 1993). Assim, a simulação do concreto em mesoescala foi explorada por diversos autores, sendo incorporadas análises tridimensionais e a consideração de não-linearidade no modelo constitutivo dos materiais.

O principal interesse dessas pesquisas é determinar uma relação entre as deformações microscópicas e o comportamento mecânico macroscópico dos materiais. Os métodos para obter essa relação são chamados de homogeneização ou teoria das propriedades efetivas, onde um material heterogêneo é substituído por um material equivalente homogêneo. O objeto de análise do método é uma amostra estatisticamente significativa do material, chamada de elemento de volume representativo (ZOHDI; WRIGGERS, 2005; WRIGGERS; MOFTAH, 2006).

Nesse capítulo serão apresentados alguns trabalhos que utilizam simulação numérica do concreto considerando a sua mesoescala. Essa é uma revisão bibliográfica exploratória para identificação das principais considerações utilizadas pelos autores nesse tipo de análise. O principal alvo são trabalhos que tratam do estudo da fluência do concreto considerando suas diferentes fases em mesoescala. Assim, os principais conceitos extraídos desses trabalhos foram a forma de geração da mesoestrutura, condições de contorno, modelos constitutivos das diferentes fases e as comparações realizadas.

3.2.1. Wriggers e Moftah (2006)

Wriggers e Moftah (2006) exploram em detalhes aspectos da modelagem do concreto em mesoescala, sendo um dos primeiros trabalhos a considerar os agregados e a matriz de argamassa num modelo de elementos finitos tridimensionais. Além disso, foi considerado um modelo de dano para a matriz da argamassa, objetivando assim retratar a não-linearidade do concreto decorrente da microfissuração. Os autores expõem as várias metodologias comumente adotadas para geração da mesoestrutura do concreto. Os autores elencam como aspectos fundamentais para análise a forma dos agregados, a sua curva granulométrica, a distribuição espacial destes e a interface entre agregados e matriz de argamassa.

O trabalho faz uma análise do concreto considerando sua mesoescala, ou seja, agregados graúdos envoltos numa matriz de argamassa. Deve-se salientar que o concreto pode ser considerado homogêneo em macroescala. Por outro lado, subdivisões da matriz de argamassa leva a agregados miúdos e pasta de cimento endurecida com poros de ar. Os autores elencam os modelos de mesoescala como os mais úteis e práticos para estudar os efeitos dos constituintes do concreto no seu comportamento em macroescala.

Para representar a real distribuição de agregados do concreto esta deve ser o tanto homogênea e isotrópica quanto possível. Para isso o método de geração da mesoestrutura utilizado se baseia na geração de formas e posições aleatórias para os agregados, os quais seguem uma curva granulométrica definida. Os agregados são posicionados um a um evitando sua sobreposição. Esse método é utilizado em diversos trabalhos sobre o tema e é conhecido como “pegar e posicionar”. A interface entre os agregados e a matriz de argamassa é considerada contínua, ou seja, a menor rigidez da zona de transição não é considerada na análise. Detalhes desse algoritmo serão apresentados no capítulo 4 dessa monografia.

O algoritmo foi utilizado para posicionar agregados esféricos em espécimes cúbicos. Foram utilizadas tanto curvas granulométricas experimentais quanto a curva de Fuller (teórica). O diâmetro dos agregados permaneceu no intervalo de 19 mm a 2,45 mm. O autor destaca que os agregados ocupam geralmente entre 60% e 80% do volume do concreto, sendo que, agregados graúdos representam em torno de 40% a 50% da maioria dos concretos.

Para os modelos gerados a partir da curva de Fuller as propriedades elásticas dos agregados e argamassa são apresentadas na Tabela 1. Foi possível gerar modelos com 20% a 60% de agregados em volume como ilustrado na Figura 5.

Tabela 1 – Propriedades elásticas da argamassa e agregado (WRIGGERS; MOFTAH, 2006)

Tipo de material	Propriedades elásticas	
	E (GPa)	ν
Argamassa	11,6	0,20
Agregado	74,5	0,20

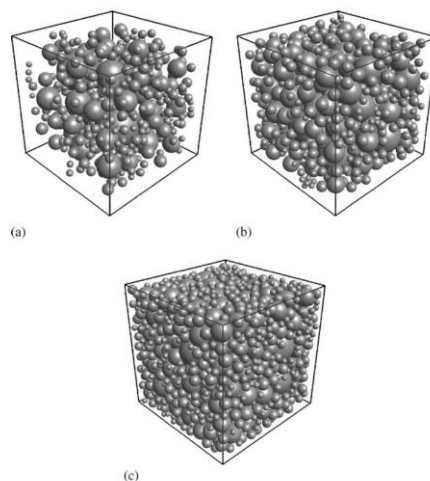


Figura 5 – Modelos de mesoestrutura do concreto. a) $V_{agreg} = 20\%$ b) $V_{agreg} = 40\%$ c) $V_{agreg} = 60\%$ (WRIGGERS; MOFTAH, 2006)

Para determinação das propriedades elásticas homogeneizadas a simulação é feita em 10 testes para cada volume de agregados mas com distribuição de agregados diferentes. O carregamento aplicado são deslocamentos uniformes em todas as faces do cubo. Dessa forma o módulo de elasticidade efetivo foi calculado usando conceitos de micromecânica e comparado com resultados experimentais. Não foi analisada a influência do tamanho, forma, textura e granulometria dos agregados no módulo de elasticidade.

Os resultados das análise numéricas mostram boa correlação com os resultados experimentais. Adicionalmente foram utilizados os métodos clássicos de homogeneização de Voigt (VOIGT, 1889), Reuss (REUSS, 1929) e Hashin and Shtrikman (HASHIN; SHTRIKMAN, 1963) que calculam limites inferiores e superiores para as propriedades homogeneizadas. A comparação do modelo em elementos finitos mostrou-se satisfatória. A Figura 6 mostra os resultados para o modelo considerando a granulometria dos agregados de acordo com a curva de Fuller. Foi observado que quanto maior o volume de agregados o comportamento do modelo numérico se torna mais rígido em relação aos dados experimentais. O autor justifica esse resultado atribuindo-o a maior influência que a zona de transição teria em concretos com maior volume de agregados. Assim, o autor recomenda a inclusão da zona de transição no modelo, bem como avaliar a influência da forma dos agregados.

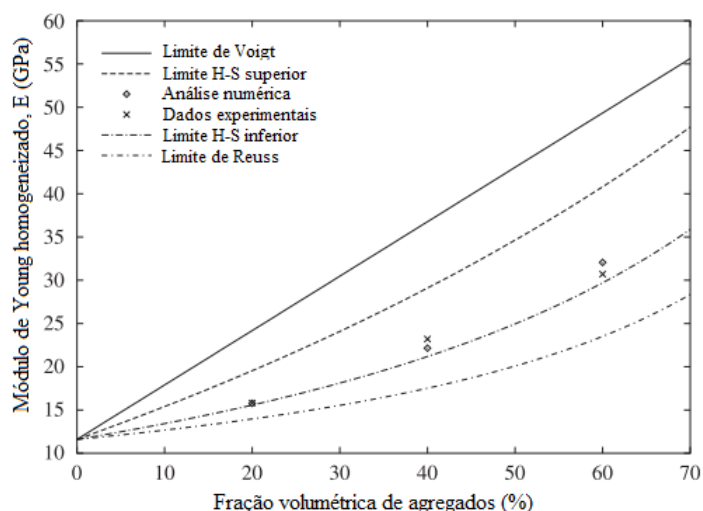


Figura 6 – Propriedades homogeneizadas usando a Curva de Fuller (WRIGGERS; MOFTAH, 2006)

Por fim, Wriggers e Moftah (2006) implementam um modelo de dano isotrópico na matriz de argamassa para simular a microfissuração do concreto. A análise numérica foi comparada com resultados experimentais e apresentou boa concordância com estes. O autor novamente ressalta possível influência da falta de modelagem da zona de transição e limitações no modelo de dano utilizado que levaram a pequenas diferenças em relação aos resultados experimentais.

3.2.2. Lavergne *et al.* (2015)

Lavergne *et al.* (2015) estuda o impacto da forma dos agregados na fluência do concreto através de simulações numéricas. Modelos numéricos tridimensionais da microestrutura do concreto são construídos considerando agregados esféricos e poliédricos. Foram considerados agregados elásticos dispersos na matriz de pasta de cimento, considerada viscoelástica. O autor relata que há resultados experimentais na literatura que mostram que concretos de composição semelhante apresentam comportamento distintos à fluência. Ou seja, concretos com formulação muito semelhante de água/cimento, granulometria e características mecânicas dos agregados podem apresentar deformações de fluência diferentes. O objetivo do autor é investigar numericamente se a forma e distribuição espacial dos agregados influenciam substancialmente na fluência. Além disso o autor faz uma análise do impacto da zona de transição na interface agregado-pasta na fluência.

As seguintes características foram colocadas como objetivos a serem atingidos através do algoritmo de geração da microestrutura:

- Inclusões (ou seja, os agregados) são posicionadas num espécime cúbico e elas não podem se sobrepor;
- A microestrutura deve ser periódica;
- Um bom controle da fração volumétrica, da distribuição granulométrica e da forma das inclusões é necessária;
- Um alto volume de inclusões (>50%) é necessário para representar microestruturas realistas do concreto;
- O material simulado deve ser isotrópico;
- O gerador deve ser tão rápido quanto possível.

Para atingir esse objetivo os autores utilizam dois algoritmos. Para gerar a microestrutura de agregados poliédricos, de forma a obter um alto volume de agregados, utiliza-se o *Random Sequential Adsorption* (Adsorção Aleatória Sequencial) (FEDER, 1980). No entanto, para gerar um alto volume de inclusões considerando esferas monodispersas foi utilizado o algoritmo de Lubachevsky e Stillinger (1990). Esses algoritmos possibilitaram se obter uma microestrutura com 63% em volume de agregados.

O número de agregados foi gerado a partir de curva granulométrica. Para isso a curva granulométrica foi dividida em 20 classes, cada qual correspondendo a 5% do volume total de agregados. Cada classe é caracterizada pelo seu diâmetro equivalente mínimo e máximo, onde o diâmetro equivalente de uma inclusão é o diâmetro de uma esfera de mesmo volume. Assim, para cada classe são geradas inclusões escolhendo um diâmetro equivalente aleatório entre os limites da classe até que se obtenha o volume necessário para aquela classe. A metodologia adotada aqui é semelhante a de Wriggers e Moftah (2006).

A geração dos agregados poliédricos é feita de forma a controlar a sua forma. O algoritmo é baseado em se escolher pontos aleatórios e a partir deles se determinar um fecho convexo, o qual seria a inclusão poliédrica. O posicionamento das inclusões geradas no espécime cúbico deve ser feito sem que haja sobreposição. Assim, usa-se a metodologia de “pegar e posicionar” assim como Wriggers e Moftah (2006). No entanto, nesse caso as inclusões são poliédricas, assim o cálculo de distâncias e sobreposições é mais complexa. Por isso, para cada inclusão é definida sua caixa delimitadora e verifica-se se estas se interceptam. Uma vez que estas se interceptem é utilizado o algoritmo Gilbert-Johnson-Keerthi para calcular distâncias e

sobreposições entre poliedros (GILBERT; JOHNSON; KEERTHI, 1987). No capítulo de Metodologia dessa monografia serão apresentados mais detalhes do algoritmo de geração e posicionamento de inclusões adotado por Lavergne *et al.* (2015).

Uma diferença nesse algoritmo em relação ao adotado por Wriggers e Moftah (2006) é a periodicidade aplicada às inclusões. Ou seja, uma mesma inclusão é inserida em vários setores do cubo de forma a gerar uma estrutura periódica. Assim, existem inclusões que são “cortadas” pela fronteira, no entanto elas devem estar contidas na fronteira oposta do cubo. A periodicidade da microestrutura tem vantagens por minimizar os efeitos de fronteira na análise do modelo. Isso, pois o modelo de elemento de volume representativo supõe que este é uma amostra representativa de um material considerado homogêneo e isotrópico em macroescala, ou seja, o comportamento global do elemento de volume representativo deve atender a essas suposições.

Foram geradas três microestruturas, todas com 63% em volume de inclusões. A primeira microestrutura foi chamada de unimodal, sendo composta de inclusões esféricas de 0,2 mm de diâmetro, dispostas em cubo de 4 mm de lado. Já a segunda microestrutura é bimodal, composta de inclusões esféricas de 1 mm e 0,2 mm de diâmetro dispostas num cubo de 4 mm de lado. Por fim, a microestrutura do concreto é simulada com agregados poliédricos com diâmetro equivalente máximo de 12,5 mm e mínimo de 0,5 mm. As inclusões são dispostas em cubo de 40 mm de lado. A Figura 7 ilustra as microestruturas geradas.

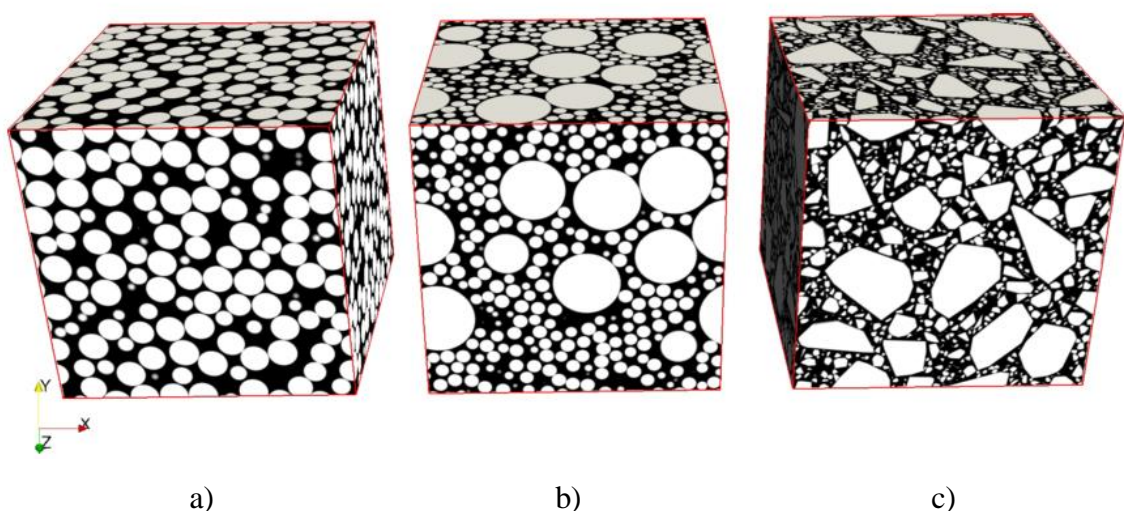


Figura 7 – Microestrutura gerada: a) unimodal, b) bimodal e c) concreto (LAVERGNE et al., 2015)

Para considerar a viscoelasticidade da matriz de pasta de cimento o autor se baseou em dados de ensaio de fluência realizado em espécimes de concreto. Assim, para a pasta de cimento as rigidezes elásticas e viscoelásticas do concreto foram divididas por 3. O modelo viscoelástico é caracterizado por uma cadeia de Kelvin com 8 tempos característicos, de 0,002 dias a 20000 dias. A Tabela 2 mostra os dados da cadeia de Kelvin utilizados para a matriz de pasta de cimento. As inclusões são consideradas com comportamento elástico e isotrópico, assume-se $E = 60 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,2$.

Tabela 2 - Dados do modelo viscoelástico da pasta de cimento. Adaptado de Lavergne *et al.*, (2015)

τ_k (dias)	Módulo de Young, E, ou rigidez da cadeia de Kelvin (GPa)
Elástico	12
0,002	634
0,02	475
0,2	182
2	80,2
20	37,6
200	18,3
2000	12,2
20000	9,01

Para determinar as propriedades viscoelásticas homogeneizadas da amostra cúbica gerada o autor utilizou algoritmo incremental proposto por Šmilauer e Bažant (2010). Esse método é um procedimento iterativo no tempo que permite resolver o problema viscoelástico para o caso de carregamentos constantes. Ele realiza integração das equações constitutivas em cada passo de tempo assumindo taxa constante de tensão. Ele permite que o passo de carregamento cresça exponencialmente ao realizar uma simulação de fluência ou relaxação (LAVERGNE *et al.*, 2015).

Para resolução numérica do problema em cada passo de carregamento o autor optou por utilizar o algoritmo FFT (Transformada Rápida de Fourier, *Fast Fourier Transform* em inglês), o qual é uma ferramenta capaz de calcular a resposta elástica e viscoelástica de microestruturas periódicas (MOULINEC; SUQUET, 1995). A entrada desse algoritmo são imagens digitais dos

materiais e as tensões iniciais aplicadas. Cada “pixel” da imagem recebe um dado acerca do seu material, o qual pode ser matriz, inclusão, ou uma propriedade intermediária correspondente a interface. Logo, o método se caracteriza por não ter uma conformação da geometria, sendo baseado numa malha cartesiana. O carregamento pode ser uma deformação macroscópica imposta ou uma tensão macroscópica imposta.

A opção por utilizar o algoritmo FFT diferencia o trabalho de Lavergne *et al.*, (2015) do já apresentado trabalho de Wriggers e Moftah (2006) o qual utiliza o método dos elementos finitos. O motivo de se utilizar métodos baseados em FFT geralmente é diminuir o custo computacional do problema. Dunant *et al.*, (2013) faz uma extensa revisão sobre a performance de diversos métodos numéricos utilizados para resolver problemas de homogeneização de materiais heterogêneos onde foram analisados métodos baseados no Método dos Elementos Finitos, Elementos Finitos Estendidos (*Extended Finite Element Method – XFEM*) e algoritmos FFT.

A simulação é feita com testes de fluência por compressão hidrostática e fluência por cisalhamento. São realizados de 5 a 10 testes para cada um dos diferentes modelos de microestrutura (unimodal, bimodal e concreto).

Os resultados da análise mostraram que as deformações de fluência foram próximas mesmo para microestruturas muito diferentes. A curva granulométrica e a forma das inclusões mostraram ter pouco efeito sobre o comportamento viscoelástico do concreto como mostra a Figura 8. Assim, o único parâmetro relevante é o volume de inclusões. A distribuição de tensões na matriz mostra que esta tende a relaxar enquanto a tensão aumenta nas inclusões no decorrer do tempo.

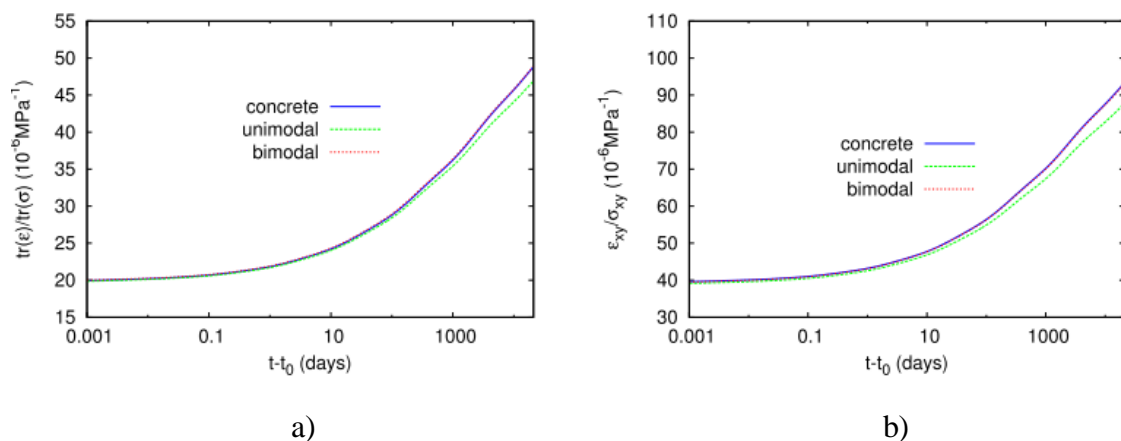


Figura 8 – Resultados das curvas de fluência. a) Carregamento hidrostático b) Carregamento cisalhante (LAVERGNE et al., 2015)

Assim, o autor conclui que diferenças de fluência em concreto semelhantes não pode ser atribuída à curva granulométrica ou à forma dos agregados. Assim, ele propõe um refinamento do modelo de microestrutura. Assim, ele refina o modelo ao considerar a zona de transição na interface agregado pasta de cimento.

Como a zona de transição tem pequenas dimensões, não seria possível introduzi-la na escala do modelo gerado para o concreto. Métodos multiescala poderiam ser utilizados para determinar o comportamento das regiões de interface, através de modelos mais detalhados.

Para estudar o impacto da zona de transição, os autores utilizam um modelo de argamassa numa amostra cúbica de 4 mm x 4 mm na qual é introduzida a zona de transição. Para caracterizar o comportamento da zona de transição é usado o modelo de Nadeau (2003), em linha gerais o modelo descreve a variação local da relação água/cimento em função da distância dos agregados. Os parâmetros elásticos e viscoelásticos são determinados em função da relação água/cimento e correlação com dados experimentais.

Foram realizadas análises considerando a espessura da zona de transição de 0 μm a 50 μm . A Figura 9 mostra os resultados de fluência para as diversas espessuras. Os resultados mostraram que quanto maior a espessura da zona de transição menores as rigidezes elásticas e viscoelásticas. O aumento da zona de transição produz uma diminuição de rigidez maior quando se considera as deformações de fluência em relação a rigidez elástica. Assim, observa-se que a zona de transição é uma explicação plausível para as diferentes deformações de fluência de vários concretos.

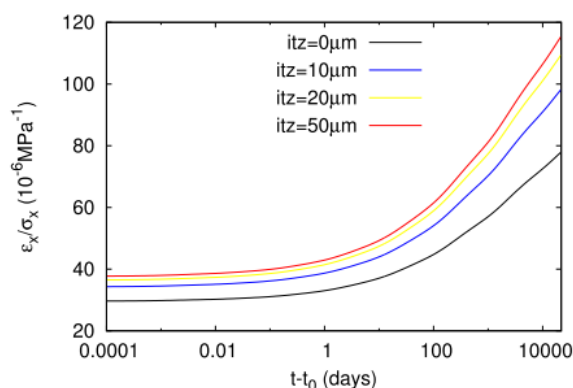


Figura 9 – Impacto da zona de transição na fluência (LAVERGNE et al., 2015)

Por fim, o autor compara os resultados numéricos com métodos semi-analíticos de homogeneização. Considerando fluência sem envelhecimento, a transformada de Laplace-

Carson transforma um problema dependente do tempo em vários problemas elásticos através do princípio da correspondência. Assim, é possível aplicar métodos analíticos de homogeneização. O autor utilizou o modelo de Hashin e Shtrikman (1963), o modelo de três-fases de Christensen e Lo (1979) e o modelo n+1 fases esféricas de Herve e Zaoui (1993). Os resultados dos modelos numéricos mostraram boa concordância com os modelos analíticos.

O autor ressalta as limitações de seu modelo e destaca alguns aspectos que precisam ser considerados para refinar o modelo, entre eles estão a consideração do envelhecimento do material e microfissuração. Esta última é elencada como a responsável pela fluência não-linear para tensões acima de 40% da resistência à compressão.

3.2.3. Das, Maroli e Neithalath (2016)

Das, Maroli e Neithalath (2016) estuda os efeitos das propriedades dos agregados no comportamento elástico de argamassa através de simulação numérica. Os autores realizam várias simulações analisando o efeito de agregados leves e da zona de transição no módulo de elasticidade da argamassa. Além disso, as tensões nas diferentes fases da argamassa são analisadas. Os autores utilizam um modelo bidimensional em elementos finitos para análise dos modelos. Para justificar a validade de um modelo bidimensional ele realiza um único modelo tridimensional com 30% em volume de agregados e calcula o módulo de elasticidade homogeneizado para vários módulos de Young dos agregados. A comparação com um modelo bidimensional equivalente leva a resultados próximos. No entanto, cabe destacar que os autores não deixam claro se nesses modelos foi considerado a zona de transição e é difícil prever se o comportamento se mantém com o aumento volumétrico de agregados. A evolução das concentrações de tensão com o aumento do volume de inclusões proporciona um campo de tensões mais complexo e a equivalência 2D/3D deve ser estudada mais a fundo.

Os autores consideram dois modelos principais, sendo um com agregados quartzosos com alto módulo de elasticidade e outro com agregados leves com baixo módulo de elasticidade. O autor utiliza valores da literatura para definir o módulo de elasticidade dos agregados, pasta de cimento e zona de transição de acordo com a Tabela 3. No entanto, em análises posteriores ele varia os parâmetros elásticos das fases.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais (DAS; MAROLI; NEITHALATH, 2016)

Propriedade elástica	Pasta de cimento endurecida	Inclusão quartzo	Interface quartzo - pasta de cimento	Inclusão Agregado Leve	Interface agregado leve – pasta de cimento
Módulo de Young, E (GPa)	20	70	15	16	30
Coefficiente de Poisson, ν	0,22	0,17	0,22	0,20	0,20

Para consideração da zona de transição foi considerada explicitamente uma região do modelo em torno das inclusões com espessura de 30 μm , na qual também foi gerada malha e atribuída as propriedades correspondentes. A microestrutura gerada é chamada de um elemento representativo de área (ERA) por ser uma análise bidimensional. As inclusões são circulares, o volume de inclusões é 50% e foi considerada uma microestrutura periódica assim como Lavergne *et al.* (2015). A Figura 10 ilustra a microestrutura descrita.

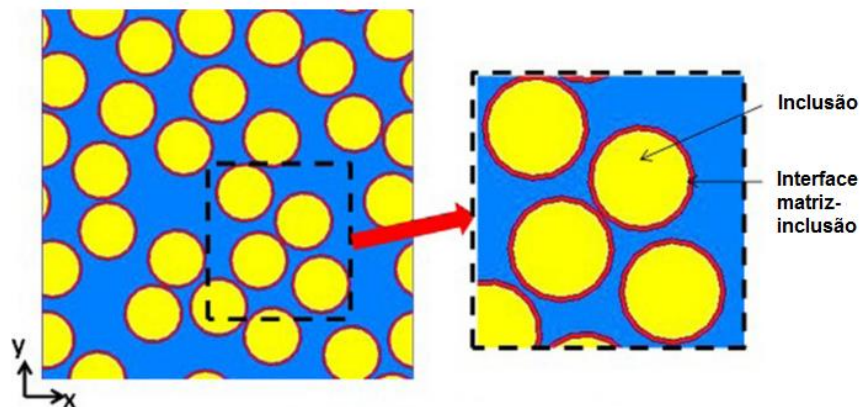


Figura 10 – Microestrutura do ERA. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016)

Como o autor pretende avaliar o estado de tensão em cada uma das fases da microestrutura ele teve uma preocupação acerca das concentrações de tensão devido a fronteira do ERA como mostra a Figura 11.

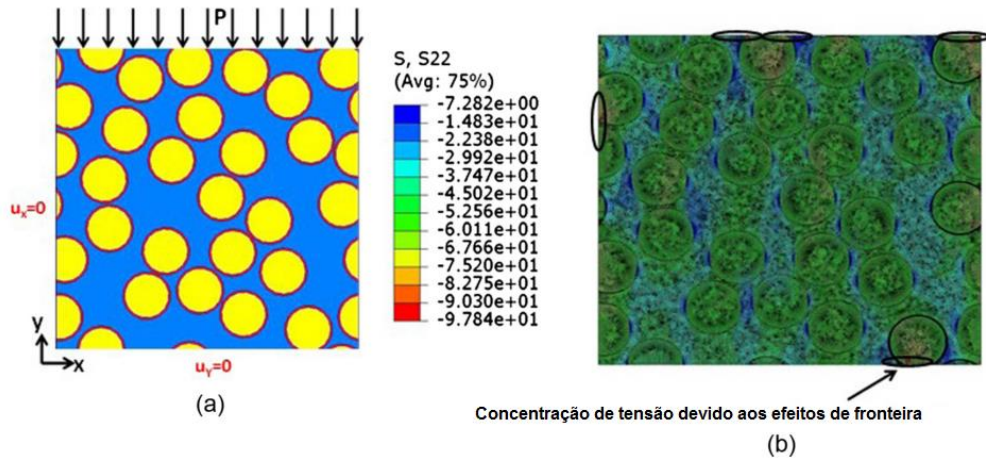


Figura 11 – Efeito da fronteira, a) Carregamento b) Concentrações de tensão. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016)

Para solucionar o problema foram utilizadas condições de contorno periódicas. Essa condição estabelece que faces opostas do elemento representativo devem ter deslocamentos compatíveis supondo a continuidade do comportamento do material que é composto destes elementos representativos como ilustra a Figura 12. No método dos elementos finitos esse comportamento é gerado a partir de equações adicionais de imposição de movimento relativo aos nós de fronteira. Assim, aplica-se um carregamento de deformação ou deslocamento controlado no ERA, o que elimina os efeitos de fronteira expostos.

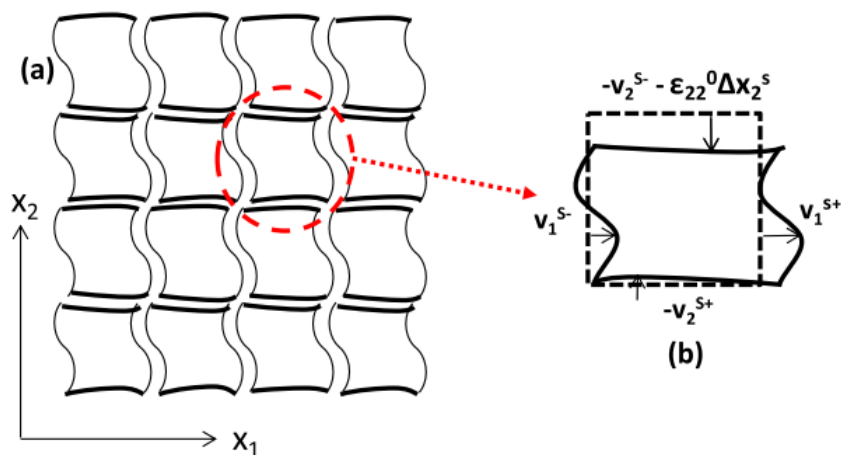


Figura 12 – Condições de contorno periódicas para deformação ϵ_{22} aplicada (DAS; MAROLI; NEITHALATH, 2016)

A análise do modelo foi realizada através do software ABAQUS. Foi utilizado um ERA de 4,15 mm x 4,15 mm e um tamanho de *seed* da malha de 0,0175 mm o qual resultou em uma malha

de 68879 nós e 68771 elementos. Na zona de transição o *seed* da malha foi de 5 μm . O método de geração da malha foi livre, com dominância de quadriláteros. Os elementos foram quadriláteros, deformação plana, bi-lineares de 4 nós.

O autor faz uma série de análises sobre as concentrações de tensão nas diferentes fases do concreto em função do tipo de agregado. De forma geral suas conclusões mostram que para agregados de quartzo a zona de transição é crítica por ter menor resistência, apesar de as maiores tensões serem nos agregados. Assim, o uso de agregados mais rígidos não proporcionaria maiores resistências do concreto uma vez que este faria aumentar a tensão na zona de transição, sendo necessário assim que se altere as propriedades da pasta e conseqüentemente da zona de transição. No entanto, em baixas deformações os benefícios de agregados mais rígidos são a maior rigidez do conjunto.

Por outro lado, os agregados leves se tornam críticos para a resistência mesmo que as tensões sejam maiores na zona de transição, isto pois geralmente os agregados tem menor resistência que a zona de transição. Novamente, um aumento de rigidez do agregado leva a um aumento da tensão na zona de transição e matriz, sendo assim, para aumentar a rigidez e resistência deve-se melhorar a propriedade dos agregados e da pasta.

A Figura 13 mostra os resultados para a tensão média principal no ERA para uma deformação aplicada de $\varepsilon_{22} = 0,12\%$. São considerados vários módulos de Young para os agregados. Percebe-se que o impacto dos agregados na rigidez da argamassa é maior para os agregados leves os quais tem baixa rigidez. Para agregados de quartzo a sua influência na rigidez do conjunto é menor.

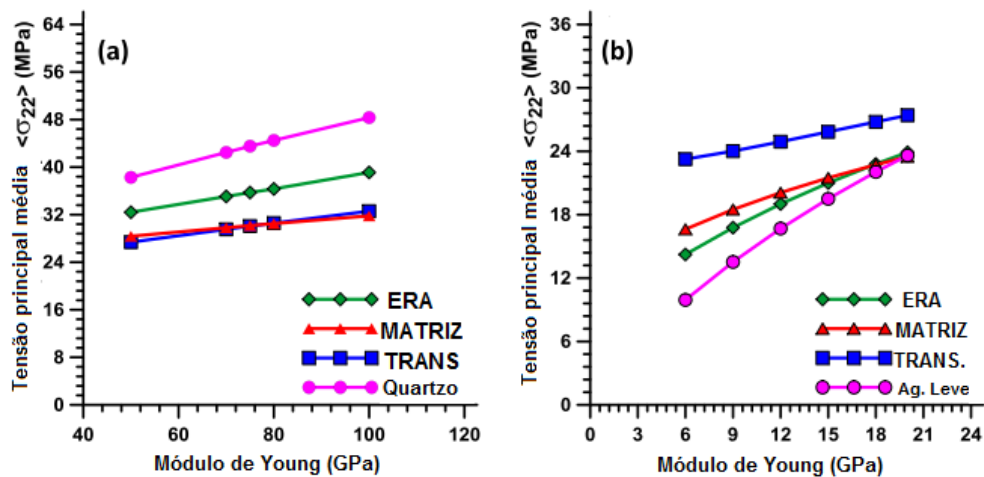


Figura 13 – Influência do módulo de Young (E) dos agregados na tensão do conjunto, onde $\epsilon_{22}=0,12\%$. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016)

Por outro lado, para agregados de quartzo o volume de agregados tem impacto mais sensível na rigidez do conjunto como mostra a Figura 14 para uma deformação aplicada de $\epsilon_{22} = 0,12\%$.

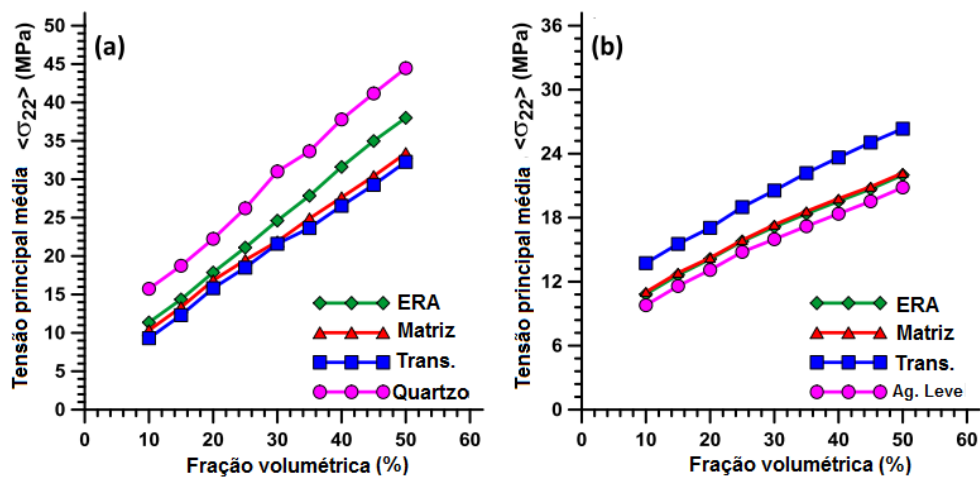


Figura 14 - Influência do volume de agregados na tensão do conjunto, onde $\epsilon_{22}=0,12\%$. Adaptado de Das, Maroli e Neithalath (2016)

Adicionalmente, o autor verifica o impacto da distribuição granulométrica. Para mesmo volume de agregados e mesmo diâmetro médio o autor gera distribuições de agregados com diferentes desvios padrões. É observado que uma maior variação dos diâmetros dos agregados, ou seja, presença de agregados maiores, intermediários e pequenos provoca uma diminuição das concentrações de tensão.

O autor também compara os resultados numéricos com resultados experimentais e resultados obtidos por métodos de homogeneização analíticos. Foi verificado que os resultados numéricos tiveram melhor correlação com os experimentais quando comparados com os métodos analíticos. Assim, o autor justifica o uso de métodos de homogeneização numéricos para estimar o comportamento do material.

3.2.4. Bary, Bourcier e Helfer (2017)

Bary, Bourcier e Helfer (2017) analisam o efeito da zona de transição na interface entre agregados e matriz através de simulações numéricas tridimensionais em elementos finitos. São utilizados elementos de interface de espessura nula para simular a área de menor rigidez na zona de transição. O objetivo dos autores é realizar simulações numéricas considerando a viscoelasticidade da matriz cimentícia e a menor rigidez da zona de transição. São construídas curvas de fluência numéricas as quais são comparadas com métodos analíticos de homogeneização. Também é estudado a distribuição de tensões nas diferentes fases do material. A seguir será dada ênfase nos aspectos referentes à geração da microestrutura, interface e características das diferentes fases.

A biblioteca Combs (BOURCIER et al., 2014) a qual é baseada na plataforma CAD Salome (CASCADE, 2018) foi utilizada para gerar a geometria e a malha das mesoestruturas. A geometria é obtida através da distribuição aleatória num cubo de agregados poliédricos de vários tamanhos e formas os quais são obtidos independentemente por uma decomposição de Voronoi. Também foi implementado o algoritmo GJK (GILBERT; JOHNSON; KEERTHI, 1987) para calcular as distâncias entre agregados assim como Lavergne *et al.* (2015). A mesoestrutura foi construída de forma a garantir a periodicidade como já discutido para os trabalhos anteriores nessa revisão.

Foram considerados dois modelos, um para a argamassa e outro para concreto. O modelo para concreto é uma amostra cúbica de 120 mm x 120 mm com 40% em volume de agregados, sendo o diâmetro médio equivalente dos agregados de 7,1 mm. Já o modelo para argamassa é uma amostra cúbica de 24mm x 24 mm com 50% em volume de agregados, sendo o diâmetro médio equivalente dos agregados de 2,1 mm. Para avaliar a forma dos agregados, alguns modelos foram construídos com agregados alongados e/ou achatados. Para isso, os agregados gerados sofrem uma transformação de escala de 3 a 4 vezes ao longo de um ou dois eixos. A malha foi gerada considerando um tamanho máximo da aresta dos elementos finitos tetraédricos igual a 2% da aresta do cubo. A Figura 15 ilustra as mesoestruturas geradas.

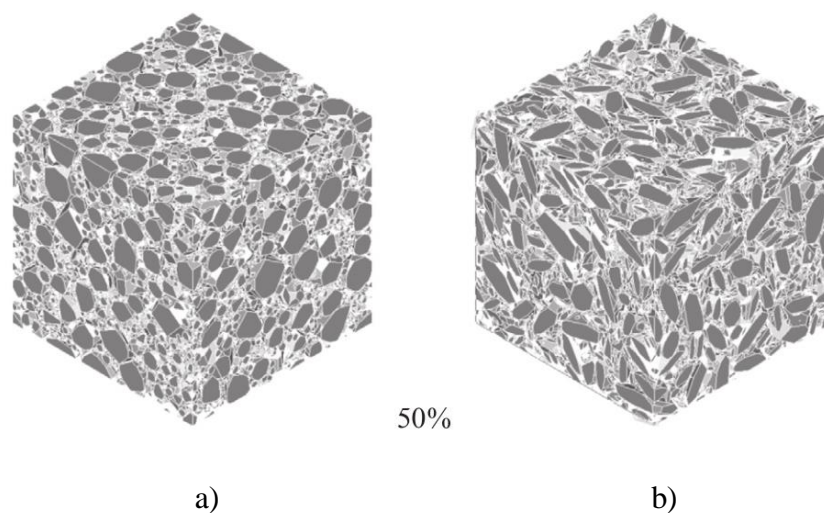


Figura 15 – Mesoestrutura para 50% volume de agregados a) Agregado isotrópico b) Agregado achatado. Adaptado de Bary, Bourcier e Helfer (2017)

A interface entre agregado e matriz é modelada através da consideração de interfaces imperfeitas. No método dos elementos finitos isso é feito através do uso de elementos específicos de interface. O material da interface assim como a matriz segue comportamento viscoelástico de acordo com o modelo generalizado de Maxwell. Assim, o modelo de interface é aplicado no espaço de Laplace-Carson para resolução do problema viscoelástico. O comportamento da interface é caracterizado pelo Modelo de Mola Linear (*Linear Spring Model – LSM*). Esse modelo descreve o deslocamento na interface como uma função da tensão normal (assumindo esta contínua) através de coeficientes de rigidez estimados por expressões que envolvem as propriedades mecânicas da interface e sua espessura real. Assim, a tensão é contínua na interface e os deslocamentos apresentam uma descontinuidade. Mais detalhes da formulação podem ser encontrados no referido artigo.

Os agregados são simulados considerando $E = 70 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,3$. Os parâmetros do modelo de Maxwell são identificados num ensaio de fluência do concreto, assumindo que o material é composto de uma matriz viscoelástica linear e 65% em volume de agregados esféricos elásticos. Nesse composto de duas fases aplica-se o método de homogeneização de Mori-Tanaka (MORI; TANAKA, 1973) para determinar as propriedades da matriz. A Tabela 4 traz os valores adotados para o modelo generalizado de Maxwell.

Tabela 4 – Parâmetros do modelo de Maxwell para a matriz (BARY; BOURCIER; HELFER, 2017)

Elemento	0	1	2	3
k_i^m (GPa)	6,27	2,93	4,21	6,93
μ_i^m (GPa)	3,41	7,77	3,54	3,32
τ_i^m (dias)		2	20	150

Para simplificar os autores utilizam os mesmos dados da matriz para os modelos de concreto e argamassa. É feita uma ressalva acerca desse procedimento o qual é utilizado devido a escassez de dados experimentais sobre fluência em argamassa. Além disso, os autores consideram que tal fato não é empecilho para os objetivos do trabalho.

As propriedades mecânicas da zona de transição são estimadas a partir das propriedades da matriz considerando que nessa região há uma porosidade adicional. Assim assume-se que a zona de transição possui uma porosidade adicional de 30% e aplica-se o método de homogeneização de Mori-Tanaka para obter as propriedades da zona de transição. Essa metodologia leva a um módulo de aproximadamente metade do módulo da matriz.

As análises são realizadas para diversas espessuras da zona de transição. O carregamento é correspondente a um ensaio de fluência, consiste em compressão unidirecional por tensão normal igual -25,8 MPa. O resultados do modelo numérico são comparados com modelos analíticos, especialmente o GSCS (*Generalized self-consistent method*, ou Método auto-consistente generalizado) (CHRISTENSEN; LO, 1979).

Nas suas análises os autores fazem uma investigação interessante sobre as condições de contorno aplicadas. Nos trabalhos já apresentados nessa revisão é possível perceber que sempre que possível os autores tentam gerar uma distribuição periódica de agregados e condições de contorno periódicas. Essa metodologia é considerada a melhor abordagem quando se trata de elementos de volume representativos. Os autores investigam os resultados para três condições de contorno: tensões homogêneas (SUBC) diretamente aplicadas na superfície; deformações homogêneas (KUBC) na qual todos os nós de uma superfície externa tem o mesmo deslocamento; e por fim, condições de contorno periódicas (PBC), já explanadas anteriormente.

A Figura 16 mostra os resultados para as diferentes condições de contorno. Percebe-se que os resultados considerando SUBC são mais próximos daqueles considerando PBC do que KUBC.

Os autores explanam que esse resultado concorda com os resultados para casos elásticos quando a matriz é mais deformável que as inclusões. Assim, os autores utilizam SUBC (tensão homogênea aplicada) pois esse método leva a resultados similares às condições de contorno periódicas a um custo computacional menor.

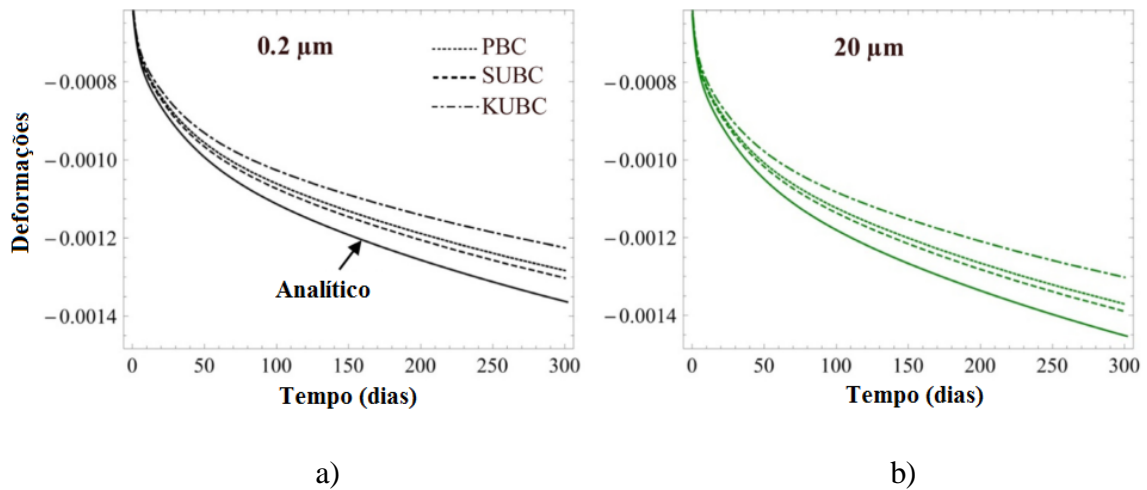


Figura 16 – Deformação longitudinal para 40% em volume de agregados considerando diferentes condições de contorno. a) $e_{\text{transição}} = 0,2 \mu\text{m}$ b) $e_{\text{transição}} = 20 \mu\text{m}$. Adaptado de Bary, Bourcier e Helfer (2017)

A análise dos modelos com 50% de agregados foi realizada para várias espessuras da zona de transição. O autor destaca um conceito importante, ambos os modelos, de 40% e 50%, podem representar tanto concreto como argamassa. A razão entre espessura da zona de transição e tamanho do agregado é o que caracteriza um comportamento de argamassa ou concreto. Considerando o concreto em mesoescala, ou seja, agregados envoltos em matriz de argamassa, a espessura da zona de transição está entre 20 e 25 μm. Já para argamassas, a espessura corresponde ao caso de 100 μm levando em conta o tamanho dos agregados usados na simulação.

A Figura 17 mostra os resultados obtidos para o modelo com 50% de agregados considerando espessura de interface variável entre 1 μm e 250 μm. As diferenças são pequenas entre as espessuras de 1 μm e 25 μm. Já as diferenças entre a espessura de 1 μm e 50 μm, 100 μm e 250 μm são 6%, 14% e 33%, respectivamente.

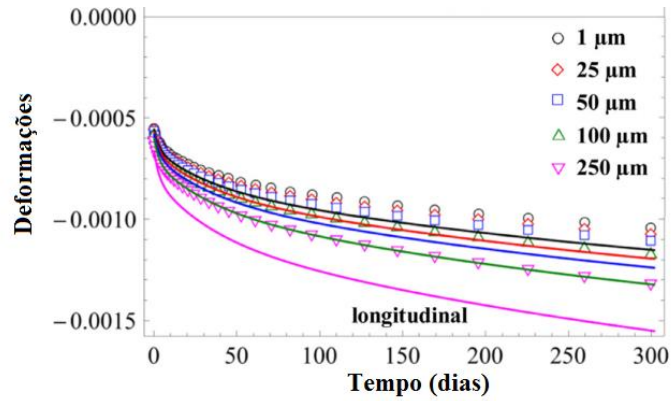


Figura 17 – Deformações obtidas numericamente (símbolos) e analiticamente (linhas) para 50% de agregados e espessura da zona de transição indicada. Adaptado de Bary, Bourcier e Helfer (2017)

O autor conclui que a zona de transição tem influência desprezível no concreto em mesoescala para determinar o comportamento macroscópico do material. No entanto, a zona de transição apresenta influência significativa em argamassas sendo seus efeitos não-desprezíveis. O autor também levanta hipóteses para a divergência entre os resultados do modelo numérico e o modelo analítico. O primeiro fator é a diferença de forma da inclusão, esférico para o modelo analítico e poliédrico para o numérico. O segundo aspecto são as limitações inerentes ao próprio método GSCS, especialmente para altos volumes de inclusões. Por fim, erros devido ao refinamento da malha e condições de contorno podem influenciar os resultados.

4. METODOLOGIA

A partir da análise dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica foi proposta uma metodologia para análise da fluência no concreto considerando sua mesoestrutura de acordo com os objetivos propostos no capítulo 1 dessa monografia.

4.1. Script para geração dos modelos

O script para geração da geometria do modelo foi implementado em Matlab. O script constrói uma distribuição espacial de agregados poliédricos dentro de um cilindro. Os dados de entrada são as dimensões do cilindro, o traço do concreto, as massas específicas dos constituintes e a curva granulométrica. Na curva granulométrica define-se para cada faixa granulométrica o alongamento e achatamento dos agregados, o qual é imposto para todos os agregados daquela faixa. Alternativamente, pode-se determinar um volume de agregados específico, abrindo mão do traço do concreto. O arquivo de saída do script é um arquivo de texto que contém as coordenadas dos nós que definem cada agregado e suas conectividades.

O modelo em elementos finitos foi construído no software ABAQUS. Para isso, foi implementada uma rotina em Python, a qual cria a geometria e insere dados do modelo, como condições de contorno, materiais e carregamento de forma automatizada. Essa rotina constrói o modelo do ABAQUS a partir do arquivo de texto de geometria dos agregados gerado pelo script do Matlab. Em todos os modelos optou-se por utilizar malha de elementos finitos tetraédricos lineares e uma alta densidade de malha de forma a melhor captar a complexa geometria.

A geometria dos agregados é poliédrica e foi gerada a partir da metodologia usada por Lavergne *et al.* (2015). Abaixo seguem os passos necessários para criar um agregado os quais foram implementados na função *inclusion_generator()* no Matlab. O fluxograma da função é ilustrado na Figura 18.

Passo 1. Gerar número de vértices a partir de um gerador de números aleatórios que segue a distribuição de Poisson com $\lambda = 12$ vértices. Caso o número de vértices seja menor que 6, o valor é descartado.

Passo 2. Para cada vértice é gerada uma direção aleatória seguindo distribuição uniforme sobre uma esfera unitária centrada na origem. A distância de cada vértice à origem é

calculada a partir de um número aleatório gerado de acordo com distribuição Log-Normal com $\mu = 0,08$ e $\sigma = 0,02$.

Passo 3. Para se definir um poliedro é calculado o fecho convexo do pontos gerados através da função $alphaShape(x,y,z,a)$, a qual é nativa do Matlab. O raio alfa adotado, a , é igual a Inf o que resulta no cálculo do fecho convexo dos pontos.

Passo 4. A partir das dimensões da caixa delimitadora mínima do agregado, avalia-se suas dimensões mínima, média e máxima. O agregado é escalado de forma a ter a sua menor dimensão, alongamento e achatamento iguais aos desejados de acordo com a faixa granulométrica.

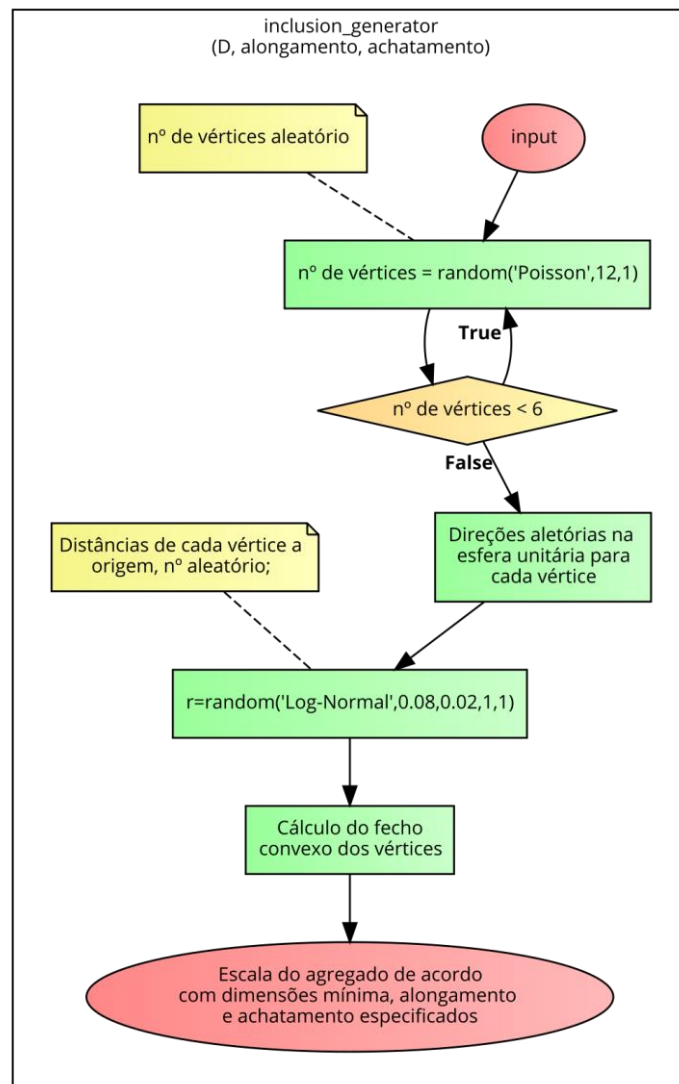


Figura 18 – Fluxograma função *inclusion_generator()*

É necessário uma rotina para posicionar os diferentes agregados dentro do cilindro e assim simular a real distribuição de agregados existente no concreto. Nesse trabalho adaptou-se o algoritmo utilizado por Wriggers e Mofteh (2006) para agregados esféricos. Esse algoritmo é conhecido como “pegar e posicionar”, consiste em posicionar cada agregado um a um e verificar a intersecção deste com os agregados já posicionados e os limites do corpo de prova. Considera-se que o agregado tem um envolvimento mínimo de argamassa, esse envolvimento é definido pelo parâmetro γ . Cada agregado sendo posicionado deve ter uma distância mínima dos limites do cilindro e de outros agregados de γD , onde D é a dimensão mínima do agregado. A utilização de valores mais altos de γ proporciona uma distribuição mais uniforme dos agregados. A Figura 19 ilustra o processo de posicionamento adotado por Wriggers e Mofteh (2006), note que nesse trabalho o modelo é tridimensional composto de poliedros, entretanto a metodologia adotada segue os mesmos princípios.

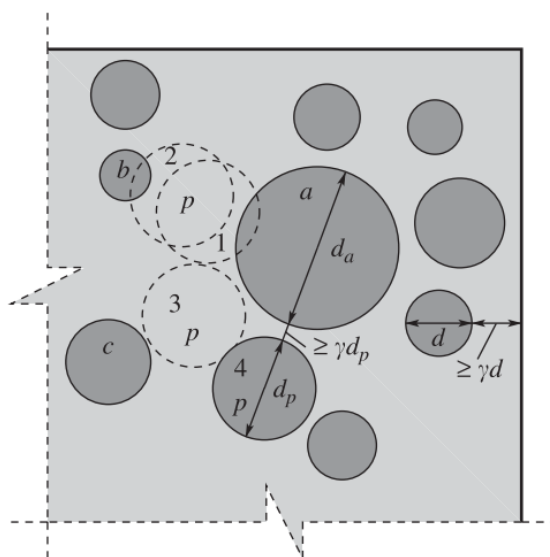


Figura 19 – Processo de posicionamento (WRIGGERS; MOFTAH, 2006)

O algoritmo é baseado nos seguintes passos.

Passo 1. Geração de todos os agregados seguindo a curva granulométrica até o volume total desejado de agregados. A dimensão mínima de cada agregado é um número aleatório gerado por distribuição uniforme no intervalo da faixa granulométrica.

Passo 2. Começar o posicionamento pelos agregados de maior volume. Gera-se uma posição aleatória no cilindro a qual será o centro do agregado. Então é verificado se ele está contido dentro do cilindro, levando em conta a distância mínima de γD . Caso a verificação seja negativa então nova posição é gerada.

Passo 3. Realiza-se a verificação preliminar de intersecção do agregado sendo posicionado com aqueles já posicionados. Nessa etapa, verifica-se a caixa delimitadora dos agregados, caso elas se interceptem então é realizada uma verificação refinada.

Passo 4. A verificação refinada consiste no algoritmo GJK, o qual foi implementado e disponibilizado online por Lebel (2017). Este algoritmo permite verificar se dois poliedros convexos estão se interceptando e também a menor distância entre dois poliedros no espaço (GILBERT; JOHNSON; KEERTHI, 1987). Se o agregado sendo posicionado intercepta um já posicionado, o agregado atual é translado numa direção aleatória e rotacionado, sendo posicionado o mais próximo possível (γD) do agregado o qual foi detectado sua intersecção. Esse processo é repetido para todos os agregados, de modo que não haja intersecção com nenhum. Se for atingido um certo número de iterações sem sucesso em evitar a intersecção, uma nova posição inicial do agregado é escolhida e o processo se repete.

Passo 5. É possível que após um certo número de posições iniciais não seja possível posicionar o agregado. Nesse caso, o parâmetro γ da faixa granulométrica é diminuído e os agregados da respectiva faixa são reposicionados.

A Figura 20 mostra o fluxograma do algoritmo descrito acima, o qual foi implementado na função *distribution_generator()*. Já a Figura 21 mostra o fluxograma da função *curva_granu()* a qual é chamada pela *distribution_generator()* e que chama a função *inclusion_generator()* para geração dos agregados poliédricos.

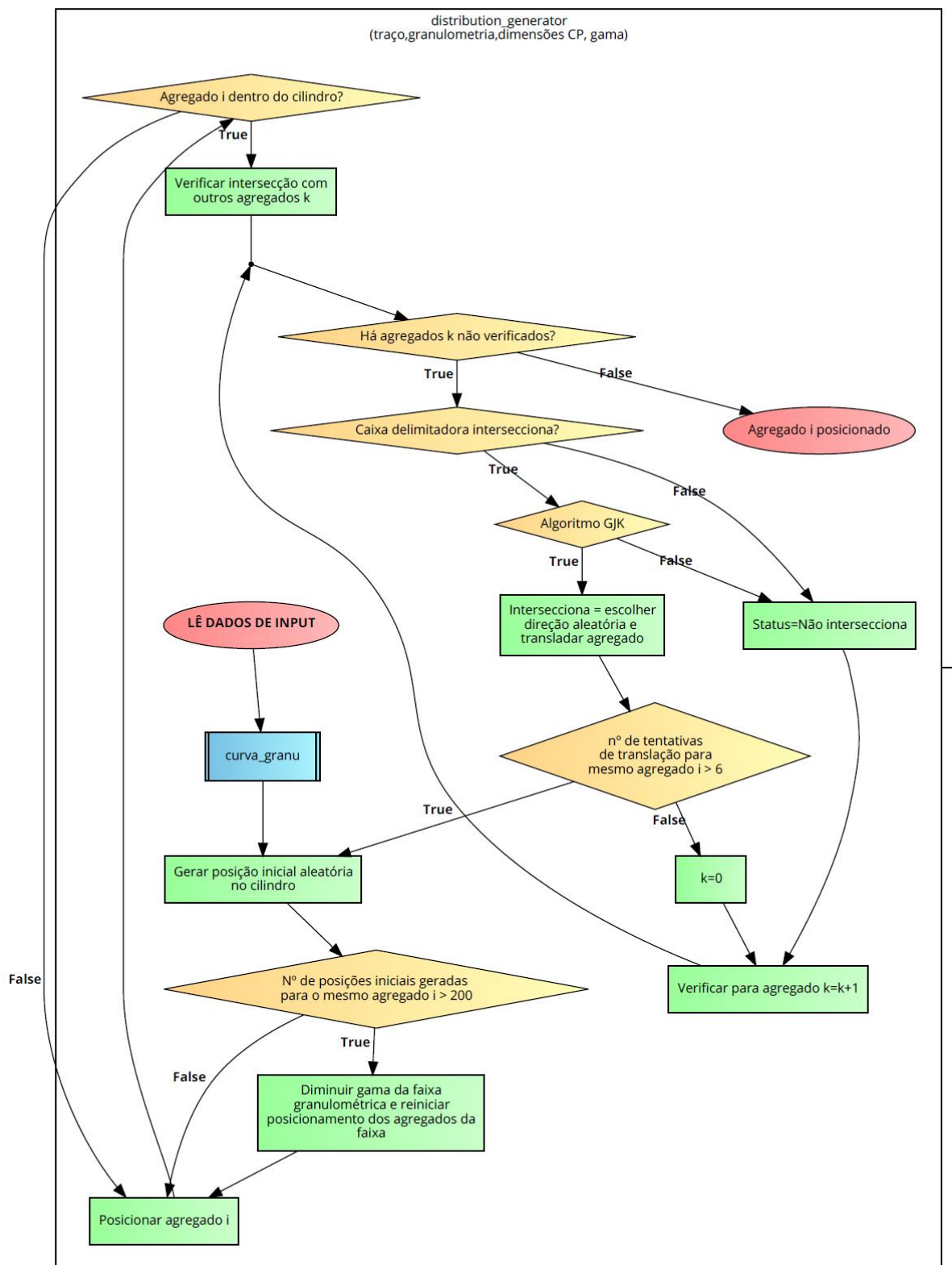


Figura 20 – Fluxograma do script para posicionamento de agregados – *distribution_generator()*

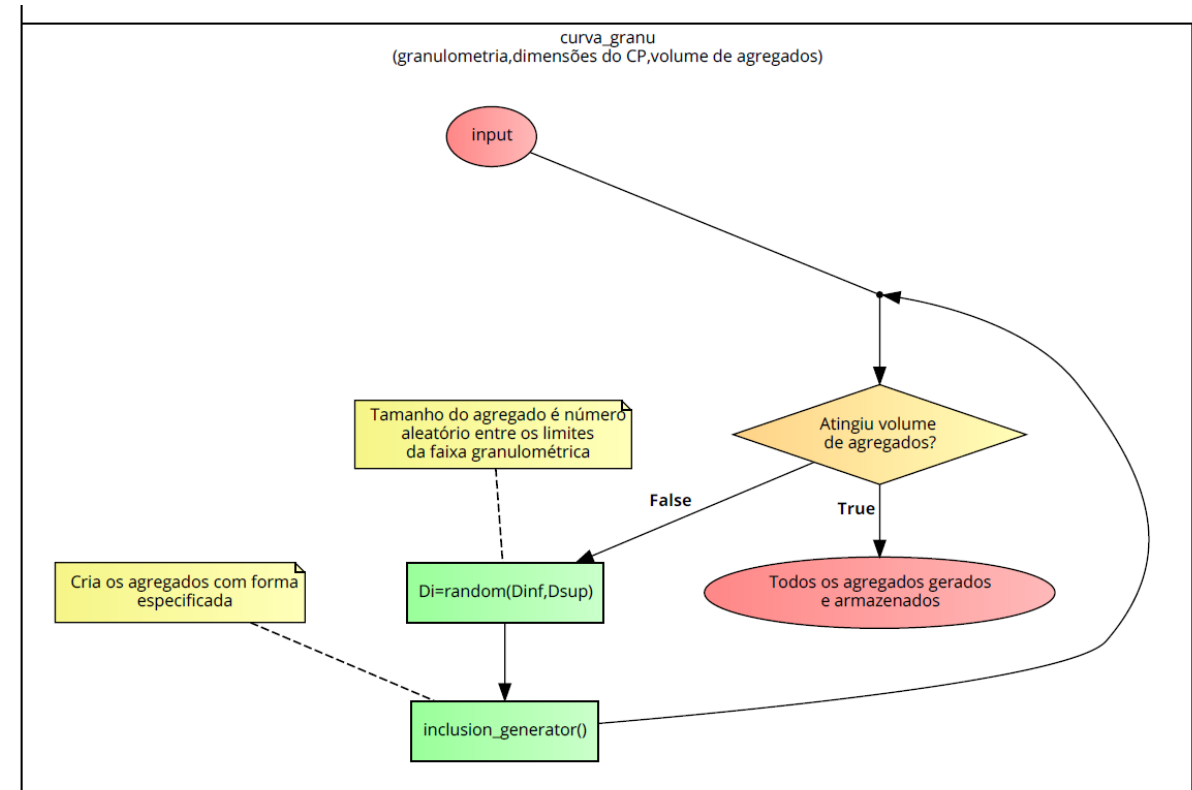


Figura 21 – Fluxograma da função *curva_granu()*, responsável por coordenar a geração de agregados de acordo com a curva granulométrica

A Figura 22 ilustra a geometria e distribuição típica gerada para os agregados.

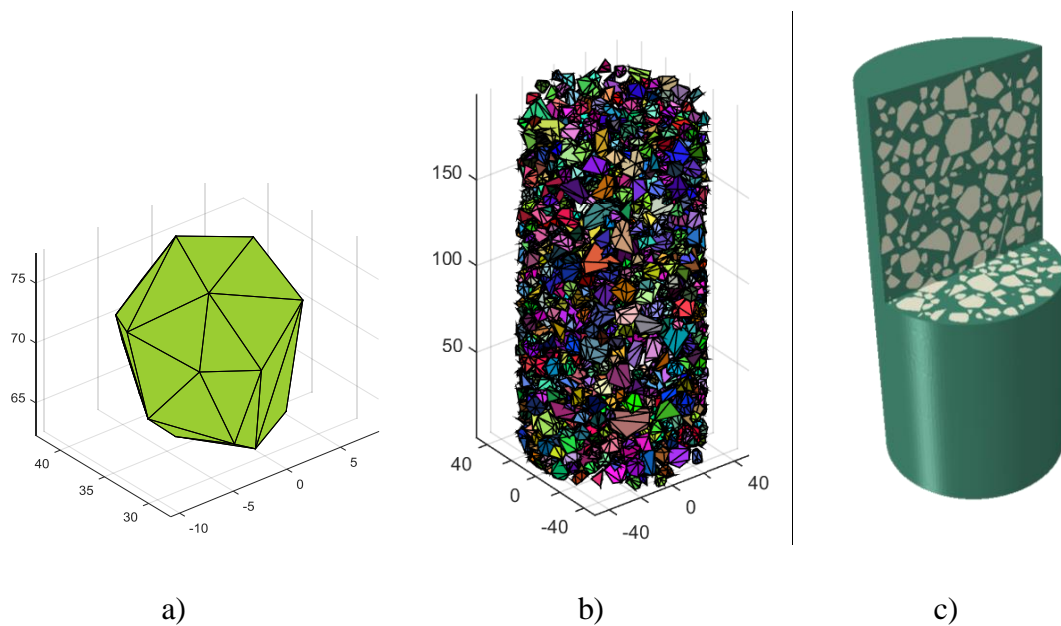


Figura 22 – Geometria típica dos modelos, eixos em mm a) Exemplo de agregado b) Distribuição dos agregados c) Detalhe seção no cilindro

4.2. Modelo 1 – Influência do volume de agregados graúdos

O Modelo 1 foi construído de forma a se avaliar a influência relativa do volume de agregados na fluência do concreto. A geometria consiste em um corpo de prova cilíndrico de dimensões $D_{cil} = 100$ mm e $H_{cil} = 200$ mm. O objetivo dessa geometria é simular numericamente um ensaio de fluência. Para analisar a influência do volume de agregados graúdos, foram gerados 3 modelos, os quais continham 20%, 30% e 40% em volume de agregados graúdos em relação ao corpo de prova. Os agregados graúdos estão dispersos numa matriz de argamassa considerada homogênea.

O modelo constitutivo dos agregados graúdos é linear elástico com $E = 80$ GPa e $\nu = 0,2$. Já a matriz de argamassa é considerada viscoelástica linear, com $\nu = 0,2$. A função de relaxação foi adotada a partir dos dados experimentais de Francinete Silva Junior (2017). Foi considerado que a relaxação da argamassa é 25% da relaxação do concreto. Assim, utilizou-se os dados de fluência do concreto REF 0,367 para estimar a sua relaxação e assim calcular a relaxação para a argamassa. A curva de relaxação adotada para argamassa é ilustrada pela Figura 23. Para análise pelo método dos elementos finitos, a função de relaxação foi regredida em termos de série de Prony.

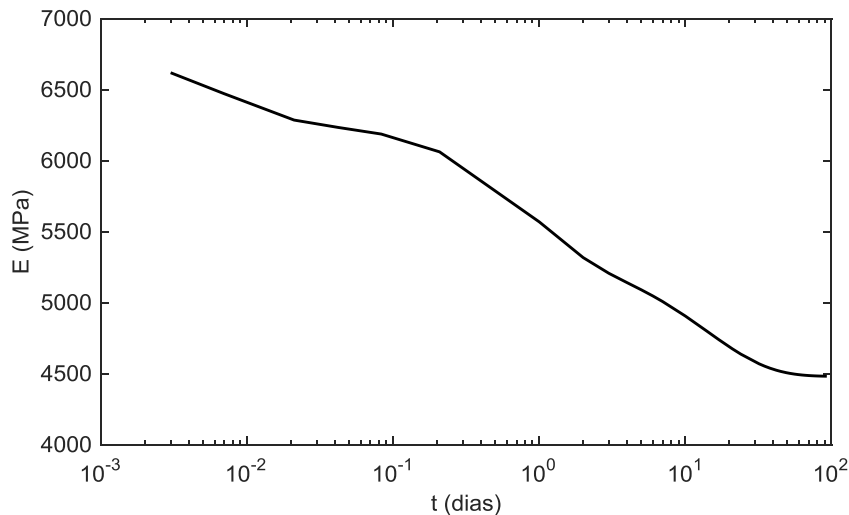


Figura 23 - Função de relaxação adotada para argamassa

Nesse modelo, considerou-se que a curva granulométrica dos agregados segue a distribuição de Fuller, onde a porcentagem passante acumulada é dada pelo Equação 5.

$$P(d) = 100 \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^{0,5} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde d é a abertura da peneira e d_{\max} é a maior dimensão dos agregados da curva. A curva granulométrica utilizada dada por porcentagem retida acumulada é dada pela Tabela 5.

Tabela 5 - Curva granulométrica dos agregados

Peneira	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	6,3 mm	4,75 mm
% retida acumulada	0	37,78	58,58	84,83	100

O volume total de agregados foi definido como uma fração do volume total do cilindro, sendo realizado três modelos: 20, 30 e 40 % de agregados.

O carregamento simula um ensaio de fluência onde o corpo de prova é submetido à compressão de 10 MPa por um período de 100 dias. O corpo de prova é simplesmente apoiado em sua base com carga distribuída no topo.

4.3. Modelo 2 – Retroanálise para determinação de $E(t)$ e $J(t)$ da matriz

O modelo 2 foi construído com o objetivo de se realizar uma retroanálise de forma a se estimar a fluência e módulo de relaxação da argamassa e pasta de cimento a partir da fluência do concreto.

Para construção do modelo foram utilizados os dados experimentais de Francinete Silva Junior (2017), que apresenta dados de ensaio de fluência para diferentes traços de concreto. Optou-se por utilizar os dados do concreto REF 0,367. A Tabela 6, Notas: a. Estimativa baseada na faixa de variação do módulo de elasticidade do gnaïsse de acordo com (FURNAS, 1997) b. Estimativa baseada no módulo de elasticidade do quartzo, o qual é aproximadamente 100 GPa

Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9 mostram o resumo dos dados utilizados e adotados para construção do modelo numérico do concreto REF 0,367. Para cálculo dos volumes dos constituintes foi adotada uma porcentagem de ar incorporado de 2% em volume. Ressalta-se que foi realizado um ajuste, onde a fração do agregado graúdo menor que 4,75 mm foi considerada como miúdo, ajustando assim as curvas granulométricas dos agregados, massa específica e traço. Esse procedimento foi realizado para limitar o tamanho mínimo dos agregados criados no modelo de concreto numérico, ou seja, agregados graúdos envoltos em

argamassa. A escolha do módulo de Young (E) dos agregados foi feita com base na origem dos agregados e na faixa de variação de E disponível na literatura. No entanto, destaca-se a alta variabilidade do parâmetro, o qual necessitaria de ensaios para ser determinado com acurácia.

Tabela 6 – Dados dos materiais constituintes do concreto REF 0,367

Material	Origem	m_{ss} (kg/m ³)	m_{ss} ajustada (kg/m ³)	Alongamento	Achatamento	E adotado (GPa)
Agregado Graúdo	Gnaïsse, Guapó-GO	2730	2730	0,726	0,726	50 ^a
Agregado Miúdo	Areia Natural de rio	2640	2646,61	-	-	90 ^b
Cimento CPV-ARI	-	3130	3130	-	-	-
Sílica	-	2210	2210	-	-	-

Notas: a. Estimativa baseada na faixa de variação do módulo de elasticidade do gnaïsse de acordo com (FURNAS, 1997) b. Estimativa baseada no módulo de elasticidade do quartzo, o qual é aproximadamente 100 GPa

Tabela 7 – Curva granulométrica agregado graúdo. Adaptado de Francinete Silva Junior (2017)

Peneira	12,5 mm	9,5 mm	6,3 mm	4,75 mm	2,36mm
% retida acumulada	0	18	70	91	96
% retida acumulada ajustada	0	19,78	76,92	100	-

Tabela 8 – Curva granulométrica agregado miúdo. Adaptado de Francinete Silva Junior (2017)

Peneira	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,6 mm	0,3 mm	0,15 mm
% retida acumulada	0	13	38	57	74	89
% retida acumulada ajustada	0	16,12	40,22	58,54	74,93	89,39

Tabela 9 – Traço em massa, concreto REF 0,367. Adaptado de Francinete Silva Junior (2017)

Traço	Cimento	Sílica	Areia	Brita	a/c	Aditivo
REF 0,367	1	0,1	1,914	1,686	0,367	1,44%
REF 0,367 ajustado	1	0,1	2,06574	1,53426	0,367	1,44%

Foram utilizados os dados de fluência experimentais do concreto REF 0,367 para carga aplicada em $t'=3$ dias . Os dados foram interconvertidos para dados de relaxação e regredidos em termos de séries de Prony como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Relaxação em termos de série de Prony regredida a partir de dados experimentais

Concreto-REF 0,367		
N	E (MPa)	ρ (dias)
$E_{inf}^{conc_exp}$	17850,00	-
$E_1^{conc_exp}$	1128,0	0,001852
$E_2^{conc_exp}$	785,8	0,01852
$E_3^{conc_exp}$	1703,0	0,1852
$E_4^{conc_exp}$	2941,0	1,85
$E_5^{conc_exp}$	2910,0	18,5
$E_0^{conc_exp}$	27317,8	-

Nota: $E_0 = E_{inf} + \sum_{i=1}^5 E_i$ é o módulo instantâneo, ou seja, $E(t=0)$

O objetivo das análises é obter uma curva de relaxação para argamassa a qual, quando atribuída no modelo numérico com os agregados graúdos dispersos, leve a um resultado de fluência e relaxação idêntico ao concreto experimental. Obtendo uma curva de relaxação para argamassa, segue-se a mesma metodologia para obter uma curva de relaxação para a pasta de cimento. Portanto, trata-se de duas etapas e dois modelos distintos que serão detalhados abaixo.

4.3.1. Modelo 2a – Concreto Numérico

O modelo busca reproduzir a mesoestrutura do concreto REF 0,367. Considera-se a curva granulométrica ajustada da Notas: a. Estimativa baseada na faixa de variação do módulo de elasticidade do gnaiss de acordo com (FURNAS, 1997) b. Estimativa baseada no módulo de elasticidade do quartzo, o qual é aproximadamente 100 GPa

Tabela 7, ou seja, agregados de 12,5 mm a 4,75 mm. A curva granulométrica, traço ajustado e massas específicas dos materiais são os dados de entrada para o script descrito na seção 4.1. A Tabela 11 faz um resumo das principais características do modelo 2a.

Tabela 11 – Dados do modelo 2a – Concreto Numérico

D_{cil} (cm)	10
H_{cil} (cm)	20
V_{agreg} (%)	26,38
D_{agreg} (mm)	12,5 a 4,75
E_{agreg} (GPa)	50
σ (MPa)	-10
t (dias)	100

Onde D_{cil} é o diâmetro do cilindro, H_{cil} é a altura do cilindro, V_{agreg} é a porcentagem de agregados em volume, D_{agreg} é a menor dimensão do agregado, E_{agreg} é o módulo de Young dos agregados, σ é a tensão aplicada e t é o tempo de aplicação da carga.

Para determinar $E_{arg}(t)$, módulo de relaxação da argamassa, foi adotada a seguinte estratégia:

Passo 1: Análise elástica, considerando $E_{arg} = E_0^{conc_exp}$. Constituinto assim um concreto numérico fictício, com módulo de elasticidade da argamassa igual ao módulo de elasticidade instantâneo do concreto experimental. Com a média dos deslocamentos no topo do cilindro, calcular $E_0^{conc_num}$. Considera-se que o módulo de elasticidade do concreto aumenta linearmente com o módulo de elasticidade da argamassa, assim estima-se $E_0^{arg} = (E_0^{conc_exp})^2 / E_0^{conc_num}$

Passo 2: Para refinar o valor encontrado para E_0^{arg} , realiza-se outra análise elástica, considerando $E_{arg} = E_0^{arg}$ como determinado no passo 1. Com a média dos deslocamentos no topo do cilindro, calcular $E_0^{conc_num}$. Considera-se que o módulo de elasticidade do concreto aumenta linearmente com o módulo de elasticidade da argamassa, assim estima-se $E_0^{arg*} = (E_0^{arg} \cdot E_0^{conc_exp}) / E_0^{conc_num}$, onde E_0^{arg*} é o novo módulo de elasticidade instantâneo da argamassa.

Passo 3 e Passo 4: Seguir a metodologia dos passos 1 e 2 para $E_{inf}^{conc_exp}$ e E_{inf}^{arg} , ou seja, utiliza-se agora o módulo de relaxação do concreto no infinito.

Passo 5: Tendo E_0^{arg} e $E_{\text{inf}}^{\text{arg}}$ estimados, pode-se estimar um módulo de relaxação, $E_{\text{arg}}(t)$, para a argamassa. A estimativa de $E_{\text{arg}}(t)$ em termos de Série de Prony é realizada através do método de Nelder-Mead. O algoritmo é utilizado para minimização de uma função de n variáveis, sendo comumente utilizado em casos de otimização não-linear (NELDER; MEAD, 1965).

Passo 6: Com $E_{\text{arg}}(t)$ em termos de série de Prony, realiza-se uma simulação viscoelástica do concreto numérico. Os deslocamentos médios no topo do cilindro ao longo do tempo são utilizados para calcular a fluência e relaxação do concreto numérico. Os resultados do concreto numérico são comparados com o do concreto experimental. Foi adotada uma tolerância de 1% na diferença entre os resultados do concreto numérico e experimental nos pontos t onde os deslocamentos são calculados na análise viscoelástica. Caso os resultados não coincidam com a tolerância desejada estima-se uma nova curva de relaxação para a argamassa. Isso é feito novamente através do algoritmo de Nelder-Mead utilizando o resultados de fluência e relaxação obtidos da simulação numérica.

Passo 7: O passo 6 é repetido até a convergência, ou seja, quando os resultados do concreto numérico aproximarem bem os resultados do concreto experimental. Ou seja, nesse momento, supõe-se que a argamassa estimada em conjunto com os agregados utilizados aproxima bem os resultados experimentais.

4.3.2. Modelo 2b – Argamassa Numérica

Para estimar a curva de fluência e relaxação da pasta de cimento, cria-se um modelo que represente a fração da argamassa do concreto REF 0,367. Para isso, considera-se a curva granulométrica ajustada da Tabela 8, no entanto modela-se apenas os agregados de 4,75 mm a 0,03 mm, pois a inclusão de agregados da faixa de 0,03 mm a 0,15 mm criaria um número excessivo de agregados no modelo, aumentando a exigência computacional. Assim, entra-se no script de geração com os dados da curva até 0,03 mm. Assim, o modelo consiste em agregados miúdos mais a matriz de pasta de cimento que inclui agregados menores que 0,03 mm e outros finos. Daqui para frente, quando o texto se referir a pasta, na verdade inclui-se pasta e finos. A Tabela 12 faz um resumo das principais características do modelo 2b.

Tabela 12 – Dados do modelo 2b – Argamassa Numérica

D_{cil} (cm)	1,25
H_{cil} (cm)	2,5
V_{agreg} (%)	37,29
D_{agreg} (mm)	4,75 a 0,03
E_{agreg} (GPa)	90
σ (MPa)	-10
t (dias)	100

Para estimativa de $E_{pasta}(t)$ adota-se metodologia similar à adotada para o Modelo 2a, nesse caso utiliza-se $E_{arg}(t)$ determinada pela metodologia do Modelo 2a no lugar de $E_{conc_exp}(t)$.

4.4. Modelo 3 – Retroanálise para estimativa de E do agregado

O modelo 3 foi construído para realizar uma retroanálise de forma a se estimar o módulo de elasticidade dos agregados graúdos do concreto. Ward, Neville e Singh (1969) fizeram uma série de ensaios de fluência em concretos, argamassas e pastas de cimento com o objetivo de estudar a influência do ar incorporado na fluência da mistura. A carga foi aplicada em $t'=7$ dias e teve duração de 150 dias. O artigo traz conjuntos de concreto e argamassa equivalentes, ou seja, a argamassa ensaiada apresenta traço equivalente a argamassa contida no concreto. Escolheu-se trabalhar com o concreto C4 e argamassa M6.

A Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 mostram os dados de massa específica, granulometria e traço utilizados para construção do modelo numérico do concreto C4. Para cálculo dos volumes foi adotada uma porcentagem de ar incorporado de 2,8% em volume.

Tabela 13 – Dados dos materiais constituintes do concreto C4. Adaptado de Ward, Neville e Singh (1969)

Material	Origem	m_{SSS} (kg/m ³)	Alongamento adotado	Achatamento adotado
Agregado Graúdo	Principalmente quartzo e calcário	2650	0,9	0,9
Agregado Miúdo	Areia Natural	2640	-	-
Cimento Tipo III – ASTM C150	-	3150	-	-

Tabela 14 – Curva granulométrica agregado graúdo. Adaptado de Ward, Neville e Singh (1969)

Peneira	12,7 mm	9,51 mm	6,35 mm	4,76 mm	2,38mm
% retida acumulada	0	3	51	83	100

Tabela 15 – Traço em massa, concreto C4. Adaptado de Ward, Neville e Singh (1969)

Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c
C4	1	2,588	3,312	0,62

Os dados experimentais de fluência foram interconvertidos em dados de relaxação e regredidos em termos de séries de Prony. Dessa forma obteve-se a curva de fluência e relaxação experimental para o concreto C4 e argamassa M6, como mostra a Tabela 16.

Tabela 16 – Relaxação em termos de série de Prony regredida a partir de dados experimentais

N	Concreto C4	Argamassa M6	ρ (dias)
	E (MPa)	E (MPa)	
E_{inf}	12780	7435	
E_1	1381	1119	0,003664
E_2	1382	1120	0,03664
E_3	1380	2702	0,3664
E_4	4204	3062	3,664
E_5	2948	3312	36,64
E_0	24075	18750	

Nota: $E_0 = E_{inf} + \sum_{i=1}^5 E_i$ é o módulo instantâneo, ou seja, $E(t=0)$

A Tabela 17 faz um resumo das principais características do modelo 3.

Tabela 17 – Dados do modelo 3 – Concreto numérico C4

D_{cil} (cm)	7,6
H_{cil} (cm)	23,5
V_{agreg} (%)	38,17
D_{agreg} (mm)	12,7 a 2,38
$E_{arg}(t)$ (GPa)	E_{M6} (t)
σ (MPa)	-10,23
t (dias)	150

Optou-se por realizar 3 simulações, considerando $E_{agreg} = 50$ GPa, 40 GPa e 30 GPa. Os resultados de fluência e relaxação do concreto numérico calculados com os deslocamentos médios no topo do cilindro são comparados com os dados experimentais de fluência e relaxação do concreto C4. A partir dos resultados dos modelos analisa-se o comportamento a medida que se varia o módulo de elasticidade dos agregados.

5. RESULTADOS

Essa seção apresenta e discute os resultados da simulação computacional. Além disso são exploradas as limitações do modelo.

5.1. Resultados e Análise – Modelo 1

A deformação média do cilindro em cada incremento de tempo foi calculada através da razão do valor médio de deslocamento vertical no topo do cilindro e a altura deste. Com os valores de deformação e a tensão aplicada constante de 10 MPa calcula-se $J(t)$. A Figura 24 apresenta as curvas de fluência calculadas para a argamassa adotada e os modelos com 20%, 30% e 40% de agregados graúdos.

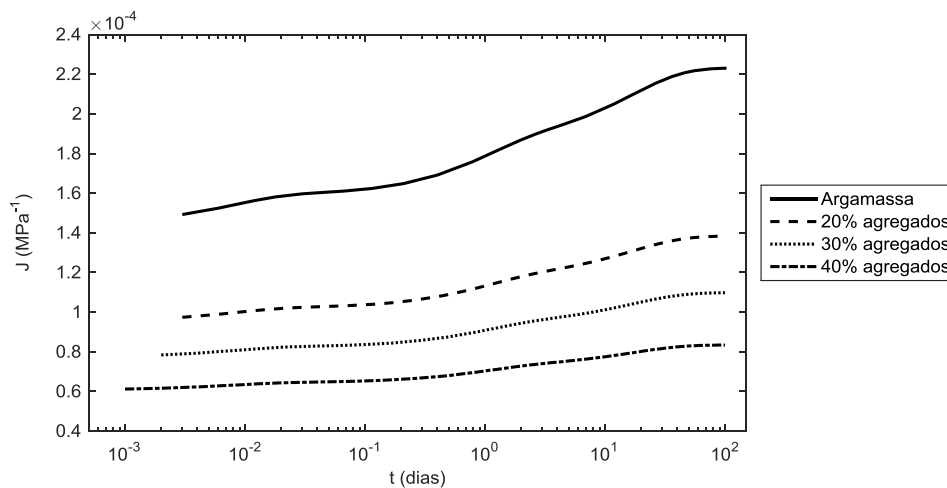


Figura 24 - Função Fluência, $J(t)$, calculada a partir da simulação

Através da análise do gráfico é possível perceber que a inserção de 20% de agregados graúdos já produz uma diminuição significativa na deformação inicial e ao longo do tempo. Além disso, um aumento no volume de agregados graúdos produz uma diminuição adicional nas deformações. A Tabela 18 apresenta uma comparação dos resultados de forma a avaliar a redução percentual de deformações totais à medida que se aumenta o volume de agregados. Onde J_i é a fluência de cada um dos modelos e J_{arg} é a fluência da argamassa.

Tabela 18 – Comparação percentual da fluência com aumento de agregados

	Argamassa	20% agregados	30% agregados	40% agregados
$J_i(t=0)$ (MPa ⁻¹)	1,47E-04	9,52E-05	7,72E-05	6,08E-05
$J_i(t=0)/J_{arg}(t=0)$ (%)	100%	65%	52%	41%
$J_i(t=100)$ (MPa ⁻¹)	2,23E-04	1,38E-04	1,10E-04	8,34E-05
$J_i(t=100)/J_{arg}(t=100)$ (%)	100%	62%	49%	37%

Os resultados mostram uma redução de 35% já para um acréscimo de 20% de agregados graúdos para as deformações elásticas. Para as deformações totais após 100 dias o comportamento parece seguir a mesma tendência. Esses resultados tem correlação direta com o módulo de elasticidade inicial dos agregados e a função fluência da argamassa. Nesse estudo foi utilizado agregados com módulo de elasticidade 80 GPa, bem superior ao módulo inicial da argamassa mostrada pela função relaxação da Figura 23. Assim, os agregados graúdos enrijecem o concreto.

Por outro lado, o gráfico apresentado não é esclarecedor quanto ao impacto do volume de agregados nas deformações adicionais devido à fluência do material. Essa análise é feita pela função fluência normalizada pelo seu valor em $t = 0$, ou seja, deformações elásticas. Esse gráfico permite visualizar em que percentual as deformações iniciais aumentam com o passar do tempo. A Figura 25 mostra a fluência normalizada para os quatro casos estudados.

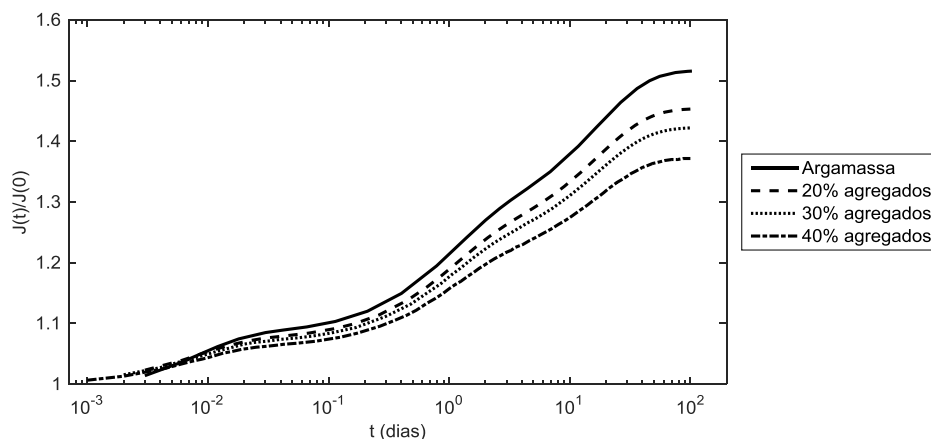


Figura 25 - Função Fluência Normalizada, $J(t)/J(0)$

Analisando a Figura 25 é possível perceber que um maior volume de agregados graúdos leva a uma menor deformação devido a fluência. Aos 100 dias, a argamassa desenvolve uma deformação devido a fluência de 49% em relação a deformação elástica, o modelo com 20% de agregados graúdos desenvolve 45%, o modelo com 30% de agregados graúdos desenvolve 42% e o modelo com 40% de agregados graúdos desenvolve 37% de deformação adicional. Esses resultados mostram que além de afetar a rigidez inicial, um aumento de volume de agregados graúdos pode levar a uma diminuição das deformações de fluência. No entanto, é interessante notar que mesmo com um volume alto de material elástico, as deformações lentas da parcela viscoelástica tem grande influência no comportamento em macroescala do concreto.

A fluência da fase viscoelástica, considerada como a argamassa nesse modelo, faz com que ao longo do tempo suas deformações aumentem modificando assim o estado de tensão e deformação na matriz e nos agregados que compõem o concreto. A Figura 26 mostra o estado inicial e o estado com $t = 100$ dias das deformações mínimas principais no modelo com 40% de agregados graúdos. Percebe-se o aumento gradual das deformações na argamassa que ocorre notadamente no topo do cilindro e nas áreas de concentrações de tensão devido a distribuição dos agregados.

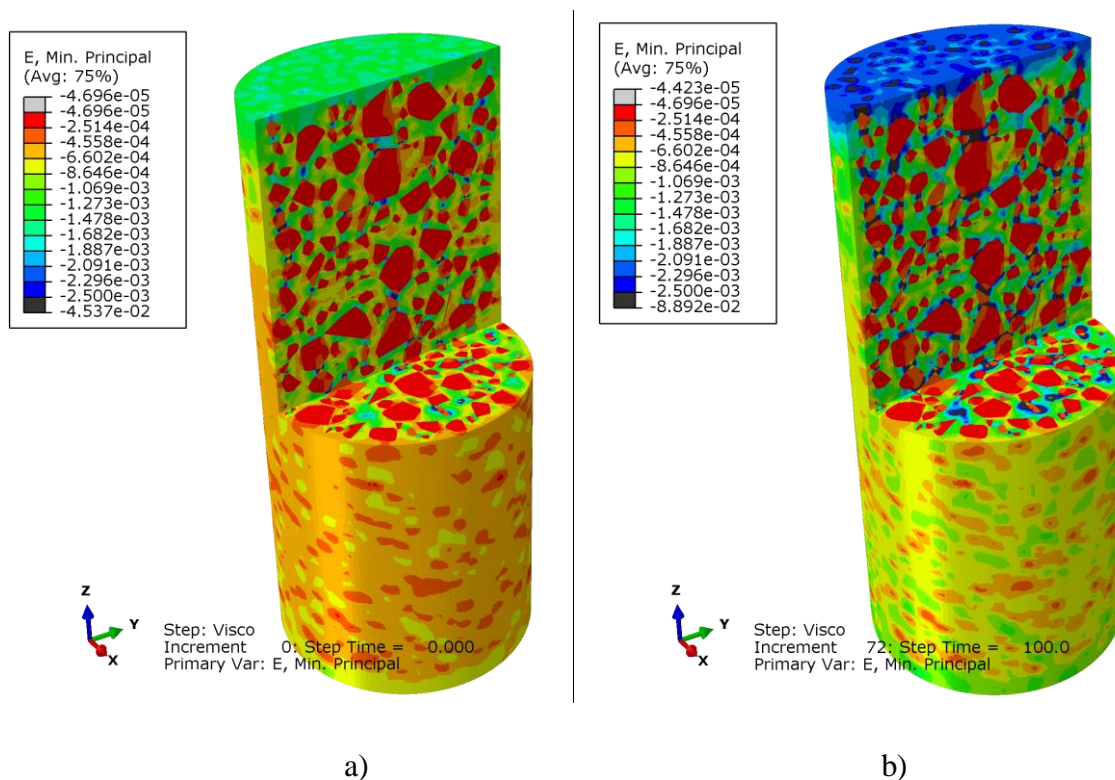


Figura 26 – Deformação mínima principal. a) Elástica ($t = 0$) b) Elástica + Fluência ($t = 100$ dias)

5.2. Resultados e Análise – Modelo 2

5.2.1. Modelo 2a – Concreto Numérico

Os resultados para o concreto numérico são apresentados de acordo com os passos descritos na metodologia para estimativa de $E_{arg}(t)$ apresentados na seção 4.3.

A Tabela 19 e Tabela 20 mostram os resultados para estimativa inicial de E_0^{arg} e E_{inf}^{arg} , módulo de relaxação instantâneo e de longa duração da argamassa, respectivamente.

Tabela 19 –Análise elástica para estimativa inicial de E_0^{arg} , valor adotado sombreado

Estimativa 1	$E_{arg} = E_0^{conc_exp}$ (MPa)	27317,8
	$E_0^{conc_num}$ (MPa)	32423,58
	E_0^{arg} (MPa)	23016,03
Estimativa 2	$E_{arg} = E_0^{arg}$ (MPa)	23016,03
	$E_0^{conc_num}$ (MPa)	28679,96
	E_0^{arg} (MPa)	21922,88

Tabela 20 –Análise elástica para estimativa inicial de E_{inf}^{arg} , valor adotado sombreado

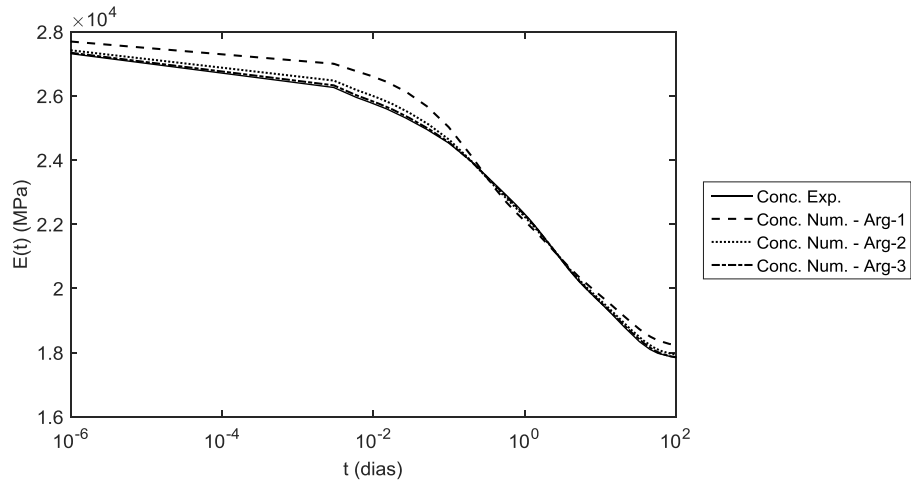
Estimativa 1	$E_{arg} = E_{inf}^{conc_exp}$ (MPa)	27317,8
	$E_{inf}^{conc_num}$ (MPa)	23877,95
	E_{inf}^{arg} (MPa)	13343,80
Estimativa 2	$E_{arg} = E_{inf}^{arg}$ (MPa)	13343,80
	$E_{inf}^{conc_num}$ (MPa)	19299,80
	E_{inf}^{arg} (MPa)	12341,41

A partir de E_0^{arg} e E_{inf}^{arg} estimados, estima-se a Arg-1, primeira estimativa para a curva de relaxação da argamassa em termos de série de Prony. Com os resultados de $E_{conc_num}(t)$ utilizando Arg-1 estima-se uma nova curva para argamassa, Arg-2, e posteriormente Arg-3.

Foram necessários apenas 3 curvas tentativas para convergência, ou seja,

$$E_{conc_num}(t) \cong E_{conc_exp}(t).$$

A Tabela 9 mostra os parâmetros da série de Prony para as diferentes argamassas utilizadas na



simulação. Já a

Figura 27 mostra as curvas de $E_{conc_num}(t)$ para as diferentes argamassas e $E_{conc_exp}(t)$, onde pode se ver que o modelo com a Arg-3 aproxima bem os dados experimentais.

Tabela 21 – Parâmetros de Prony estimados para $E_{arg}(t)$

	Arg-1	Arg-2	Arg-3	
N	E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)	ρ (dias)
E_{inf}^{arg}	12341,41	12061,8	11986,74	-
E_1^{arg}	779,9	1106,57	1202,21	0,001852
E_2^{arg}	543,3	760,04	815,07	0,01852
E_3^{arg}	3562,8	2391,11	2014,00	0,1852
E_4^{arg}	2360,2	2757,59	2950,21	1,85
E_5^{arg}	2335,3	2546,01	2570,99	18,5
E_0^{arg}	21922,88	21623,1	21539,2	-

Nota: $E_0 = E_{inf} + \sum_{i=1}^5 E_i$ é o módulo instantâneo, ou seja, $E(t=0)$

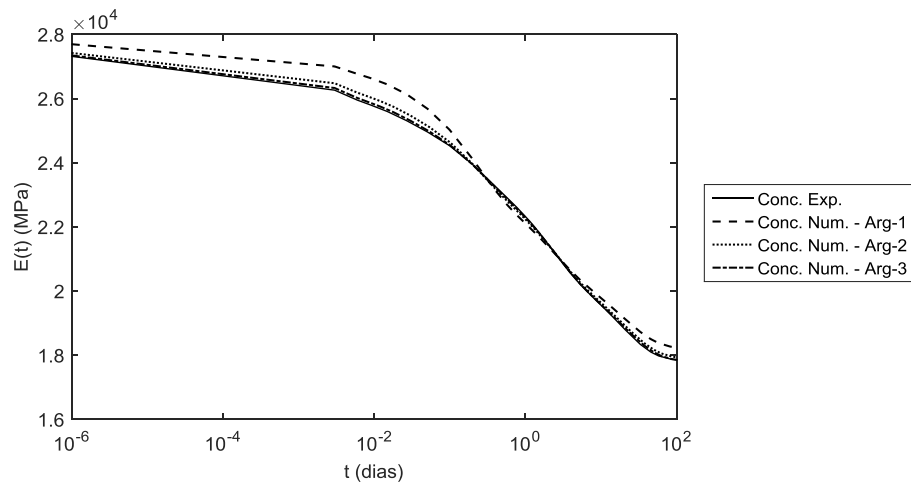


Figura 27 – Módulo de relaxação experimental e numérico do concreto para diferentes $E_{arg}(t)$

A Figura 28 mostra as curvas de fluência para os modelos numéricos e o experimental, onde pode-se notar a aproximação do modelo com Arg-3 dos resultados experimentais.

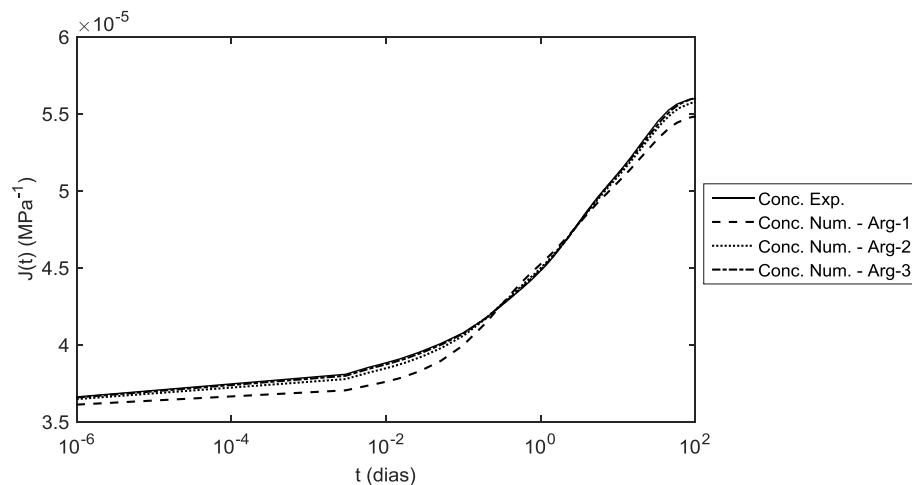


Figura 28 – Função fluência experimental e numérica do concreto para diferentes $J_{arg}(t)$

Para avaliar a influência da distribuição aleatória dos agregados e formato do cilindro foram gerados mais 4 modelos com os mesmos dados de entrada: curva granulométrica e traço. Abaixo a descrição da geometria desses modelos:

Modelo A: modelo utilizado para determinar a curva Arg-3 como descrito anteriormente na seção 4.3.1. $D_{cil} = 10$ cm e $H = 20$ cm, como diâmetro e altura do cilindro, respectivamente.

Modelo B e C: mesmos dados de entrada do Modelo A, a diferença aqui é a aleatoriedade da forma e posição dos agregados gerados. $D_{cil} = 10$ cm e $H = 20$ cm, como diâmetro e altura do cilindro, respectivamente.

Modelo D: mesma granulometria e traços dos modelos anteriores, no entanto adota-se um cilindro de $D_{cil} = 7,6$ cm e $H = 23,5$ cm, como diâmetro e altura do cilindro, respectivamente.

Modelo E: granulometria da zona granulométrica 9,5/25 da ABNT NBR 7211-2009, equivalente a Brita 1, mesmo traço dos modelos anteriores. $D_{cil} = 10$ cm e $H = 20$ cm, como diâmetro e altura do cilindro, respectivamente.

Com esses modelos, considerou-se $E_{agreg} = 50$ GPa como anteriormente e curva de relaxação da Arg-3. A Figura 29 mostra os resultados da função fluência para os diferentes modelos. Percebe-se que os modelos apresentam resultados idênticos, o que mostra que uma mudança aleatória na posição e forma dos agregados, mantendo seu volume, não implica em grandes mudanças no comportamento viscoelástico do concreto. Uma curva granulométrica diferente também não mostrou mudanças sensíveis no resultado, no entanto, caberia realizar simulações com uma gama maior de curvas para resultados mais conclusivos.

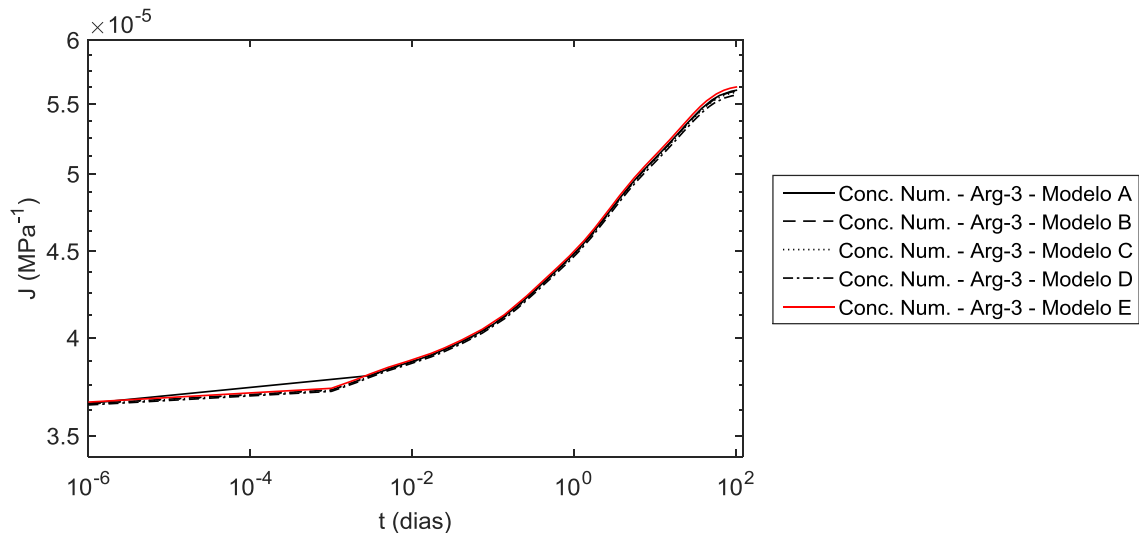


Figura 29 – Função fluência, $J(t)$, para diferentes modelos com o mesmo volume de agregados e curva de relaxação da Arg-3

5.2.2. Modelo 2b – Argamassa Numérica

Para estimar $E_{pasta}(t)$ considera-se $E_{arg}(t)$ da Arg-3 de acordo com a Tabela 21. Ressalta-se que “pasta” aqui refere-se a pasta de cimento mais uma fração de agregados de pequena

granulometria como explicado na seção 4.3.2. Procura-se um $E_{pasta}(t)$ que quando simulado com os agregados miúdos leve ao $E_{arg}(t)$ como explicado na seção 4.3.2.

A Tabela 22 e Tabela 23 mostram os resultados para estimativa inicial de E_0^{pasta} e E_{inf}^{pasta} , módulo de relaxação instantâneo e de longa duração da pasta respectivamente.

Tabela 22 –Análise elástica para estimativa inicial de E_0^{pasta} , valor adotado sombreado

Estimativa 1	$E_{pasta} = E_0^{arg}$ (MPa)	21539,2
	$E_0^{arg_num}$ (MPa)	37064,82
	E_0^{pasta} (MPa)	12516,94
Estimativa 2	$E_{pasta} = E_0^{pasta}$ (MPa)	12516,94
	$E_0^{arg_num}$ (MPa)	25765,20
	E_0^{pasta} (MPa)	10463,93

Tabela 23 –Análise elástica para estimativa inicial de E_{inf}^{pasta} , valor adotado sombreado

Estimativa 1	$E_{pasta} = E_{inf}^{arg}$ (MPa)	11986,74
	$E_{inf}^{arg_num}$ (MPa)	25000,35
	E_{inf}^{pasta} (MPa)	5747,20
Estimativa 2	$E_{pasta} = E_{inf}^{pasta}$ (MPa)	5747,20
	$E_{inf}^{arg_num}$ (MPa)	14544,36
	E_{inf}^{pasta} (MPa)	4736,56

De forma idêntica à realizada no modelo 2a, a partir de E_0^{pasta} e E_{inf}^{pasta} estimados, estima-se a Pasta-1, primeira estimativa para a curva de relaxação da pasta em termos de série de Prony. Com os resultados de $E_{arg_num}(t)$ utilizando a Pasta-1 estima-se uma nova curva para pasta, Pasta-2, e posteriormente Pasta-3. Foram necessárias apenas 3 curvas tentativas para convergência, ou seja, $E_{arg_num}(t) \cong E_{arg}(t)$.

A Tabela 24 mostra os parâmetros da série de Prony para as diferentes pastas utilizadas na simulação. Já a Figura 30 mostra as curvas de $E_{arg_num}(t)$ para as diferentes pastas e $E_{arg}(t)$, curva estimada da argamassa do concreto REF 0,367. Adicionalmente, a Figura 31 traz as curvas de fluência para os modelos analisados.

Tabela 24 – Parâmetros de Prony estimados para $E_{pasta}(t)$

	Pasta-1	Pasta-2	Pasta-3	
N	E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)	ρ (dias)
E_{inf}^{pasta}	4736,56	4526,08	4482,05	-
E_1^{pasta}	589,08	707,08	740,81	0,001852
E_2^{pasta}	399,39	482,74	493,11	0,01852
E_3^{pasta}	2530,4	1643,73	1352,4	0,1852
E_4^{pasta}	1180,08	1391,02	1534,25	1,85
E_5^{pasta}	1028,40	1168,55	1166,93	18,5
E_0^{pasta}	10463,9	9919,2	9769,55	-

Nota: $E_0 = E_{inf} + \sum_{i=1}^5 E_i$ é o módulo instantâneo, ou seja, $E(t=0)$

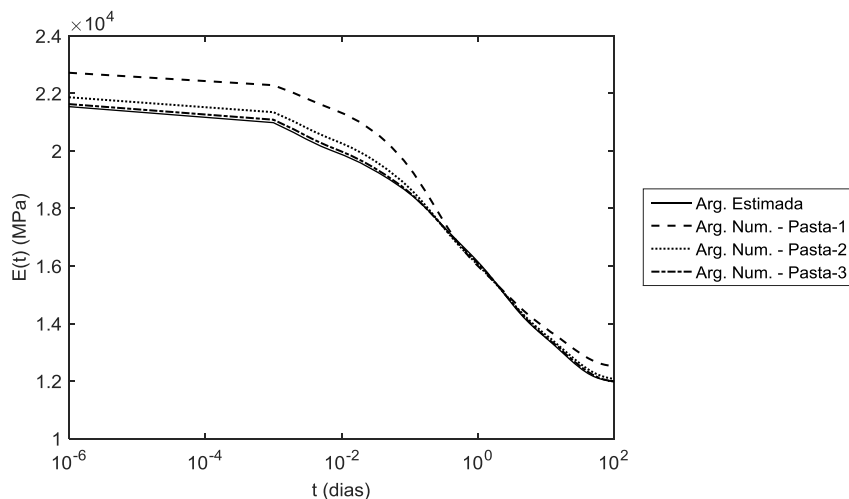


Figura 30 – Módulo de relaxação estimado (Arg-3) e da argamassa numérica para diferentes

$$E_{pasta}(t)$$

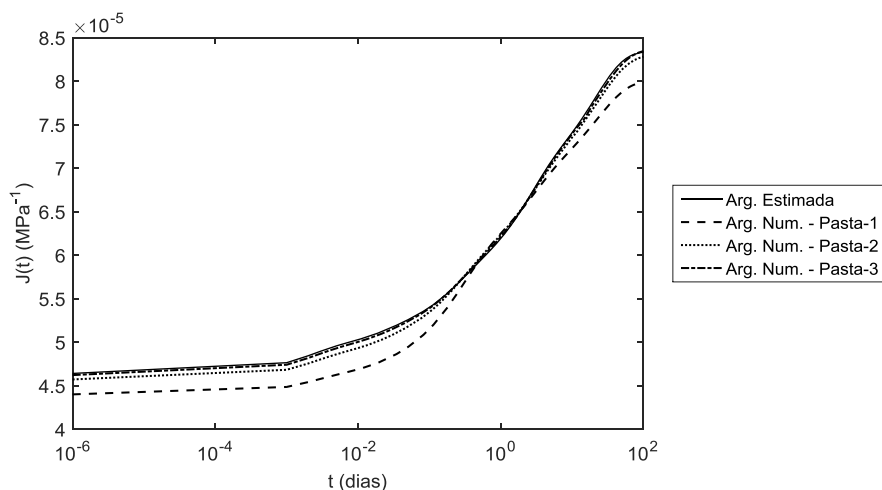


Figura 31 - Função fluência da argamassa estimada e argamassa numérica para diferentes

$$J_{pasta}(t)$$

5.2.3. Resumo dos resultados do modelo 2

A Figura 32 e Figura 33 mostram as curvas de $E(t)$ e $J(t)$ calculadas para o concreto de REF 0,367 pela metodologia proposta. Ressalta-se que foi realizada uma suposição acerca do módulo de elasticidade dos agregados, os quais foram mantidos constantes. Na verdade, existe uma ampla faixa de variação para determinação desse módulo o que torna necessário ensaios para resultados mais acurados. De forma alternativa pode-se realizar a análise para diferentes módulos de elasticidade do agregado, de forma a obter uma faixa de variação para $E(t)$ e $J(t)$

dos constituintes. Além disso, carecem resultados experimentais de argamassa e pastas equivalentes às usadas no concreto para validação do modelo.

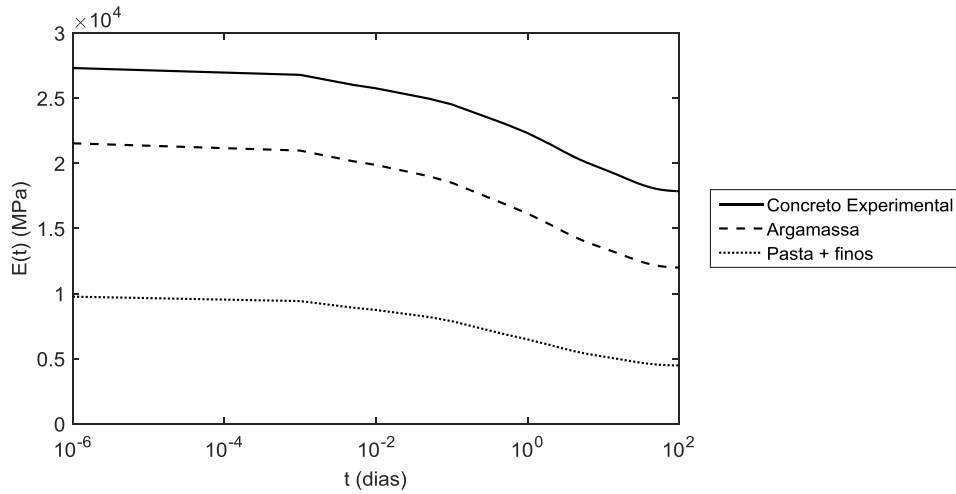


Figura 32 – Curva $E(t)$ do concreto e curvas calculadas para a argamassa e pasta

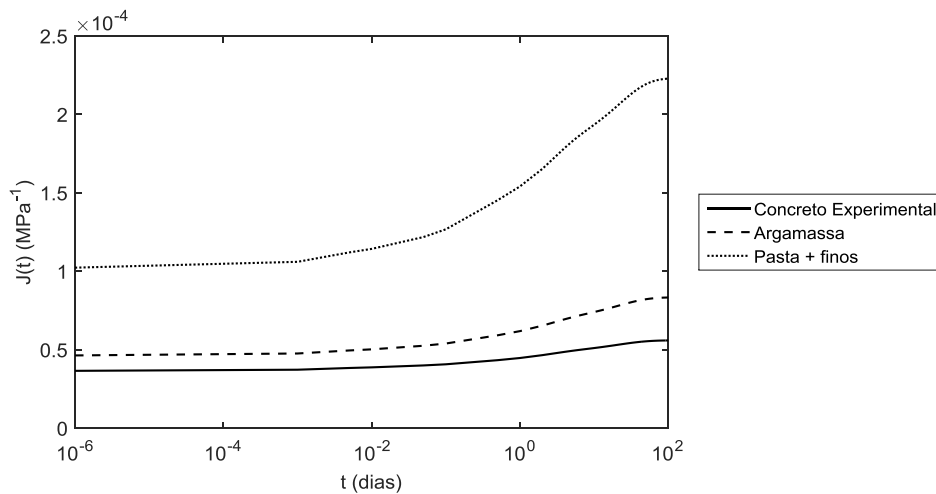


Figura 33 – Curva $J(t)$ do concreto e curvas calculadas para a argamassa e pasta

5.3. Resultados e Análise – Modelo 3

Os resultados de fluência e relaxação do Modelo 3 são apresentadas na Figura 34 e Figura 35. Como explicado na seção 4.4, foram realizadas simulações considerando três valores distintos de E_{agreg} e considerando a função de relaxação da argamassa igual à experimental (M6), verificou-se então se o resultado numérico aproxima bem o concreto experimental C4.

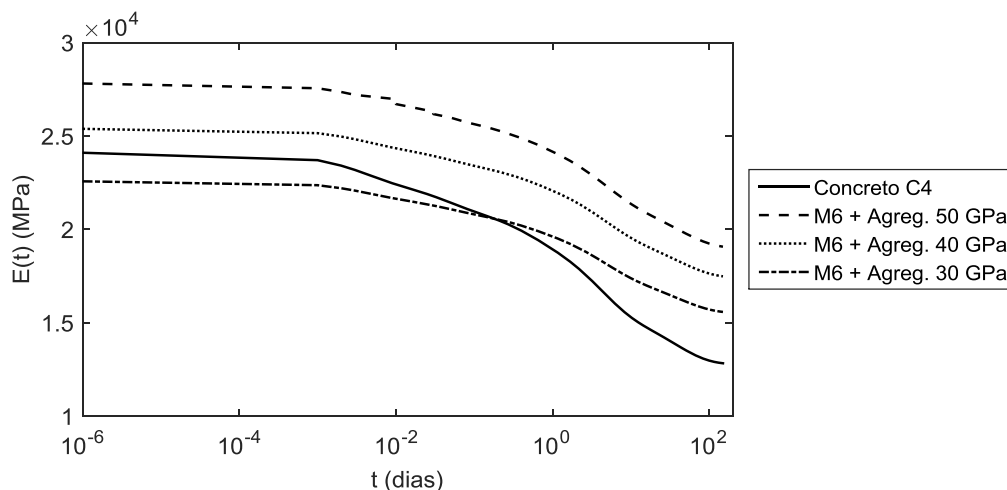


Figura 34 – Módulo de relaxação para o concreto C4 experimental e os modelos numéricos testados com diferentes E_{agreg}

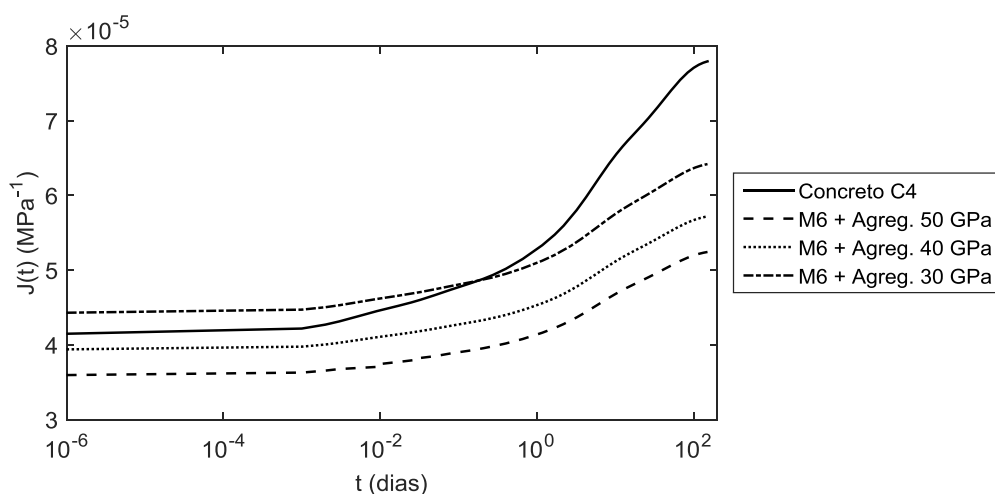


Figura 35 – Função fluência para o concreto C4 experimental e os modelos numéricos testados com diferentes E_{agreg}

A análise da Figura 34 e Figura 35 mostra que os resultados das simulações não puderam aproximar bem o resultado experimental do concreto C4, especialmente para idades mais avançadas, onde os modelos numéricos se mostram mais rígidos que o experimental.

Assim, procurou-se hipóteses para justificar os resultados do modelo e buscou-se melhorá-lo. Para isso, utilizando o modelo com agregados de 40 GPa, refinou-se a malha, passando de um *seed size* (tamanho aproximado de elemento para geração da malha) de 2 mm para 1,5 mm. Adicionalmente, foi criado um segundo modelo, com uma nova distribuição aleatória de agregados, *seed size* de 2 mm o qual foi atribuído $E_{agreg} = 40$ GPa novamente. Os resultados

para o modelo original (modelo 1), modelo com malha refinada (modelo 1 refinado) e modelo 2 são mostrados na Figura 36. Analisando o gráfico se percebe, que a alteração do modelo não teve grandes impactos no resultado.

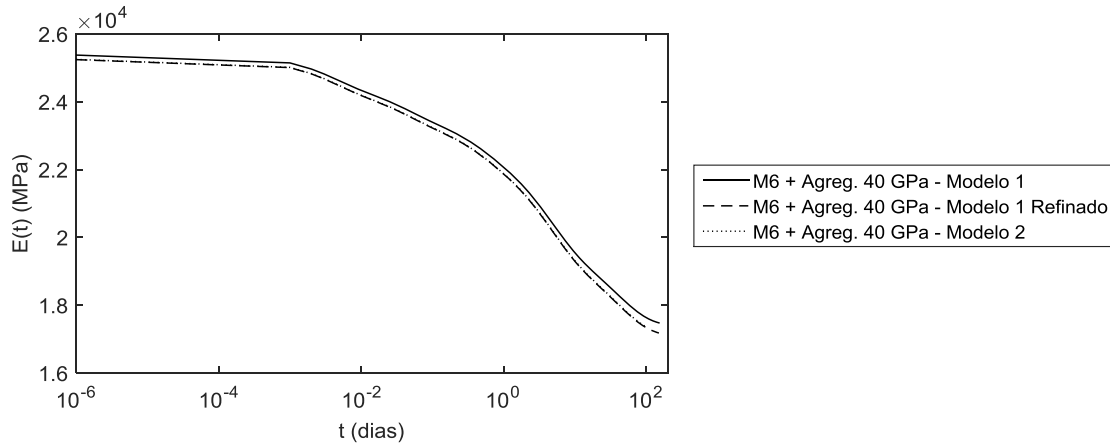


Figura 36 – Módulo de relaxação para diferentes modelos utilizando $E_{agreg} = 40$ GPa

Como hipóteses para o resultado ruim dos modelos tem-se a não consideração da menor rigidez na zona de interface entre agregado graúdo e argamassa e ausência da consideração da microfissuração da argamassa. Destaca-se também que o estudo careceu de uma análise mais detalhada sobre a qualidade da malha, sendo esse aspecto limitado principalmente pelas máquinas disponíveis, uma vez que o modelo requeria uma alta densidade de malha. Uma alternativa, seria construir modelos com dimensões menores, desde que seja mantida uma amostra representativa da mesoestrutura do concreto. Ressalta-se que aqui buscou-se utilizar as dimensões dos corpos-de-prova experimentais utilizados pelos autores.

5.4. Limitações dos modelos

O modelo implementado nesse trabalho é de grande valor para o estudo da fluência considerando a mesoescala do concreto, entretanto existe uma série de fenômenos que foram desconsiderados. Um modelo de dano pode ser implementado para avaliar os efeitos da microfissuração que ocorre no concreto devido às concentrações de tensão. A Zona da Interface de Transição entre agregado graúdo e argamassa não foi estudada e sua influência não foi considerada no modelo. Sabe-se que essa zona apresenta uma menor rigidez e resistência e existem trabalhos que propõem metodologias para modelar e avaliar a sua influência no comportamento do concreto (GRONDIN; MATALLAH, 2014; LAVERGNE *et al.*, 2015; HONORIO; BARY; BENBOUDJEMA, 2016; BARY; BOURCIER; HELFER, 2017;).

Por outro lado, os resultados apresentados não podem ser extrapolados para condições diferentes do modelo. É preciso avaliar qual o impacto da diferença relativa de rigidez entre a fase elástica e a fase viscoelástica. Apesar da literatura apresentar resultados que indicam pouco impacto da forma do agregado na fluência do concreto (LAVERGNE *et al.*, 2015), a forma pode se tornar influente caso se considere um modelo de dano para a matriz viscoelástica, uma vez que a forma terá impacto direto nas concentrações de tensão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta monografia analisou o comportamento viscoelástico do concreto considerando a sua mesoestrutura através de modelos computacionais. Foi realizada uma descrição do algoritmo para geração dos agregados e sua distribuição num cilindro. Com uso do algoritmo foi possível construir modelos 3D do concreto em mesoescala considerando agregados graúdos poliédricos envoltos por argamassa. Para estudar a fluência considerou-se os agregados com comportamento elástico e a argamassa com comportamento viscoelástico.

A simulação dos modelos através do Método dos Elementos Finitos mostrou uma sensível diminuição das deformações à medida que se aumenta o volume de agregados. Esse comportamento era esperado na medida em que os agregados graúdos possuem maior módulo de Elasticidade em relação à argamassa, gerando assim um conjunto mais rígido. Assim, para um volume de 40% de agregados foi obtida uma redução de 59% na deformação elástica do concreto.

Por outro lado, além de diminuir as deformações totais, o aumento do volume de agregados proporciona menores deformações devido à fluência, ou seja, as deformações adicionais além da instantânea. Analisando deformações aos 100 dias após carregamento, a argamassa adotada apresenta 49% de deformações adicionais enquanto o concreto com 40% de agregados graúdos apresenta 37% de deformações adicionais.

Também foi proposta uma metodologia para se realizar uma retroanálise de dados de fluência do concreto de forma a se obter a curva de fluência da argamassa e da pasta. A metodologia foi aplicada em dados experimentais de Francinete Silva Junior (2017) e foi possível estimar a curva da argamassa e da pasta. No entanto, os resultados não puderam ser validados devido à ausência de dados experimentais para a argamassa e pasta. Outra dificuldade foi a escolha do módulo de Young dos agregados, uma vez que apenas a origem da rocha se mostrou insuficiente para fazer boas estimativas para esse módulo. Assim, recomenda-se no futuro, realização de ensaios de fluência na argamassa e pasta descritas, bem como, ensaios para determinar o módulo de Young dos agregados, possibilitando assim a validação do modelo.

Por fim, foi realizada uma retroanálise para estimar o módulo de Young dos agregados do concreto, tendo a curva de fluência experimental do concreto e da argamassa. Foram utilizados os dados de Ward, Neville e Singh (1969). Foram analisados 3 módulos de elasticidade para os

agregados, no entanto, as propriedades homogeneizadas do modelo numérico não seguiram a mesma tendência dos dados experimentais do concreto em nenhum caso. Foram levantadas algumas hipóteses para essa divergência, que devem ser exploradas em trabalhos futuros. Entre elas, cita-se: necessidade de um estudo mais detalhado da malha, variabilidade do módulo de elasticidade dos agregados em função de suas dimensões, ausência da zona de transição do modelo e ocorrência de microfissuração.

A metodologia e resultados apresentados podem ser utilizados como motivadores para trabalhos futuros que considerem a mesoestrutura do concreto e sua caracterização quanto à fluência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C. V. D. S. (2018) **Implementação de um Modelo Constitutivo Viscoelástico com Envelhecimento do Concreto no Software Abaqus**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 08A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 56p.

BARY, B.; BOURCIER, C.; HELFER, T. Analytical and 3D numerical analysis of the thermoviscoelastic behavior of concrete-like materials including interfaces. **Advances in Engineering Software**, v. 112, p. 16–30, 2017.

BAŽANT, Z. P.; YU, Q.; LI, G.-H. Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms. **Journal of Structural Engineering**, v. 138, n. 6, p. 676–686, 2012.

BOURCIER, C.; DRIDI, W.; CHOMAT, L.; LAUCOIN, E.; BARY, B.; ADAM, E. Combs: open source python library for RVE generation. Application to microscale diffusion simulations in cementitious materials. In: SNA + MC 2013 - JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERCOMPUTING IN NUCLEAR APPLICATIONS + MONTE CARLO 2014, **Anais...** Paris, France, 2013

CASCADE, O. **SALOME: The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation**. 2018. Disponível em: <<http://www.salome-platform.org/>>. Acesso em: 25 jun. 2018.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity, Second Edition**. [s.l.] : INscribe Digital, 1982.

CHRISTENSEN, R. M.; LO, K. H. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 27, n. 4, p. 315–330, 1979.

DAS, S.; MAROLI, A.; NEITHALATH, N. Finite element-based micromechanical modeling of the influence of phase properties on the elastic response of cementitious mortars. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 153–166, 2016.

DUNANT, C. F.; BARY, B.; GIORLA, A. B.; PÉNIGUEL, C.; SANAHUJA, J.; TOULEMONDE, C.; TRAN, A.; WILLOT, F.; YVONNET, J. A critical comparison of several numerical methods for computing effective properties of highly heterogeneous materials. **Advances in Engineering Software**, v. 58, p. 1–12, 2013.

FEDER, J. Random sequential adsorption. **Journal of Theoretical Biology**, v. 87, n. 2, p. 237–254, 1980.

FRANCINETE SILVA JUNIOR, P. **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD 005A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 345 p.

FURNAS. **CONCRETOS - ENSAIOS E PROPRIEDADES**. 1. ed. Brasil, 1997.

GILBERT, E.; JOHNSON, D.; KEERTHI, S. A fast procedure for computing the distance between complex objects in three space. In: PROCEEDINGS. 1987 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION 1987, **Anais...** : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1987.

GRONDIN, F.; MATALLAH, M. How to consider the Interfacial Transition Zones in the finite element modelling of concrete? **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 58, p. 67–75, 2014.

HASHIN, Z.; SHTRIKMAN, S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 11, n. 2, p. 127–140, 1963.

HERVE, E.; ZAOU, A. n-Layered inclusion-based micromechanical modelling. **International Journal of Engineering Science**, v. 31, n. 1, p. 1–10, 1993.

HONORIO, T.; BARY, B.; BENBOUDJEMA, F. Multiscale estimation of ageing viscoelastic properties of cement-based materials: A combined analytical and numerical approach to estimate the behaviour at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 137–155, 2016.

LAKES, R. **Viscoelastic Materials**. Cambridge : Cambridge University Press, 2009.

LAVERGNE, F.; SAB, K.; SANAHUJA, J.; BORNERT, M.; TOULEMONDE, C. Investigation of the effect of aggregates' morphology on concrete creep properties by numerical simulations. **Cement and Concrete Research**, v. 71, p. 14–28, 2015.

LEBEL, P. **GJK algorithm distance of closest points in 3D**. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62429-gjk-algorithm-distance-of-closest-points-in-3d>>. Acesso em: 5 jan. 2018.

LUBACHEVSKY, B. D.; STILLINGER, F. H. Geometric properties of random disk packings. **Journal of Statistical Physics**, v. 60, n. 5–6, p. 561–583, 1990.

MORI, T.; TANAKA, K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. **Acta Metallurgica**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 571–574, 1973.

MOULINEC, H; SUQUET, P. A FFT-based numerical method for computing mechanical properties of composite materials from images of their microstructure. In: IUTAM Symposium on Microstructure-Property Interactions in Composite Materials, **Anais ...**: Kluwer Academic Publishers, 1995

NADEAU, J. C. A multiscale model for effective moduli of concrete incorporating ITZ water-cement ratio gradients, aggregate size distributions, and entrapped voids. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 103–113, 2003.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. **The Computer Journal**, [s. l.], 1965.

REUSS, A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle . **ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**, [s. l.], 1929.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE TC-242-MDC (ZDENĚK, P. BAŽANT, chair). RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 753–770, 2015.

SADOUKI, H.; WITTMANN, F. H. On the analysis of the failure process in composite materials by numerical simulation. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 104, p. 9–20, 1988.

ŠMILAUER, V.; BAŽANT, Z. P. Identification of viscoelastic C-S-H behavior in mature cement paste by FFT-based homogenization method. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 197–207, 2010.

VOIGT, W. Über die Beziehung zwischen den beiden Elastizitätskonstanten isotroper Körper.

Wied. Ann., [s. l.], 1889.

WARD, M. A.; NEVILLE, A. M.; SINGH, S. P. Creep of air-entrained concrete. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 21, n. 69, p. 205–210, 1969.

WITTMANN, F. H.; ROELFSTRA, P. E.; SADOUKI, H. Simulation and analysis of composite structures. **Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 68, n. 2, p. 239–248, 1985.

WITTMANN, F. H.; SADOUKI, H.; STEIGER, T. Experimental and numerical study of effective properties of composite material. In: HUET, C. (Ed.). **Micromechanics of Concrete and Cementitious Composites**. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1993. p. 59–82.

WRIGGERS, P.; MOFTAH, S. O. Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. **Finite Elements in Analysis and Design**, [s. l.], v. 42, n. 7 SPEC. ISS., p. 623–636, 2006.

ZOHDI, T. I.; WRIGGERS, P. An Introduction to Computational Micromechanics. In: **Lecture Notes In Applied And Computational Mechanics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. v. 20