

**METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
VISCOELÁSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DE MATERIAIS
CIMENTÍCIOS POR MEIO DE ANÁLISES DINÂMICAS MECÂNICAS**

FABIANO CAMPOS MACEDO

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
VISCOELÁSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DE MATERIAIS
CIMENTÍCIOS POR MEIO DE ANÁLISES DINÂMICAS
MECÂNICAS

FABIANO CAMPOS MACEDO

ORIENTADOR: FRANCISCO EVANGELISTA JUNIOR, PhD.

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2019

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

**METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
VISCOELÁSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DE MATERIAIS
CIMENTÍCIOS POR MEIO DE ANÁLISES DINÂMICAS
MECÂNICAS**

FABIANO CAMPOS MACEDO

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof. Francisco Evangelista Junior, PhD. (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Rodrigo de Melo Lameiras, Dr. (ENC-UnB)
(Examinador interno)**

**Prof. Márcio Muniz de Farias, PhD. (PPG-UnB)
(Examinador Externo)**

**Profa. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, PhD. (DET-UFC)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 26 DE MARÇO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

MACEDO, FABIANO CAMPOS, Metodologia para caracterização das propriedades viscoelásticas estáticas e dinâmicas de materiais cimentícios por meio de análises dinâmicas mecânicas. [Distrito Federal] 2019. xx, 137p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2019). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Análise dinâmica mecânica	2. Pasta
3. Argamassa	4. Viscoelasticidade
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MACEDO, F. C. (2019). Metodologia para caracterização das propriedades viscoelásticas estáticas e dinâmicas de materiais cimentícios por meio de análises dinâmicas mecânicas. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-003A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fabiano Campos Macedo

TÍTULO: Metodologia para caracterização das propriedades viscoelásticas estáticas e dinâmicas de materiais cimentícios por meio de análises dinâmicas mecânicas.

GRAU: Doutor

ANO: 2019

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

Fabiano Campos Macedo
Rua 64, s/n – Esq. c/Rua 11 – Parque Lago.
CEP: 73813-816 – Formosa – GO – Brasil.
fabianocampos87@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de concluir essa pesquisa.

Aos meus pais, Olegário (in memoriam) e Domingas pelo amor, apoio, confiança, força e incentivo, pois sei que sem eles não seria possível concluir esse trabalho.

Aos meus irmãos, Fernando e Fernanda, pelo apoio e confiança, sendo um dos pilares de equilíbrio de minha vida.

À UnB por abrir as portas para sonhadores como eu que almejam dar um passo a mais na qualificação profissional, assim como o suporte da CAPES, CNPQ e FAPDF.

Aos Professores do PECC pelos ensinamentos. Em especial, aos professores Lineu, Antônio Miranda e Eugênia.

Ao professor, Francisco Evangelista Júnior, pelo excelente tema proposto, orientação e confiança.

Ao Infralab, na figura do professor Márcio pelo suporte, além dos alunos e ex-alunos Liosber, Juan e Letícia pela ajuda.

A todos os alunos e ex-alunos do PECC, em especial ao Paulo, Elaine, Ramon, Iago, Carlos, João Paulo, Pablo, Wilson, Maria, Jerfison, Alejandra e Wanderley pelo apoio.

Ao IFG pela licença concedida, e aos professores Divino e Murilo e aos técnicos Alexandre e Milton pelo apoio.

Aos amigos Iuri, Gelson, Américo, Eduardo, Luiz, Vitor, Suzane e Júnior que sempre deram suporte, principalmente por meio de momentos alegres e da diversão distribuída gratuitamente. Momentos que serviram para reanimar as forças e continuar o trabalho.

Aos professores Paulo de Tarso e Evandro pelo incentivo inicial na área acadêmica, além do Professor Fernando Drummond por seus ensinamentos.

À toda minha família pelo incentivo, em especial ao meu avô materno (In memoriam).

RESUMO

METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS POR MEIO DE ANÁLISES DINÂMICAS MECÂNICAS

Autor: Fabiano Campos Macedo

Orientador: Francisco Evangelista Junior

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, março de 2019

Esta pesquisa apresenta uma nova metodologia de determinação das propriedades de fluência envelhecida e não envelhecida de pastas, argamassas e concretos no estado endurecido por meio da interconversão de dados de análises dinâmicas mecânicas (DMA). Os resultados obtidos foram os módulos cisalhantes de armazenamento (G'), perda (G'') e o ângulo de fase (δ), que permitem analisar o comportamento viscoelástico do material. Os dados são transformados em fluência no tempo por meio de simplificações matemáticas encontradas na literatura e por soluções analíticas para poucos termos da série de Prony. A validação é realizada pela comparação entre os módulos de elasticidade dos ensaios DMA e o módulo de elasticidade (Young) em várias idades. As comparações mostram boa aproximação entre os módulos. Por fim, são estimadas as propriedades de pastas e argamassas por meio de processo inverso de simulação numérica de argamassas e concretos.

Palavras-chave: análise dinâmica mecânica, pasta, argamassa, viscoelasticidade

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR CHARACTERIZATION OF STATIC AND DYNAMIC VISCOELASTIC PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIALS BY MECHANICAL DYNAMIC ANALYSIS

Author: Fabiano Campos Macedo

Supervisor: Francisco Evangelista Junior

Post-graduation Program in Structures and Civil Construction

Brasília, March of 2019

This research presents a new methodology to determine aging and non - aging time dependent creep compliances of pastes, mortars and concretes in the hardened state through the data interconversion obtained from mechanical dynamic analysis (DMA). The results were the storage moduli (G'), loss moduli (G''), and phase angle (δ), which allow the analysis of the material viscoelastic behavior. Experimental results are transformed in time creep by means of mathematics simplifications found in the literature and by analytical solutions for a few terms in the Prony series. Validation is performed by comparing the longitudinal modules of the DMA test and the Young's modulus at various loading ages. The comparisons show a good agreement between them. Finally, the properties of pastes and mortars are estimated by the inverse numerical simulation process of mortars and concretes.

Key words: dynamic mechanical analysis, paste, mortar, viscoelasticity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2	OBJETIVOS	4
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	4
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	FLUÊNCIA E RELAXAÇÃO ESTÁTICA	7
2.2	AMORTECIMENTO DO MATERIAL.....	9
2.3	ANÁLISE DINÂMICA MECÂNICA	10
2.3.1	Análise DMA à flexão em materiais cimentícios.....	10
2.3.2	Ensaio DMA à compressão.....	12
2.3.3	Ensaio DMTA à torção	13
2.4	ESTUDO NUMÉRICO DOS AGREGADOS NA MATRIZ.....	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	TEORIA DA VISCOELASTICIDADE	18
3.1.1	Modelos mecânicos viscoelásticos	20
3.1.2	Modelos viscoelásticos generalizados	21
3.1.3	Fundamentação teórica da Análise dinâmica mecânica	23
3.2	INTERCONVERSÕES DAS FUNÇÕES VISCOELÁSTICAS	25
3.2.1	Interconversão das funções de fluência e relaxação.....	26
3.2.2	Interconversão dos módulos complexos cisalhantes em longitudinais	29
3.3	MODELOS E LEIS VISCOELÁSTICOS COM ENVELHECIMENTO.....	30
3.3.1	Lei de Potência Dupla.....	30
3.3.2	Lei de Potência Tripla.....	31
3.3.3	Abordagem de Tempo diferido	32
3.3.4	Teoria da Solidificação	32
4	METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA....	36

4.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	38
4.2	MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO.....	40
4.2.1	Sílica ativa.....	40
4.2.2	Cimento Portland.....	41
4.2.3	Agregado miúdo – Areia.....	42
4.2.4	Agregado graúdo	43
4.2.5	Aditivo superplastificante	44
4.2.6	Água.....	45
4.2.7	Composição e produção das misturas.....	45
4.2.8	Caracterização mecânica de resistência e rigidez.....	46
4.2.9	Metodologia e equipamento para ensaio DMA	49
4.2.10	Preparação dos corpos de prova prismáticos para ensaios DMA.....	52
4.2.11	Preparação dos corpos de prova cilíndricos.....	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DMA	56
5.1.1	Resultados experimentais da mistura P030.....	56
5.1.2	Resultados experimentais da mistura P035.....	58
5.1.3	Resultados experimentais da mistura P042.....	61
5.1.4	Resultados experimentais da mistura A035	63
5.1.5	Resultados experimentais da mistura A038	65
5.2	RESULTADOS MÉDIOS DE η E $ G^* $ DAS MISTURAS ESTUDADAS ..	67
5.3	REGRESSÃO NA LEI DE POTÊNCIA DUPLA	69
5.4	PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE POR MEIO DA FLUÊNCIA	72
5.4.1	Mistura P030	72
5.4.2	Mistura P035	74
5.4.3	Mistura P042	76
5.4.4	Mistura A035	78
5.4.5	Conclusões parciais	80
6	ESTIMAÇÃO NUMÉRICA DE PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS	81

6.1.1	Introdução à simulação numérica.....	81
6.1.2	Elementos da simulação numérica	83
6.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONCRETO A PARTIR DA ARGAMASSA	84
6.2.1	Propriedades dos materiais	84
6.2.2	Modelo computacional	86
6.2.3	Resultado da simulação numérica do concreto	88
6.2.4	Resultado da simulação numérica do concreto com as correções de outras idades	95
6.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ARGAMASSA A PARTIR DA PASTA..	97
6.3.1	Propriedades dos materiais	97
6.3.2	Modelo computacional	99
6.3.3	Resultado da simulação numérica da argamassa.....	100
6.4	CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES.....	107
7	CONCLUSÕES.....	108
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
	APÊNDICES.....	120
APÊNDICE A	Teste de convergência no programa ANSYS	121
APÊNDICE B	Validação da análise numérica.....	122
APÊNDICE C	Resultados experimentais	126
APÊNDICE D	Regressões dos resultados experimentais utilizados.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Matriz experimental.....	39
Tabela 4.3 – Caracterização física e química da Sílica ativa (modificada de Santos, 2016)	40
Tabela 4.2 – Caracterização química dos cimentos empregados	41
Tabela 4.4 – Dados técnicos do aditivo superplastificante	44
Tabela 4.5 – Traço unitário das misturas em estudo.....	45
Tabela 4.6 – Etapas e tempos da produção das misturas [modificado de TC 225 – SAP (RILEM, 2012)]	46
Tabela 4.7 – Duração dos ensaios DMA de acordo com a frequência	52
Tabela 5.1 – Coeficientes regredidos de $D(t, t')$ pela equação de DPL.....	70
Tabela 5.2 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de P030.....	74
Tabela 5.3 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de P035.....	76
Tabela 5.4 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de P042.....	78
Tabela 5.5 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de A035	79
Tabela 6.1 – Traço unitário do concreto REF035 (Silva Jr., 2017) e estimativa do módulo de elasticidade e porcentagem em volume dos componentes.....	85
Tabela 6.2 – Parâmetros do modelo computacional para simulação do concreto.....	87
Tabela 6.3 – Valores de RMSE da simulação do concreto para correção ϕ^k	94
Tabela 6.4 – Traço unitário da argamassa e estimativa do módulo de elasticidade e porcentagem em volume dos componentes.....	98
Tabela 6.5 – Características do modelo computacional para simulação do concreto...	100
Tabela 6.6 – Valores de RMSE da simulação do concreto para diferentes iterações...	106
Tabela C. 1 – Resistência à compressão das misturas em diferentes idades.....	126
Tabela C. 2 – Módulo de elasticidade das misturas em diferentes idades	127
Tabela C. 3 – Módulos G' e G'' da mistura P030 a 1 dia.....	128
Tabela C. 4 – Módulos G' e G'' da mistura P030 a 7 dias	128
Tabela C. 5 – Módulos G' e G'' da mistura P030 a 28 dias	128
Tabela C. 6 – Módulos G' e G'' da mistura P042 a 1 dia.....	129
Tabela C. 7 – Módulos G' e G'' da mistura P042 a 7 dias	129
Tabela C. 8 – Módulos G' e G'' da mistura P042 a 28 dias	129
Tabela C. 9 – Módulos G' e G'' da mistura P035 a 1 dia.....	130

Tabela C. 10 – Módulos G' e G'' da mistura P035 a 3 dias	130
Tabela C. 11 – Módulos G' e G'' da mistura P035 a 7 dias	130
Tabela C. 12 – Módulos G' e G'' da mistura A035 a 1 dia	131
Tabela C. 13 – Módulos G' e G'' da mistura A035 a 3 dias.....	131
Tabela C. 14 – Módulos G' e G'' da mistura A035 a 7 dias.....	131
Tabela C. 15 – Módulos G' e G'' da mistura A038 a 1 dia	131
Tabela C. 16 – Módulos G' e G'' da mistura A038 a 3 dias.....	132
Tabela C. 17 – Módulos G' e G'' da mistura A038 a 21 dias.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Intervalo de frequência (f) de estruturas excitadas pelo vento e terremotos (modificada de Boggs e Dragovich, 2006).....	3
Figura 2.1 – Módulos dinâmicos: a) armazenamento E' ; b) perda E'' (modificado de Granja e Azenha, 2016).....	12
Figura 2.2 – Valores da tangente de perda (amortecimento) para corpo de prova seco e saturado de pasta obtidos por Leung e Grasley (2012).....	13
Figura 2.3 – Resultados da análise DMTA de um corpo de prova de seção retangular de pasta de cimento (modificado de Foray-Thevenin <i>et al.</i> (2006))	14
Figura 3.1 – Analogia mecânica do comportamento constitutivo de: (a) sólido elástico linear; (b) fluido viscoso	18
Figura 3.2 – Comportamento reológico de: (a) aplicação de tensão constante no tempo; (b) aplicação de deformação constante no tempo; (c) fluência; (d) relaxação	19
Figura 3.3 – Representação do modelo de Maxwell.....	21
Figura 3.4 – Representação do modelo de Kelvin.....	21
Figura 3.5 – Modelos mecânicos viscoelásticos generalizados de: (a) Maxwell; (b) Kelvin.....	22
Figura 3.6 – Relações entre E' , E'' e δ	23
Figura 3.7 – Curva tensão-deformação com carregamento senoidal.....	24
Figura 3.8 – Curva de relaxação usada por Park e Schapery (1999).....	28
Figura 3.9 – Comparação do método de Christensen (1982),Park e Schapery (1999) e $1/E(t)$	28
Figura 3.10 - Modelo para teoria da solidificação na fluência	33
Figura 4.1 – Fluxograma do programa experimental.....	36
Figura 4.2 – Fluxograma de ensaio DMA ao cisalhamento	37
Figura 4.3 – Fluxograma de interconversão dos dados do domínio da frequência (ω) para o tempo (t)	38
Figura 4.4 – Curva granulométrica e características do agregado miúdo (Areia 01)	42
Figura 4.5 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia 02) utilizado por Silva Junior (2017)	43
Figura 4.6 – Curva granulométrica da brita 0 (modificado de Silva Junior, 2017).....	44

Figura 4.7 – Corpo de prova encaixado no equipamento de ensaio de resistência à compressão: (a) antes do ensaio; (b) depois do ensaio	47
Figura 4.8 – Evolução da tensão de compressão f_c para as misturas em estudo.....	47
Figura 4.9 – Ensaio de módulo de elasticidade: (a) equipamento utilizado; (b) detalhe do corpo de prova pronto para o ensaio	48
Figura 4.10 – Evolução do módulo de elasticidade (Young) E das misturas.....	48
Figura 4.11 – Ensaio DMA: (a) Corpo de prova submetido à torção; (b) carregamento de torção senoidal aplicado e sua respectiva deformação	49
Figura 4.12 – Equipamento DSR: (a) módulo de ensaio com câmara térmica; (b) detalhe do corpo de prova fixado no equipamento	50
Figura 4.13 – Resistência ao cisalhamento das misturas: (a) mistura P030; (b) detalhe da linearidade da mistura P030; (c) mistura P042; (d) detalhe da linearidade da mistura P042	51
Figura 4.14 –Produção dos corpos de prova prismáticos para DMA: (a) Lançamento na forma; (b) corpo de prova retirado da forma; (c) corpo de prova prismáticos lixado; (d) amostra cortada pronta para ensaio DMA.....	53
Figura 4.15 – Teste de sensibilidade da tensão e módulo de armazenamento com: (a) Variação da espessura; (b) variação da largura	54
Figura 4.16 – Fabricação dos corpos de prova cilíndricos: (a) lançamento na forma 5,0 cm x 10 cm; (b) corpo de prova desformado.....	55
Figura 5.1 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura P030: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$	56
Figura 5.2 – Módulos longitudinais para a mistura P030: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''	57
Figura 5.3 – Funções de fluência $D(t)$ para as misturas finais obtidas de E' da mistura P030	58
Figura 5.4 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura P035 em escala logarítmica: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$	59
Figura 5.5 – Módulos longitudinais da mistura P035 em escala logarítmica: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''	60
Figura 5.6 – Função de fluência $D(t)$ para mistura P035 obtidas de E'	60

Figura 5.7 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura P042: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$	61
Figura 5.8 – Módulos longitudinais para a mistura P042: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''	62
Figura 5.9 – Funções de fluência $D(t)$ para a mistura P042 obtidas de E'	62
Figura 5.10 – Resultados experimentais cisalhantes da argamassa A035 em escala logarítmica: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$	63
Figura 5.11 – Módulos longitudinais da mistura A035 em escala logarítmica: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''	64
Figura 5.12 – Função de fluência $D(t)$ para argamassa A035 obtidas de E'	64
Figura 5.13 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura A038: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$	65
Figura 5.14 – Módulos longitudinais da mistura A038 para 1 e 3 dias de idade de: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''	66
Figura 5.15 – Funções de fluência, $D(t)$, para 1 e 3 dias de idade da mistura A038 obtidas de E'	67
Figura 5.16 – Média das propriedades: (a) módulo complexo ao cisalhamento $ G^* $; (b) tangente de perda para $f = 10 \text{ Hz}$; (c) tangente de perda para $f = 1 \text{ Hz}$	68
Figura 5.17 – Determinação do envelhecimento da função $D(t, t')$ de funções $D(t)$ não envelhecidas em diferentes idades	69
Figura 5.18 – Regressão da função de fluência $D(t, t')$ em DPL obtidas de E' para: (a) P030; (b) P042; (c) P035; (d) A035; (e) A038	71
Figura 5.19 – Comparação de E_0 versus E para a mistura P030 nas idades de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias; (d) média de todas as idades com desvio padrão	73
Figura 5.20 – Comparação de E_0 versus E para a mistura P035 nas idades de: (a) 3 dias; (b) 7 dias; (c) Média de todas as idades com desvio padrão	75
Figura 5.21 – Comparação de E_0 versus E para a mistura P042 nas idades de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias; (d) média de todas as idades com desvio padrão	77
Figura 5.22 – Comparação de E_0 versus E para a mistura A035 nas idades de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 7 dias; (d) média de todas as idades com desvio padrão	79
Figura 6.1 – Modelo em mesoescala de simulação numérica de materiais cimentícios em dois níveis para: (a) concreto; (b) argamassa	81

Figura 6.2 – Fluxograma de obtenção das propriedades $D(t)$ de pastas e argamassas por meio de processo inverso de simulação numérica	82
Figura 6.3 – Elementos da biblioteca do ANSYS utilizados na simulação: (a) elemento SOLID187; (b) elemento CONTA174; (c) elemento TARGE170.....	83
Figura 6.4 – Resultado experimental de fluência D_c^{exp} de Silva Jr. (2017) para o concreto em diferentes idades.....	85
Figura 6.5 – Modelo numérico usado para simular o concreto: (a) modelo geométrico da argamassa com agregado; (b) malha com refinamento no topo; (c) detalhe da malha na ligação argamassa-agregado.....	86
Figura 6.6 – Valores iniciais de $D_a^{k=1}$ da argamassa propostos para análise em diferentes idades na iteração inicial ($k = 1$) com $\phi^{k=1}=1$	87
Figura 6.7 - Relação entre os resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) com a simulação da argamassa em $t' = 1$ dia: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k=4$	88
Figura 6.8 – Resultados da simulação em $t' = 1$ dia: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=4}$ usado na simulação do concreto para $\phi^{k=4}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação do concreto em $k = 4$	89
Figura 6.9 - Relação entre os resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) com a simulação da argamassa em $t' = 3$ dias: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k = 4$	90
Figura 6.10 – Resultados da simulação em $t' = 3$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=4}$ usado na simulação do concreto para $\phi^{k=4}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação do concreto em $k = 4$	91
Figura 6.11 - Relação entre os resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) com a simulação da argamassa em $t' = 7$ dias: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k = 4$	92
Figura 6.12 – Resultados da simulação em $t' = 7$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=4}$ usado na simulação do concreto para $\phi^{k=4}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação do concreto em $k = 4$	93
Figura 6.13 – Valores corrigidos de D_a^k da argamassa estimados pela simulação do concreto em diferentes idades.....	94

Figura 6.14 – Comparação e regressão entre as relações dos resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) e simulação numérica nas diferentes idades para $k = 2$	95
Figura 6.15 - Comparação dos resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) versus simulação da argamassa corrigida para $D_c^{k=2}$ e t' de: (a),(b) 1 dia; (c),(d) 3 dias; (e),(f) 7 dias	96
Figura 6.16 – Resultado estimado de fluência D_a^{est} para a argamassa em diferentes idades	98
Figura 6.17 – Modelo numérico usado para simular a argamassa: (a) pasta com agregado; (b) malha utilizada; (c) detalhe da malha na interseção da pasta com o agregado	99
Figura 6.18 – Propriedades $D_p^{k=1}$ para $\phi^{k=1} = 1$ da pasta propostas para análise da argamassa em diferentes idades.....	100
Figura 6.19 - Relação entre os resultados de fluência estimada da argamassa com a simulação em $t' = 1$ dia: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k=4$	101
Figura 6.20 – Resultados da simulação em $t' = 1$ dia: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=3}$ usado na simulação da argamassa para $\phi^{k=3}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação da argamassa em $k = 3$	102
Figura 6.21 - Relação entre os resultados de fluência estimada da argamassa com a simulação em $t' = 3$ dias: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k=4$	103
Figura 6.22 – Resultados da simulação em $t' = 3$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_p^{k=3}$ usado na simulação da argamassa para $\phi^{k=3}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação da argamassa em $k = 3$	104
Figura 6.23 - Relação entre os resultados de fluência estimada da argamassa com a simulação em $t' = 7$ dias: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k=4$	105
Figura 6.24 – Resultados da simulação em $t' = 7$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_p^{k=3}$ usado na simulação da argamassa para $\phi^{k=3}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação da argamassa em $k = 3$	106
Figura A. 1 – Teste de convergência para a simulação do concreto.....	121
Figura B. 1 – Corpos de prova de argamassa asfáltica: (a) sem esferas de aço; (b) com 3 esferas; (c) com 5 esferas	122
Figura B. 2 – Comparação numérico-experimental dos deslocamentos da argamassa asfáltica: (a) sem esferas; (b) com 3 esferas; (c) com 5 esferas	123

Figura B. 3 – Resultados a 1 dia de pasta argamassa obtidos de ensaios DMAs e do concreto para a mistura REF 0,367.....	124
Figura B. 4 – Modelo de simulação do concreto composto de argamassa e agregado.	124
Figura B. 5 – Resultados da simulação do concreto REF 0,367 com diferentes E da brita	125
Figura B. 6 – Relação entre a simulação e o experimental do concreto REF 0,367.....	125
Figura D. 1 – Linha de tendência da média da mistura A038 em t' de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 21 dias	133
Figura D. 2 – Linha de tendência da média da mistura P030 em t' de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias	134
Figura D. 3 – Linha de tendência da amostra utilizada da mistura P042 em t' de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias	135
Figura D. 4 – Linha de tendência da amostra utilizada da mistura P035 em t' de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 7 dias.....	136
Figura D. 5 – Linha de tendência da amostra utilizada da mistura A035 em t' de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 7 dias.....	137

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius;
a/c	Relação água-cimento;
$D(t)$	Função de fluência;
$E(t)$	Módulo de relaxação;
E_{assin}	Módulo assintótico da Lei de potência dupla
E_0	Módulo de relaxação instantâneo; inverso de $D(t - t' = 0)$
$E'(\omega)$	Módulo de armazenamento longitudinal;
$E''(\omega)$	Módulo de perda longitudinal;
$ E^*(\omega) $	Módulo complexo;
E_{∞}^{ef}	Módulo de relaxação efetivo (equivalente);
E^s	Módulo de elasticidade do aço;
f	Frequência na unidade de Hz
f_c	Resistência à compressão do concreto;
$G(t)$	Módulo de relaxação ao cisalhamento;
$G'(\omega)$	Módulo de armazenamento (elástico) ao cisalhamento;
$G''(\omega)$	Módulo de perda ao cisalhamento;
$ G^*(\omega) $	Módulo complexo ao cisalhamento;
$J(t)$	Função de fluência ao cisalhamento;
Kg	Quilograma;
m	Metro;
mm	Milímetro;
s	Segundos;
t	Idade corrente;
t'	Idade de carregamento;
$\tan(\delta)$	Coefficiente de fricção interna; fator de amortecimento;
T	Temperatura;

LISTA DE ABREVIÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
------	---

ACI	<i>American Concrete Institute;</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
CPV ARI	Cimento Portland tipo V de Alta Resistência Inicial;
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização);
DMA	<i>Dynamic mechanical analysis</i> (Análise dinâmica mecânica)
DPL	<i>Double Power Law</i> (Lei de potência dupla)
<i>GPa</i>	Giga Pascal ($10^9 Pa$);
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais;
<i>MPa</i>	Mega Pascal ($10^6 Pa$);
NBR	Norma Brasileira Registrada;
NBR NM	Norma MERCOSUL;
<i>Pa</i>	Pascal;
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i> (União Internacional dos Laboratórios e Especialistas em Materiais);
SAP	<i>Superabsorbent Polymer</i> (Polímero Superabsorvente);
TC 225-SAP	RILEM <i>Technical Committee 225 - Superabsorbent Polymer</i> (Comitê Técnico - Polímero Superabsorvente);
UnB	Universidade de Brasília.

LETRAS GREGAS

δ	Ângulo de fase; deslocamento;
ε	Deformação;
ξ	Diferença de tempo;
λ	Relação entre inércias;
γ	Deformação ao cisalhamento;
μ	Parâmetro de ajuste;
η	Coefficiente de viscosidade do fluido; fator de perda;
ρ_i	Tempo de relaxação;
τ	Variável de tempo usado na integração; Tensão de cisalhamento;
τ_i	Tempo de retardação;
σ	Tensão;

ω	Frequência angular;
ν	Coefficiente de Poisson;
$v(t)$	Volume de gel solidificado;
$1/v(t)$	Função de envelhecimento;
ψ	Capacidade de amortecimento específico;

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As análises dinâmicas mecânicas, do inglês *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA), é uma técnica utilizada na caracterização de estruturas compósitas e amortecimento em função da frequência, temperatura, tempo, tensão ou a combinação destes parâmetros (Saba *et al.*, 2016). Têm ampla aplicação, sendo comum na caracterização das propriedades de materiais poliméricos e asfálticos. Sua abrangência vai desde a indústria química, óleo e gás, farmacêutica, biomédica, alimentícia, automotiva e aeroespacial. Os resultados procurados são para a análise dos módulos dinâmicos, reações de cura, reparação estrutural, comportamento de amortecimento e transições de fases sólidas a líquidas.

No caso de materiais asfálticos (Castelo Branco, 2008; Coutinho *et al.*, 2013; Bonica *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2017; Freire *et al.*, 2017; Medina, 2017; Gomes, 2018; Rodrigues, 2018) e poliméricos, como em Williams e Ferry (1955), Duval *et al.* (2015) e Costa *et al.* (2016), é comum a realização de ensaios não destrutivos DMA. Nesses ensaios, os módulos cisalhantes de armazenamento $G'(\omega)$ e perda $G''(\omega)$ são determinados em função de frequências angulares, ω . Com isso, há a necessidade da interconversão das propriedades do domínio da frequência para o tempo. Essas interconversões podem ser feitas com as transformadas de Laplace ou de Fourier, para a obtenção da relaxação $G(t)$ e da fluência $J(t)$, no caso de propriedades ao cisalhamento, e da relaxação $E(t)$ e da fluência $D(t)$ no caso das propriedades à tração, compressão ou flexão.

Nos ensaios DMA, a frequência tem um papel fundamental dependendo dos objetivos de análises. Quando é necessário analisar apenas o efeito que determinada adição mineral ou polimérica provoca nas propriedades reológicas da mistura, a manutenção de uma frequência de valor constante é suficiente. No entanto, para as análises de envelhecimento, a variação do valor da frequência tem grande importância. Os resultados de $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$ a altas frequências, acima de 1 Hz, representam o comportamento do material em baixas idades. Por outro lado, à medida que o valor da

frequência diminui o material apresenta comportamento em longas idades. Isso ocorre, pois quanto menor a frequência maior é a parcela viscosa do material.

As pesquisas com ensaios DMAs com o objetivo de obter os módulos armazenamento $E'(\omega)$, e perda $E''(\omega)$ disponíveis na literatura para caracterização de materiais cimentícios no estado endurecido são poucas e geralmente voltadas para ensaios à flexão. Além disso, são realizadas para frequências geralmente acima de 10 Hz que não permitem observar a evolução da parcela viscosa do comportamento reológico. O material geralmente utilizado é a pasta (Fu e Chung, 1996; Morlat *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2012) com poucos trabalhos em concreto (Swamy, 1971; Granja e Azenha, 2016) e argamassa (Li e Chung, 1998). Algumas destas pesquisas, utilizam as frequências naturais através de acelerômetros para obter as propriedades dinâmicas (Swamy, 1971; Granja e Azenha, 2014), ou apenas levam em consideração o tempo de carregamento para obtenção dos módulos dinâmicos.

Nota-se uma limitação nos ensaios para a obtenção das propriedades à torção destes materiais com posterior transformação nas propriedades longitudinais, tais como módulo elástico dinâmico longitudinal e fluência no tempo $D(t)$. É importante destacar que, as pesquisas existentes geralmente não procuram obter a função de fluência através das propriedades viscoelásticas encontradas. Alguns casos, limitam-se a analisar a curva mestre e o coeficiente de fricção interna, $\eta = \tan(\delta)$, sendo δ o ângulo de fase, com a variação da temperatura, que não faz parte do escopo deste trabalho.

Em geral, a maioria das estruturas está submetida a carregamentos que provocam vibração, seja por impactos ou carregamentos cíclicos tais como: ventos, cargas móveis (veículos em pontes) e sismos. O ensaio DMA também é utilizado no estudo do amortecimento passivo de materiais cimentícios (Grasley e Leung, 2011; Leung e Grasley, 2012a; b). A Figura 1.1 mostra o intervalo de frequência de vibração para edifícios de concreto sujeitos a cargas dinâmicas de vento e terremoto. Estas estruturas necessitam de análises das propriedades de amortecimento a fim de melhorar a sua durabilidade e eficiência, mesmo que possuam dispositivos de amortecimento. Com isso, é importante saber o amortecimento do material que aqui é representado pelo fator de perda, $\eta = \tan(\delta)$. Nas estruturas de concreto, a pasta de cimento por ser

viscoelástica amortece parte das vibrações. A dissipação da energia ou amortecimento durante carregamentos dinâmicos pode ser incrementada pelos efeitos poromecânicos (Leung e Grasley, 2012a). Soluções aproximadas para o amortecimento poromecânico ($\tan(\delta)$) foram obtidas por Grasley e Leung (2011) para sólidos carregados axialmente.

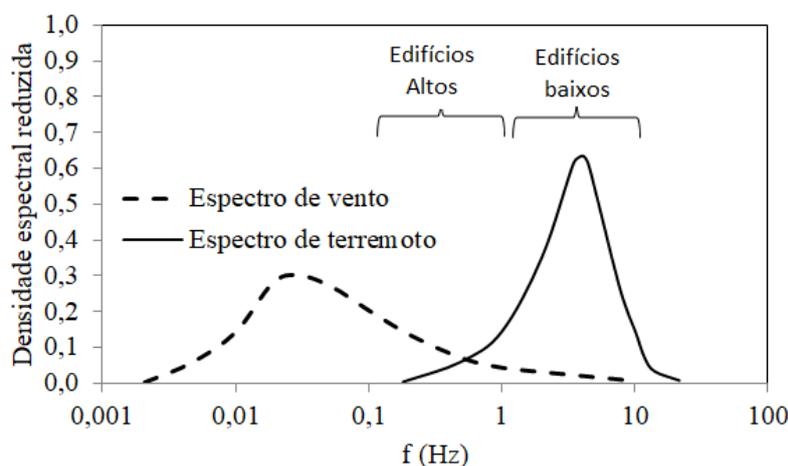


Figura 1.1 – Intervalo de frequência (f) de estruturas excitadas pelo vento e terremotos (modificada de Boggs e Dragovich, 2006)

As propriedades de pastas e argamassas também podem ser obtidas a partir das propriedades do concreto por meio de análise inversa em mesoescala (Hashin e Monteiro, 2002). Essa consiste em obter as propriedades isoladas dos componentes de materiais compósitos a partir da propriedade do conjunto como: módulo de elasticidade, fluência e relaxação de pasta, argamassa e agregados. As propriedades da zona de transição de interface também são obtidas por processo inverso, como mostra Hashin e Monteiro (2002), onde são obtidos seus módulos de elasticidade.

O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson foram obtidos em análise inversa para simulações em 3D de agregado embebidos na argamassa (duas fases) por Comby-peyrot *et al.* (2009). Da mesma forma é possível obter o módulo de elasticidade da argamassa (Rodrigues *et al.*, 2016) nas simulações da propagação de fissuras. Essa análise é empregada para obtenção de parâmetros de simulação de modelos de fratura de concreto (Wu *et al.*, 2014; Rodrigues *et al.*, 2016). Nesse caso, o concreto é simulado em três fases, sendo composto por argamassa, agregado e uma zona de interface argamassa-agregado. A simulação numérica da fluência em 3D com a

estimativa da espessura zona da transição de interface é encontrada em Bary, Bourcier e Helfer (2014) e com o estudo do efeito das inclusões e forma do agregado pode ser encontrado em Lavergne *et al.* (2015).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo é desenvolver uma metodologia para caracterização das propriedades estáticas e dinâmicas de materiais cimentícios por meio de ensaios DMA a torção, assim como uma metodologia para estimar a função fluência por meio de simulação em mesoescala e análise inversa.

Esses resultados são alcançados por meio dos seguintes objetivos específicos:

- Adaptação de ensaios utilizados em materiais poliméricos e asfálticos e aplicar em materiais cimentícios;
- Realizar ensaios DMA em pastas (até 28 dias) e argamassas (até 3 dias);
- Caracterização de δ , G' e G'' de pastas e argamassas no estado endurecido em diferentes idades;
- Caracterização do amortecimento (η) de pastas e argamassas em diferentes idades e relação água-cimento a/c ;
- Apresentar uma metodologia de obtenção do módulo de elasticidade (Young) por meio de ensaios DMA;
- Realizar a interconversão das propriedades do domínio da frequência (f) para o tempo (t);
- Realizar interconversões de relaxação para fluência e vice-versa no domínio do tempo através de soluções analíticas;
- Simular numericamente o efeito do agregado nas propriedades viscoelásticas para obtenção das propriedades de pastas e argamassas;

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa contribui com uma metodologia analítica - experimental para avaliar as propriedades dinâmicas G' e G'' , δ e η de pastas e argamassas no estado endurecido

sujeitas a carregamentos harmônicos de torção. Com isso, é uma pesquisa que aplica a teoria da viscoelasticidade para estabelecer uma metodologia de ensaio DMA e interconversões do domínio da frequência para o tempo e de relaxação para fluência em pastas e argamassas. A metodologia proposta também contribui com a aplicação de ensaios de curta duração em corpos de prova de tamanho reduzidos, sendo de fácil produção, lançamento e ensaio. Como contribuições complementares têm-se:

- Adaptação da metodologia de ensaio DMA à torção para material cimentício;
- Obtenção das propriedades de fluência de pastas e argamassas por meio de simulações numéricas;
- Monitoramento do módulo de elasticidade (Young) por meio de ensaios DMA à torção e interconversões matemáticas;
- Valores da capacidade de amortecimento de pastas e argamassas de alta resistência inicial;

Além disso, são mostradas a evolução das propriedades dinâmicas, como o módulo dinâmico $|G^*|$, para diferentes idades, relações água-cimento (a/c) de pastas e argamassas em ensaios de curta duração.

Nas simulações numéricas, é apresentada uma metodologia para estimar a fluência de pastas e argamassas a partir da fluência do concreto por método iterativo.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O capítulo 1 apresenta a introdução com a justificativa para a realização desta pesquisa. Os principais objetivos são detalhados, sendo ainda mostradas as contribuições de interesse para engenharia estrutural e de materiais. De maneira simplificada é feito um fluxograma que mostra as etapas de elaboração da tese.

No capítulo 2 são mostrados os estudos de relaxação e fluência que são abordados de diferentes maneiras pela literatura. Os estudos são divididos em ensaios estáticos e dinâmicos, onde são mostrados os trabalhos realizados em materiais cimentícios: pasta, argamassa e concreto.

A fundamentação teórica da viscoelasticidade é apresentada no capítulo 3, onde são mostrados os modelos mecânicos, as interconversões viscoelásticas e as leis viscoelásticas. Nesse, são mostradas como são realizadas as interconversões das propriedades no domínio da frequência para o domínio do tempo e de relaxação para fluência. Ao final do capítulo são mostrados estudos de simulações numéricas com a inclusão de agregados em uma matriz cimentícia e outros materiais.

O capítulo 4 mostra o planejamento experimental, a metodologia de ensaio e os equipamentos utilizados, além da caracterização dos materiais. São mostradas as composições das misturas e a maneira que os corpos de prova são preparados.

Os resultados experimentais são apresentados no capítulo 5 para as misturas estudadas. Ao final do capítulo é feita a comparação entre as parcelas elásticas obtidas de ensaios DMAs e o módulo de elasticidade com o objetivo de mostrar a validade da metodologia desta pesquisa.

No capítulo 6 são mostrados os dados utilizados nas simulações numéricas e as considerações realizadas. Aqui, são obtidas as propriedades das argamassas por meio de processo iterativo e correção das propriedades na simulação do concreto por análise inversa. Da mesma forma são obtidas as propriedades das pastas pela simulação da argamassa.

O capítulo 7 apresenta as principais conclusões e contribuições desta pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros que possam fortalecer o conhecimento dessa metodologia em materiais cimentícios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui são apresentados os estudos das propriedades viscoelásticas estáticas e dinâmicas de materiais cimentícios com foco na fluência e relaxação. Além disso, são mostrados modelos reológicos que os utilizam.

2.1 Fluência e relaxação estática

Na engenharia estrutural e de construção civil, o comportamento de fluência dos materiais cimentícios é de grande importância e deve ser previsto durante a fase de projeto. As estruturas de concreto armado ou protendido precisam dessa previsão (Asamoto *et al.*, 2014; Tong *et al.*, 2016). Além disso, há a necessidade da avaliação da fluência em torres de resfriamento, vasos de pressão e estruturas de contenção nuclear (Benboudjema e Torrenti, 2008; Trivedi e Singh, 2014). Em estruturas de grandes vãos, como pontes, ao longo do tempo as deflexões tendem a ficar maiores devido aos carregamentos que estão submetidas. Esse aumento no tempo pode levar a estrutura ao colapso. O incremento de deformação no tempo é devido aos fenômenos de fluência e relaxação, sendo provocados pela aplicação de tensão e deformação constantes no tempo, respectivamente.

A fluência consiste no incremento de deformação devido a tensões constantes no tempo, já a relaxação é um fenômeno que ocorre devido à manutenção de deformação constante no tempo, que provoca redução nas tensões no tempo. A fluência do concreto pode ser obtida por meio de ensaios estáticos, como: tração, compressão, flexão e torção.

A fluência tem uma maior taxa de crescimento nas idades iniciais, que bem prevista, posteriormente facilita a aplicação correta de um controle na deflexão excessiva a longo prazo (Maia e Figueiras, 2012). Essas grandes variações nas propriedades viscoelásticas do concreto nas idades iniciais são provocadas pelas reações químicas de hidratação do cimento (Schutter, 1999; Schindler, 2004; Lin e Meyer, 2009; Jiang *et al.*, 2014). Isso é devido ao processo de difusão da água entre as camadas de hidratos já formados para o cimento não hidratado por meio de reações físico-químicas que formam a massa de gel de cimento endurecida (Mehta e Monteiro, 2014).

Nessa fase inicial, existe uma grande dificuldade em se realizar ensaios para obtenção das propriedades viscoelásticas, como: ensaios de fluência e relaxação. Isso pode ser explicado pela fragilidade do corpo de prova ou por ensaios demorados, em que a propriedade de fluência se mistura com o próprio envelhecimento do material. Alguns ensaios de caracterização reológica, tais como, fluência e relaxação geralmente são utilizados em materiais cimentícios de maneira estática ou quase-estática (Atrushi, 2003; Grasley e Lange, 2007; Maia e Figueiras, 2012).

Existem vários estudos sobre o fenômeno da fluência em estruturas de concreto, no entanto, a maioria está voltado para propriedades à compressão (Maia e Figueiras, 2012; Asamoto *et al.*, 2014; Hamed, 2015), apesar das propriedades na tração terem grande importância na previsão de fissuras. Os estudos da relação entre fluência na tração, como em Zhuang *et al.* (2013), e na compressão são insuficientes para dar uma boa caracterização dos fenômenos, devido à sua dificuldade experimental (Ranaivomanana *et al.*, 2013). Com isso, os modelos de fluência teóricos não são muito confiáveis (Atrushi, 2003), bem como, tendo conclusões adversas entre a comunidade científica (Hilaire, 2014; Rossi *et al.*, 2014).

Alguns autores se dedicaram a estudar essas propriedades e observar suas relações (Briffaut *et al.*, 2012 e Rossi *et al.*, 2013), como a relação entre os coeficientes de fluência e coeficiente de deflexão de fluência, proposto por Wang *et al.* (2016). O estudo da previsão de deslocamentos e perda de protensão em estruturas é encontrado em Granata *et al.* (2013), Lou *et al.* (2014) e Asamoto *et al.* (2014).

A fluência básica (sem perda de água para o meio ambiente) pode ser estudada por leis de potência, como a dupla de Bažant e Osman (1976), tripla de Bažant e Chern (1985) que foi melhorada por Emborg (1989). Além do mais, podem ser estudadas por modelos termoquímicos, que levam em consideração o grau de hidratação do concreto, temperatura e afinidade química (Ulm e Coussy, 1995; Schutter, 1999; Schindler, 2004; Lin e Meyer, 2009; Briffaut *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2014).

A teoria da solidificação de Bažant e Prasannan (1988), combinada com a abordagem do tempo diferido proposto por Grasley e Lange (2007) podem ser utilizados para as curvas de fluência. Modelos mais completos fazem a junção dessas abordagens, como os modelos: *CEB-FIP Model Code (1993)*, *ACI 209 (2008)* e o modelo B3 de Kim e Bažant (2014). Existem alguns estudos que analisam o efeito da fluência à flexão em vigas no estado fissurado (García-Taengua *et al.*, 2014), ou com a conexão entre aço e concreto (Souici *et al.*, 2015) pelas equações de compatibilidade de Dischinger.

É possível observar que a fluência estática é uma propriedade bastante estudada. Desse modo, são utilizados dados experimentais de fluência estática, da literatura, em concretos para estimação da fluência de pastas e argamassas. Além disso, é possível notar que a maioria dos estudos são voltados para fluência à compressão, com um crescente interesse pela fluência na tração. Por outro lado, o estudo das propriedades cisalhantes não tem sido tão explorado.

2.2 AMORTECIMENTO DO MATERIAL

Em estruturas submetidas a cargas cíclicas, de ondas ou móveis é necessária a utilização de sistemas de amortecimento que podem ser de controladores de forças externas aplicadas ou do próprio material. O primeiro denomina-se de amortecedor ativo e o segundo de passivo. A propriedade amortecida do material pode ser obtida de diversas maneiras, dentre elas destaca-se o ensaio DMA, com o fator de perda $\eta = \tan(\delta)$ (Graesser e Wong, 1991; Carfagne *et al.*, 1998; Grasley e Leung, 2011).

Outra medida do amortecimento que pode ser obtida a partir da tangente de perda é a capacidade de amortecimento específica, ψ , sendo:

$$\psi = \frac{W_D}{W_0} \cong 2 \pi \tan(\delta) \quad (2.1)$$

em que W_D é a energia dissipada por ciclo de carregamento e W_0 é a energia total de vibração do ciclo de carregamento e $\eta = \tan(\delta)$. Essa relação é válida para $0 \leq \tan(\delta) \leq 0,19$ com erro de 1% do valor exato (Graesser e Wong, 1991). De acordo

Graesser e Wong (1991) a propriedades ψ pode ser definida como a energia de deformação total na máxima deformação da estrutura.

2.3 Análise dinâmica mecânica

A análise DMA é chamada de termo análise mecânica dinâmica, do inglês *dynamic mechanical thermo analysis* – DMTA, que pode ser feita à flexão, compressão ou torção, quando é feito o uso da temperatura como parâmetro de variação. Embora os ensaios DMTA sejam geralmente empregados em materiais poliméricos e asfálticos, existem alguns estudos em materiais cimentícios. Estes ensaios buscam as respostas elásticas e viscosas no domínio da frequência.

2.3.1 Análise DMA à flexão em materiais cimentícios

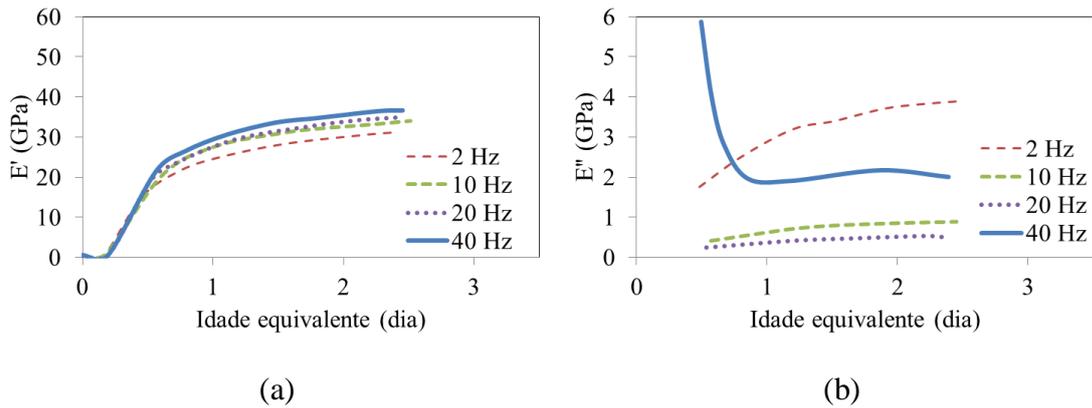
As análises DMAs não são comuns em materiais cimentícios, pois geralmente são empregadas em materiais que apresentam suas propriedades viscosas acentuadas. No entanto, os modelos reológicos utilizados em concretos fazem a consideração da viscoelasticidade. Nesse contexto, há a utilização de agregados, que geralmente são considerados elásticos e das pastas que fornecem o comportamento elástico e viscoso da mistura. Com isso, os modelos matemáticos geralmente são representados por molas e amortecedores associados em série ou em paralelo.

O comportamento viscoelástico das pastas é estudado no meio científico do estado fresco até o estado endurecido. Em se tratando de estado endurecido, existem estudos que relacionam o módulo de armazenamento, E' , e perda, E'' , com a variação da temperatura por meio de ensaios DMTA de flexão em três pontos (Fu e Chung, 1996; Li e Chung, 1998). Estas pesquisas variam a temperatura ao longo dos ensaios para uma frequência de valor constante para observar os valores dos módulos E' e E'' . Além disso, Morlat *et al.* (1999) encontraram o valor de $E' = 33$ GPa a uma temperatura de 25 °C e o valor da $\tan(\delta) \cong 0,01$ com uma frequência de 3 Hz. Neste caso a idade e a frequência não são parâmetros de avaliação.

A avaliação da idade de carregamento é um parâmetro importante para observar a evolução das propriedades E' , E'' e a $\tan(\delta)$. Isso pode fornecer bases para a análise do envelhecimento das misturas cimentícias, quando está associado com a variação da frequência. Apesar de não fazer a análise de envelhecimento, Zhang *et al.* (2012) fizeram a variação da frequência de 0,49 Hz a 100 Hz em duas idades (1 dia e 7 dias) de carregamento em pastas de cimento modificadas com polímero por meio de ensaios DMA à flexão. Esse estudo visa avaliar o efeito que a quantidade de polímero provoca nas propriedades de amortecimento de vibrações da pasta. Foi observado nos resultados de Zhang *et al.* (2012) o aumento de E' com o aumento da frequência e da idade, diminuição da $\tan(\delta)$ com o aumento da idade na maioria dos casos estudados.

Os ensaios DMA à flexão são empregados para as análises das propriedades viscoelásticas no domínio da frequência em materiais cimentícios nas idades iniciais. Azenha *et al.* (2015) propuseram uma metodologia de ensaio, denominada VisCoDyn, para obter as propriedades viscoelásticas (E' , E'' e a $\tan(\delta)$) do concreto endurecido à flexão.

A validade da metodologia VisCoDyn foi demonstrada em Granja e Azenha (2016), onde tentou-se superar as dificuldades em concretos nas idades iniciais (primeiras 24 horas de cura). Foi obtido o ângulo de fase (δ) por meio da conversão dos sinais (força e aceleração) do domínio do tempo para o domínio da frequência com a transformada rápida de Fourier, em inglês *Fast Fourier Transform*, ou FFT. De acordo com os autores, a realização de vários testes em idades distintas necessita de várias plataformas de fluência simultaneamente com impactos econômicos tanto em termo de laboratório quanto de equipamento. Foram apresentados os valores de E' e E'' , sendo comparados com outro método para monitorar o módulo de elasticidade do concreto desde o lançamento, como mostra a Figura 2.1



(a) (b)
 Figura 2.1 – Módulos dinâmicos: a) armazenamento E' ; b) perda E'' (modificado de Granja e Azenha, 2016)

A Figura 2.1 mostra que E' aumenta com o aumento da frequência, enquanto E'' aumenta com a diminuição da frequência, exceto na frequência de 40 Hz. O trabalho apresentado por Granja e Azenha (2016) é de grande importância nas análises DMA. No entanto, não foi feito o estudo do envelhecimento ou da transformação destes dados dos módulos no domínio da frequência em fluência no domínio do tempo. Os autores utilizam método de frequência ressonante para obtenção dos resultados e fazem o monitoramento do módulo de elasticidade em diferentes idades de carregamento.

2.3.2 Ensaio DMA à compressão

O estudo da porosidade e permeabilidade realizado por Leung e Grasley (2012) apresentou as propriedades amortecidas de pastas e argamassas. Os testes foram realizados com a varredura de frequência no intervalo de 0,01 Hz a 25 Hz. Os resultados da tangente de perda $\tan(\delta)$ estão ilustrados na Figura 2.2:

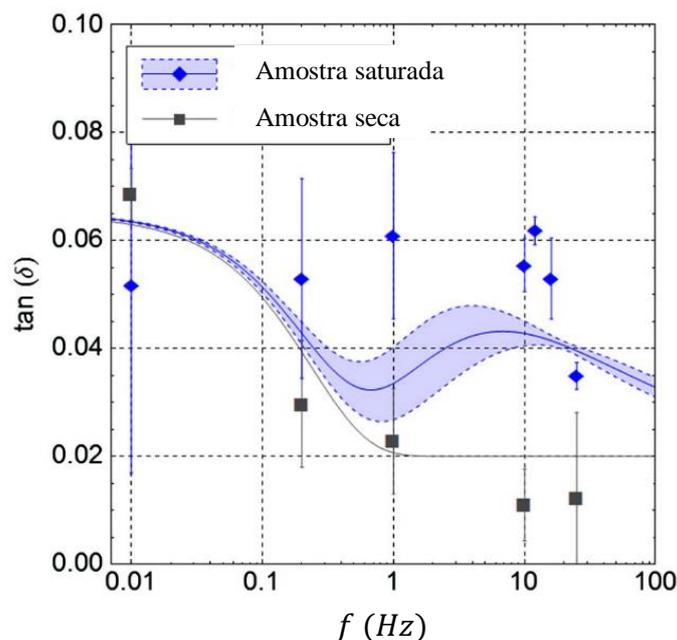


Figura 2.2 – Valores da tangente de perda (amortecimento) para corpo de prova seco e saturado de pasta obtidos por Leung e Grasley (2012)

O valor da $\tan(\delta)$ aumenta com a redução de f para $f < 1 \text{ Hz}$ e possui valor entre 0,015 e 0,06 para $f = 10 \text{ Hz}$. Para $1 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ Hz}$ a tangente de perda apresenta uma perturbação na curva. Fora desse intervalo tende a diminuir com o aumento da frequência. Nota-se que a condição seca ou saturada afeta o valor das propriedades de amortecimento de pastas.

Fan *et al.* (2013) estudaram o comportamento viscoelástico uniaxial compressivo do concreto sob cargas dinâmicas e quase estáticas. De acordo com os autores, o concreto, quando submetido a carregamento de onda, tem comportamento viscoelástico. Por outro lado, é elástico não linear sob carregamento quase estático. Os módulos E' e E'' , são fornecidos por um modelo proposto viscoelástico não-linear com três elementos através de baixas e altas frequências.

2.3.3 Ensaio DMTA à torção

Tendo em vista que nesta pesquisa foram realizados ensaios DMA ao cisalhamento, há a necessidade de resultados que possam servir de base de comparação, mesmo que as misturas possuam composições distintas. Com isso, foi encontrado o trabalho de Foray-

Thevenin *et al.* (2006) por meio de ensaios *DMTA* em pastas de cimento, com frequência de 1 Hz. Embora com objetivos distintos, no caso verificar a desidratação, água livre e porosidade de pastas, é possível extrair os resultados para saber a ordem de grandeza dos mesmos. A amostra possui dimensões de 2 x 8 x 50 mm³. A Figura 2.3 mostra o resultado de G' e da $\tan(\delta)$ para uma dada pasta com variação de temperatura de -150 °C a 210 °C.

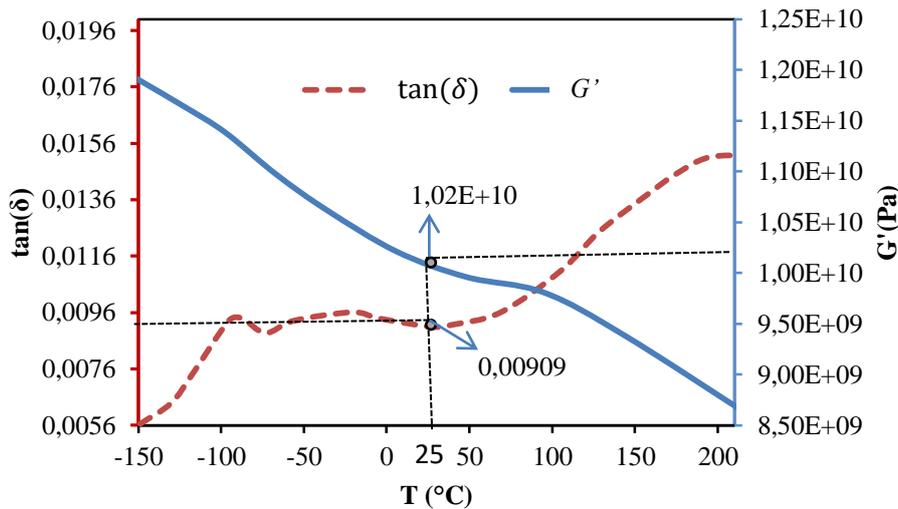


Figura 2.3 – Resultados da análise DMTA de um corpo de prova de seção retangular de pasta de cimento (modificado de Foray-Thevenin *et al.* (2006))

Na Figura 2.3 é possível notar $G' \cong 10,2 \text{ GPa}$ para uma temperatura de aproximadamente 25 ° C e que $\tan(\delta) \cong 0,0091$ ($\delta \cong 0,52^\circ$). Esses resultados são importantes para conhecimento da ordem de grandeza dos resultados obtidos ao longo dos ensaios DMAs.

O ensaio DMA à torção, também é útil na análise das propriedades viscoelásticas de concretos isentos de macro defeitos, do inglês *macro-defect-free* (MDF). Esses concretos são de alto (ultra) desempenho, caracterizados pela utilização de cimento aluminoso¹, polímeros e baixa relação água-cimento, que visam a redução dos vazios e consequente aumento da resistência. Assim, Chu e Robertson (1994) fizeram a análise de G' e $\tan \delta$ por meio de ensaios DMA com a variação de temperatura, umidade e frequência (0,05 Hz a 5 Hz). Os autores notaram uma diminuição de G' com a

¹ Cimento aluminoso: são cimentos constituídos predominantemente por aluminatos de cálcio.

diminuição da frequência, aumento da umidade ou aumento da temperatura. Assim o MDF se torna mais viscoso a baixas frequências, como é esperado para as misturas desta pesquisa.

Das pesquisas de propriedades dinâmicas a torção, flexão e compressão é possível notar que existe uma lacuna entre a obtenção dos resultados por ensaios DMA que já são poucos em materiais cimentícios e sua relação com o amadurecimento das propriedades E' , E'' e a $\tan \delta$ ou G' , G'' . Além disso, nota-se que não existe a preocupação na interconversão dos valores dos módulos dinâmicos em fluência no tempo.

Com isso, na busca de adaptar metodologias geralmente empregadas em materiais poliméricos, esta pesquisa busca as propriedades dinâmicas de torção (G' , G'' e a $\tan(\delta)$) e suas transformações em fluência $D(t)$ no tempo em pastas e argamassas. As propriedades do concreto são obtidas por simulações numéricas dos dados de argamassas com a inclusão de agregados.

Essas propriedades são provenientes de ensaios DMAs, feito em um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, em inglês *Dynamic Shear Rheometer*, DSR. As frequências utilizadas são menores que 10 Hz, tendo a intenção de representar o comportamento do material em longas idades. A menor frequência é de 0,000278 Hz e a máxima de 10 Hz, pois o comportamento viscoso é mais visível nas menores frequências. Devido à necessidade de menores frequência é feita uma expansão num intervalo maior por meio de linhas de tendência.

2.4 ESTUDO NUMÉRICO DOS AGREGADOS NA MATRIZ

A simulação numérica de materiais compósitos é importante para observação do comportamento do conjunto de misturas com materiais diferentes. Assim, a simulação numérica, com o uso do método dos elementos finitos (MEF), é um meio de obtenção desse comportamento. Assim, pode ocorrer a consideração da homogeneidade entre os componentes (uma fase), argamassa e agregados (duas fases) ou com o incremento de uma zona de transição argamassa-agregado (três fases) como em Stroeven e Stroeven (2001).

A simulação dos agregados na matriz cimentícia pode ser feita nas escalas microscópica, mesoscópica e macroscópicas. Na escala micro com a simulação da reação de hidratação dos grãos de cimentos é encontrada em Stroeven e Stroeven (1999). Nessa simulação os agregados são considerados esféricos e realizados no programa SPACE (*Software Package for the Assessment of Compositional Evolution*)². A escala mesoscópica, é comum nas análises numéricas de concretos com a consideração do agregado graúdo. As análises macroscópicas levam em consideração agregados de grandes volumes, como por exemplo, a simulação das camadas da terra, como em Madi *et al.* (2005).

Em todas as escalas de simulações há a preocupação com a distribuição dos agregados na matriz (pasta ou argamassa). É consenso no meio científico que é necessário realizar uma distribuição aleatória dos agregados, levando em consideração o caos. A distribuição pode ser realizada por métodos sequenciais, do inglês *random sequential addition* (RSA), em que o agregado locado em sua posição não sofre alteração de posição pelos próximos. Já nos métodos concorrentes, do inglês *concurrent algorithms* (CA), há alteração da posição do agregado dinamicamente à medida que são lançados novos agregados. Ambos os métodos são utilizados por Stroeven e Stroeven (2001) e Stroeven *et al.* (2009).

O mosaico de Voronoi, que é outra forma de distribuição aleatória de agregados no espaço, é determinado pela distância de um ponto da geometria para outra é usado por

² SPACE: Pacote de programa de avaliação da evolução da composição, em tradução livre.

Madi *et al.* (2005) e Bary, Bourcier e Helfer (2014). Outros trabalhos que utilizam algoritmos de distribuição granulométrica aleatória podem ser encontrados em Wang, Kwan e Chan (1999) e Du e Sun (2007). A distribuição aleatória de agregados em simulações em duas dimensões (2D), pode ser encontrada em Wang, Kwan e Chan (1999) e Giorla e Dunant (2018). Já em três dimensões como encontrado em Stroeven e Stroeven (1999), no caso da simulação de hidratação do cimento, Fu e Dekelbab (2003), locação aleatória dos agregados, e Xu *et al.* (2010) com a distribuição granulométrica em material asfáltico e simulação da fluência.

A simulação no MEF em 2D em mesoescala, realizada por Giorla e Dunant (2018) mostra que o material composto com grandes proporções de partículas mais finas exibe menos fluência. Apesar da maioria das pesquisas aqui citadas utilizarem agregados esféricos, Bary, Bourcier e Helfer (2014) mostram diferenças significativas nas propriedades de fluência com o uso de simulações numéricas em 3D com essas formas. Além disso, mostraram a pouca influência da zona de transição de interface nas simulações de concreto em mesoescala, que não foram observadas em argamassas. Por outro lado, Lavergne *et al.* (2015) mostraram que a distribuição de tamanho e forma tem pouca influência sobre as propriedades viscoelásticas não envelhecidas. No campo da viscoelasticidade linear, Song e Jun (2013) e Lavergne *et al.* (2016) utilizam métodos de homogeneização dos componentes para simular um meio heterogêneo de forma homogênea em 3D.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fundamentos matemáticos aqui apresentados fazem parte de um conhecimento clássico da teoria da viscoelasticidade que podem ser encontrados em Findley et al. (1976), Ferry (1980) e Christensen (1982).

3.1 TEORIA DA VISCOELASTICIDADE

O comportamento de um material elástico e de um fluido viscoso são distintos, pois o primeiro volta ao seu estado inicial após a retirada de um carregamento aplicado, já o segundo não possui essa recuperação. Muitos materiais apresentam os dois comportamentos e são chamados de viscoelásticos. O comportamento linear elástico segue a Lei de Hooke como mostrada na Equação (3.1) e o comportamento viscoso é dado pela Equação (3.2) para situações unidimensionais.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\sigma' = \mu \dot{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Em que, σ e σ' são as tensões elásticas e viscosas, ε é a deformação, E é o Módulo de elasticidade (Young), $\dot{\varepsilon}$ é a derivada das deformações no tempo e μ representa o coeficiente viscosidade do fluido. A analogia para o comportamento elástico é de uma mola linear como mostrado na Figura 3.1a. Nos fluidos há a analogia com o comportamento de um amortecedor (Figura 3.1b).



Figura 3.1 – Analogia mecânica do comportamento constitutivo de: (a) sólido elástico linear; (b) fluido viscoso

A viscoelasticidade pode ser representada pelos fenômenos da fluência e da relaxação relacionadas ao envelhecimento do concreto que estão em função das características evolutivas das propriedades mecânicas do material. Esse fenômeno é caracterizado pelas deformações além do regime elástico, mesmo após a retirada de um carregamento. O fenômeno da fluência que corresponde ao incremento de ε (Figura 3.2c) sob σ constante (Figura 3.2a) é muito estudado no meio científico. Por outro lado, a manutenção de ε constante no tempo (Figura 3.2b) provoca reduções nas tensões dos materiais, a chamada relaxação (Figura 3.2d).

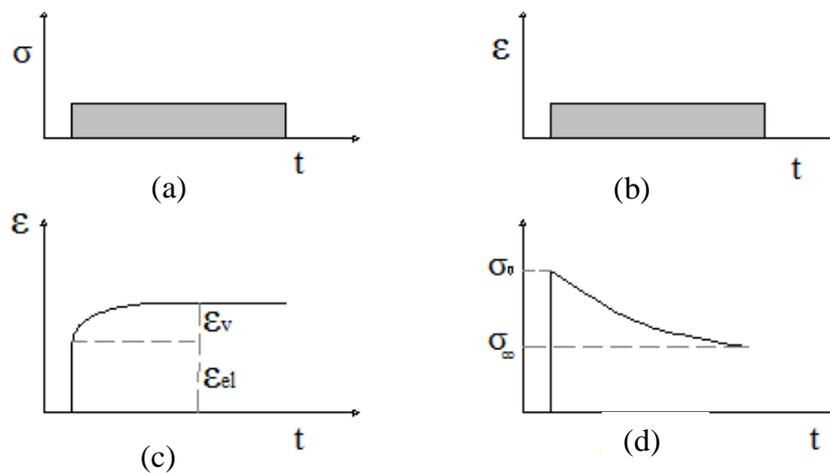


Figura 3.2 – Comportamento reológico de: (a) aplicação de tensão constante no tempo; (b) aplicação de deformação constante no tempo; (c) fluência; (d) relaxação

A parcela de deformação instantânea, ou elástica, está representada na Figura 3.2c por ε_{el} . A Figura 3.2c mostra a parcela viscoelástica (ε_v) que evolui ao longo do tempo. Para um corpo de prova sujeito a um carregamento constante uniaxial de tensão aplicado no tempo t_0 até t a deformação é dada pela multiplicação da inversa de E com a tensão, e reorganizando a Equação (3.1), obtém-se:

$$\varepsilon = D\sigma \quad (3.3)$$

em que, $D = 1/E$ é um fator de compressibilidade em materiais de comportamento elástico. No caso de materiais viscoelásticos, $D(t)$ representa a fluência no tempo t para um passo unitário de tensão, e $D(t) \neq 1/E(t)$ (Ferry, 1980; Christensen, 1982).

A história das deformações variáveis devido à fluência é melhor representada por uma integral de convolução, na Equação (3.4) (Volterra, 1912; Christensen, 1982). Na estrutura submetida a cargas de longa duração, além da deformação por fluência, ocorre o fenômeno da relaxação, como mostrado na Figura 3.2d e na Equação (3.5).

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (3.4)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (3.5)$$

em que $D(t)$ é a função de fluência, t o tempo atual, τ é o tempo usado na integração e $E(t)$ o módulo de relaxação. Quando o tempo de carregamento e o tempo corrente na análise são considerados, ou seja, com a consideração do envelhecimento, $D(t - \tau)$ que está em função de uma única variável $(t - \tau)$ passa a ser $D(t, t')$ e a Equação (3.4) muda para Equação (3.6):

$$\varepsilon(t, t') = \int_0^t D(t, t') \frac{\partial \sigma}{\partial t'} dt' \quad (3.6)$$

em que t' é o tempo de carregamento. O envelhecimento do material é tratado com o uso de modelos matemáticos propostos na literatura. Isso é feito por meio das equações hereditárias associadas com modelos de fluência envelhecidos em função de duas variáveis t e t' . A evolução das propriedades viscoelásticas com a idade é um fator importante de determinação do envelhecimento.

3.1.1 Modelos mecânicos viscoelásticos

A representação do comportamento viscoelástico é feita por meio da associação de molas e amortecedores em série ou paralelo. Diversas combinações de molas e amortecedores podem ser feitas, que geram diferentes modelos reológicos, sendo os mais simples os modelos de Maxwell e Kelvin. O modelo de Maxwell se caracteriza pela associação em série de uma mola e um amortecedor. Assim, tanto a mola como o amortecedor estão submetidos à mesma tensão. Já a deformação total é a soma das

parcelas das deformações individuais da mola e do amortecedor. A representação do modelo de Maxwell é mostrada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Representação do modelo de Maxwell

No modelo da Figura 3.3, E representa a rigidez da mola e μ a viscosidade normal do amortecedor. Por outro lado, o modelo de Kelvin é representado pela associação em paralelo de mola e amortecedor, como mostra a Figura 3.4.

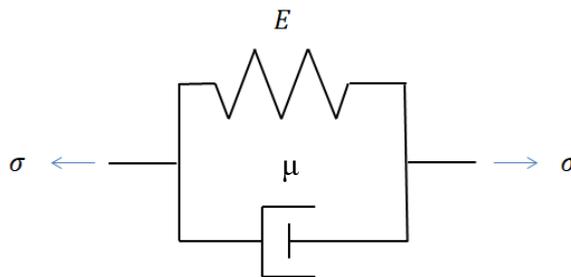


Figura 3.4 – Representação do modelo de Kelvin

No modelo de Kelvin apresentado na Figura 3.4, molas e amortecedores estão submetidos a mesma deformação. No entanto, a tensão total é a soma das parcelas individuais de cada um. Geralmente, esse modelo faz a representação do comportamento de fluência dos materiais.

3.1.2 Modelos viscoelásticos generalizados

Os modelos de Maxwell e Kelvin são bastante simples para representar o comportamento material por completo (Creus, 1986; Christensen, 1982). No entanto, a combinação várias molas e amortecedores podem melhorá-los. Dessa maneira surgem os modelos de Maxwell e Kelvin Generalizados como apresenta a Figura 3.5.

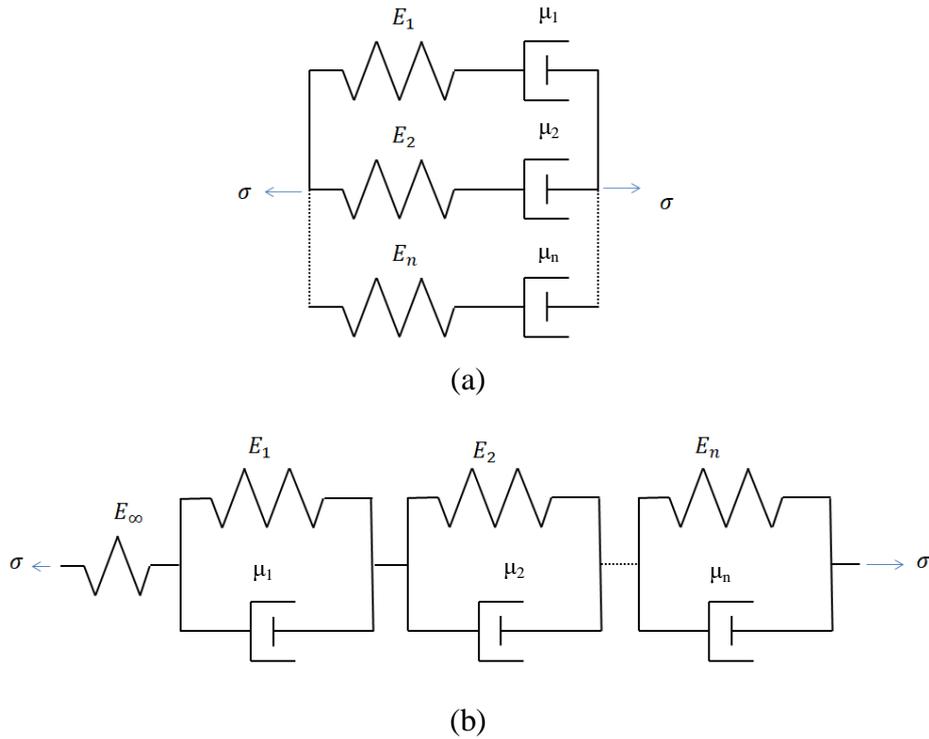


Figura 3.5 – Modelos mecânicos viscoelásticos generalizados de: (a) Maxwell; (b) Kelvin

Na Figura 3.5 são apresentados os modelos generalizados que podem representar o comportamento reológico dos materiais. A fluência básica pode ser representada pelo modelo de Kelvin generalizado com o uso da série de Prony (Equação (3.7)). Já a relaxação, representada pelo modelo de Maxwell generalizado, que também pode ser representada pela série de Prony (Equação (3.8)).

$$\text{Fluência: } D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^n D_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (3.7)$$

$$\text{Relaxação: } E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \left(e^{-\frac{t}{\rho_i}}\right) \quad (3.8)$$

em que D_0 é a fluência instantânea, que representa o comportamento instantâneo do material, D_i são as rigidezes viscoelásticas de retardação, τ_i são os tempos de retardação característicos do material. Na relaxação, ρ_i são os tempos de relaxação e E_∞ é o módulo de equilíbrio, E_i são as rigidezes à relaxação, com $i = 1 \dots n$ e n o número de elementos do modelo.

Os modelos generalizados de Maxwell e Kelvin são utilizados nesta pesquisa, assim como as séries de Prony que os representam. Devido em muitos casos ser possível apenas a realização de ensaios de fluência ou relaxação, existe a necessidade da interconversão das propriedades.

3.1.3 Fundamentação teórica da Análise dinâmica mecânica

A análise dinâmica mecânica é utilizada no monitoramento das respostas elásticas e viscosas de um material submetido a carregamentos cíclicos senoidais. Essa técnica é uma ferramenta indispensável para determinar a morfologia e as propriedades viscoelásticas de materiais poliméricos e compósitos (Saba *et al.*, 2016), tais como: viscosidade complexa, fluência complexa, relaxação complexa em relação ao tempo, frequência ou temperatura.

A resposta elástica, chamada de módulo de armazenamento longitudinal E' (flexão, compressão e tração) ou módulo de armazenamento cisalhante G' (torção), está associada à rigidez do material ou à energia armazenada pelo corpo. Por outro lado, a resposta viscosa, denominada de módulo de perda longitudinal E'' (flexão, compressão e tração) ou cisalhante G'' (torção), está relacionada com a tendência do corpo em dissipar energia. Das respostas elásticas e viscosas é possível obter o fator de amortecimento do material, $\tan(\delta = E''/E')$, sendo δ o ângulo de fase. Essas propriedades são relacionadas de acordo com a

Figura 3.6.

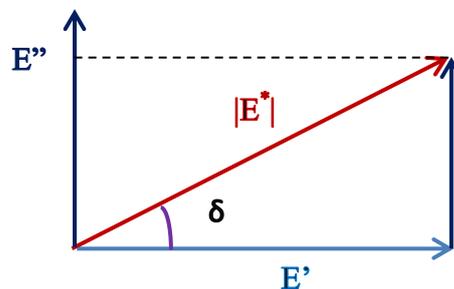


Figura 3.6 – Relações entre E' , E'' e δ

A Figura 3.6 mostra que as parcelas E' e E'' estão relacionadas com o módulo complexo, $|E^*|$, e com δ . O ângulo de fase tem seu valor entre 0° e 90° ,

sendo que quanto mais próximo de zero mais elástico, enquanto que mais próximo de 90° mais viscoso é o material. No caso de materiais cimentícios esse valor está mais próximo de zero, por ser um material de comportamento predominantemente elástico. Entretanto, à medida que a frequência de ensaio diminui esse valor aumenta, pois o comportamento viscoso é acentuado. As relações matemáticas entre E' , E'' e E^* são dadas por:

$$E^* = E' + iE'' \quad (3.9)$$

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} \quad (3.10)$$

A Equação (3.9), encontrada em Schwarzl e Struik (1968), mostra essa relação no domínio complexo, sendo $i = \sqrt{-1}$. Em alguns materiais o valor de E^* é representado em valor absoluto de forma a facilitar a análise dos dados, como mostrado na Equação (3.10). A Figura 3.7 reproduz de maneira simplificada a tensão e a deformação gerada durante o ensaio DMA.

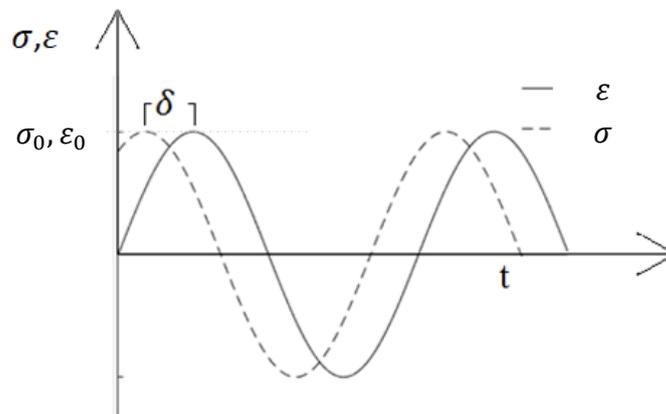


Figura 3.7 – Curva tensão-deformação com carregamento senoidal

A Figura 3.7 mostra a amplitude de tensão (σ_0) aplicada de forma senoidal e a amplitude de deformação senoidal (ϵ_0). O atraso de tempo entre as curvas permite encontrar δ . Os valores de E' , E'' e δ são encontrados por meio de ensaios como ilustra a Figura 3.7. A tensão e a deformação senoidal gerada são representadas por:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (3.11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (3.12)$$

em que ω é a frequência angular, t o tempo, σ é a função de tensão senoidal e ε é a deformação senoidal gerada. As relações entre os módulos $|E^*|$, E' e E'' são mostrados nas Equações (3.13) a (3.15):

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3.13)$$

$$E' = |E^*| \cos(\delta) \quad (3.14)$$

$$E'' = |E^*| \sin(\delta) \quad (3.15)$$

As Equações (3.9) a (3.15) também se aplicam nos ensaios de torção senoidal. No entanto, em se tratando de nomenclatura, basta trocar σ por τ (tensão cisalhante) e ε por γ (deformação ao cisalhamento). Os termos DMA e DMTA, ambos podem ser tratados como DMA, pois o segundo difere apenas pela utilização da variação temperatura durante o experimento. Neste caso, supõe-se que o valor de δ é considerado o mesmo tanto para o cisalhamento quanto para a flexão, tendo como base a proximidade dos valores encontrados na literatura (Fu e Chung, 1996; Morlat *et al.*, 1999; Chung, 2001; Foray-thevenin *et al.*, 2006) nas duas situações. Assim, aqui é considerado um valor constante do coeficiente de Poisson, ν .

3.2 INTERCONVERSÕES DAS FUNÇÕES VISCOELÁSTICAS

Aqui será apresentada uma metodologia de interconversão dos dados dinâmicos para estáticos com simplificações da literatura, assim como de fluência para relaxação e vice-versa.

3.2.1 Interconversão das funções de fluência e relaxação

A interconversão dos dados é realizada através do princípio da correspondência elástico-viscoelástico, com o modelo de Kelvin para elementos unidimensionais. Isso pois, o comportamento de materiais viscoelásticos no espaço do tempo corresponde a seu comportamento elástico no espaço de Laplace. Assim, as séries de Prony são utilizadas para facilitar as interconversões dos dados. Dessa maneira, são representadas no espaço do tempo, t , e suas correspondentes no espaço de Laplace, s , para fluência (D) e relaxação (E), mostradas nas Equações (3.16) e (3.17).

$$D(s) = \frac{D_0}{s} + \sum_{i=1}^n D_i \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{\tau_i}} \right) \quad (3.16)$$

$$E(s) = \frac{E_\infty}{s} + \sum_{i=1}^n E_i \left(\frac{1}{s + \frac{1}{\rho_i}} \right) \quad (3.17)$$

A relação entre $D(s)$ e $E(s)$ no espaço de Laplace (Findley *et al.*, 1976) é feita por:

$$D(s) E(s) = \frac{1}{s^2} \quad (3.18)$$

Com a inserção das Equações (3.16) e (3.17) na Equação (3.18) e com a volta do espaço de Laplace para o espaço do tempo, é possível encontrar soluções analíticas. Em muitos casos, dependendo do número de termos, se torna bem complexa, devido à dificuldade de se encontrar os resultados analíticos para muitos termos. Com isso, alguns autores recorrem a métodos numéricos (Dubner e Abate, 1968; Durbin, 1972).

Nas interconversões numéricas, Schapery e Park (1999) propuseram encontrar a função de fluência a partir dos dados de relaxação em série de Prony, que podem ser resolvidos por um sistema de equações pelo método da colocação ou método dos mínimos quadrados dado pela Equação (3.19):

$$[A]\{d\} = \{b\} \text{ ou } A_{kj}d_j = b_k \quad (3.19)$$

sendo:

$$A_{kj} = \begin{cases} E_e \left(1 - e^{-\left(\frac{t_k}{\tau_j}\right)} \right) + \sum_{i=1}^m \frac{\rho_i E_i}{\rho_i - \tau_j} \left(e^{-\left(\frac{t_k}{\rho_i}\right)} - e^{-\left(\frac{t_k}{\tau_j}\right)} \right) & \text{se } \rho_i \neq \tau_j \\ E_e \left(1 - e^{-\left(\frac{t_k}{\tau_j}\right)} \right) + \sum_{i=1}^m \frac{t_k E_i}{\tau_j} \left(e^{-\left(\frac{t_k}{\rho_i}\right)} \right) & \text{se } \rho_i = \tau_j \end{cases} \quad (3.20)$$

$$b_k = 1 - \left(E_e + \sum_{i=1}^m E_i e^{-\left(\frac{t_k}{\rho_i}\right)} \right) / \left(E_e + \sum_{i=1}^m E_i \right) \quad (3.21)$$

em que, t_k é o tempo discreto correspondente ao limite superior de integração, E_e é o módulo de equilíbrio, m representa o número de termos no somatório, $[A]$ é uma matriz conhecida, $\{b\}$ é um vetor conhecido e $\{d\}$ sendo um vetor desconhecido. Assim, com a A_{kj} e b_k é possível encontrar d_j que neste caso teria os coeficientes de fluência. No entanto, para um bom resultado, é necessário escolher o correto intervalo de tempo, pois diferentes intervalos fornecem diferentes resultados.

No caso da interconversão analítica, Christensen (1982) apresenta a Equação (3.22). É uma forma simplificada de interconversão, onde há a necessidade apenas da função de relaxação $E(t)$ e sua derivada. De acordo com Park e Kim (1999), a troca de $D(t)$ por $E(t)$ gera boas aproximações na transformação inversa.

$$D(t) \cong \frac{E(t)}{E(t)^2 + \frac{\pi^2 t^2}{4} \left\{ \frac{dE(t)}{dt} \right\}} \quad (3.22)$$

Quando é necessário uma interconversão rápida e simples, em alguns casos é possível recorrer a interconversão direta dos dados. Isso é feito apenas pela inversão dos dados como mostrado na Equação (3.23) em materiais sólidos viscoelásticos que em muitos casos é satisfatória.

$$D(t) \cong \frac{1}{E(t)} \quad (3.23)$$

A eficácia dos métodos é mostrada por meio de uma comparação dos métodos de interconversão apresentados. Os dados são os mesmos utilizados por Schapery e Park (1999) que são mostrados na Figura 3.8.

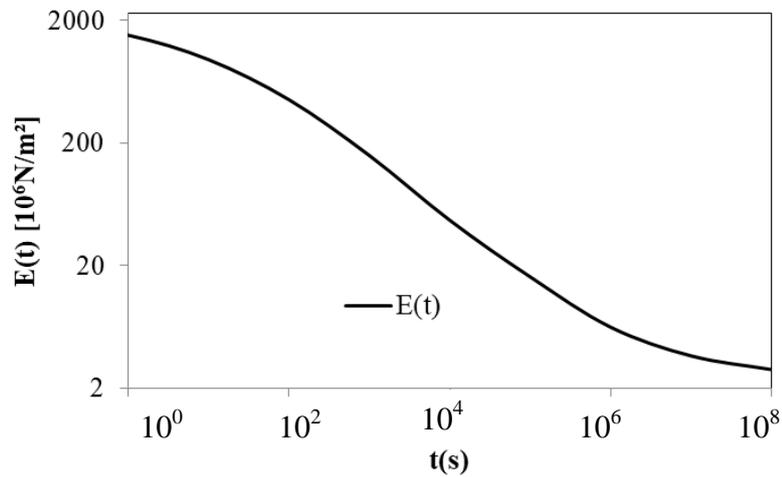


Figura 3.8 – Curva de relaxação usada por Park e Schapery (1999)

Com os dados da Figura 3.8 além da formulação numérica proposta por Schapery e Park (1999), Christensen (1982) e a Equação (3.23), faz-se a comparação dos métodos. A comparação é mostrada na Figura 3.9.

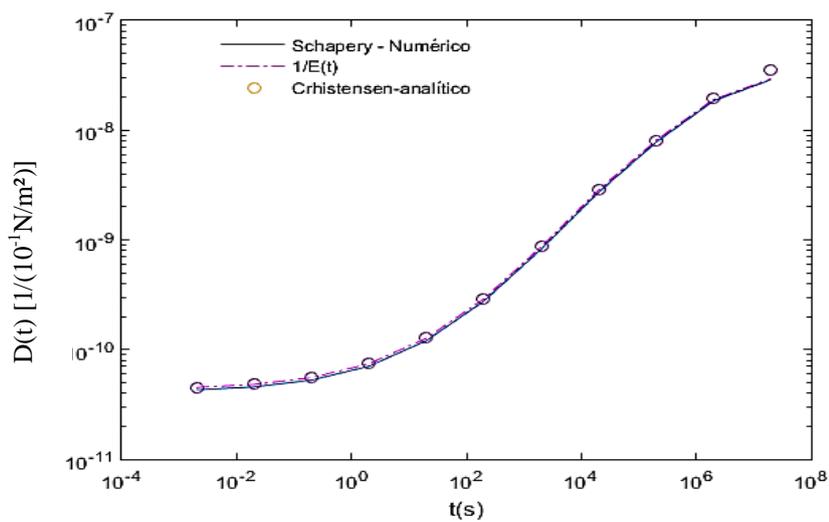


Figura 3.9 – Comparação do método de Christensen (1982), Park e Schapery (1999) e $1/E(t)$

Observa-se na Figura 3.9 que as três soluções apresentaram boa aproximação. Com isso, a equação de Christensen (1982) é uma aproximação satisfatória e para sólidos há uma aproximação do inverso da relaxação. No caso da solução de Park e Schapery (1999), só é possível num determinado intervalo de tempo, que é determinado por meio de tentativas. Dessa maneira, a solução de Christensen (1982) é selecionada para realização das interconversões de $E(t)$ para $D(t)$ nesta pesquisa.

3.2.2 Interconversão dos módulos complexos cisalhantes em longitudinais

Com o objetivo de obter os módulos complexos longitudinais, $|E^*|$, $E'(\omega)$ e $E''(\omega)$, foi realizada uma interconversão simplificada dos módulos complexos ao cisalhamento, $|G^*|$, no domínio da frequência (ω). Assim os resultados de $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$ são transformados em $|E^*|$ com a Equação (3.24) (Ferry, 1980).

$$|E^*| = |G^*|2(1 + \nu) \quad (3.24)$$

O coeficiente de Poisson (ν) é considerado constante no tempo, e de valor $\nu = 0,20$, sendo usado para encontrar o valor do módulo complexo, $|E^*|$, e os módulos dinâmicos longitudinais, $E'(\omega)$ e $E''(\omega)$ com as equações:

$$E' = |E^*| \cos(\delta) \quad (3.25)$$

$$E'' = |E^*| \sin(\delta) \quad (3.26)$$

As regressões em séries de Prony podem ser feitas de acordo com a Equação (3.27) e (3.28), no domínio da frequência. Onde, os ρ_i são espaçados em décadas de tempo.

$$E'(\omega) = E_\infty + \sum_{i=1}^m \frac{\omega^2 \rho_i^2 E_i}{\omega^2 \rho_i^2 + 1} \quad (3.27)$$

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^m \frac{\omega \rho_i E_i}{\omega^2 \rho_i^2 + 1} \quad (3.28)$$

sendo m o número de termos da série. Os coeficientes obtidos na regressão das Equações (3.27) e (3.28) também são válidos para a série de Prony no domínio do tempo da Equação (3.8). Isso é feito pela relação direta dos coeficientes de $E(t)$, como mostrado por Schapery e Park (1999). A interconversão de $E(t)$ para $D(t)$ é feita com o uso da Equação (3.22), apresentada por Christensen (1982), que gera boas aproximações no caso de materiais sólidos.

3.3 MODELOS E LEIS VISCOELÁSTICOS COM ENVELHECIMENTO

O envelhecimento dos materiais cimentícios pode ser representado por leis e modelos matemáticos. As funções que representam o envelhecimento levam em consideração o tempo corrente (t) e o tempo de carregamento (t') que aqui são representados pela fluência.

3.3.1 Lei de Potência Dupla

As funções de fluência vêm sendo estudadas por leis de potências que descrevem a forma das suas curvas. Algumas estão limitadas à fluência básica, como a Lei de Potência Dupla de Bažant (1975), sendo que esta pode ser usada na fluência por secagem apenas para certa duração de tempo. A Equação (3.29) representa a função de fluência desse modelo.

$$D(t, t') = \frac{1}{E_{assin}} + \frac{\varphi_0}{E_{assin}} (\alpha + t'^{-d})(t - t')^p \quad (3.29)$$

em que: t é a idade do concreto; t' a idade de carregamento; $D(t, t')$ é a fluência em função do tempo corrente e do tempo de carregamento; $E_{assin} = 1,5E_{c28}$ o módulo de elasticidade assintótico; α o Parâmetro do modelo para fluência de longo prazo; φ_0 , d e p são parâmetros do modelo de fluência. Esse modelo pode ser melhorado com a introdução de um módulo de elasticidade dependente do tempo, como na representação por Séries de Dirichlet na Equação (3.30) (Bažant, 1975).

$$D(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i(t')} (1 - e^{-[(t-t')/\tau_i]}) \quad (3.30)$$

Com o tempo de retardação $\tau_i = 10^{i-1}$ e E_i são coeficientes definidos de acordo com o número de termos da série, N .

3.3.2 Lei de Potência Tripla

A Lei de potência tripla de Bažant e Chern (1985) aparece como uma melhoria de outras leis de potência, tal como a Lei de Potência Dupla (Bažant e Osman, 1976), pois ela abrange um intervalo maior de análise da função de fluência. Ela pode ser aplicada para duração de cargas em tempos muito curtos e muito longos. Ela é obtida através de uma taxa de fluência representada pela Equação (3.31).

$$\dot{D}(t, t') = \frac{\psi_1}{E_0} \frac{t'^{-m} + \alpha}{(t - t')^{1-n} \left(\frac{t}{t'}\right)^n} \quad (3.31)$$

em que: $\dot{D}(t, t') = \frac{\partial D(t, t')}{\partial t}$; E_0 ; ψ_1 ; n ; m são parâmetros materiais, similares, mas não idênticos aos da Lei de Potência Dupla. A Lei de potência Tripla é obtida pela integração da Equação (3.31) sendo mostrada na Equação (3.32).

$$D(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_0}{E_0} (t'^{-m} + \alpha) [(t - t')^n - B(t, t'; n)] \quad (3.32)$$

onde:

$$B(t, t'; n) = n \int_{\xi=0}^{t-t'} \left[1 - \left(\frac{t'}{t' + \xi} \right)^n \right] \xi^{n-1} d\xi, \quad \xi = t - t' \quad (3.33)$$

sendo B uma integral binomial em função de $t - t'$. Apesar de descrita aqui, esta equação não é utilizada para ajuste dos dados desta pesquisa.

3.3.3 Abordagem de Tempo diferido

Os modelos viscoelásticos com envelhecimento com o uso da abordagem de tempo diferido levam em consideração o princípio da superposição análogo ao tempo em função da temperatura (Morland e Lee, 1960). Com isso, este princípio afirma que a mudança na temperatura provoca aumento ou diminuição nos tempos de relaxação e retardação em materiais que são termoreologicamente simples (mudanças nas funções de módulos ou ajustes ao longo do eixo x não mudam a forma das curvas com a idade de carregamento. A mudança no tempo é dada por (Morland e Lee, 1960; Schwarzl e Struik, 1968):

$$A_t = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^\mu \quad (3.34)$$

onde t_{ref} é a idade de referência, t é a idade atual e μ é um parâmetro de ajuste (Grasley e Lange, 2007).

3.3.4 Teoria da Solidificação

A observação do envelhecimento na pasta de cimento pode ser estudada pela Teoria da Solidificação. Alguns trabalhos de destaque na Teoria da Solidificação para fluência do concreto podem ser encontrados em Bažant e Prasannan (1988). Nela, uma análise micromecânica do processo de solidificação é usada para mostrar que o envelhecimento pode ser modelado como um crescimento da fração de volume de suporte de matéria solidificada. Na Figura 3.10 está representado o modelo viscoelástico na cadeia de Kelvin para a solidificação.

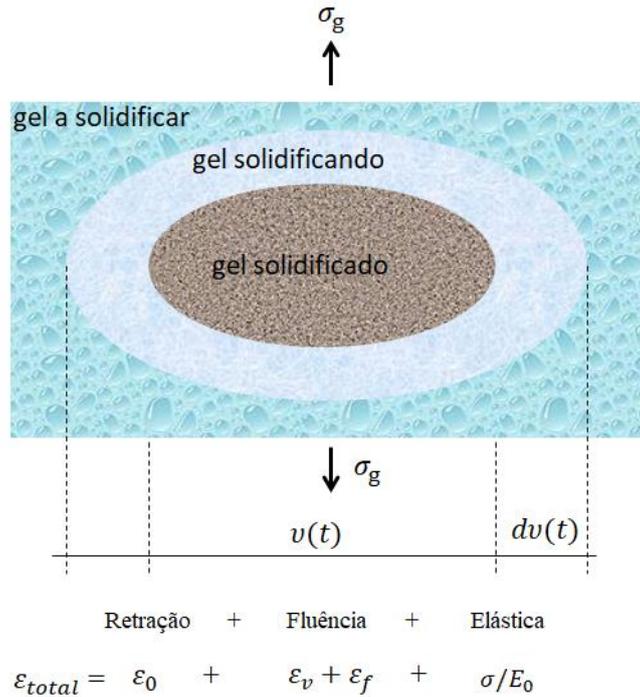


Figura 3.10 - Modelo para teoria da solidificação na fluência

em que σ/E_0 é deformação elástica, σ_g é a tensão no volume solidificado (envelhecido), ε_v é a deformação viscoelástica da matéria solidificada (hidratação do cimento), ε_f é a deformação viscosa, ε_0 é a deformação por retração, $v(t)$ é o volume de gel solidificado e $dv(t)$ é o volume de gel solidificando no tempo t e ε_{total} é a deformação total. Sendo a função de fluência apresentada em Carol e Bažant (1993) pela Equação (3.35).

$$D(t, t') = \frac{D_0}{v(t')} + \int_{t'}^t \frac{1}{v(\tau)} \frac{\partial D_g(\tau - t')}{\partial \tau} d\tau \quad (3.35)$$

As funções materiais, D_g , podem ser escolhidas de forma a produzir leis simples, como a Lei da potência Dupla, Bažant e Osman (1976), Tripla, Bažant e Chern (1985), Logarítmica e duplo Logarítmica. A não linearidade é introduzida com a modificação da taxa de fluência corrente como função da tensão.

Grasley e Lange (2007), fizeram um estudo do comportamento viscoelástico do envelhecimento da pasta de cimento. Neste trabalho foram utilizados dois modelos diferentes, como a abordagem de tempo diferido e a teoria da solidificação. Tais

modelos foram realizados e foi observado que eles não conseguem caracterizar bem as respostas viscoelásticas envelhecidas separadamente. Com isso, os autores fizeram a combinação dos dois modelos e observaram um melhor resultado das propriedades viscoelásticas envelhecidas da pasta de cimento e concreto. A função de ajuste que leva em consideração as duas teorias, sendo representado pela cadeia de Kelvin, é dada por:

$$D(t, t') = \int_{t'}^t \frac{1}{v(\tau)} \frac{\partial D_g \{(\tau^{1+\mu} - \tau'^{1+\mu}) / (1 + \mu)\}}{\partial \tau} d\tau \quad (3.36)$$

em que t um tempo qualquer, t' é a idade de carregamento, $v(\tau)$ é o volume efetivo solidificado, D_g é a fluência uniaxial viscoelástica não envelhecida, μ é um parâmetro de ajuste e τ é a variável de tempo utilizado na integração.

O envelhecimento é representado por $1/v(t)$, de acordo com Grasley e Lange (2007), no domínio das transformadas de Laplace, na mesma forma das equações constitutivas elásticas (princípio da correspondência elástico-viscoelástico), sendo:

$$\frac{1}{v(t)} = \sum_{i=1}^N \beta_i e^{-w_i t} \quad (3.37)$$

onde β_i e w_i são constantes a serem determinadas para cada material. Com isso, $1/v(t)$ é um parâmetro de medição do envelhecimento e é utilizado nesta tese. Entretanto, as propriedades são encontradas em ensaios viscoelásticos de curta duração. Sabe-se que, a propriedade envelhece ao longo do tempo, no entanto durante ensaios de curta duração (questão de horas) o material praticamente não envelhece. Dessa maneira, a função de fluência não envelhecida para cada idade quando multiplicada por $1/v(t')$, torna-se envelhecida. Com isso, a Equação (3.35) passa a ser:

$$D(t, t') = \frac{1}{v(t')} \left[D_0 + \int_{t'}^t \frac{\partial D_g(\tau - t')}{\partial \tau} d\tau \right] \quad (3.38)$$

Por meio da Equação (3.35) é possível simplificar as dificuldades matemáticas que são encontradas. Sendo $1/\nu(t')$ função apenas do tempo de carregamento, t' . Assim, a previsão dos deslocamentos no tempo de estruturas pode ser feita por meio de soluções numéricas destinadas a materiais não envelhecidos.

4 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma dos ensaios, sendo os ensaios DMAs para caracterização viscoelástica e resistência à compressão e módulo de elasticidade para caracterização das propriedades mecânicas em pastas e argamassas. Os corpos de prova foram produzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB). Já os ensaios DMA foram realizados no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB/UnB), ambos da Universidade de Brasília (UnB). A caracterização mecânica foi realizada no LEM/UnB e no Laboratório de Tecnologia do Instituto Federal de Goiás – Campus Formosa (IFG/ Formosa).

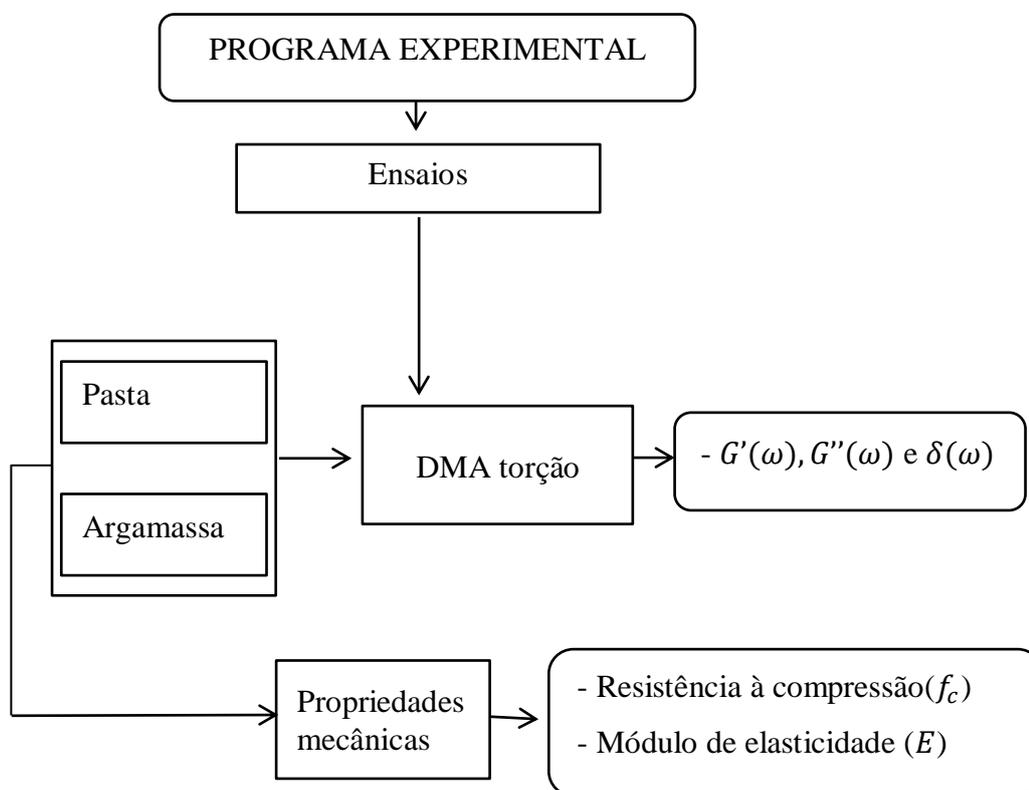


Figura 4.1 – Fluxograma do programa experimental

A metodologia proposta é ilustrada na Figura 4.2. É realizado um ensaio de varredura de frequência em corpos de prova com o uso de um reômetro de cisalhamento dinâmico, do inglês *Dynamic Shear Rheometer* (DSR). Os resultados fornecem o comportamento de $G'(\omega)$, $G''(\omega)$ e $\delta(\omega)$ no domínio da frequência (f ou ω como escolhido). A

frequência angular ω em radianos, e a frequência f em Hz, são relacionadas por $\omega = 2\pi f$.

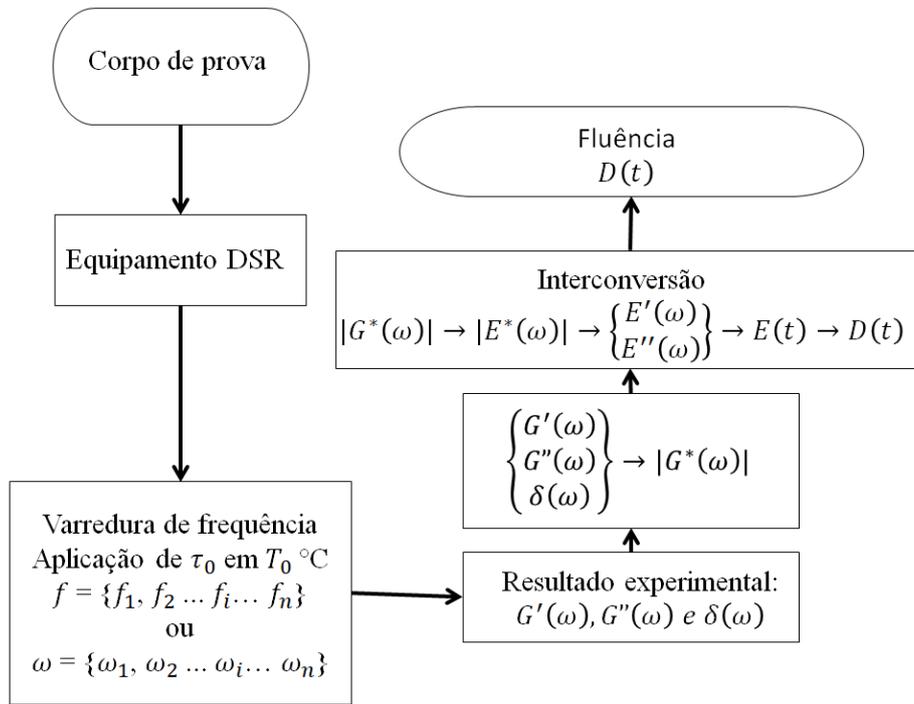


Figura 4.2 – Fluxograma de ensaio DMA ao cisalhamento

Os ensaios DMAs foram realizados no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária da Universidade de Brasília - INFRALAB/UnB. Além disso, é mostrada a caracterização dos materiais e propriedades mecânicas dos corpos de prova nas idades de 1 dia a 28 dias. Os ensaios estão divididos em DMA à torção e caracterização mecânica do material (ver Figura 4.1).

É possível realizar regressões numéricas para obtenção dos coeficientes em série de Prony no domínio do tempo, pela Equação (3.7). O processo de transformação dos dados de relaxação ao cisalhamento no domínio da frequência, $|G^*(\omega)|$, até a fluência longitudinal no tempo, $D(t)$, está resumido na Figura 4.3 com o uso das equações da seção 3.1.2.

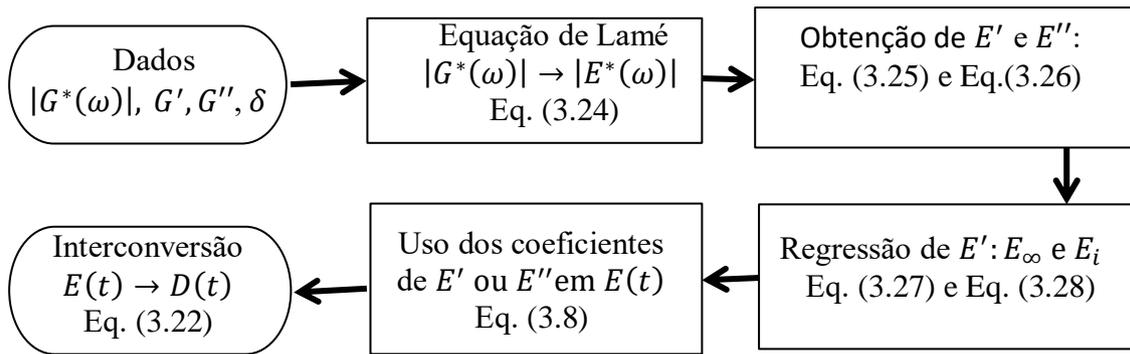


Figura 4.3 – Fluxograma de interconversão dos dados do domínio da frequência (ω) para o tempo (t)

Na transformação de $|G^*(\omega)|$ para $|E^*(\omega)|$ com a relação constitutiva de Lamé, por simplificação, é considerado que δ é igual para ambas as propriedades (G' e E'). Com isso, é possível encontrar os valores de $E'(\omega)$ e $E''(\omega)$, para posterior regressão dos coeficientes no domínio da frequência. Estes são os mesmos coeficientes no domínio do tempo em série de Prony (12 termos de série) como utilizado por Schapery e Park (1999). Encontrado os coeficientes, é feita a interconversão dos dados de relaxação para fluência, $D(t)$. Com isso, o fluxograma da Figura 4.3 é aplicado em todos os dados viscoelásticos obtidos nos ensaios DMA. A propriedade E' é escolhida nas interconversões tendo como critério: o material ser predominante elástico e sua validação (ver seção 5.3).

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados para pastas e argamassas, em um total de cinco misturas com relação a/c de 0,30, 0,35, 0,38 e 0,42. As misturas são baseadas no TC – 225 – SAP (RILEM, 2012) que foi utilizado por Santos (2016), Manzano (2016) e Silva Junior (2017), sendo estas pesquisas desenvolvidas na UnB. Entretanto, há a alteração na relação a/c e no teor do superplasticante que fica em torno de 2%. A mudança no fator a/c se faz necessário para a observação do comportamento viscoelástico da mistura sem a alteração das quantidades dos outros componentes.

Os experimentos visam caracterizar as propriedades viscoelásticas de materiais cimentícios no domínio da frequência. As variáveis de resposta para as diferentes

misturas quantificam as características e propriedades no estado endurecido nas primeiras idades (até 28 dias de moldado), sendo:

- I. Propriedades mecânicas estáticas: resistência à compressão (f_c) e módulo de Young (E);
- II. Propriedades dinâmicas: módulos de armazenamento (G'), perda (G''), e ângulo de fase (δ) à torção.

Os fatores controláveis foram o fator água-cimento (a/c), a idade de carregamento (t') e a frequência (ω), já as variáveis de resposta foram f_c , E , G' , G'' e δ . Diante disso, as misturas foram feitas de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Matriz experimental

Mistura	Fatores controláveis		
	a/c	Tipo de cimento	t' (dia)
P030	0,30	CPV ARI	1, 7 e 28
P035	0,35	CPV ARI	1, 3 e 7
P042	0,42	CPV ARI	1, 7 e 28
A035	0,35	CPV ARI	1 e 3
A038	0,38	CPV ARI ³	1 e 3

A Tabela 4.1 mostra as misturas realizadas com cimento de alta resistência inicial em diferentes idades. Os nomes das misturas são representados pelas letras P (pasta) e A (argamassa) e por números que representam a relação a/c (como exemplo a mistura P030 significa pasta com relação $a/c = 0,30$). As idades de análise foram diferentes entre as misturas, porém para facilitar a comparação numérica – experimental foram usadas as mesmas idades como nas misturas P035 e A035 para comparação com a literatura.

³ CPV ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial (ABNT NBR 5733: 1991)

4.2 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO

A escolha dos materiais foi realizada de modo que já fosse conhecida a caracterização dos mesmos. Isso pois, o objetivo desta pesquisa é transformação dos dados e adaptação de ensaios DMA comuns em materiais poliméricos e asfálticos com aplicação em materiais cimentícios. Diante disso, os materiais empregados são os mesmos da pesquisa realizada por Santos (2016), Manzano (2016) e Silva Junior (2017) tendo alguns deles diferenças no lote de fabricação.

4.2.1 Sílica ativa

A sílica ativa é geralmente empregada em concretos de alta resistência. É utilizada com a finalidade de melhorar a capacidade de amortecimento e vibração, no estado endurecido, que por vezes são reduzidas devido aos agregados de acordo com Wang e Chung (1998). O teor de 10% de sílica em relação à massa de cimento é utilizado nas misturas por recomendação do Comitê 225-SAP (RILEM, 2012) e também no estudo de Atrushi (2003). A caracterização química é encontrada no trabalho de Santos (2016) na Tabela 4.2 sendo de mesma origem, apenas com lote de fabricação diferente.

Tabela 4.2 – Caracterização física e química da Sílica ativa (modificada de Santos, 2016)

Propriedades	Teor (%)	Limites NBR 13956:2012
Massa específica (g/cm ³)	2,21	-
Perda ao fogo	3,22	≤ 6,0
Óxido de magnésio - MgO	0,49	-
Dióxido de silício – SiO ₂	93,5	≥ 85
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	0,16	-
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	0,15	-
Óxido de cálcio - CaO	0,37	-
Óxido de sódio – Na ₂ O	0,26	-
Óxido de potássio – K ₂ O	0,85	-
Equivalente alcalino	0,82	≤ 1,5

Fonte: Santos (2016)

4.2.2 Cimento Portland

Na busca de elevada resistência em pequenas idades, a fim de evitar a fragilidade do corpo de prova, é utilizado o cimento CPV ARI. Este possui alta resistência inicial, devido a alta reatividade em baixas idades e seu elevado grau de finura. Foram empregados dois cimentos de alta resistência provenientes de diferentes fabricantes, sendo suas caracterizações químicas apresentadas Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Caracterização química dos cimentos empregados

Composição química	Teores (%)		Limites NBR 5733	
	CPV ^a	CPV ^b		
Perda ao fogo	1,82	1,94	≤ 4,5	
Resíduo insolúvel	0,79	-	≤ 1,0	
Trióxido de enxofre – SO ₃	3,28	-	*	
Óxido de magnésio - MgO	4,36	4,43	≤ 6,5	
Dióxido de silício – SiO ₂	24,41	20,65	-	
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	3,02	2,29	-	
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	7,09	3,94	-	
Óxido de cálcio - CaO	53,44	61,95	-	
Óxido de cálcio livre – CaO livre	2,16	-	≤ 3,00	
Sulfato de cálcio – CaSO ₄	2,16	-	-	
Álcalis totais	Óxido de sódio – Na ₂ O	0,29	0,53	-
	Óxido de potássio – K ₂ O	0,77	0,94	-
	Equivalente alcalino	0,80	-	-
Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio – Na ₂ O	0,18	-	-
	Óxido de potássio – K ₂ O	0,64	-	-
	Equivalente alcalino	0,60	-	-

O cimento CPV^a ARI foi o mesmo utilizado por Santos (2016), já o CPV^b ARI foi escolhido aleatoriamente de outro fabricante sem nenhum critério, apenas pela disponibilidade do material. A caracterização química do CPV^b foi realizada no laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília. As características químicas dos cimentos utilizados estão próximas, com isso o termo CPV ARI passa a ser usado em toda tese para ambos os cimentos.

4.2.3 Agregado miúdo – Areia

As argamassas foram fabricadas com areia fina de tamanho máximo de 0,6 mm (ver Figura 4.4) e outra que foi utilizada por Silva Junior (2017) (ver Figura 4.5). Essa limitação do tamanho do agregado é devido ao tamanho dos corpos de prova para os ensaios DMA à torção terem a menor dimensão de 2,5 mm. A limitação evita variações nos resultados experimentais, pois a mistura se torna mais homogênea, o que diminui os ruídos nos dados. Então, foi realizada a caracterização granulométrica, módulo de finura, massa específica e dimensão máxima do agregado no Laboratório de Ensaios e materiais – LEM da Universidade de Brasília, de acordo com Figura 4.4.

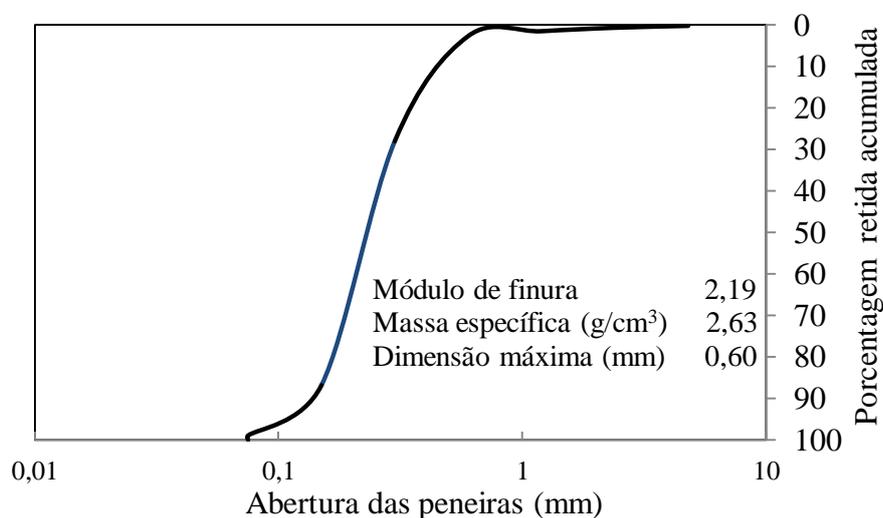


Figura 4.4 – Curva granulométrica e características do agregado miúdo (Areia 01)

A areia 01 da Figura 4.4 foi utilizada em corpos de prova de dimensão de 4,3 mm x 10 mm x 2,5 mm. Já a areia 02 que foi utilizada por Silva Junior (2017), não sendo utilizada na fabricação das misturas devido a alta granulometria em relação à menor dimensão do corpo de prova. Esta é usada nas simulações numéricas com a inclusão de agregados graúdos para comparar com os resultados de fluência de Silva Junior (2017).

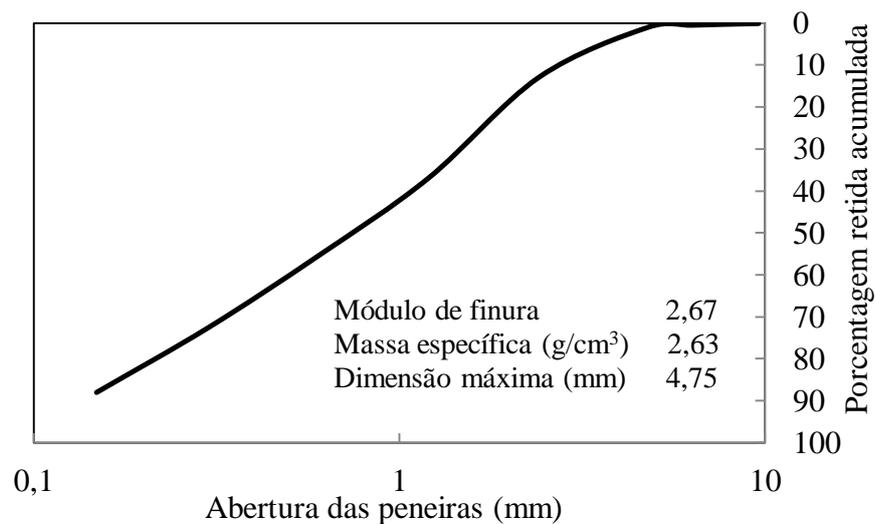


Figura 4.5 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia 02) utilizado por Silva Junior (2017)

A determinação da massa específica do agregado miúdo com o frasco de Chapman foi feita de acordo com a ABNT NBR 9776: 1987. Já a caracterização granulométrica, realizada com as peneiras de série normal, além do módulo de finura e dimensão máxima do agregado miúdo estão de acordo com a ABNT NBR 7211: 2011. Devido à umidade existente, foi feito um ensaio para determinação do percentual de água existente no agregado com a utilização do frasco de Chapman e da ABNT NBR 9775: 2011. Os teores de água encontrados são corrigidos durante a produção das misturas.

4.2.4 Agregado graúdo

Os agregados graúdos são utilizados na produção do concreto. Aqui são utilizadas britas com graduação zero. A escolha do material foi feita de modo que houvesse resultados na literatura para comparação. A brita de origem metamórfica do tipo gnaisse foi utilizada por Silva Junior (2017), que realizou ensaios de fluência estática em concretos. Assim, foi utilizado o mesmo agregado graúdo com curva granulométrica apresentada na Figura 4.6.

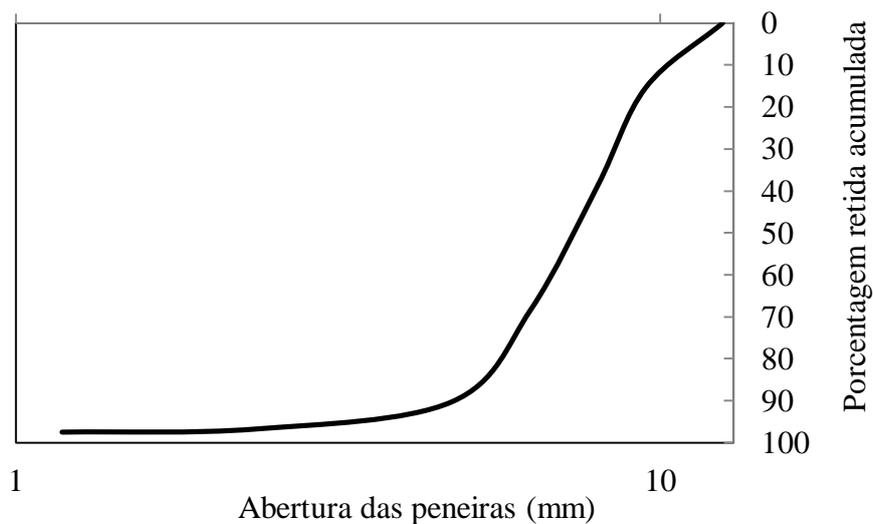


Figura 4.6 – Curva granulométrica da brita 0 (modificado de Silva Junior, 2017)

Apesar de nessa pesquisa não serem feitos corpos de prova de concreto, as características da brita são necessárias para alimentar os modelos de simulação numérica.

4.2.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante é empregado para dar maior fluidez nas misturas com baixa relação a/c . O aditivo (GLENIUM® 51 da BASF) é empregado com um teor de 2% em relação a massa de cimento nas pastas e argamassas. Os dados técnicos foram obtidos do fabricante como mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados técnicos do aditivo superplastificante

Característica	Especificação
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5 - 7
Densidade (g/cm ³)	1,067 – 1,107
Sólidos (%)	28,5 – 31,5
Viscosidade (cps [*])	< 150

*cps: centipoise = 1 mPa.s Fonte: Ficha técnica do produto

A escolha do aditivo vem de critérios determinados na pesquisa de Manzano (2016) para o espalhamento no estado fresco da mistura e por sua disponibilidade para esta pesquisa.

4.2.6 Água

Na pesquisa são utilizadas diferentes relações a/c nas misturas tais como: 0,30, 0,35, 0,38 e 0,42. A variação nessas relações serve para a observação do comportamento reológico das misturas sem a alteração dos outros componentes. Destaca-se que, como o aditivo possui água, cerca de 70% de sua composição, é descontado esse valor de água adicionada. A água é obtida diretamente da rede de abastecimento pública.

4.2.7 Composição e produção das misturas

Foram realizadas misturas com diferentes relações a/c . A Tabela 4.5 apresenta os traços unitários dos materiais empregados para cada mistura. É importante destacar que as misturas tem como base a recomendação do Comitê 225-SAP (RILEM, 2012), no entanto, em alguns casos, com a alteração da relação a/c e do tipo de agregado.

Tabela 4.5 – Traço unitário das misturas em estudo

Componente	Composição unitária (Kg/Kg de cimento)				
	P030	P035	P042	A035	A038
Cimento CP V ARI	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
areia 01 ($\emptyset \leq 0,60 \text{ mm}$)	-	-	-	-	1,91
areia 02 ($\emptyset \leq 4,75 \text{ mm}$)	-	-	-	1,91	-
Sílica ativa	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Aditivo superplastificante (%)	2,00	2,00	2,00	2,00	-
a/c	0,30	0,35	0,42	0,35	0,38

Na Tabela 4.5 são mostradas as composições das misturas com o intuito de aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho. Foram feitas 3 pastas (misturas P030, P035 e P042) e 2 argamassas (misturas A038 e A035) com diferentes relações a/c . Isso foi necessário para observar as perturbações nos resultados devido ao tamanho do agregado e da variação do teor de água.

A produção dos corpos de prova de pasta e argamassa seguiram as recomendações do Comitê TC 225 – SAP (RILEM, 2012). No entanto, diferente do prescrito pelo Comitê, aqui não é utilizado polímero superabsorvente, por não ter como objetivo o estudo deste componente, sendo estudada apenas a composição de referência. O tempo de preparação das misturas está descrito na Tabela 4.6 para cada etapa.

Tabela 4.6 – Etapas e tempos da produção das misturas [modificado de TC 225 – SAP (RILEM, 2012)]

Etapa	Tempo (minutos)
Mistura de componentes secos	4
Adição de água com superplastificante	1
Mistura inicial	3
Raspagem dos materiais presos nas paredes do misturador	1
Mistura final	3

As etapas que foram seguidas são apresentadas na Tabela 4.6. As misturas foram feitas em um misturador mecânico (Hobart, modelo N-50) no Laboratório de ensaios de Materiais (LEM/UnB). Os corpos de prova moldados foram colocados em uma câmara úmida com 100% de umidade para evitar a perda de água. Após a desforma, foram colocados em solução alcalina a fim de mitigar os efeitos da retração por secagem. Sabe-se que para eliminar a retração autógena são necessários mecanismos específicos para esse fim, que não fazem parte dos objetivos desta pesquisa.

4.2.8 Caracterização mecânica de resistência e rigidez

A caracterização mecânica é realizada com base na determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos corpos de prova 5 cm x 10 cm nas idades de 1 dia podendo chegar a 28 dias. Foram utilizados quatro corpos de prova por idade para obter f_c e três para o módulo de elasticidade. A caracterização da resistência é ilustrada na Figura 4.7.



(a)

(b)

Figura 4.7 – Corpo de prova encaixado no equipamento de ensaio de resistência à compressão: (a) antes do ensaio; (b) depois do ensaio

Os resultados da evolução f_c para as misturas são mostradas na Figura 4.8.

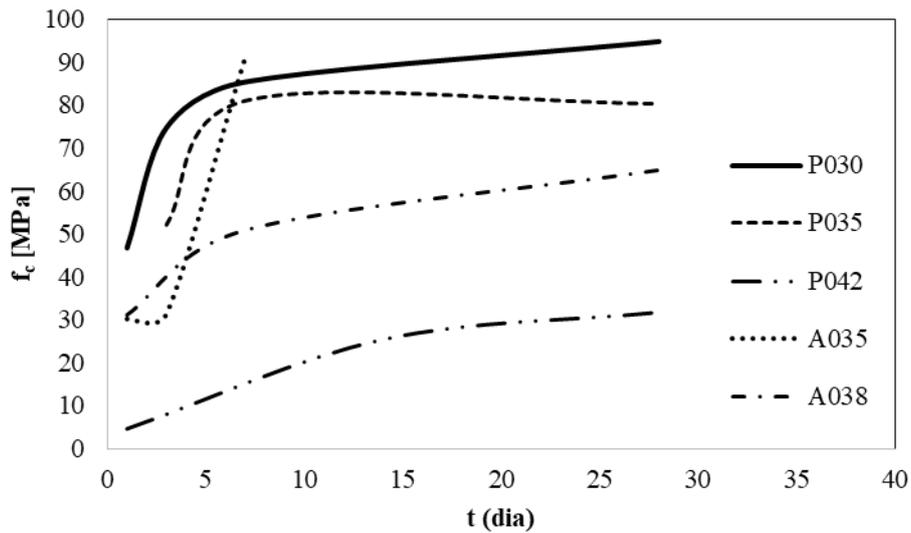


Figura 4.8 – Evolução da tensão de compressão f_c para as misturas em estudo

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados entre as idades de 1 e 28 dias, pois da primeira é possível extrair o valor da carga máxima e mínima a ser aplicada nas análises viscoelásticas das misturas com menor resistência (1 dia de idade). Já a segunda tem maior importância do ponto de vista de comparação com outros modelos reológicos. Apenas a amostra A035 foi feita até a idade de 7 dias. Os dados experimentais, média e desvio padrão de cada mistura estão no APÊNDICE C O ensaio de módulo de elasticidade (módulo de deformação tangente inicial) é ilustrado a seguir:



(a)

(b)

Figura 4.9 – Ensaio de módulo de elasticidade: (a) equipamento utilizado; (b) detalhe do corpo de prova pronto para o ensaio

A Figura 4.9 apresenta o equipamento utilizado, sendo que a Figura 4.9a mostra uma visão geral do equipamento e Figura 4.9b mostra o detalhe do corpo de prova pronto para ensaio. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade tangente inicial (E) são feitos de acordo com a norma ABNT NBR 8522: 2008 para concreto, sendo aplicada nas pastas e argamassas, no equipamento EMIC (Figura 4.9), e são apresentados na Figura 4.10.

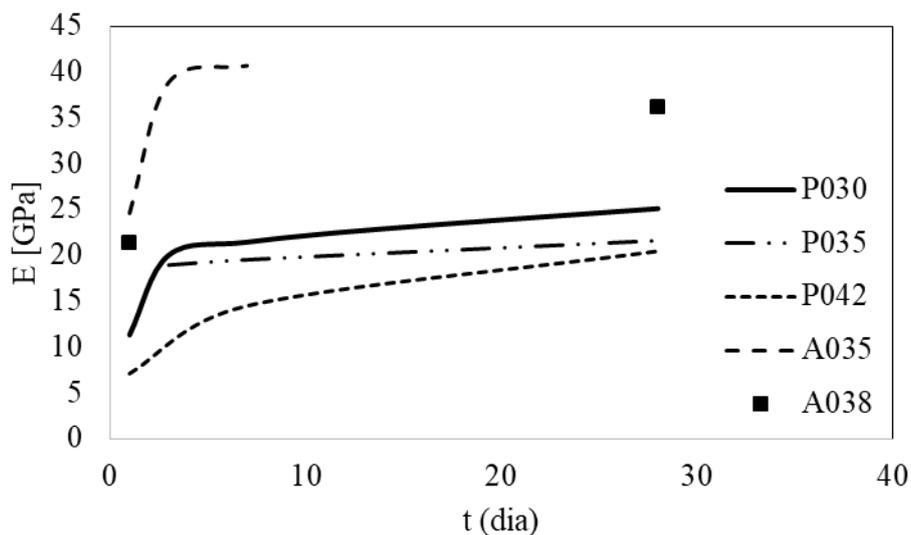


Figura 4.10 – Evolução do módulo de elasticidade (Young) E das misturas

A Figura 4.10 mostra a evolução do módulo de Young (E) em diferentes idades para as misturas. A partir desses dados é possível fazer comparações com os resultados da parcela elástica da relaxação obtida nos ensaios DMA com a finalidade de avaliar sua

proximidade. Os ensaios são realizados para as idades entre 1 dia e 28 dias, com exceção da mistura A035 que é feita até 7 dias de idade. Entre as misturas de pasta e argamassa é possível notar que quanto maior a relação a/c menor é o E .

4.2.9 Metodologia e equipamento para ensaio DMA

A caracterização das propriedades viscoelásticas à torção dos corpos de prova de pastas e argamassas foi realizada por meio de ensaios DMA. As frequências usadas foram de $1/3600 \text{ Hz}$, $1/600 \text{ Hz}$, $1/60 \text{ Hz}$, $1/10 \text{ Hz}$, 1 Hz e 10 Hz no equipamento DSR (Anton Paar) que usa os seguintes padrões: ASTM D5279 :1999, ASTM D4065: 2012, ISO 6721-1: 2011 e ISO 6721-7: 1996, a temperatura de 25°C . O torque máximo do equipamento é $T_{max} = 200 \text{ mN.m}$, que limita o tamanho da amostra. O corpo de prova é fixado no equipamento nas suas extremidades e depois é aplicado um carregamento cíclico de torção senoidal de acordo com a Figura 4.11.

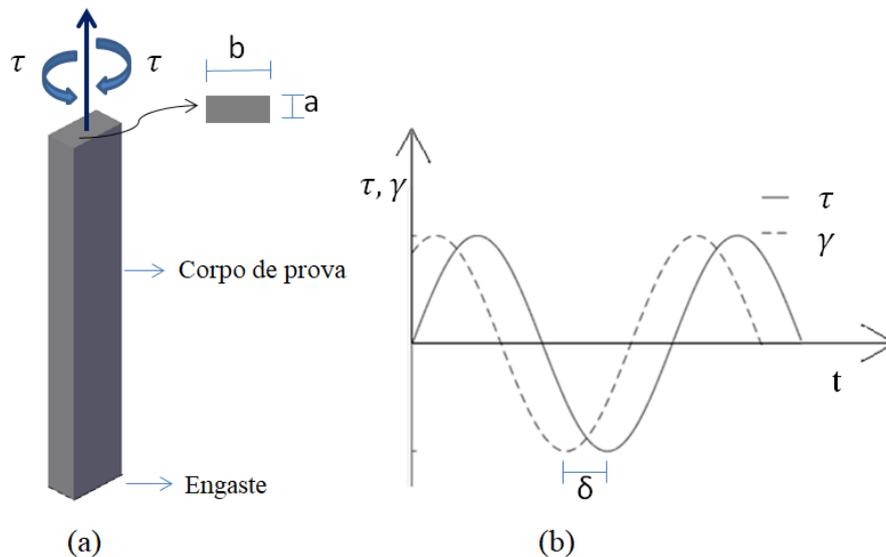


Figura 4.11 – Ensaio DMA: (a) Corpo de prova submetido à torção; (b) carregamento de torção senoidal aplicado e sua respectiva deformação

A Figura 4.11(a) reproduz o corpo de prova submetido a um carregamento cíclico senoidal cisalhante. A Figura 4.11(b) mostra τ (Equação (4.1)) aplicada para a obtenção da defasagem do tempo, em relação à deformação de cisalhamento (Equação (4.2)) gerada, que resulta no ângulo de fase (δ).

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (4.2)$$

O cálculo de τ_0 no equipamento é feito de acordo com sua seção transversal (Figura 4.11a) de acordo com o manual do fabricante. Assim, τ_0 , está em função do torque aplicado (T), das dimensões da seção transversal a e b e das constantes c_1 e c_2 . Dessa maneira τ é dado por:

$$\tau_0 = \frac{c_2 T}{c_1 b a^2} \quad (4.3)$$

sendo:

$$c_1 = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{0.630}{b/a} + \frac{0.052}{(b/a)^5} \right) \quad (4.4)$$

$$c_2 = 1 - \frac{0.65}{1 + (b/a)^3} \quad (4.5)$$

A Figura 4.12(a) mostra o equipamento utilizado e o detalhe corpo de prova de pasta ou argamassa, com dimensões de 43 mm x 10 mm x 2,5 mm, encaixado antes do ensaio que pode ser visto na Figura 4.12(b). O ensaio foi realizado a temperatura controlada de $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

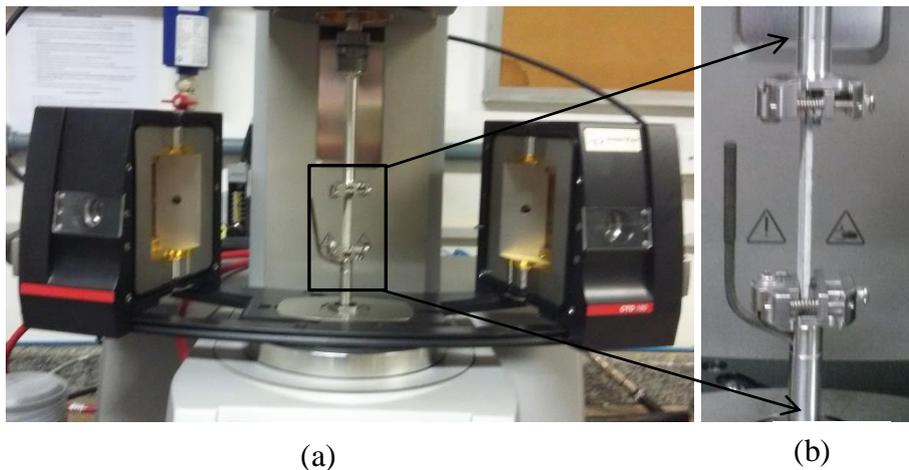


Figura 4.12 – Equipamento DSR: (a) módulo de ensaio com câmara térmica; (b) detalhe do corpo de prova fixado no equipamento

A tensão, $\tau_0 = 0,1 \text{ MPa}$, é aplicada tendo a intenção de manter o comportamento viscoelástico linear do material com as frequências indicadas em cada idade, sendo realizados para diferentes idades de carregamento. A justificativa do valor de τ_0 é mostrada para as misturas P030 e P042 na Figura 4.13. A metodologia do ensaio não padronizado ao cisalhamento consiste na aplicação de uma taxa de tensão de $0,5 \text{ Mpa/s}$ num corpo de prova de dimensão de $43 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$, no equipamento DSR (tendo limite de torque de 200 mN.m) com $f = 1 \text{ Hz}$. Assim é realizado o ensaio DMA à torção em diferentes tensões até à ruptura da amostra com a limitação do torque a 100 mN.m , para não danificar o equipamento.

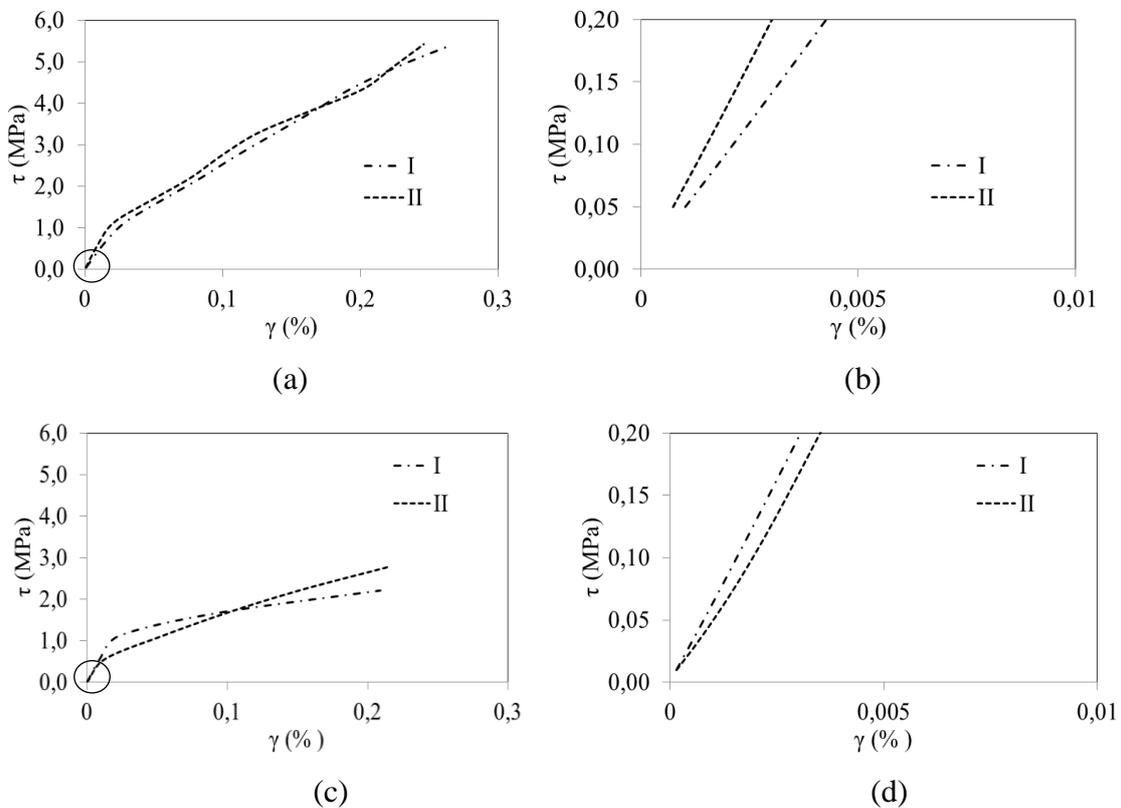


Figura 4.13 – Resistência ao cisalhamento das misturas: (a) mistura P030; (b) detalhe da linearidade da mistura P030; (c) mistura P042; (d) detalhe da linearidade da mistura P042

Na Figura 4.13 são mostrados os gráficos tensão-deformação para as misturas P030 e P042, sendo duas amostras para cada, representadas por I e II. Ainda são mostrados os detalhes da linearidade, representadas por círculos na Figura 4.13a e Figura 4.13c. A resistência à torção das mistura P030, na Figura 4.13a, é maior que a da mistura P042,

na Figura 4.13c, como esperado. Por outro lado, em ambas as misturas o valor de $\tau = 0,1 \text{ MPa}$ se encontra num intervalo linear. Assim, justifica-se a viscoelasticidade linear das misturas com a tensão aplicada na metodologia de ensaio DMA.

O experimento consiste em uma varredura de frequências, em que parte da maior para menor. Os resultados obtidos são a variação de $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$, além do ângulo de fase (δ). Os experimentos são realizados para dois corpos de prova em cada idade, sendo utilizada a média destes como resultado final. Os tempos de ensaios para cada frequência são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Duração dos ensaios DMA de acordo com a frequência

$f(\text{Hz})$	$T(\text{s})$	Tempo de ensaio (s)
10	0,10	16,33
1	1,00	30,31
0,1	10,00	72,43
0,017	58,82	229,30
0,0017	588,24	1997,00
0,000278	3597,12	12790,00

Na Tabela 4.7 estão os valores das frequências, períodos (T) e duração dos ensaios DMA. No mínimo dois ciclos para cada frequência são realizados. A quantidade de ciclos é pré-definida pelo equipamento DSR no módulo de varredura de frequência a tensão controlada. Ao término do ensaio de cada frequência o corpo de prova descansa por um tempo igual ao período de ensaio o que garante a recuperação da amostra para o ensaio com outra frequência.

4.2.10 Preparação dos corpos de prova prismáticos para ensaios DMA

A preparação das amostras para o ensaio DMA é feita desde o lançamento em uma forma de acrílico até o lixamento e corte dos corpos de prova prismáticos nas dimensões de ensaio. Assim são mostradas a seguir as etapas de preparação:

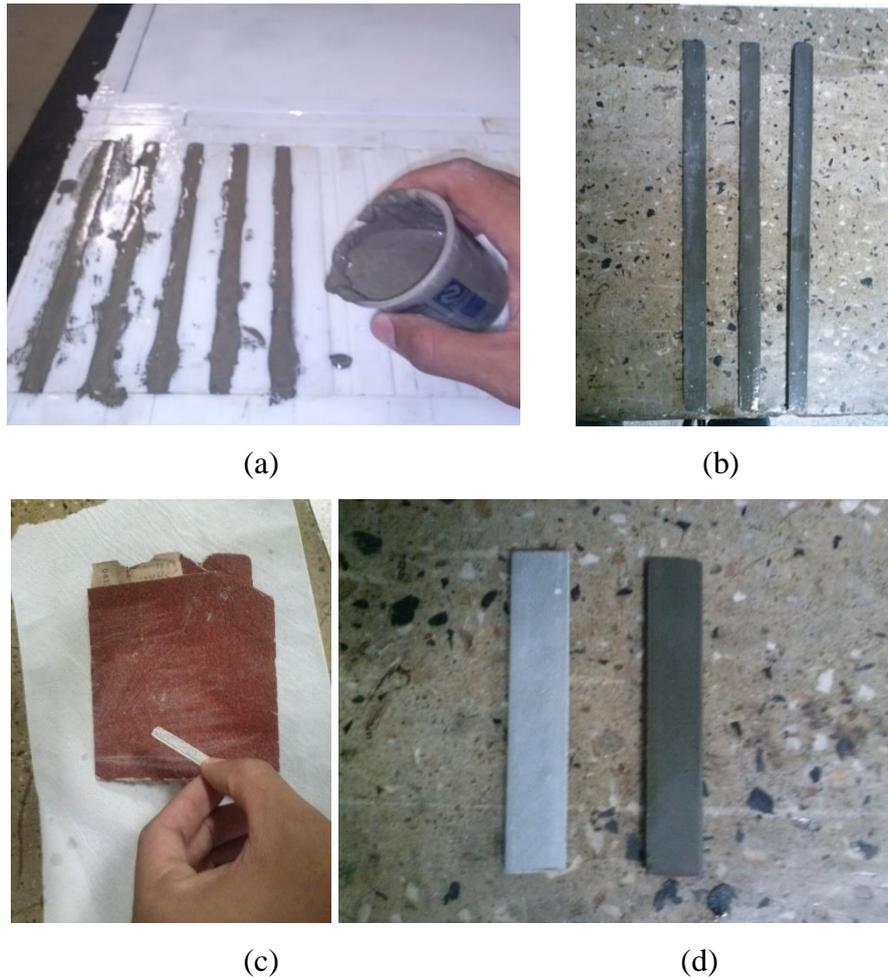


Figura 4.14 –Produção dos corpos de prova prismáticos para DMA: (a) Lançamento na forma; (b) corpo de prova retirado da forma; (c) corpo de prova prismáticos lixado; (d) amostra cortada pronta para ensaio DMA

A forma é feita de acrílico por facilitar na desforma das amostras, como ilustrado na Figura 4.14a. A mesma deve ser cortada e polida para evitar que as imperfeições danifiquem as amostras durante a desforma. A construção da forma é feita considerando um espaçamento de aproximadamente 10 mm, sendo que a mesma possui altura aproximada de 2,5 mm. Devido às pequenas dimensões há a necessidade de verificação da sensibilidade que pequenas variações de medidas causam com as equações (4.3) a (4.5). Assim, foi realizada uma análise da variação da tensão e do módulo G' para: torque $T = 1,516 \text{ mN.m}$, deflexão angular $\varphi = 0,5652 \text{ mrad}$ e comprimento $L = 43\text{mm}$ em duas situações: (a) com a variação da espessura “a”; (b) com a variação da largura “b”. Sendo a deformação ao cisalhamento $\gamma = c_2 a / (\varphi L)$.

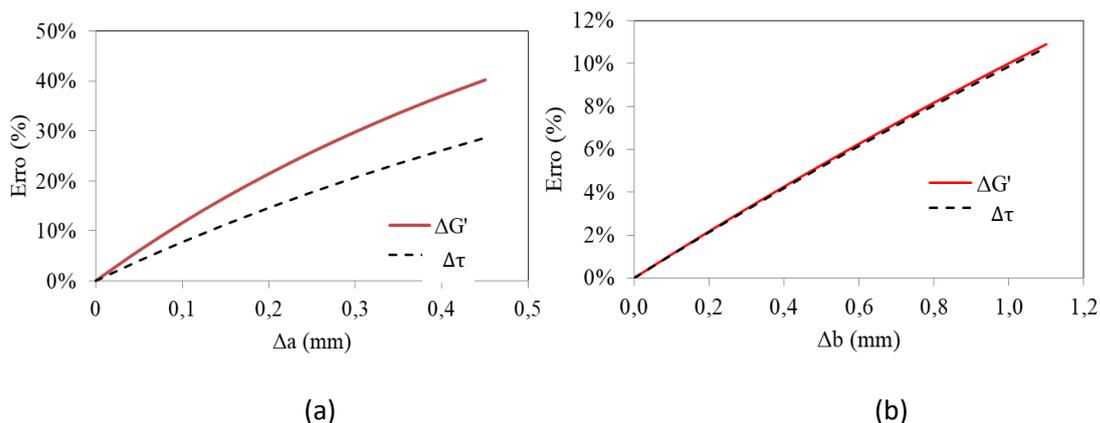


Figura 4.15 – Teste de sensibilidade da tensão e módulo de armazenamento com: (a) Variação da espessura; (b) variação da largura

Da Figura 4.15a é possível notar que variações (Δ) da ordem de 0,1 mm provocam alterações de cerca de 10 % do valor de G' , sendo um pouco inferior na tensão. Já a alteração da largura, na Figura 4.15b, em cerca de 0,6 mm, provoca mudanças em torno de 6% tanto em τ quanto em G' . Assim fica claro que as variações nas dimensões das amostras devem ser levadas em consideração, ou seja, sempre que for feita a análise deve ser colocada a dimensão correta da amostra. Essa medição é realizada com o uso de paquímetro digital.

O lançamento na forma é realizado de forma manual, como mostra a Figura 4.14a. A preparação das amostras para o ensaio DMA consiste em cortar e lixar os corpos de prova (Figura 4.14b) até chegar nas dimensões corretas (Figura 4.14c). Os ensaios DMA a torção utilizam os corpos de prova de 43 mm x 10 mm x 2,5 mm para pastas e argamassas.

4.2.11 Preparação dos corpos de prova cilíndricos

Os corpos de prova cilíndricos são utilizados para ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Nesses ensaios são utilizados os corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm para pastas e argamassas. A moldagem das amostras é ilustrada na Figura 4.16.



(a)

(b)

Figura 4.16 – Fabricação dos corpos de prova cilíndricos: (a) lançamento na forma 5,0 cm x 10 cm; (b) corpo de prova desformado

A Figura 4.16a mostra a forma após o lançamento da mistura e a Figura 4.16b ilustra o corpo de prova após a desforma. Os ensaios são realizados em corpos de prova cilíndricos de 5 cm x10 cm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DMA

Nesta seção serão apresentados os resultados de G' e G'' (APÊNDICE C) com suas interconversões em E' , E'' , $D(t)$ e $E(t)$ para as misturas de pastas e argamassas em diferentes idades de carregamento. Os resultados foram obtidos com a metodologia de ensaio da seção 4.2.9 e com as interconversões apresentadas na seção 3.2.

5.1.1 Resultados experimentais da mistura P030

Os resultados experimentais de G' , G'' e δ encontrados nos ensaios DMA para a mistura P030 são mostrados na Figura 5.1. Esses resultados foram obtidos de acordo com a metodologia de ensaio apresentada na seção 4.2.9.

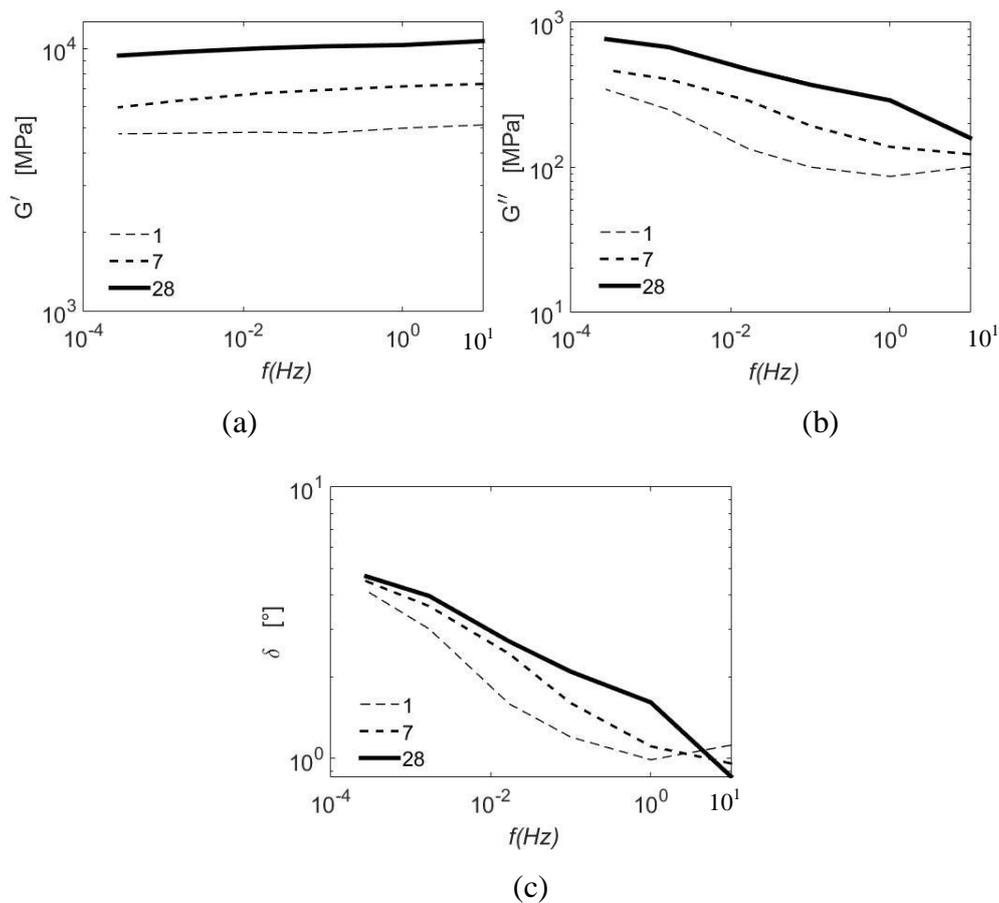


Figura 5.1 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura P030: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$

É possível notar que, G' (Figura 5.1a) que representa a parcela elástica, aumenta com o aumento da idade e da frequência. Com isso, o amadurecimento do material fica evidente ao longo do tempo de carregamento. A parcela viscosa G'' (Figura 5.1b), em escala logarítmica, também aumenta com o aumento de idade. É possível notar que δ , na Figura 5.1a, apresenta comportamento distinto nas frequências entre 1 Hz – 10 Hz, sendo também observado em Leung e Grasley (2012) em ensaio DMA de pastas e argamassas. Nesse intervalo de frequência o comportamento da mistura é praticamente elástico, o que muda o comportamento das curvas. Para frequências menores que 1 Hz há um aumento da parcela viscosa que faz com que haja essa mudança no comportamento.

Os valores de E' , E'' , $E(t)$ e $D(t)$ são obtidos pela interconversão de $|G^*|$ e G' . Os valores dos módulos longitudinais E' e E'' , obtidos pela interconversão dos dados de G' e G'' , são mostrados para mistura P030 Figura 5.2 (a e b).

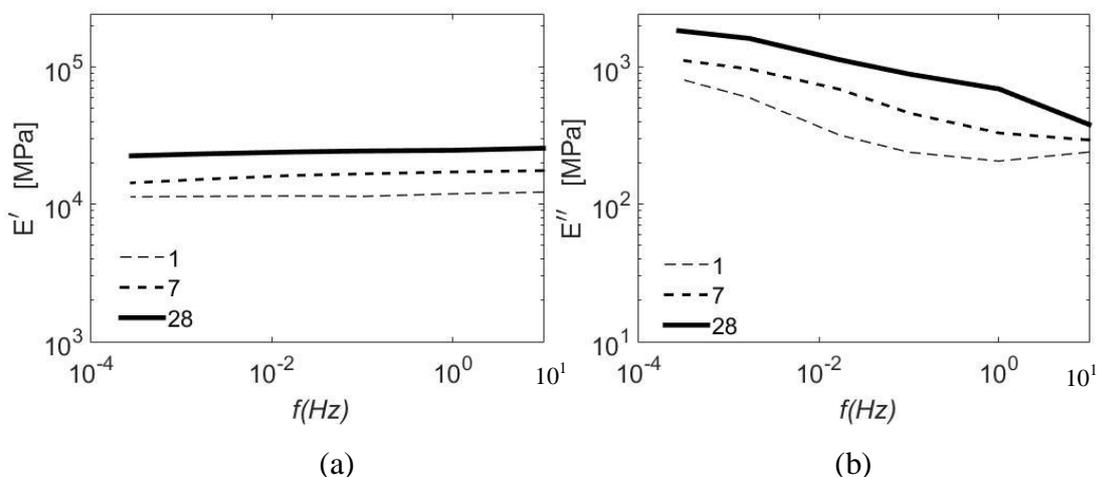


Figura 5.2 – Módulos longitudinais para a mistura P030: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''

Nota-se, na Figura 5.2, que as misturas possuem o mesmo comportamento das misturas que as originaram, ou seja, o comportamento de E' da mistura P030 é o mesmo que o de G' da mistura P030. Isso é válido para todas as misturas, pois as mesmas são obtidas pelas relações diretas de Lamé (Equação (3.24)). Com os valores do módulo de

armazenamento E' e os procedimentos descritos nas seções 3.2.2 e 3.2.1 foram plotadas as curvas de fluência, $D(t)$.

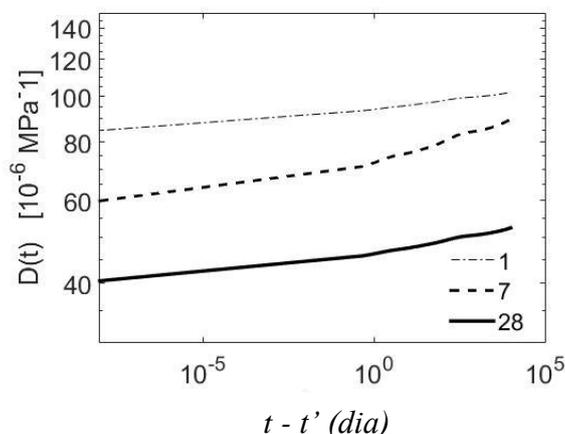


Figura 5.3 – Funções de fluência $D(t)$ para as misturas finais obtidas de E' da mistura P030

Os resultados foram feitos num intervalo de tempo maior que o de experimento (duração 3,5 h) com auxílio de uma linha de tendência. Na Figura 5.3, é possível notar que, à medida que a idade de carregamento aumenta, $D(t)$ diminui. Como as misturas possuem cimento CP V em sua composição, há uma aceleração das reações químicas tendo um ganho rápido de rigidez, ou seja, com um aumento das propriedades elásticas. Nota-se que em $t - t' = 1$ dia, há uma mudança no comportamento de $D(t)$. Isso se explica, pois quanto menor é a frequência maior é a parcela viscosa e menor a parcela elástica. O aumento da parcela viscosa provoca as alterações na forma das curvas.

5.1.2 Resultados experimentais da mistura P035

Os resultados da pasta P035 foram obtidos para as idades de 1 dia, 3 dias e 7 dias. Assim esses dados têm grande relevância para futuras comparações de simulações numéricas com a inclusão de agregados. Dessa maneira são apresentados os resultados.

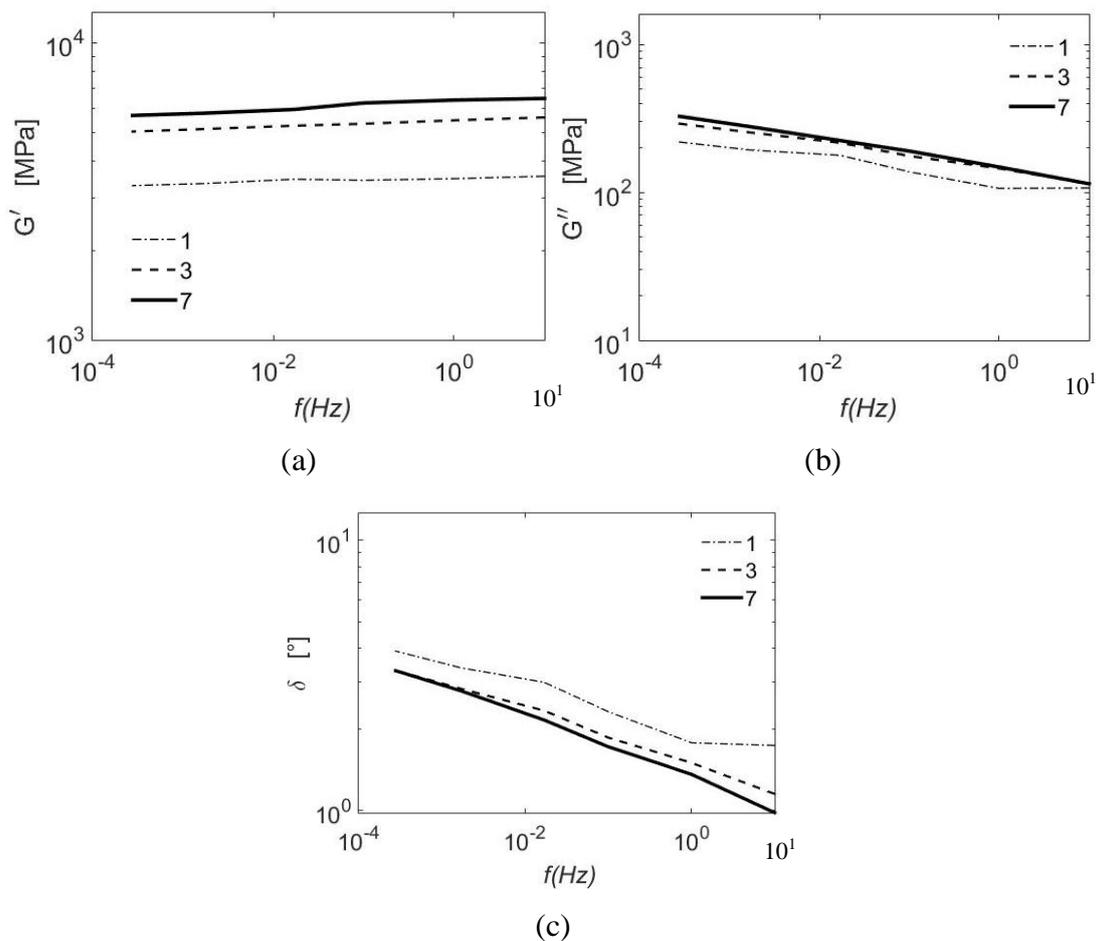


Figura 5.4 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura P035 em escala logarítmica: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$

A parcela elástica, G' , Figura 5.4 a, tem o comportamento esperado, com o aumento com a idade de carregamento. Nota-se que G'' aumenta com a idade e com a redução da frequência. Já com o δ , há uma diminuição com o aumento da idade. Isso mostra que a taxa de crescimento de G' supera o crescimento de G'' . Por meio das relações da Lamé são encontrados os valores de E' e E'' .

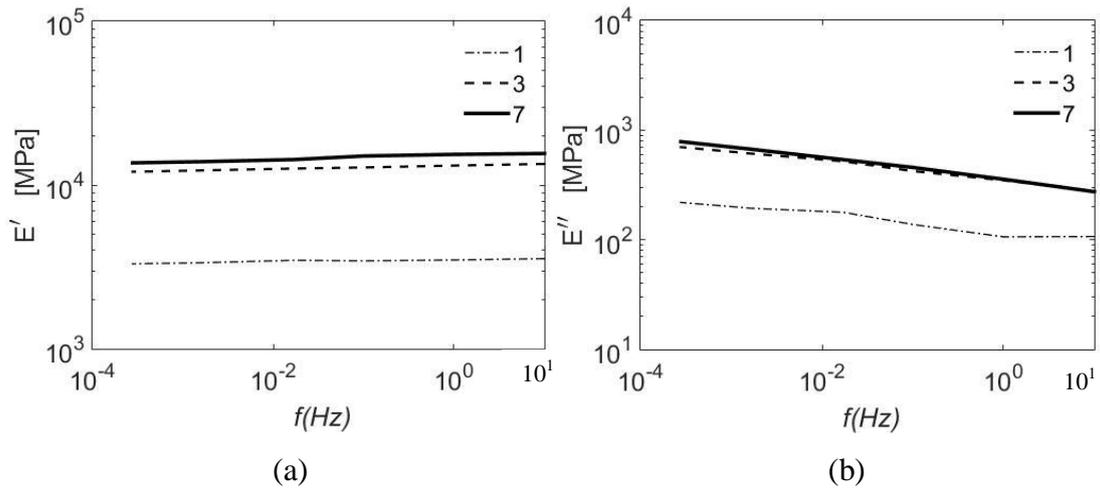


Figura 5.5 – Módulos longitudinais da mistura P035 em escala logarítmica: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''

Os valores de E' e E'' seguem as mesmas tendências de G' e G'' . Foi feita uma linha de tendência dos dados experimentais até a frequência de 10^{-10} Hz (ver APÊNDICE D) para plotar $D(t)$ em um intervalo maior. A aplicação da metodologia de interconversão das propriedades fornece os resultados de $D(t)$.

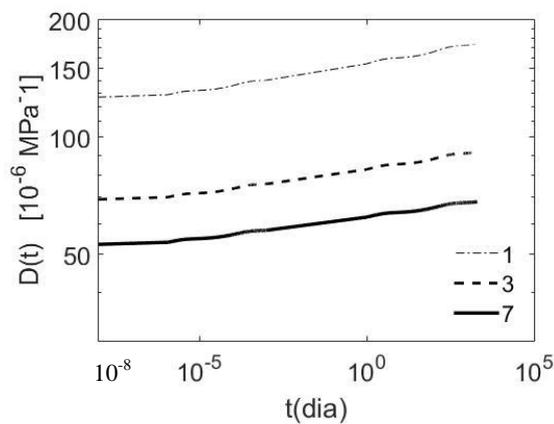


Figura 5.6 – Função de fluência $D(t)$ para mistura P035 obtidas de E'

A Figura 5.6 mostra a propriedade da pasta P035, sendo que em 1 dia de idade há o maior valor de $D(t)$. O amadurecimento das propriedades fica evidente com o aumento da rigidez e conseqüente redução de $D(t)$ com a idade.

5.1.3 Resultados experimentais da mistura P042

A mistura P042 tem um fator $a/c = 0,42$, sendo esperado, neste caso, menores valores de G' . Portanto, a parcela elástica e a resistência do material são menores. Assim, os resultados experimentais são mostrados na Figura 5.7 para as idade de carregamento de 1 dia, 7 dias e 28 dias.

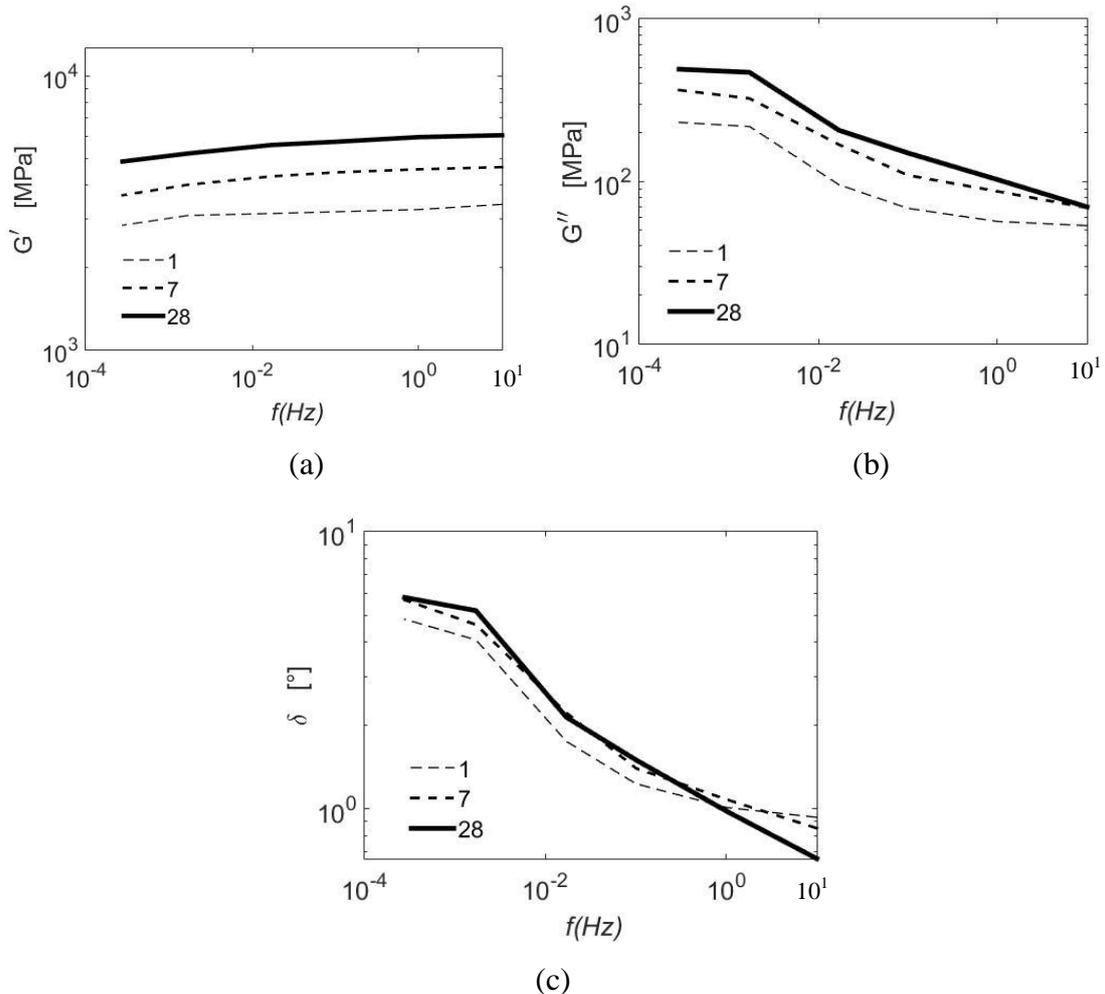


Figura 5.7 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura P042: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$

Como esperado a parcela elástica, G' , na Figura 5.7a, tem seu maior valor na frequência de 10 Hz em todas as idades, sendo o maior $G' \cong 6,07$ GPa na idade de 28 dias. Por outro lado, o maior valor da parcela viscosa $G'' \cong 489$ MPa é encontrado na menor frequência, $f = 0,000278$ Hz, e na maior idade, no caso 28 dias, Figura 5.7b. Com isso, o valor de G' sofre grandes alterações com o aumento do a/c da mistura P030 para

a mistura P042. Portanto, G' e G'' aumenta com o aumento da idade. Para $f \cong 1$ Hz nota-se uma mudança no comportamento de δ , com aumento no aumento da idade para $f > 1$ Hz, sendo observado também na mistura P030 e em Leung e Grasley (2012).

A transformação de G' e G'' em E' e E'' é feita por meio da equação de lamé. Assim, são mostrados os resultados para as idades de 1 dia, 7 dias e 28 dias na Figura 5.8.

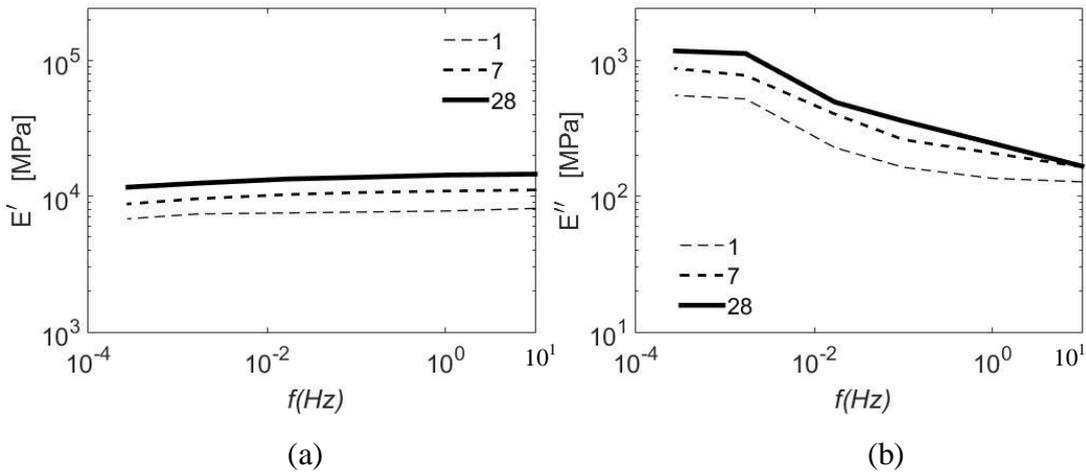


Figura 5.8 – Módulos longitudinais para a mistura P042: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''

A utilização da metodologia de interconversão de $E(t)$ para $D(t)$ da seção 3.2.1 fornece os resultados da Figura 5.9.

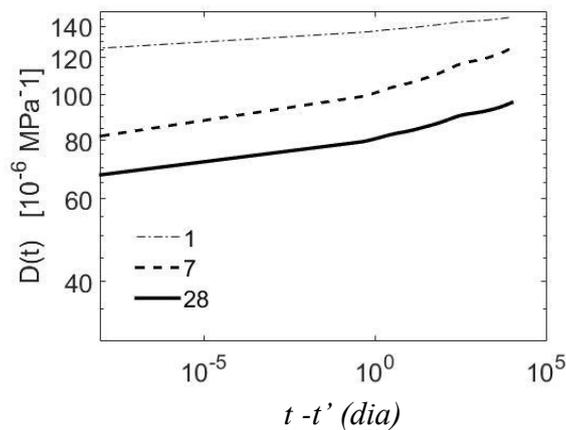


Figura 5.9 – Funções de fluência $D(t)$ para a mistura P042 obtidas de E'

Nas idades de 1, 7 e 28 dias, Figura 5.9, os valores de fluência instantânea $D(t - t' = 0)$, em $(MPa^{-1}10^{-6})$, são 124 , 79,01 e 65,69 . Isso mostra que $D(t - t' = 0)$ diminui em 36,28% de 1 dia a 7 dias e 47,02% de 1 para 28 dias.

5.1.4 Resultados experimentais da mistura A035

A argamassa A035 é feita para as idades de 1 dia e 3 dias. Assim, são apresentados os resultados para a argamassa A035.

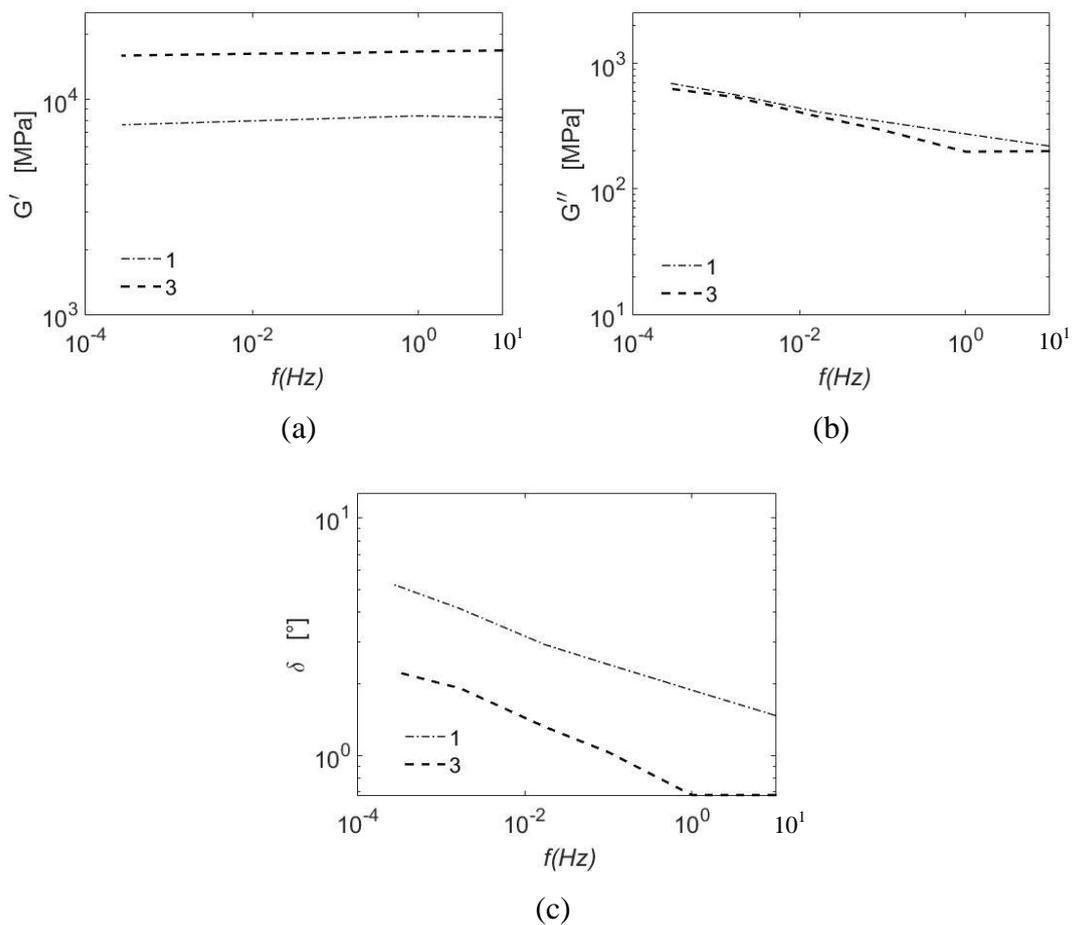


Figura 5.10 – Resultados experimentais cisalhantes da argamassa A035 em escala logarítmica: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$

O comportamento de G' está de acordo com o esperado como mostra a Figura 5.10a. No caso de G'' , Figura 5.10b, em algumas frequências a idade de 1 dia se aproxima à idade de 3 dias. Nota-se que há uma tendência das maiores idades apresentarem os maiores

valores de G'' , entretanto a amostra A035 apresenta comportamento contrário ao das pastas. Além disso, os valores de δ (Figura 5.10c) divergem das conclusões anteriores, pois a idade de 1 dia apresenta maiores valores que a de 3 dias. Isso pode ser explicado, pela adição inclusões elásticas (areia) que afetam o comportamento da mistura. Com a aplicação da metodologia proposta, são obtidos os valores de E' e E'' .

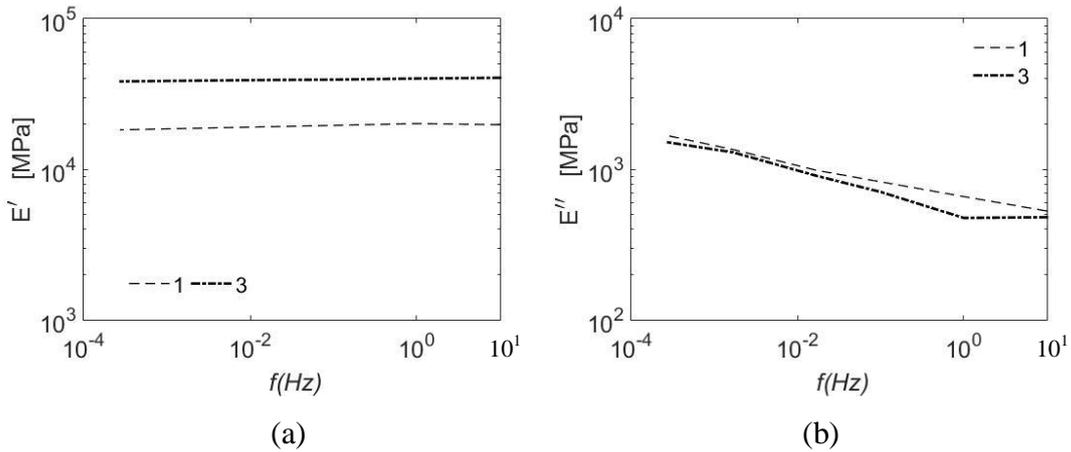


Figura 5.11 – Módulos longitudinais da mistura A035 em escala logarítmica: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''

Como em todas as amostras, E' e E'' seguem a mesma tendência de G' e G'' , como observado na Figura 5.11a e Figura 5.11b. De posse dos valores de E' e E'' são feitas as interconversões em $D(t)$ como mostrado na Figura 5.12.

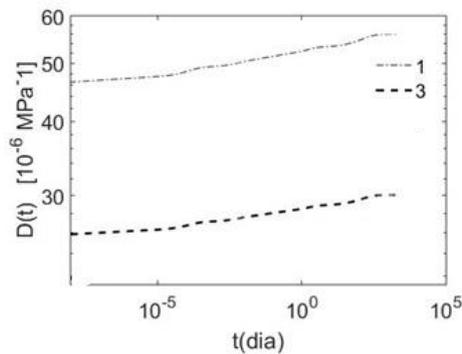


Figura 5.12 – Função de fluência $D(t)$ para argamassa A035 obtidas de E'

Aqui, por se tratar de argamassa há uma redução dos valores de $D(t)$, Figura 5.12, para a mistura A035 quando se observa os valores anteriores da pasta A035. Isso é devido ao

agregado inserido na mistura que o torna mais rígido, tendo como consequência a redução da fluência em todas as idades. Apesar das alterações no comportamento de G'' , não há alteração do comportamento de $D(t)$, pois este é obtido a partir de G' .

5.1.5 Resultados experimentais da mistura A038

Os resultados experimentais de $\delta(\omega)$, $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$ da argamassa para as idades de 1 e 3 dias são apresentados na Figura 5.13 em escala logarítmica. Essa escala é útil na visualização do comportamento da curva nas menores frequências.

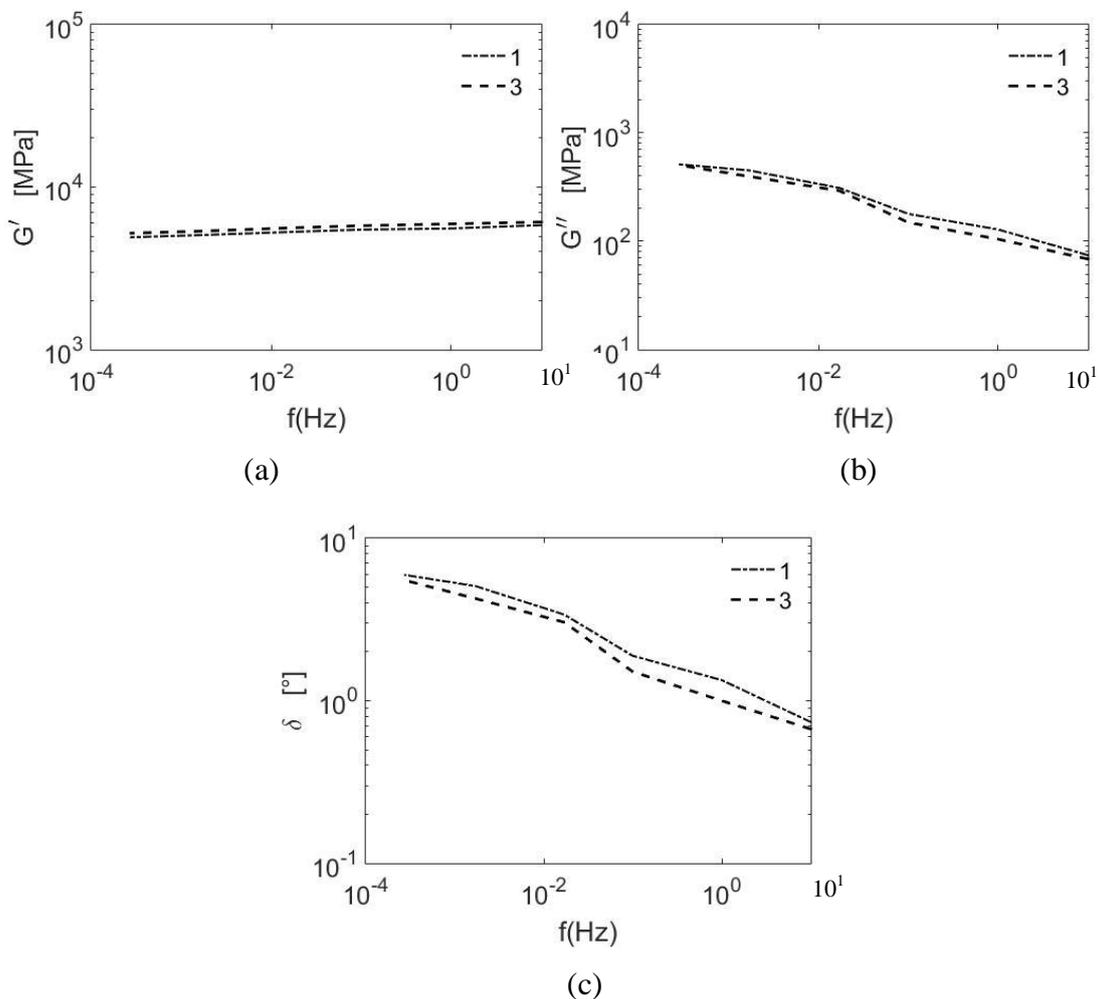


Figura 5.13 – Resultados experimentais cisalhantes da mistura A038: (a) módulo de armazenamento, $G'(\omega)$; (b) módulo de perda $G''(\omega)$; (c) ângulo de fase, $\delta(\omega)$

O $G'(\omega)$, da Figura 5.13 (a), apresenta pequena variação nas diferentes idades com a variação de frequência, em que aumenta com o aumento da frequência, como estudado

por Cortés e Elejabarrieta (2006). Nota-se que $G''(\omega)$, na Figura 5.13 (b), segue praticamente a mesma tendência de δ .

O ângulo de fase, $\delta(\omega)$, na Figura 5.13 (c), diminui com o aumento da idade de carregamento. Portanto, δ segue a mesma tendência apresentada da argamassa A035. De posse dos resultados experimentais são feitas as transformações de $|G^*(\omega)|$ para $|E^*(\omega)|$ com as Equações (3.24), (3.25) e (3.26) para um coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$. Assim, os resultados de $E'(\omega)$ e $E''(\omega)$ que são propriedades longitudinais estão ilustrados na Figura 5.14.

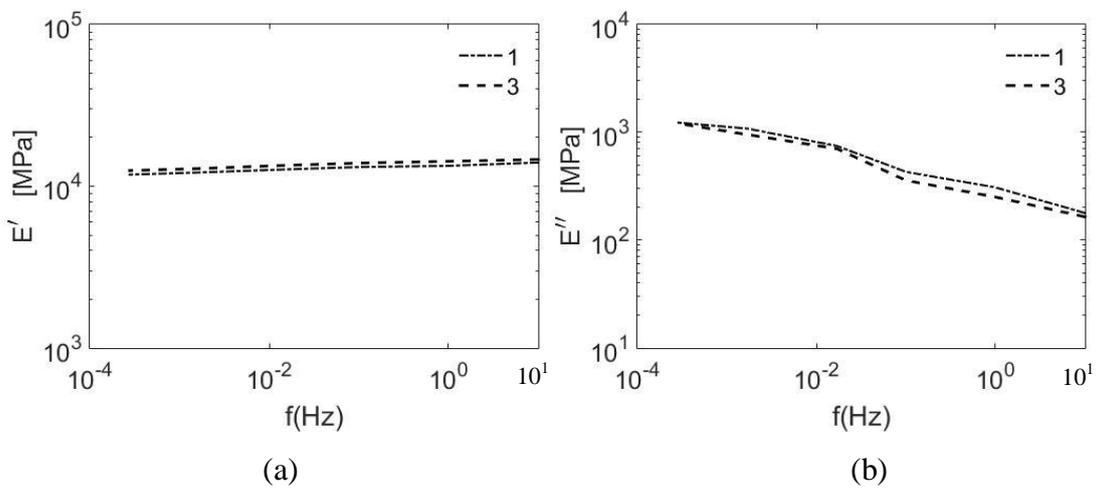


Figura 5.14 – Módulos longitudinais da mistura A038 para 1 e 3 dias de idade de: (a) armazenamento, E' ; (b) perda, E''

Os valores de $E'(\omega)$ e $E''(\omega)$, da Figura 5.14, são obtidos dos dados obtidos ao cisalhamento. Os ângulos de fase das propriedades cisalhantes são considerados os mesmos das propriedades longitudinais, por simplificação. É notável que quanto maior a idade maior é o valor de $E'(\omega)$ (Figura 5.14 a), mesmo que a variação seja pequena em escala logarítmica e que $E''(\omega)$ (Figura 5.14 b), segue a mesma tendência que $G''(\omega)$.

Os coeficientes em série de Prony de $E'(\omega)$ são utilizados $E(t)$. Com a série de Prony no domínio do tempo, $E(t)$, é possível encontrar $D(t)$. A Figura 5.15 apresenta o resultado da interconversão de relaxação em fluência.

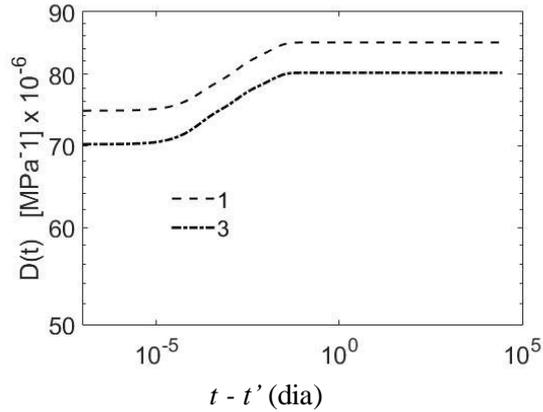
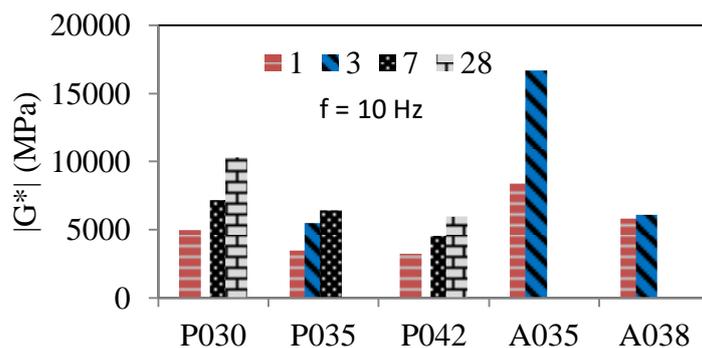


Figura 5.15 – Funções de fluência, $D(t)$, para 1 e 3 dias de idade da mistura A038 obtidas de E'

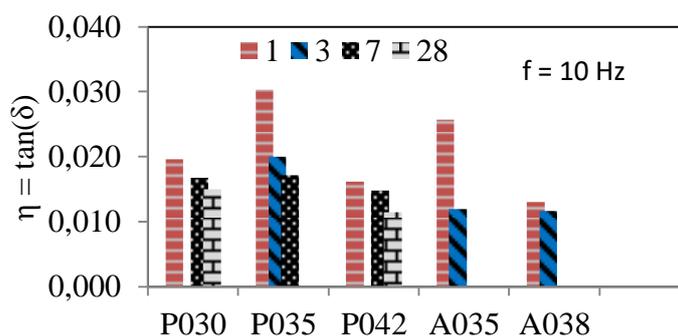
Na Figura 5.15a é apresentado $D(t)$ obtido de E' tendo um comportamento predominantemente elástico. Na Figura 5.15 é perceptível a diferença das curvas, pois quanto maior o t' maior é sua rigidez e menor é $D(t)$. Isso é esperado, pois ocorre um ganho de rigidez da argamassa através de seu envelhecimento em t' . Observado a coerência dos resultados, o mesmo procedimento é aplicado em todas as misturas que seguem. No entanto, para a confirmação da metodologia é feito outro ensaio DMA com diferente relação a/c .

5.2 RESULTADOS MÉDIOS DE η E $|G^*|$ DAS MISTURAS ESTUDADAS

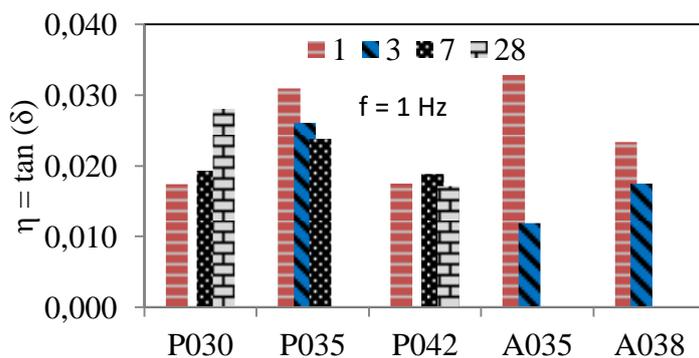
A análise do comportamento dos resultados experimentais é feita por meio da média de dois corpos de prova para $f = 1 \text{ Hz}$ e $f = 10 \text{ Hz}$, pois neste intervalo se localiza as frequências de excitação de edifícios submetidos a terremotos (ver Figura 1.1). A observação desse comportamento é feita como base de escolha da propriedade que mais se adequa a interconversões analíticas. Além disso, são apresentadas os fatores de amortecimento do material que geralmente são utilizadas em estruturas que estão submetidas a cargas cíclicas e impactos, tendo como exemplo os sismos. Assim, as médias do módulo complexo (G^*), δ e η são apresentados:



(a)



(b)



(c)

Figura 5.16 – Média das propriedades: (a) módulo complexo ao cisalhamento $|G^*|$; (b) tangente de perda para $f = 10 \text{ Hz}$; (c) tangente de perda para $f = 1 \text{ Hz}$

A Figura 5.16a mostra que o $|G^*|$ de todas as misturas segue a mesma tendência dos resultados de G' , tendo aumento com o aumento de t' para $f = 10 \text{ Hz}$. Por outro lado, a $\tan(\delta)$, na Figura 5.16b, diminui com o aumento da idade, como observado também por Zhang, Wang e Wu (2012). Os valores da $\tan(\delta)$ concordam com os resultados obtidos por Leung e Grasley (2012) que encontraram valores entre 0,015 e 0,06, aproximadamente. Isso mostra que à medida que aumenta a hidratação do cimento, o

material se torna mais elástico e perde parte de suas características ao amortecimento. Ainda é observada uma diminuição de η com o aumento da idade, redução de η com a inclusão de agregados miúdos quando se compara P035 com A035 e em sua maioria, nas pastas, o aumento da relação a/c aumenta η . A Figura 5.16c mostra η para $f = 1 \text{ Hz}$ que a maioria das misturas concordam com $\eta (f = 10 \text{ Hz})$. As diferenças no comportamento foram observadas em resultados anteriores de δ , pois nessa frequência há uma tendência de mudança no comportamento das propriedades viscosas em pastas.

5.3 REGRESSÃO NA LEI DE POTÊNCIA DUPLA

A metodologia proposta também segue a determinação de uma função de fluência envelhecida $D(t, t')$ que representa a fluência viscoelástica e envelhecimento do material em função de t e t' . Aqui, a função $D(t, t')$ é determinada e ajustada na lei de potência dupla (DPL) de Bažant e Osman (1976). Portanto o método permite fazer uma regressão explícita da função envelhecida $D(t, t')$ para qualquer uma das funções encontradas em Bažant e Osman, (1976), Atrushi (2003), Grasley e Lange (2007), Bažant e Jirásek (2018). A DPL é expressa de acordo com a Equação (3.29) da seção 3.3.1.

A determinação da função envelhecida viscoelástica é feita com o uso de funções não envelhecidas $D(t)$ já determinadas individualmente para cada idade de carregamento t' como ilustra a Figura 5.17.

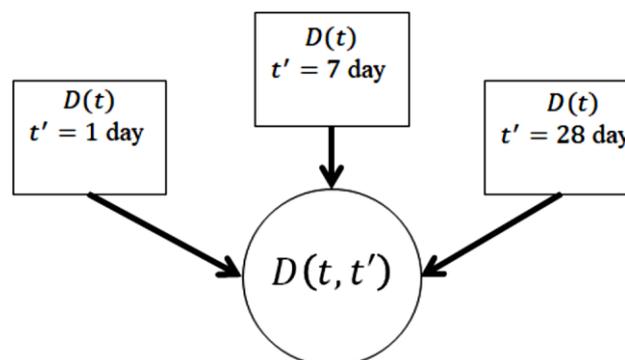


Figura 5.17 – Determinação do envelhecimento da função $D(t, t')$ de funções $D(t)$ não envelhecidas em diferentes idades

A Tabela 5.1 apresenta os coeficientes regredidos pela DPL para todas as misturas. O coeficiente de determinação (R^2) mostra a capacidade de ajuste do modelo replicar os resultados observados baseados no modelo, sendo aceito $R^2 > 0,9$.

Tabela 5.1 – Coeficientes regredidos de $D(t, t')$ pela equação de DPL

Coeficiente/mistura	P030	P035	P042	A035	A038	Unit
E_{assin}	37790	23000	55000	41000	13630	MPa
φ_0	4,0000	2,5880	4,1600	2,788	0,1522	-
d	0,1819	0,5040	0,2882	0,4065	0,21	-
p	0,0263	0,0152	0,0108	0,0090	0,0121	-
R^2	0,9657	0,9688	0,9857	0,9566	0,9204	-

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores dos coeficientes em DPL das diferentes misturas com suas respectivas aproximações (R^2). É interessante notar que quando são comparadas as pastas e argamassas, os valores de E_{assin} são maiores nas argamassas. Isso pode ser observado nas misturas com mesma relação a/c , como nas misturas P035 e A035. Os valores de d das pastas variam de 0,18 a 0,50 e de p de 0,0090 a 0,02639. Os valores de d concordam com os obtidos por Atrushi (2003), porém os valores de p são 10 vezes menores, sendo esse um indicativo da predominância da parcela elástica sobre o resultado de $D(t)$ do ensaio DMA. Os bons ajustes de superfícies de $D(t, t')$ para as diferentes misturas são mostradas em função de t e t' :

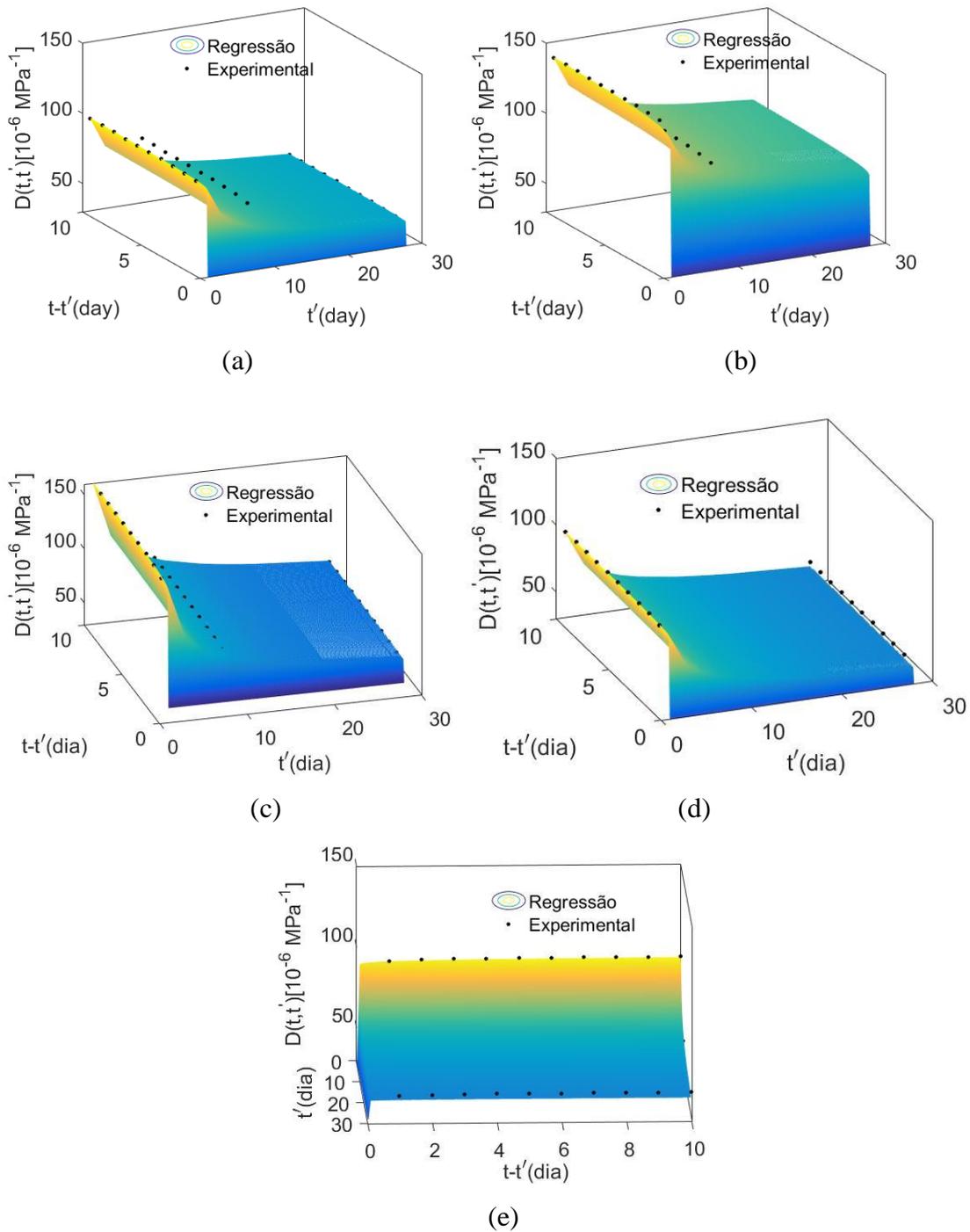


Figura 5.18 – Regressão da função de fluência $D(t, t')$ em DPL obtidas de E' para: (a) P030; (b) P042; (c) P035; (d) A035; (e) A038

A Figura 5.18 mostra as superfícies de $D(t, t')$ em DPL. Nota-se uma boa aproximação entre os pontos experimentais e a regressão de superfície com o método dos mínimos quadrados com o algoritmo *trust-region*.

5.4 PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE POR MEIO DA FLUÊNCIA

Uma maneira de validar a metodologia proposta é com a previsão do módulo de elasticidade E com os dados de fluência obtidos em cada idade de carregamento para pastas e argamassas. O valor de E é encontrado tanto por $E_0 = 1/D(t - t' \cong 0,003 \text{ dia})$ que é a propriedade para o tempo de 5 minutos. Estes podem ser comparados com o módulo de elasticidade estático (Young). Granja e Azenha (2016) mostraram que é possível fazer o monitoramento do módulo de elasticidade no tempo com metodologias DMA em vigas de concreto. Diferente dos autores citados, aqui foi feita a interconversão dos dados de ensaios DMA à torção em pastas e argamassas.

Os testes estatísticos de hipótese de uniformidade de variância (σ^2) e de médias (μ) foram realizados para os valores do módulo de elasticidade E e os valores estimados E_0 para os diferentes tempos de carregamento (t'). Para o teste de variância foi utilizado o teste Levene (Levene, 1960; Derrick *et al.*, 2018). Este teste de variância compara a variância da amostra ensaiada do módulo de elasticidade E que utilizaram a norma (NBR 8522:2008) com a variância dos valores de E_0 estimados pela função fluência. Este teste também é importante para a determinação do tipo de teste estatístico a ser utilizado na comparação de médias uma vez que testes diferentes são usados para o caso de aceitar ou rejeitar a hipótese H_0 do teste de variância, para um nível de significância $p = 0,025$. No caso de aceitar H_0 , do teste de Levene, foi utilizado o teste ANOVA de fator único (Montgomery e Ranger, 2003) para comparar as médias, e no caso de rejeitar H_0 no teste Levene (aceitar H_1) foi utilizado o teste - t (Montgomery e Ranger, 2003) para o teste de médias.

5.4.1 Mistura P030

A comparação dos módulos é apresentada na Figura 5.19 para a mistura P030 para as diferentes amostras de E_0 e E com o desvio padrão.

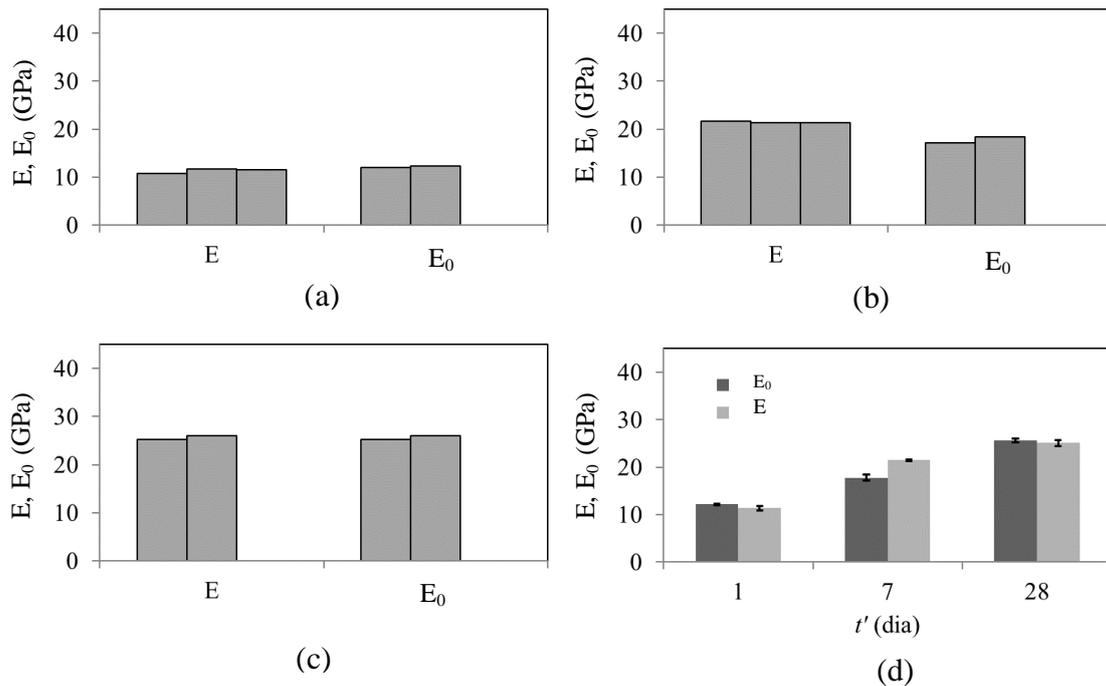


Figura 5.19 – Comparação de E_0 versus E para a mistura P030 nas idades de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias; (d) média de todas as idades com desvio padrão

A comparação entre as amostras da mistura P030, são mostradas na Figura 5.19, sendo que as menores diferenças encontradas entre as amostras da idade 1 dia (Figura 5.19a) e 28 dias (Figura 5.19c). Por outro lado, na idade de 7 dias (Figura 5.19b), a diferença é um pouco maior. A análise ANOVA foi realizada para verificar a uniformidade entre as variâncias σ^2 e das médias μ de E_0 e E na Tabela 5.2 para um dado nível de significância p .

Na Tabela 5.2 estão as hipóteses H_0 , H_1 , o valor de p e o resultado de aceitação das hipóteses para um nível de significância de $p = 0,025$ para pasta P030. Os resultados mostram que a variância da amostra de E e da amostra estimada E_0 são uniformes (H_0 aceito) para os tempos de carregamento de 1 e 28 dias, ou seja, a variância produzida pelo ensaio de modulo de Young, E , é estatisticamente a mesma da variância da amostra dos valores estimados pela função fluência E_0 .

Tabela 5.2 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de P030

Teste	1 dia	7 dias	28 dias
<u>Uniformidade das variâncias</u>			
H_0 :	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$
H_1 :	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$
p - valor	0,09	0,00	0,38
Resultado	Aceita H_0	Rejeita H_0	Aceita H_0
<u>Teste de médias</u>			
H_0 :	$\mu_E = \mu_{E_0}$	$\mu_E = \mu_{E_0}$	$\mu_E = \mu_{E_0}$
H_1 :	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$
p - valor	0,10	0,13*	0,50
Resultado	Aceita H_0	Aceita H_0	Aceita H_0

*Teste t presumindo variâncias diferentes: P (bicaudal)

A única rejeição da uniformidade das variâncias foi para $t' = 7$ dias. Uma possível explicação para esta rejeição pode ser analisada com a observação de que a variância para os valores de E é quase nula como é mostrado na Figura 5.19b. Este fato é bastante incomum para o ensaio de módulo de Young e, possivelmente, resultou na rejeição de H_0 e a utilização do teste - t para a comparação das médias. Analisando os resultados para o teste de média que mede se há diferenças estatísticas significantes entre as médias de E e de E_0 vemos que a hipótese H_0 foi aceita para todas as idades de carregamento para $p = 0,025$. Deste modo, o teste de hipótese confirma que a metodologia proposta de estimação do módulo de Young por meio do valor E_0 produz amostras de médias iguais as do ensaio tradicional do módulo de Young E para todas as idades de carregamento da pasta P030. É importante notar que os valores p indicados na tabela indicam o grau de significância em que a hipótese H_0 é aceita. Assim, a hipótese é aceita tanto para um mínimo nível de significância o valor de 0,025, como para um nível de significância de 0,05.

5.4.2 Mistura P035

Da mesma maneira foram feitos os experimentos para a pasta P035, tendo a intenção de

fortalecer as comparações entre E_0 e E . No caso da pasta P035, os experimentos foram feitos para as idades de 3 dias e 7 dias para E e E_0 . Os resultados são mostrados na Figura 5.20.

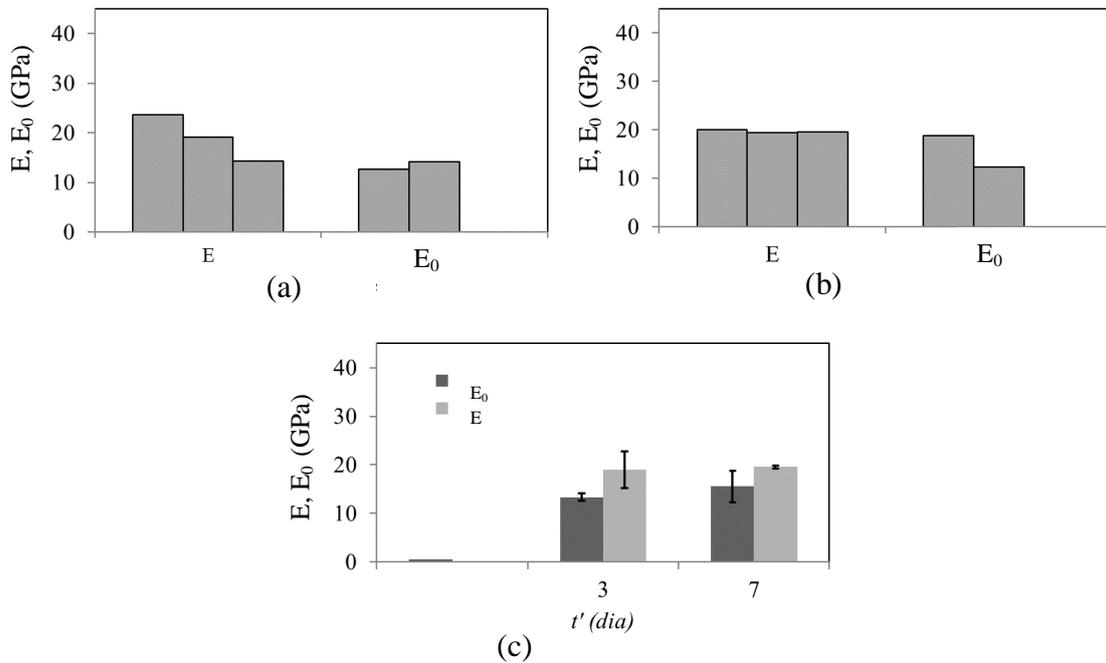


Figura 5.20 – Comparação de E_0 versus E para a mistura P035 nas idades de: (a) 3 dias; (b) 7 dias; (c) Média de todas as idades com desvio padrão

Os resultados amostrais (Figura 5.20) para diferentes amostras de E e E_0 para $t' = 3$ dias (Figura 5.20a) e $t' = 7$ dias (Figura 5.20b). O desvio padrão em relação a média é mostrado na Figura 5.20c. A análise visual da média de E e E_0 , Figura 5.20c mostra uma diferença significativa na comparação, apesar das amostras possuírem elementos de valores próximos. Assim, é feita a análise estatística de Anova de variâncias e médias, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.3.

Na Tabela 5.3 é mostrado que a variância da amostra de E e da amostra estimada E_0 são uniformes (H_0 aceito) para o tempo de carregamento de 1 dia. Entretanto, para $t' = 7$ dias há a rejeição da uniformidade das variâncias. O mesmo ocorreu na mistura P030 sendo que a rejeição pode ser analisada com a observação de que a variância para os valores de E é quase nula como é mostrado na Figura 5.20b.

Tabela 5.3 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de P035

Teste	3 dia	7 dias
<u>Uniformidade das variâncias</u>		
H ₀ :	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$
H ₁ :	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$
p - valor	0,33	0,00
Resultado	Aceita H ₀	Rejeita H ₀
<u>Teste de médias</u>		
H ₀ :	$\mu_E = \mu_{E_0}$	$\mu_E = \mu_{E_0}$
H ₁ :	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$
p - valor	0,21	0,43*
Resultado	Aceita H ₀	Aceita H ₀

*Teste t presumindo variâncias diferentes: P (bicaudal)

Na análise da média para $t' = 7$ dias foi utilizado o teste-t presumindo variâncias diferentes devido a comprovação inicial de não uniformidade de variância. Os resultados para o teste de média que mede se há diferenças estatísticas significantes entre as médias de E e de E_0 vemos que a hipótese H₀ foi aceita para todas as idades de carregamento tanto para $p = 0,05$ como para $p = 0,025$. Deste modo, o teste de hipótese confirma que a metodologia proposta de estimação do módulo de Young por meio do valor E_0 produz amostras de médias iguais as do ensaio tradicional do módulo de Young E para todas as idades de carregamento da pasta P035.

5.4.3 Mistura P042

Para confirmar a validade da comparação anterior para as pastas, foi utilizada a mistura P042 em diferentes idades.

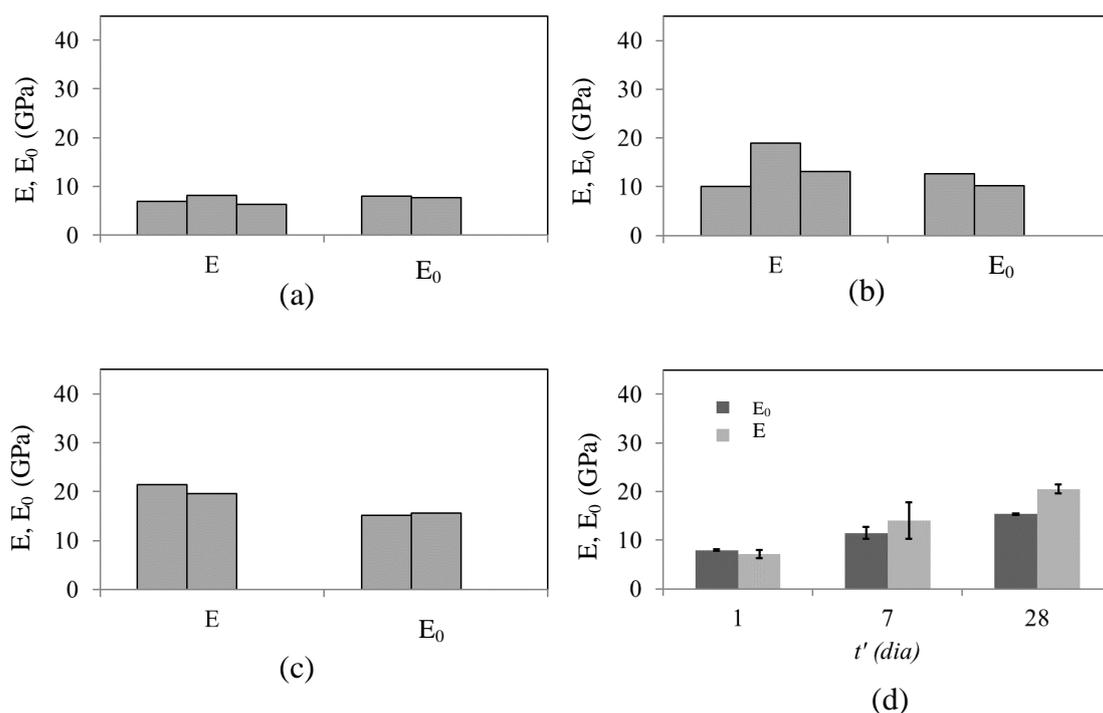


Figura 5.21 – Comparação de E_0 versus E para a mistura P042 nas idades de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias; (d) média de todas as idades com desvio padrão

As menores diferenças entre os corpos de prova são na idade de 1 dia (Figura 5.21a) e 7 dias (Figura 5.21b). No entanto, à medida que a idade aumenta há um distanciamento das curvas, sendo que a 28 dias há uma maior diferença. A Figura 5.21d mostra o desvio padrão nas diferentes idades em relação à média. Os resultados estatísticos da verificação se E_0 e E podem ser considerados iguais são apresentados na Tabela 5.4.

Na Tabela 5.4, para pasta P042, nota-se a uniformidade da variância da amostra de E e da amostra estimada E_0 (H_0 aceito) para os tempos de carregamento de 1 dia e 7 dias. Entretanto, para $t' = 28$ dias há a rejeição da uniformidade das variâncias. Os resultados para o teste de média que mede se há diferenças estatísticas significantes entre as médias de E e de E_0 vemos que a hipótese H_0 foi aceita para todas as idades de carregamento tanto para $p = 0,05$ como para $p = 0,025$. Deste modo, o teste de hipótese confirma que a metodologia proposta de estimação do módulo de Young por meio do valor E_0 produz amostras de médias iguais as de E para todas as idades de carregamento da pasta P042.

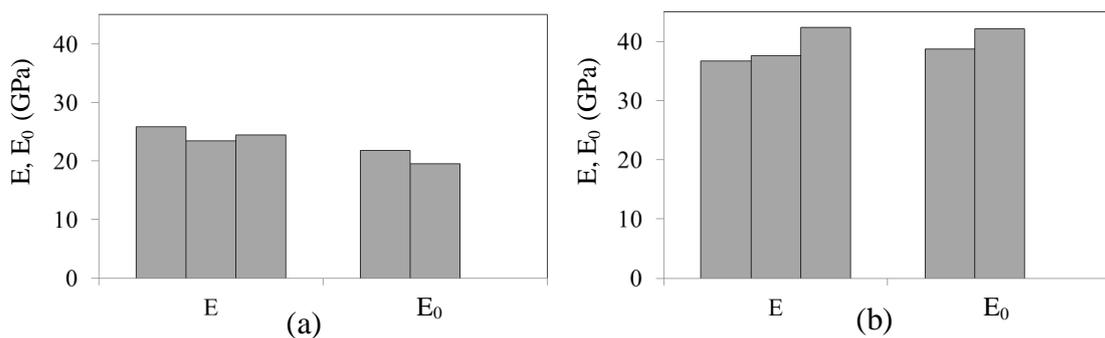
Tabela 5.4 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de P042

Teste	1 dia	7 dias	28 dias
<u>Uniformidade das variâncias</u>			
H_0 :	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$
H_1 :	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$
p - valor	0,19	0,22	0,00
Resultado	Aceita H_0	Aceita H_0	Rejeita H_0
<u>Teste de médias</u>			
H_0 :	$\mu_E = \mu_{E_0}$	$\mu_E = \mu_{E_0}$	$\mu_E = \mu_{E_0}$
H_1 :	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$
p - valor	0,36	0,46	0,06*
Resultado	Aceita H_0	Aceita H_0	Aceita H_0

*Teste t presumindo variâncias diferentes: P (bicaudal)

5.4.4 Mistura A035

Na mistura P035 foi adicionada areia para a obtenção da mistura A035. Assim, a comparação dos resultados de E e E_0 foi feita de modo a observar a tendência dos resultados, na Figura 5.22.



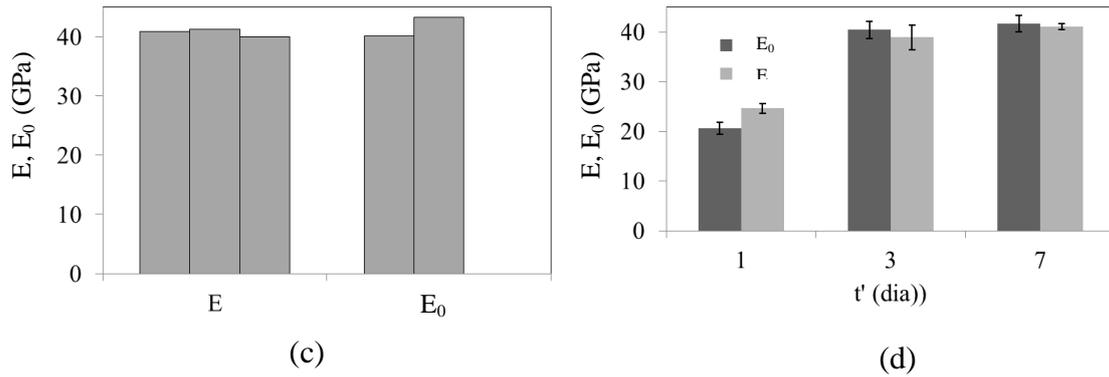


Figura 5.22 – Comparação de E_0 versus E para a mistura A035 nas idades de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 7 dias; (d) média de todas as idades com desvio padrão

Na Figura 5.22 são notadas boas aproximações entre os resultados de E_0 e E em $t' = 1$ dia (Figura 5.22a), $t' = 3$ dias (Figura 5.22b) e em $t' = 7$ dias (Figura 5.22c). O desvio padrão nas diferentes idades é apresentado na (Figura 5.22d). A análise ANOVA foi realizada para verificar a uniformidade entre as variâncias σ^2 e das médias μ de E_0 e E na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Uniformidade da σ^2 e teste de μ para os resultados do E e E_0 de A035

Teste	1 dia	3 dias	7 dias
<u>Uniformidade das variâncias</u>			
H_0 :	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 = \sigma_{E_0}^2$
H_1 :	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$	$\sigma_E^2 \neq \sigma_{E_0}^2$
p - valor	0,95	0,53	0,25
Resultado	Aceita H_0	Aceita H_0	Aceita H_0
<u>Teste de médias</u>			
H_0 :	$\mu_E = \mu_{E_0}$	$\mu_E = \mu_{E_0}$	$\mu_E = \mu_{E_0}$
H_1 :	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$	$\mu_E \neq \mu_{E_0}$
p - valor	0,04	0,59	0,30
Resultado	Aceita H_0	Aceita H_0	Aceita H_0

Na Tabela 5.5 são mostrados que a variância da amostra de E e da amostra estimada E_0 são uniformes (H_0 aceito) para todos os tempos de carregamento, ou seja, a variância produzida pelo ensaio de modulo de Young, E , é estatisticamente a mesma da variância

da amostra dos valores estimados pela função fluência E_0 . Neste caso não houve rejeição da hipótese de igualdade. Analisando os resultados para o teste de média que mede se há diferenças estatísticas significantes entre as médias de E e de E_0 vemos que a hipótese H_0 foi aceita para todas as idades de carregamento para $p = 0,025$. Assim, o teste de hipótese confirma que a estimação do módulo de Young por meio do valor E_0 produz amostras de médias iguais as de E para todas as idades de carregamento da argamassa A035. Dessa forma, é observado que a metodologia apresentada na obtenção de E_0 se aplica para pastas e argamassas, sendo que para a argamassa não houve rejeição da hipótese de igualdade para $p = 0,025$.

5.4.5 Conclusões parciais

Observou-se que a metodologia DMA à torção é aplicável tanto em pastas quanto em argamassas, quando E é comparado com E_0 . Assim, chega-se a conclusões de Granja e Azenha (2016), de que a metodologia DMA pode ser aplicada para encontrar E , no caso em concreto e à flexão. Entretanto, aqui tem como diferencial E ser encontrado por ensaios DMA à torção com posterior interconversão das propriedades. Além disso, é notável que o tamanho do corpo de prova do ensaio DMA, mesmo que pequeno, trouxe resultados semelhantes ao ensaio padrão de módulo de elasticidade (NBR 8522:2008) quando se realiza a comparação entre os corpos de prova que mais se aproximam.

Os testes estatísticos de ANOVA mostraram que E e E_0 pertencem à mesma população, ou seja, são estatisticamente iguais. Isso confirma, para pastas e argamassas, a validade da metodologia proposta, mesmo que em algumas misturas tenha tido diferença em uma idade de carregamento.

O ensaio DMA à torção tem como vantagem o uso de corpos de prova de pequenas dimensões, cerca de 45 mm x 10 mm x 2,5 mm que traz economia de material e tempo. Essas conclusões evidenciam a validade da metodologia proposta nesta pesquisa para pastas e argamassas, demonstradas pela repetitividade dos ensaios.

6 ESTIMAÇÃO NUMÉRICA DE PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS

Esta seção apresenta uma proposição de um método iterativo para estimar propriedades viscoelásticas de pastas e argamassas.

6.1.1 Introdução à simulação numérica

As propriedades são obtidas por análise inversa de simulações numéricas no programa de elementos finitos ANSYS (Workbench). A partir dos resultados experimentais de fluência do concreto são obtidas as fluências de argamassas e pastas. Nesta pesquisa, a distribuição dos agregados será feita com geometrias em posições aleatórias, onde há uma variação do volume de agregados nas simulações em 3D. Mesmo tendo divergências na literatura sobre as formas esféricas dos agregados, e como trabalhos recentes tem mostrado que há pouca diferença nos resultados de simulações viscoelásticas, estas são utilizadas. De forma simplificada as simulações para o concreto e para a argamassa são ilustradas na Figura 6.1.

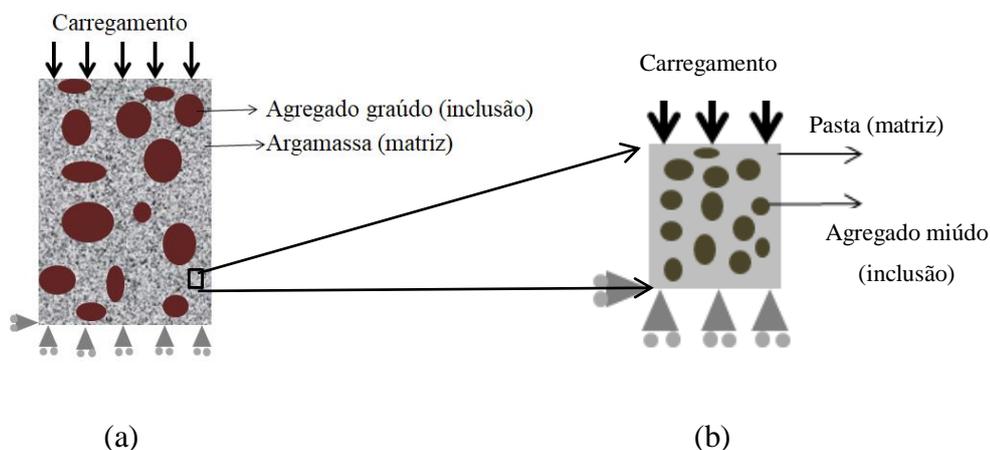


Figura 6.1 – Modelo em mesoescala de simulação numérica de materiais cimentícios em dois níveis para: (a) concreto; (b) argamassa

As simulações são feitas em duas fases (matriz com agregado), sendo no concreto com a consideração apenas da argamassa e do agregado graúdo (Figura 6.1a). Já na simulação da argamassa são considerados apenas pasta e o agregado miúdo (Figura 6.1b). Em ambos os casos não são considerados os vazios presente no conjunto e as zonas de

transição de interface. A obtenção das propriedades de pastas e argamassas segue o fluxograma da Figura 6.2.

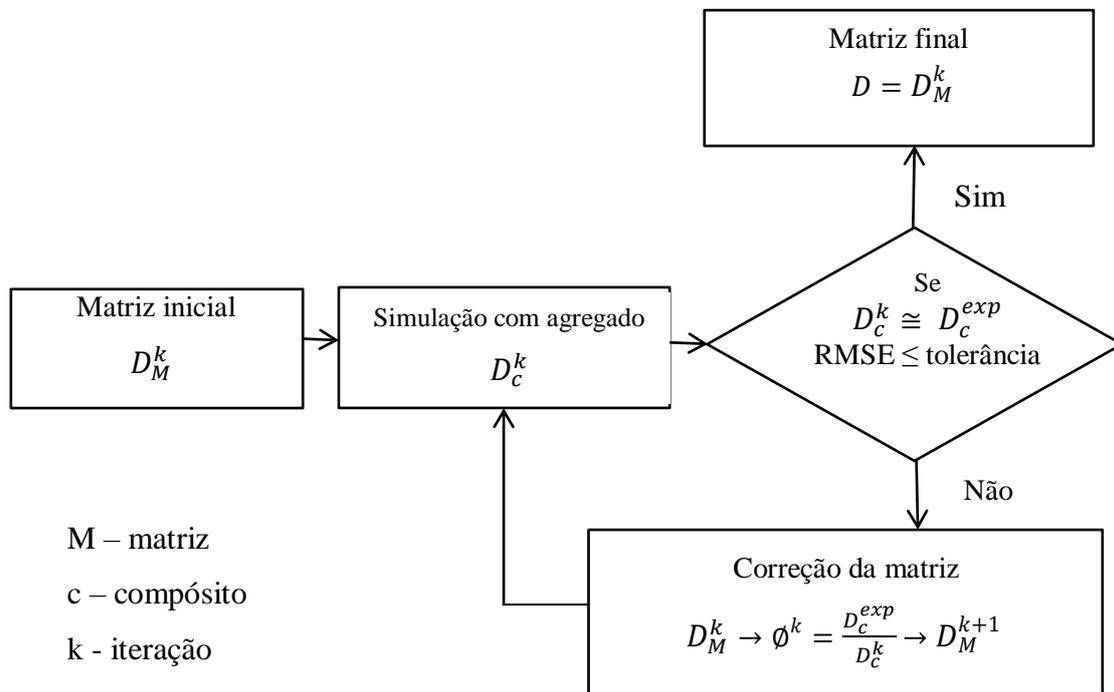


Figura 6.2 – Fluxograma de obtenção das propriedades $D(t)$ de pastas e argamassas por meio de processo inverso de simulação numérica

O fluxograma da Figura 6.2 mostra o processo iterativo de obtenção de $D(t)$ (representado neste capítulo somente pelo símbolo D com a letra t omitida) de pastas e argamassas, em que os subíndices M , c , k e exp significam matriz (pode ser pasta ou argamassa), compósito (compósito simulado que pode ser concreto ou argamassa), iteração e experimental, respectivamente. No caso da simulação do concreto, arbitra-se uma função viscoelástica de argamassa $D_M^k = D_a^k$ que combinada com o agregado (brita) é feita a simulação para encontrar a propriedade do concreto $D_c^k \cong D_c^{exp}$, sendo D_c^{exp} a fluência experimental do concreto de Silva Junior (2017). O critério de parada é dado pela raiz do erro quadrado médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE) menor que 3, pois evidências mostraram que até esta tolerância há uma boa proximidade com o resultado experimental. Esse valor foi adotado com base nas aproximações dos resultados, sendo a RMSE dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (D_c^k - D_c^{exp})^2}{n}} \quad (6.1)$$

em que n é o número de pontos utilizado somatório dos erros. Caso o critério de parada seja alcançado, a fluência $D = D_a^k$ da argamassa é encontrada. Caso contrário, é feita a correção de D_M^k com a função $\phi^k = D_c^{exp}/D_c^k$ e nova simulação até encontrar $D_c^k \cong D_c^{exp}$. A correção da matriz é feita por $D_M^{k+1} = \phi^k D_M^k$ em cada iteração até atingir a tolerância da simulação. O mesmo procedimento é feito para encontrar a fluência da pasta $D_p^k = D_p^{exp}$ a partir da fluência da argamassa até atingir a igualdade $D_a^{exp} = D_a^k$, sendo a argamassa representada por “a”.

6.1.2 Elementos da simulação numérica

As simulações numéricas são realizadas em 3D com a utilização de elementos sólidos (SOLID 187) e de contato (CONTA174/ TARGE170). O SOLID187, na Figura 6.3a, é um elemento 3D que possui 10 nós e tem comportamento quadrático, sendo que cada nó possui 3 graus de liberdade. Já o elemento CONTA174, da Figura 6.3b, que possui 8 nós e 3 graus de liberdade por nó, é utilizado para representar o contato entre superfícies na análise 3D. Neste caso, a superfície alvo é definida por outro elemento, o TARGE170. O elemento TARGE170, na Figura 6.3c, é usado para representar várias superfícies alvo 3D para elementos de contatos associados (no caso, o elemento CONTA174). Ele se sobrepõe a elementos sólidos, de cascas ou de linhas, onde descreve uma condição de contorno de um corpo deformável que está potencialmente em contato com a superfície alvo. Neste caso, o TARGE170 possui 8 nós quadrilaterais tendo 3 graus de liberdade por nó. Os elementos estão ilustrados Figura 6.3.

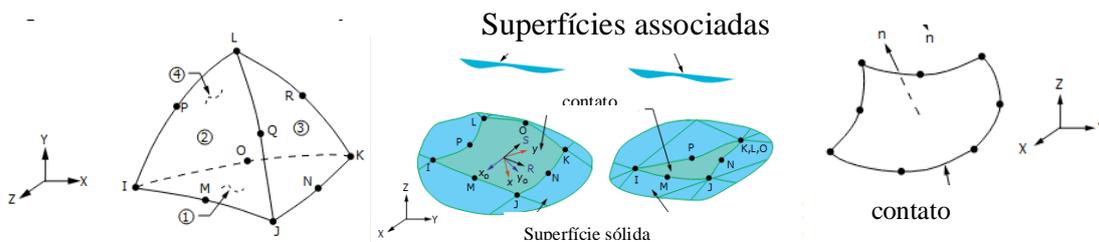


Figura 6.3 – Elementos da biblioteca do ANSYS utilizados na simulação: (a) elemento SOLID187; (b) elemento CONTA174; (c) elemento TARGE170

Os elementos CONTA174 e TARGET170 fazem a ligação entre a matriz e a inclusão (agregado), sendo pré-definido como aderente nas opções do programa ANSYS. Já o Elemento SOLID187 é usado na matriz e no agregado. Destaca-se que, a zona de transição de interface (ITZ) não é considerada, pois espessuras de ITZ utilizadas nas simulações do concreto em mesoescala em torno de $20 \mu m$ (espessura também encontrada em Comby-peyrot *et al.* (2009)) de acordo com Bary, Bourcier e Helfer (2014) não tem efeito significativo na fluência. No caso da simulação da argamassa é feita a mesma consideração, apesar de nesse caso a ITZ poder afetar significativamente o resultado (Bary, Bourcier e Helfer, 2014).

6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONCRETO A PARTIR DA ARGAMASSA

A simulação numérica do concreto com as propriedades da argamassa combinadas com agregados graúdos (brita) é importante nos casos em que há a necessidade da obtenção de $D(t)$ de argamassas e pastas por processo inverso. Aqui a matriz de argamassa D_M^k da Figura 6.2 é substituída por D_a^k , sendo que o subíndice “a” representa a argamassa. Já D_c^k permanece igual a Figura 6.2, só que neste caso “c” representa o concreto.

6.2.1 Propriedades dos materiais

As propriedades do concreto e seus componentes são apresentados na Tabela 6.1. Da mesma forma são mostrados os volumes de areia e brita, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Tabela 6.1 – Traço unitário do concreto REF035 (Silva Jr., 2017) e estimativa do módulo de elasticidade e porcentagem em volume dos componentes

Composição unitária (Kg/Kg) de cimento		Coefficiente de Poisson	Estimativa de E (GPa)	Volume (%)
Cimento CP V ARI	1			20,91
areia 01	1,914	0,20 ^a	38 ^a	34,68
Brita (gnaisse)	1,686	0,20 ^a	28 ^a	32,09
Sílica ativa	0,10			1,33
Aditivo superplastificante (%)	1,50			0,59
Água				10,30
Água/cimento (a/c)	0,35			

a – estimados a partir de dados de FURNAS (1997)

Apesar de a análise ser viscoelástica, os agregados utilizados são considerados elásticos e possuem formato esférico com diâmetro máximo de 9,5 mm (brita 0) com curva granulométrica dada na seção 4.2.4. Sendo que, o agregado utilizado é uma rocha metamórfica tipo gnaisse (Silva Junior, 2017), com módulo de elasticidade E de 28 GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,20$ (Furnas, 1997). Os resultados experimentais de Silva Junior (2017) são mostrados na Figura 6.4.

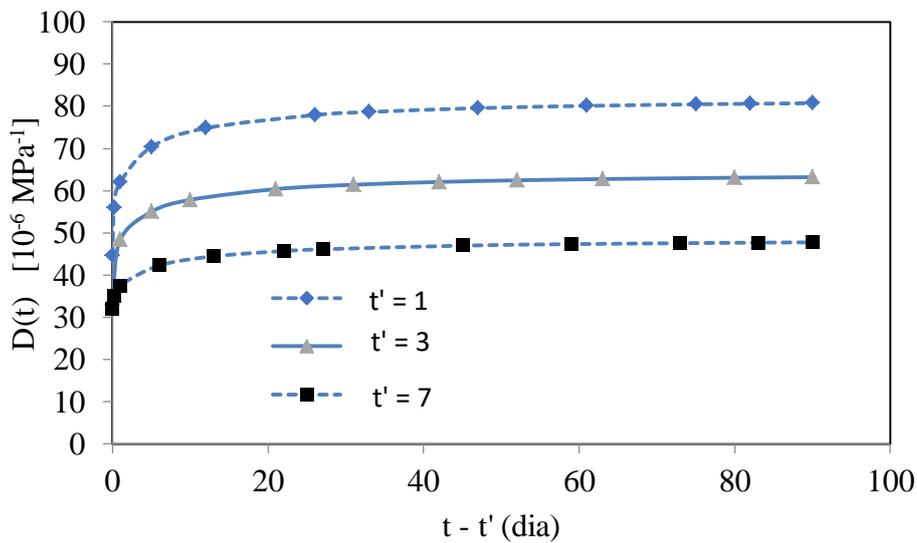


Figura 6.4 – Resultado experimental de fluência D_c^{exp} de Silva Jr. (2017) para o concreto em diferentes idades

6.2.2 Modelo computacional

Uma geometria cilíndrica em três dimensões (3D) com apenas $\frac{1}{4}$ do modelo é usada na simulação com os dados iniciais de $D_a^{k=1}$ da Figura 6.6. A distribuição aleatória dos agregados é utilizada com a consideração da curva granulométrica da seção 4.2.4. O modelo é mostrado na Figura 6.5 com detalhes da malha em elementos sólidos tetraédricos.

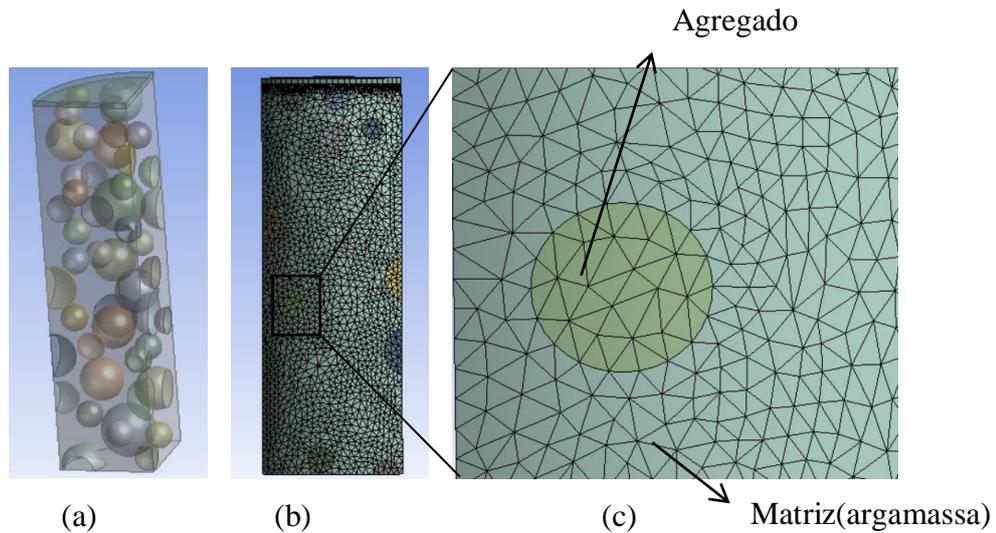


Figura 6.5 – Modelo numérico usado para simular o concreto: (a) modelo geométrico da argamassa com agregado; (b) malha com refinamento no topo; (c) detalhe da malha na ligação argamassa-agregado

Os detalhes do modelo argamassa-agregado são mostrados na Figura 6.5a e a malha na Figura 6.5b, com o detalhe da ligação argamassa-agregado na Figura 6.5c. A geometria da Figura 6.5 possui diâmetro de 35 mm com altura de 70 mm. A Tabela 6.2 mostra as características das simulações numéricas com distribuição aleatória dos agregados.

Tabela 6.2 – Parâmetros do modelo computacional para simulação do concreto

Características	Concreto
Elemento da matriz cimentícia	Solid187
Elemento do agregado	Solid187
Elemento de contato	Conta174/Targe170
Número de elementos de contato	31636
Número de nós	107534
Número de elementos sólidos	62568
Contato do agregado	aderente
Contato com suporte de carga	aderente
Total de elementos	94204

A malha foi escolhida de acordo com a quantidade de elementos definida em um teste de convergência no Apêndice A. A comparação consiste em utilizar a fluência arbitrada $D_a^{k=1}$ da argamassa com a inclusão de agregados esféricos. Os dados iniciais arbitrados da argamassa são mostrados na Figura 6.6.

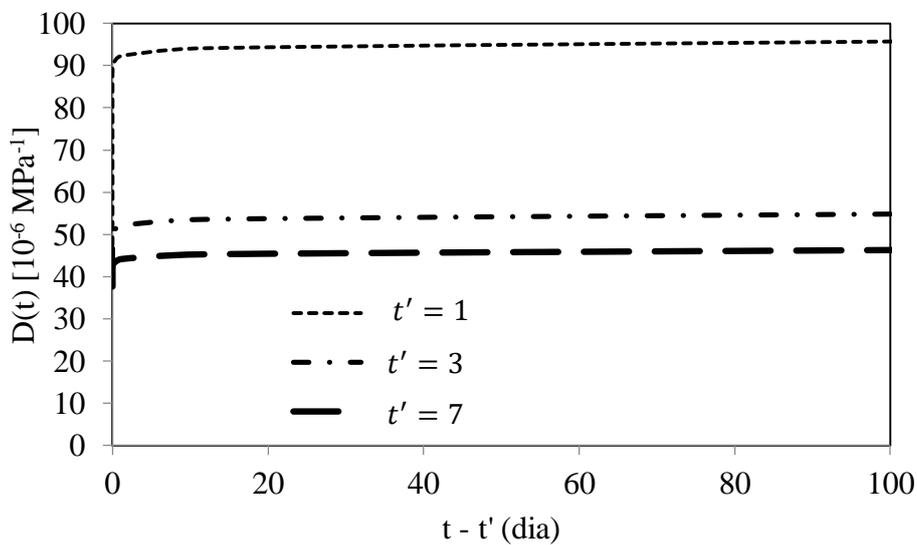


Figura 6.6 – Valores iniciais de $D_a^{k=1}$ da argamassa propostos para análise em diferentes idades na iteração inicial ($k = 1$) com $\phi^{k=1} = 1$

Os dados iniciais foram escolhidos de modo a se aproximar do resultado experimental, porém com forma da curva diferente.

6.2.3 Resultado da simulação numérica do concreto

A Figura 6.7 mostra a relação entre os resultados da simulação da argamassa com agregado e o experimento de concreto de Silva Junior (2017) para $t' = 1$ dia. Além disso, são feitas regressões a fim de obter uma função ϕ da relação entre a simulação e o experimental, como segue:

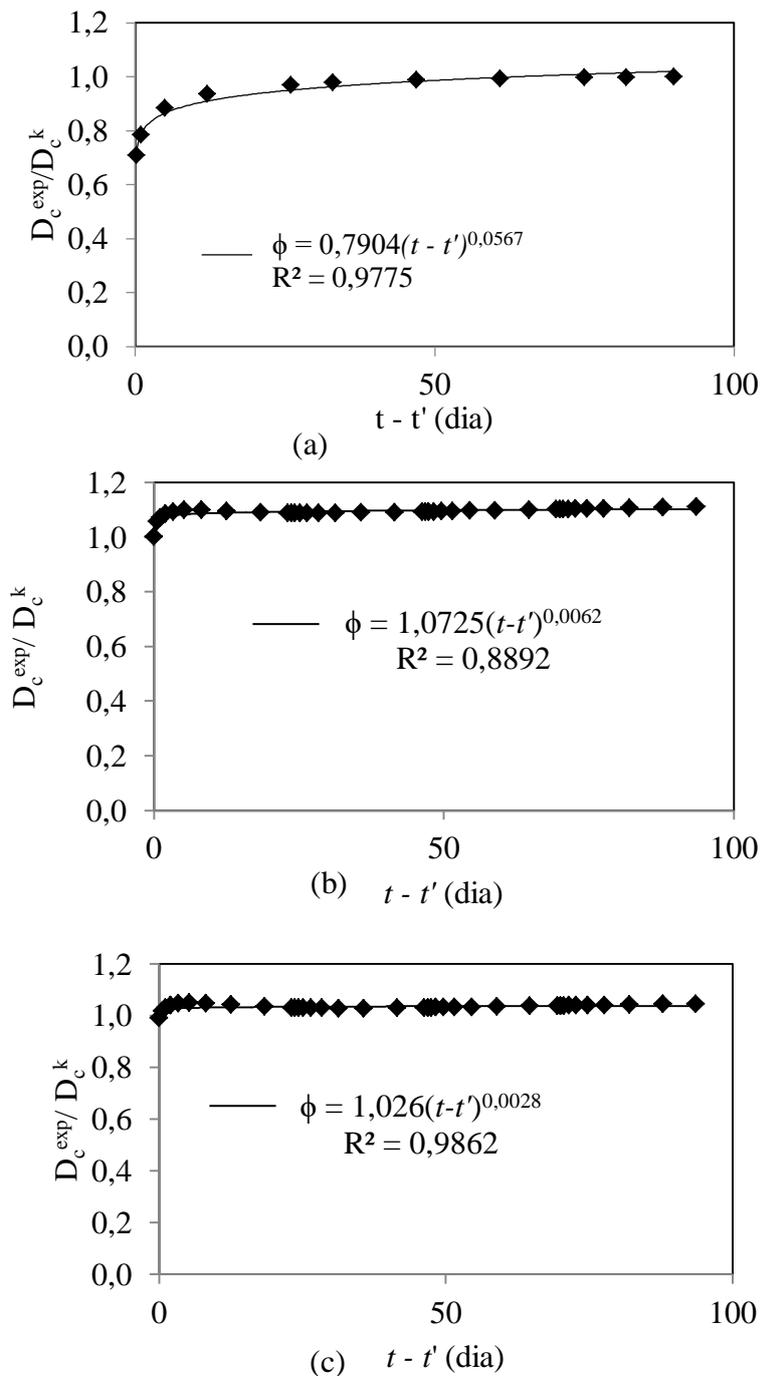
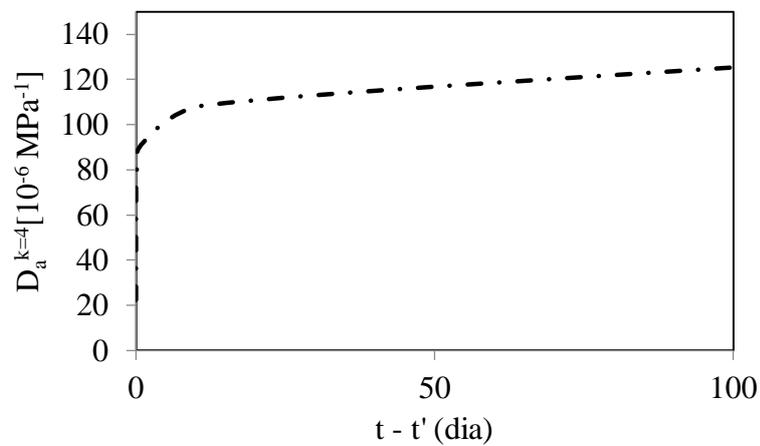
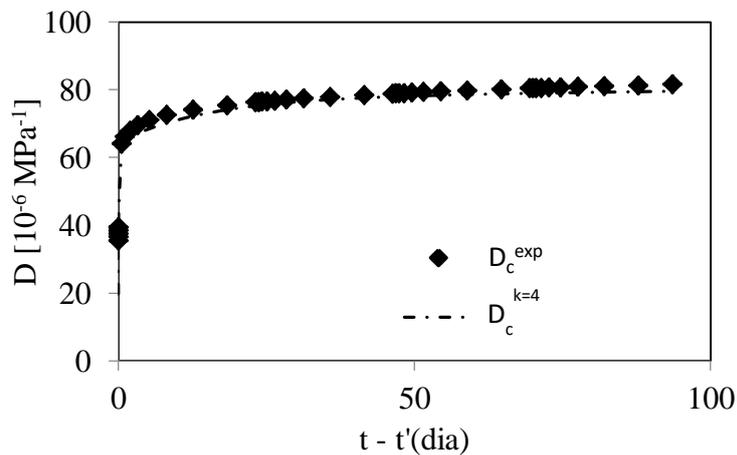


Figura 6.7 - Relação entre os resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) com a simulação da argamassa em $t' = 1$ dia: (a) correção $k=2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k=4$

Na Figura 6.7a, em $k = 2$, é possível notar que nas idades iniciais as diferenças até $t - t' = 1$ dia de idade chegam a 22%. Na idade de $t - t' = 5$ dias essa diferença reduz para 12% e a partir $t - t' = 10$ dias e $t - t' = 26$ dias tem valores de 7% de 3%, respectivamente. Dessa maneira, as propriedades obtidas experimentalmente necessitam de correções nas idades iniciais em $t - t' = 1$ dia. Entretanto, para $k=3$, a diferença máxima para o experimental que ocorre em $t - t' = 90$ dias reduz para 11% e em $k = 4$ fica em 5%. Dessa forma a propriedade de fluência estimada $D_a^{k=4}$ é dada na Figura 6.8.



(a)



(b)

Figura 6.8 – Resultados da simulação em $t' = 1$ dia: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=4}$ usado na simulação do concreto para $\phi^{k=4}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação do concreto em $k = 4$

As funções de correção ϕ para $t' = 3$ dias, entre o resultado experimental e a simulação numérica, são mostradas na Figura 6.9. Foram utilizadas 4 iterações para obtenção da propriedade da argamassa.

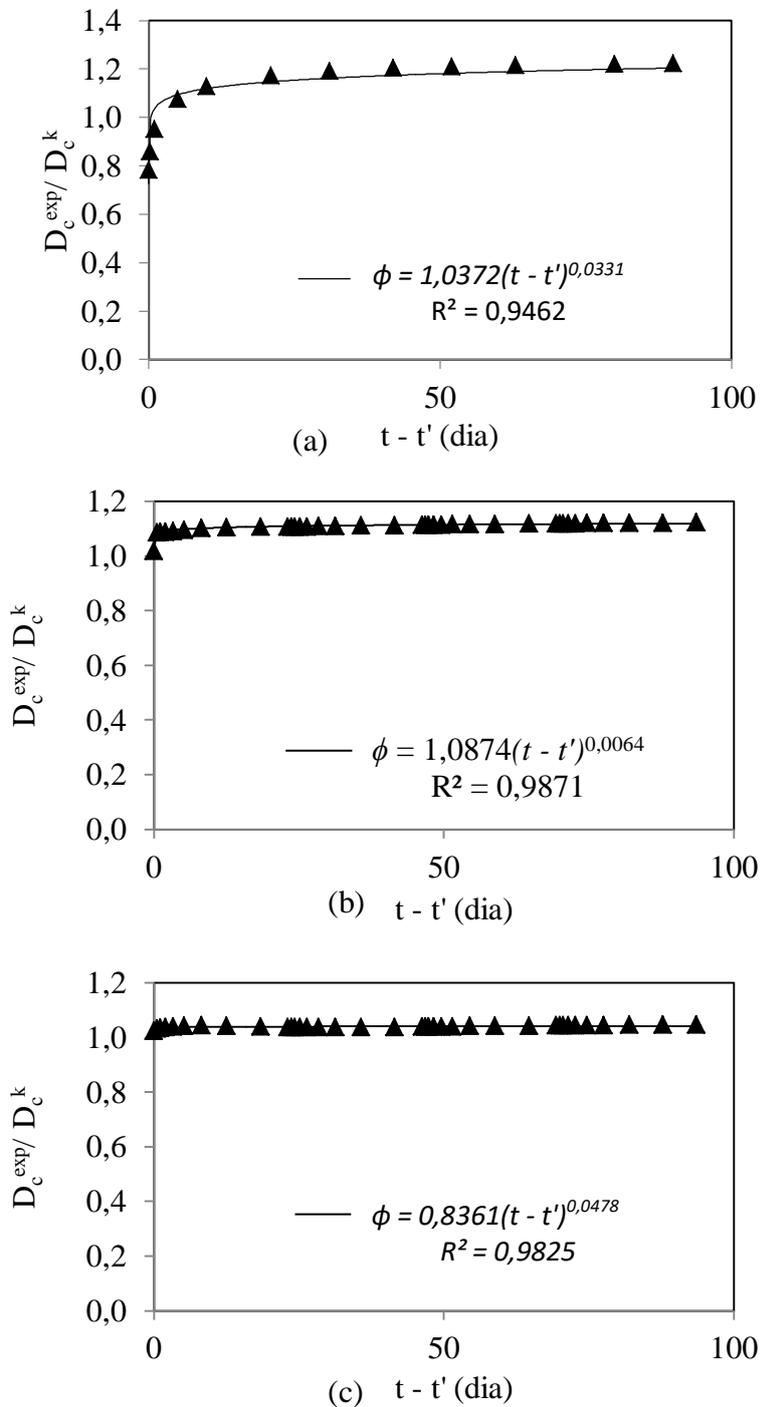


Figura 6.9 - Relação entre os resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) com a simulação da argamassa em $t' = 3$ dias: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k = 3$; (c) correção $k = 4$.

Da mesma forma que a idade de 1 dia as diferenças para a idade de 3 dias, para $k = 1$, na Figura 6.9a se concentraram em quase todas as idades. Assim, para $t - t'$ de 1, 5 e 10 dias as diferenças entre a simulação e o experimental foram de 5%, 8%, 13% . Nas idades seguintes a diferença máxima chega a 22% até os 90 dias de idade. Na segunda iteração, em $k=2$, a maior diferença que ocorria em $t - t' = 90$ dias reduz para 12% e para $k = 3$ fica em torno de 5%. Dessa forma nota-se a proximidade entre D_c^k e D_c^{exp} à medida que o número de iteração aumenta. A propriedade da argamassa D_a^k para $t' = 3$ dias em $k = 3$ é dada na Figura 6.10.

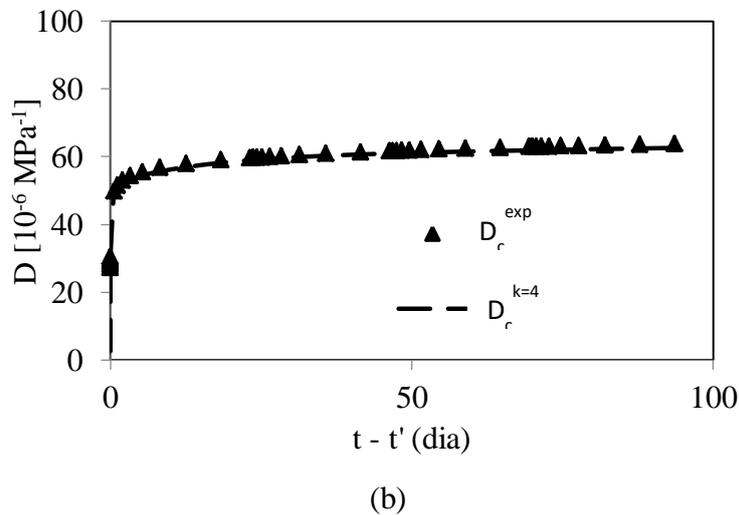
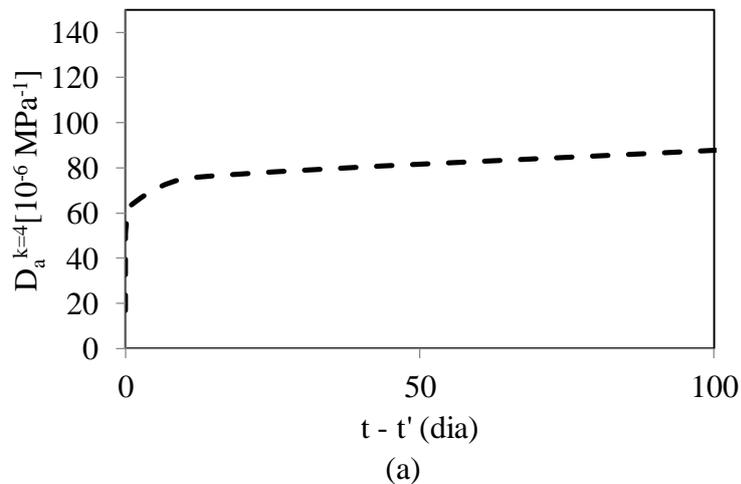


Figura 6.10 – Resultados da simulação em $t' = 3$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=4}$ usado na simulação do concreto para $\phi^{k=4}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação do concreto em $k = 4$

Da mesma maneira é feita a simulação para $t' = 7$ dias. Neste caso foram feitas 3 iterações devido à rápida convergência, sendo que para $k = 1$ a propriedade da argamassa D_a^k foi arbitrada. As funções de correção são mostradas na A Figura 6.11.

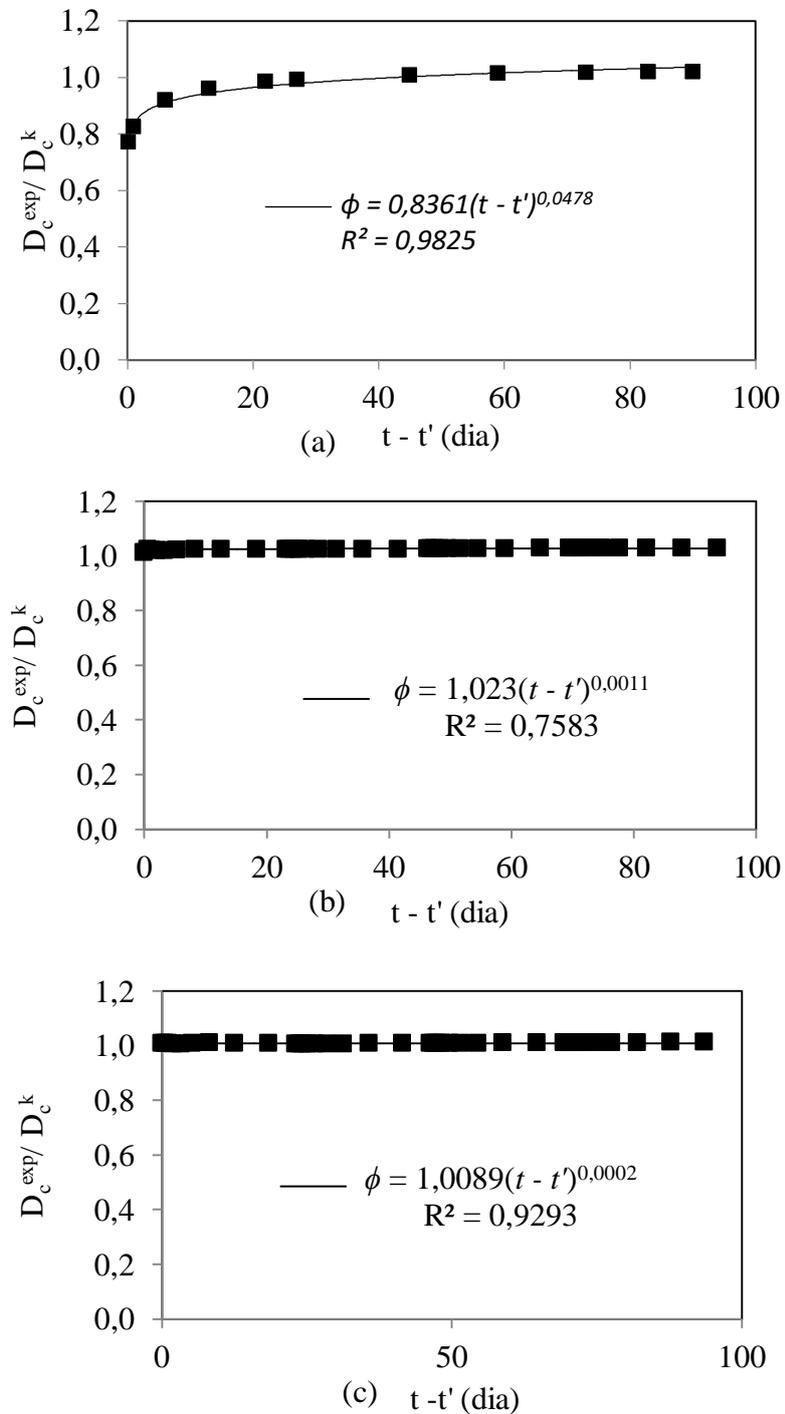
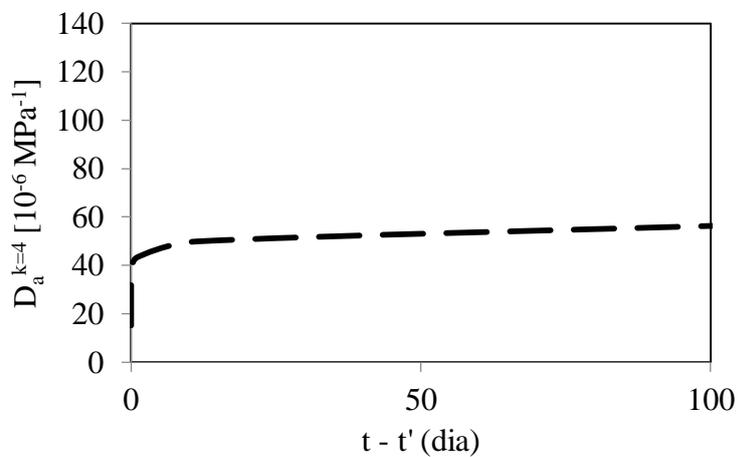


Figura 6.11 - Relação entre os resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) com a simulação da argamassa em $t' = 7$ dias: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k = 3$; (c) correção $k = 4$

Observa-se, na Figura 6.11a, que até $t - t' = 5$ dias há uma diferença que chega a 8%. Após isso, a diferença passa a ser considerada desprezível, sendo no máximo 3,8%. Em tempos muito curtos cerca de $t - t' < 0,00002$ as diferenças chegam a 23%, no entanto podem ser desprezadas devido ao pequeno intervalo de tempo, onde ocorrem erros numéricos. Em $k = 3$, na Figura 6.11b, a diferença máxima fica em torno de 3% em $t - t' = 90$ dias, não sendo neste caso necessário mais uma iteração e em $k = 4$ aproximadamente 1%. A propriedade da argamassa encontrada na simulação e a comparação com o resultado experimental do concreto são mostrados na Figura 6.12.



(a)

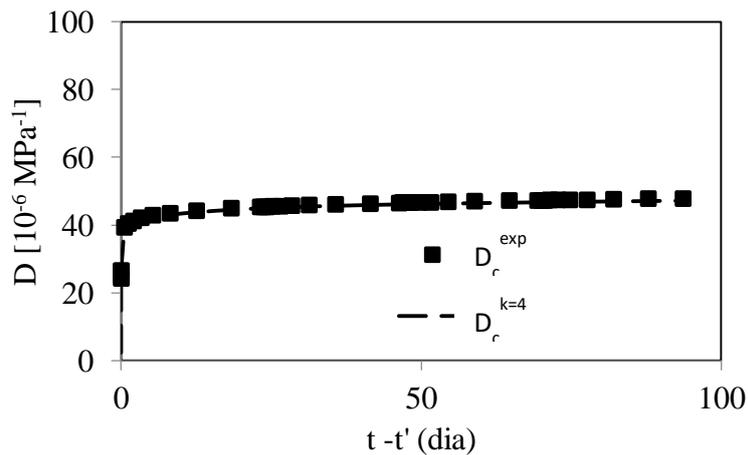


Figura 6.12 – Resultados da simulação em $t' = 7$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=4}$ usado na simulação do concreto para $\phi^{k=4}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação do concreto em $k = 4$

As funções de correções obtidas foram usadas nas propriedades G' e G'' da argamassa. O uso da metodologia de interconversão fornece os resultados da função de relaxação $E(t)$. Os dados da argamassa final após as correções são apresentados:

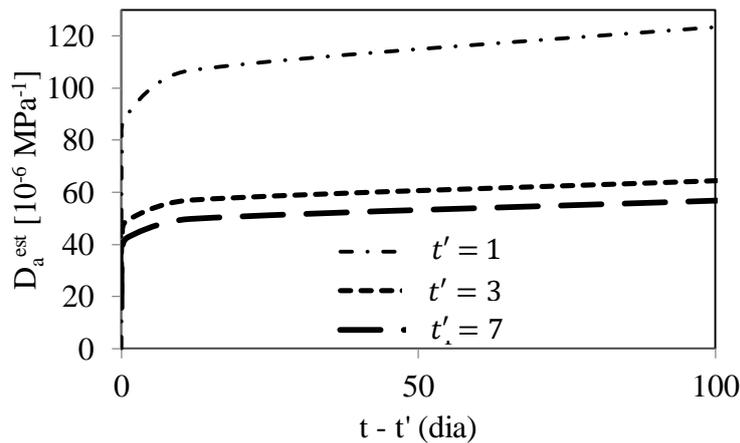


Figura 6.13 – Valores corrigidos de D_a^k da argamassa estimados pela simulação do concreto em diferentes idades

A comparação entre os valores de RMSE para as iterações com suas respectivas correções são mostrados na Tabela 6.3 para cada idade de carregamento.

Tabela 6.3 – Valores de RMSE da simulação do concreto para correção ϕ^k

t'	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
1	10,98	3,95	6,85	1,29
3	9,77	6,05	2,40	0,93
7	5,83	1,21	0,46	0,13

A Tabela 6.3 mostra significativa redução do RMSE a medida que o número de iteração aumenta, ou seja, o resultado da simulação se aproxima de resultado experimental. Esses resultados reforçam as conclusões que partiram da porcentagem da diferença vistas anteriormente. Em $t' = 1$ houve a necessidade de mais iterações devido ao aumento das diferenças em $k = 3$. Esse aumento é provocado por erros da simulação em tempos menores que 0,00002 dia.

6.2.4 Resultado da simulação numérica do concreto com as correções de outras idades

Nesta seção são mostradas as comparações das simulações do concreto com as argamassas para $k = 2$. Neste caso, são utilizadas as correções de uma determinada idade em outra idade, na intenção de verificar outra maneira de encontrar a propriedade da argamassa. Além disso, é encontrada uma função de correção em função de todas as idades como mostrado na a Figura 6.14.

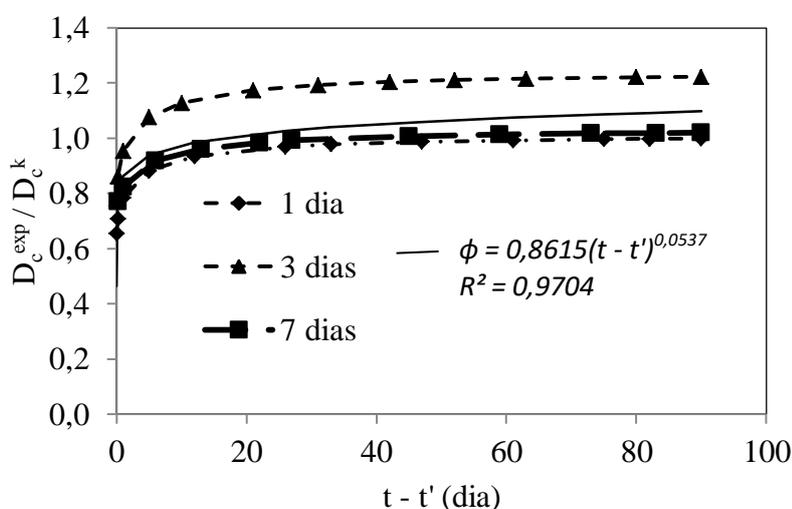


Figura 6.14 – Comparação e regressão entre as relações dos resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) e simulação numérica nas diferentes idades para $k = 2$

O uso da função de correção da Figura 6.14 com a correção em $k=2$ das idades de 1, 3 e 7 dias possibilita e comparação entre a simulação do concreto para diferentes ϕ em diferentes idades. Assim, a Figura 6.15 mostra os resultados da simulação do concreto da combinação argamassa-agregado.

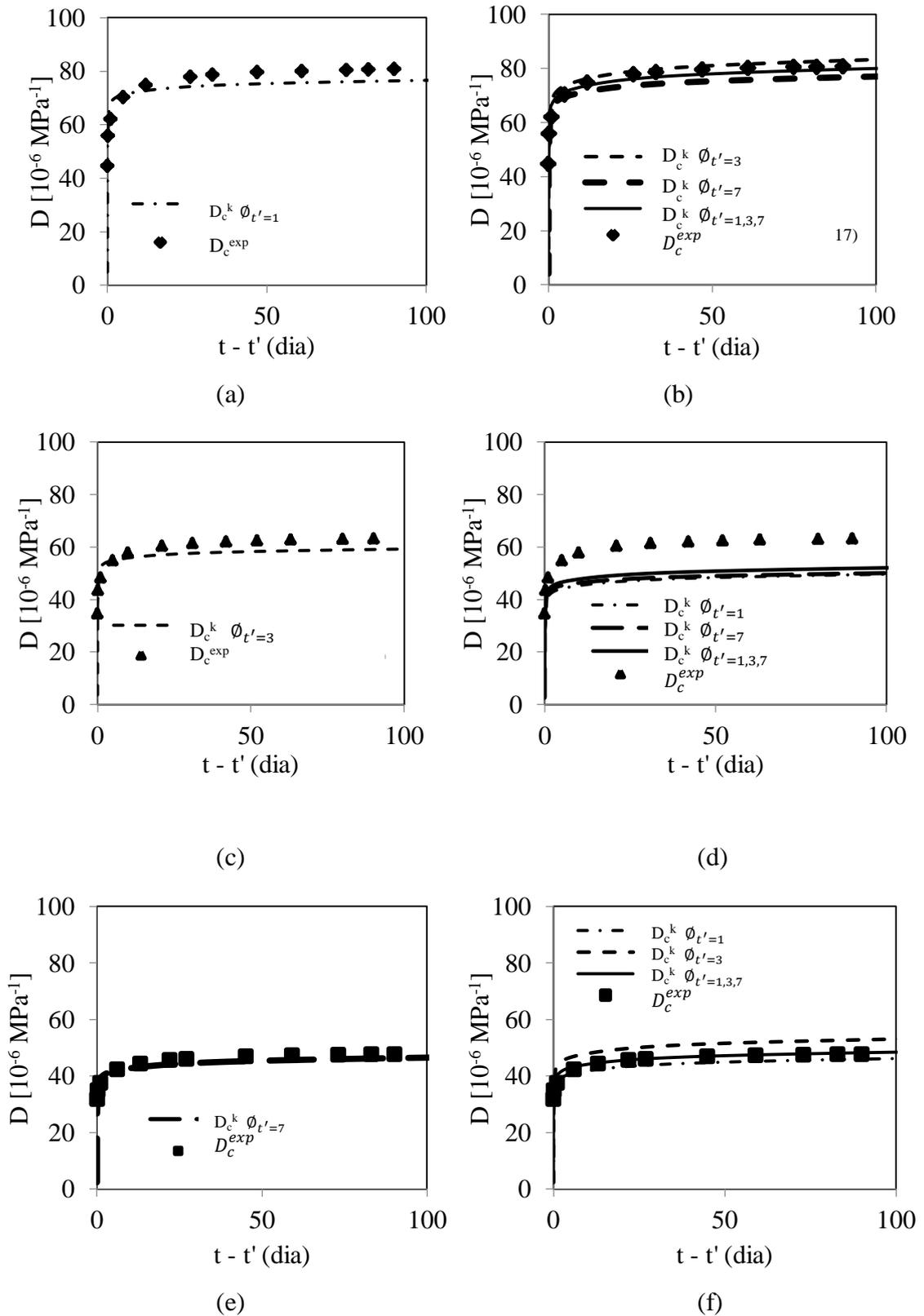


Figura 6.15 - Comparação dos resultados de fluência experimental do concreto (Silva Junior (2017)) versus simulação da argamassa corrigida para $D_c^{k=2}$ e t' de: (a),(b) 1 dia; (c),(d) 3 dias; (e),(f) 7 dias

Na Figura 6.15, $D_c^k(t' = t'_0)$ indica a propriedade simulada na idade t'_0 e $\phi_{t'=t'_0}$ é a função de correção da idade t'_0 . Os resultados apresentaram melhores aproximações com a correção ϕ ($t' = 1, 3, 7$) como pode ser observado na Figura 6.15b. No caso das propriedades a 3 dias de idade, Figura 6.15c houve uma boa aproximação nas idades iniciais já na Figura 6.15d houve diferenças em todas as outras funções de correções. Os resultados de D_c^k na idade de 7 dias da simulação, mostrados na Figura 6.15e apresentaram diferenças significativas em $t - t' = 1$ dia que chegam a 12% para $D_c^k(t' = 7)$ na Figura 6.15e e correção ϕ ($t' = 7$) e 2,38% para $D_c^k(t' = 7)$ corrigida por ϕ ($t' = 1, 3, 7$). Na maioria dos casos a correção entre todas as idades ϕ ($t' = 1, 3, 7$) apresentou melhores aproximações. Entretanto a correção na própria idade se mostrou satisfatória em todas as situações, sendo necessário neste caso mais iterações até o resultado da simulação se tornar aproximadamente igual ao resultado experimental.

6.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ARGAMASSA A PARTIR DA PASTA

Esta seção apresenta a simulação da argamassa com a propriedade de pasta combinada com agregado miúdo (areia). Aqui há a mudança na simbologia $D_c^{exp} = D_a^{est}$ e $D_M^k = D_p^k$ no fluxograma da Figura 6.2. Neste caso, são utilizados os valores estimados da argamassa D_a^{est} da seção 6.2.3 para obtenção das propriedades da pasta D_p^k em três iterações.

6.3.1 Propriedades dos materiais

As propriedades da argamassa e seus componentes são apresentados na Tabela 6.4. Da mesma forma são mostrados os volumes de areia, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Tabela 6.4 – Traço unitário da argamassa e estimativa do módulo de elasticidade e porcentagem em volume dos componentes

Composição unitária (Kg/Kg) de cimento		Coefficiente de Poisson	Estimativa de E (GPa)	Volume (%)
Cimento CP V ARI	1			31,60
areia	1,91	0,20 ^a	38 ^a	52,20
Sílica ativa	0,10			2,00
Aditivo superplastificante (%)	1,50			0,90
Água				13,30
Água/cimento (a/c)	0,35			

a – estimados a partir de dados de FURNAS (1997)

As simulações são feitas com as propriedades da pasta arbitrada inicialmente com areia de módulo de elasticidade de $E = 38 \text{ GPa}$ (Furnas, 1997). As propriedades da pasta utilizada na simulação das argamassas obtidas na seção anterior são apresentadas na Figura 6.16. Para facilitar as observações dos resultados, a fluência da argamassa obtida na seção anterior é aqui tratada como, D_a^{est} , sendo o significado do sobrescrito est a estimativa e o subscrito a argamassa.

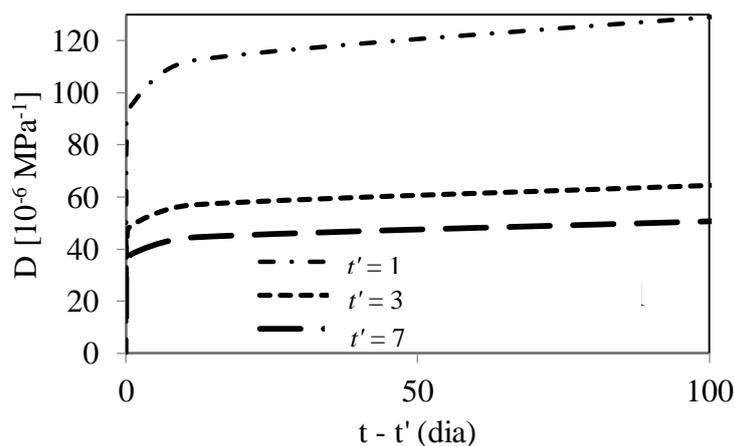


Figura 6.16 – Resultado estimado de fluência D_a^{est} para a argamassa em diferentes idades

6.3.2 Modelo computacional

A geometria consiste em um cilindro com as propriedades da pasta e de esferas que visam simular o agregado (areia). Nesse caso, as esferas possuem o mesmo diâmetro em posições aleatórias como ilustrado na Figura 6.17.

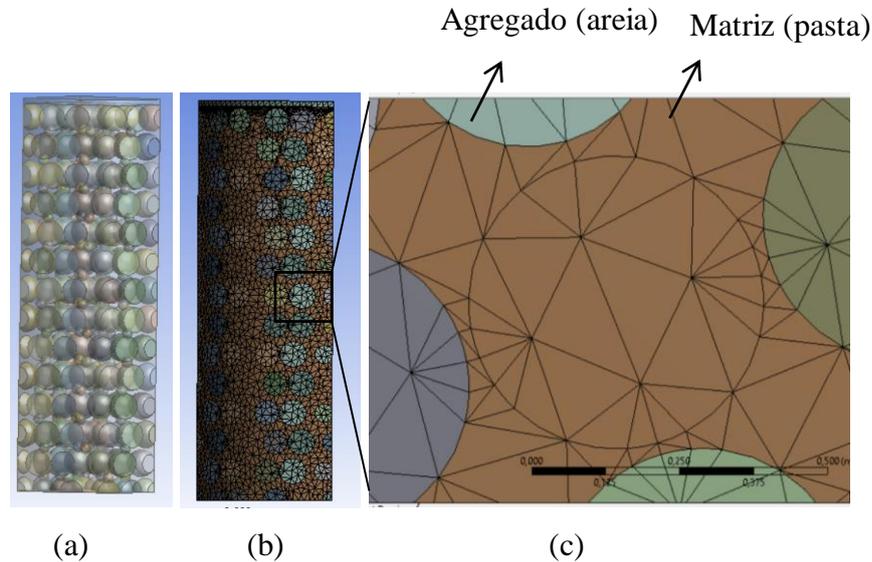


Figura 6.17 – Modelo numérico usado para simular a argamassa: (a) pasta com agregado; (b) malha utilizada; (c) detalhe da malha na interseção da pasta com o agregado

O modelo de argamassa (Figura 6.17) possui diâmetro de 3,5 mm com altura de 7,0 mm. Neste caso o modelo foi reduzido para diminuir os custos computacionais e o tempo da simulação. A Figura 6.17a mostra o agregado dentro da pasta. A malha, da Figura 6.17b, utiliza elementos sólidos tetraédricos, sendo o detalhe da ligação pasta-agregado mostrado na Figura 6.17c. As características e elementos do modelo são apresentados:

Tabela 6.5 – Características do modelo computacional para simulação do concreto

Características	Argamassa
Elemento da matriz cimentícia	Solid187
Elemento do agregado	Solid187
Elemento de contato	Conta174/Targe170
Número de elementos de contato	114362
Número de nós	277354
Número de elementos sólidos	156911
Contato do agregado	aderente
Contato com suporte de carga	aderente
Total de elementos	271273

A propriedade de fluência inicialmente arbitrada D_p^k é mostrada na Figura 6.18. Assim como na seção anterior aqui foram escolhidas funções que fazem a simulação da argamassa se aproximar das propriedades estimadas na Figura 6.16.

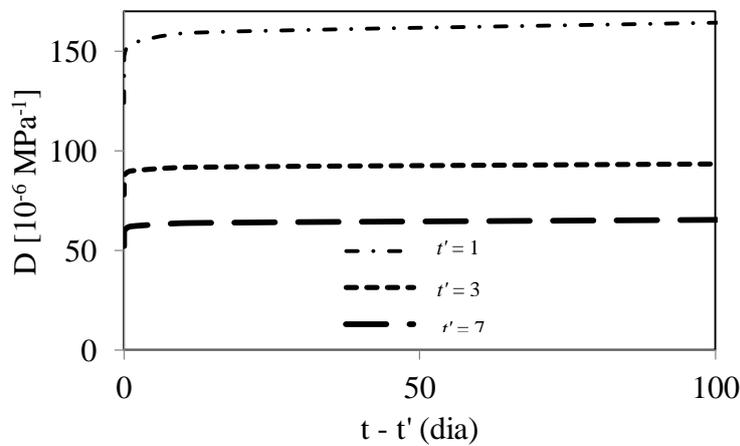


Figura 6.18 – Propriedades $D_p^{k=1}$ para $\phi^{k=1} = 1$ da pasta propostas para análise da argamassa em diferentes idades

6.3.3 Resultado da simulação numérica da argamassa

Aqui é feita a simulação da argamassa com os resultados arbitrados e corrigidos da pasta e do agregado miúdo (Furnas, 1997). A Figura 6.19 apresenta a relação numérica e experimental para $t' = 1$ dia.

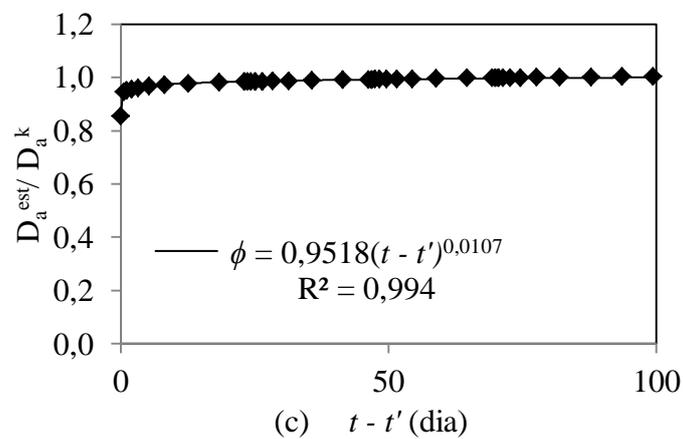
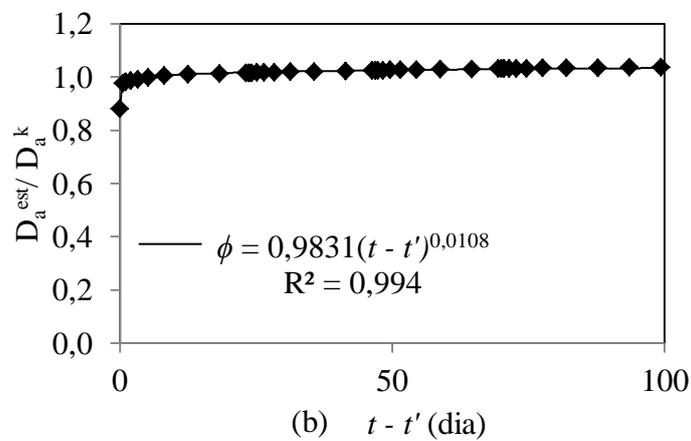
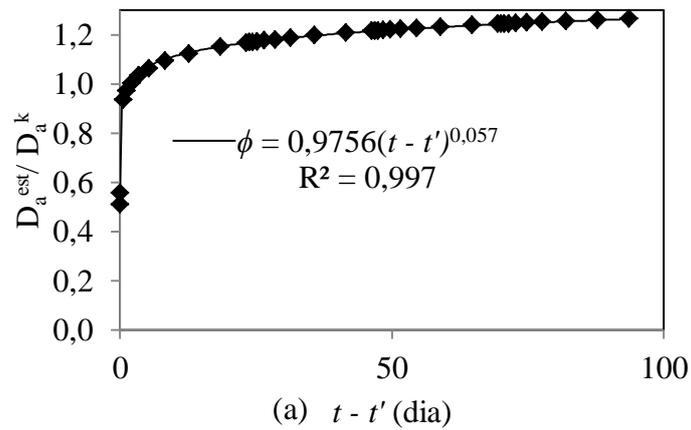


Figura 6.19 - Relação entre os resultados de fluência estimada da argamassa com a simulação em $t' = 1$ dia: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k = 3$; (c) correção $k = 4$

Na Figura 6.19 está a relação entre a simulação da pasta com agregado e a argamassa estimada na seção anterior em $t' = 1$. As diferenças em $t - t' = 90$ dias para $k = 2$ (Figura 6.19a), $k = 3$ (Figura 6.19b) e $k = 4$ (Figura 6.19c) são 27%, 4% e 1%,

respectivamente. Isso mostra que em três iterações é possível obter boas aproximações em $t' = 1$. Os resultados finais da fluência estimada da pasta e a comparação entre as argamassas experimental e numérica são mostradas na Figura 6.20.

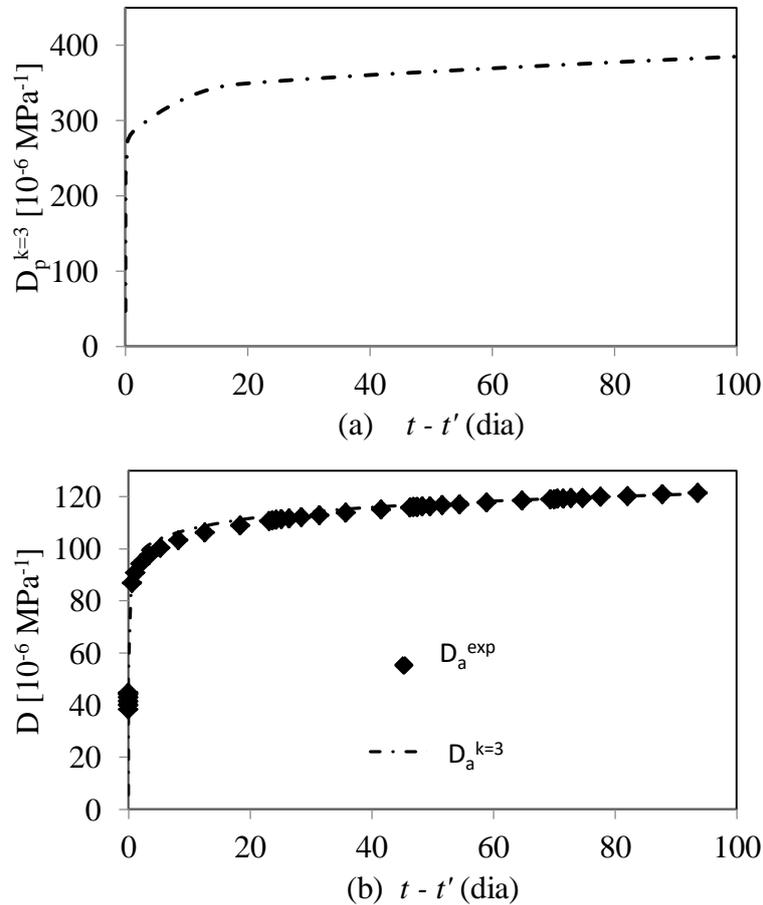


Figura 6.20 – Resultados da simulação em $t' = 1$ dia: (a) Valores corrigidos de $D_a^{k=3}$ usado na simulação da argamassa para $\phi^{k=3}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação da argamassa em $k = 3$

Da mesma forma, foi realizada a simulação da argamassa em $t' = 3$ dias a fim de obter a fluência da pasta. A relação entre o resultado experimental e a simulação é mostrada na Figura 6.21.

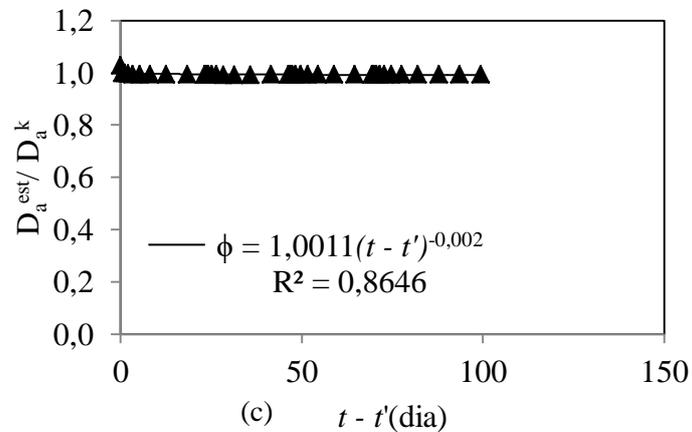
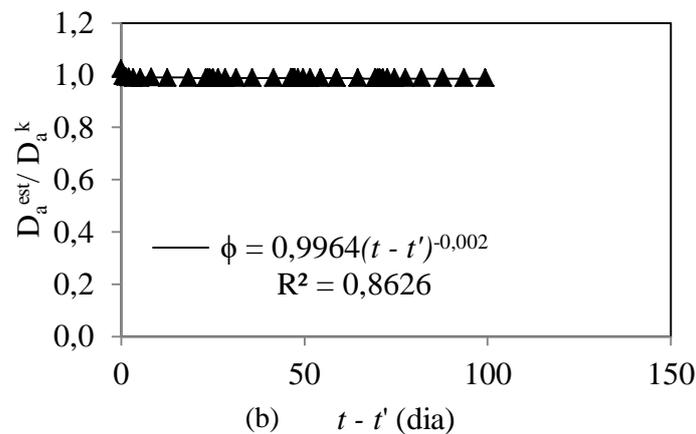
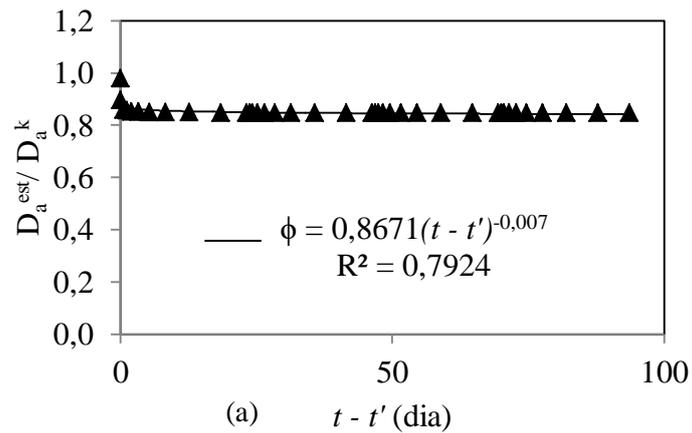


Figura 6.21 - Relação entre os resultados de fluência estimada da argamassa com a simulação em $t' = 3$ dias: (a) correção $k=2$; (b) correção $k=3$; (c) correção $k=4$

Na Figura 6.21a é possível notar que em $k=2$ há diferenças maiores nas idades iniciais, sendo que à medida que o número de iterações aumenta os resultados tendem a se aproximar de 1, como pode ser visto na Figura 6.21b e Figura 6.21c. O resultado da fluência estimada para $t' = 3$ dias, assim como a comparação entre a argamassa simulada e o resultado experimental são mostrados na Figura 6.22.

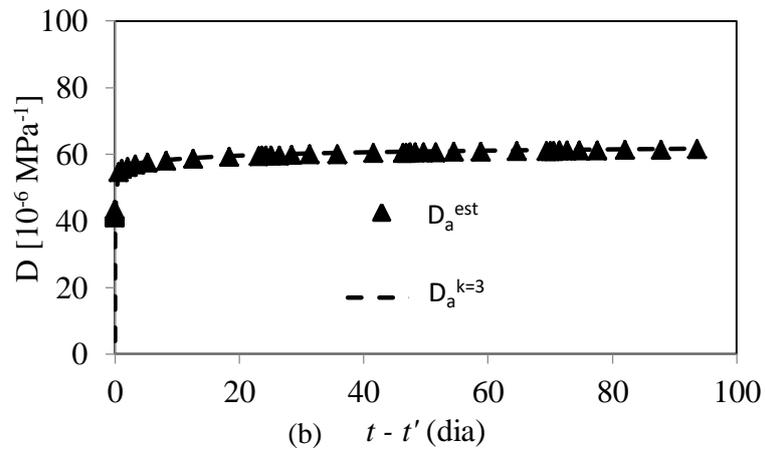
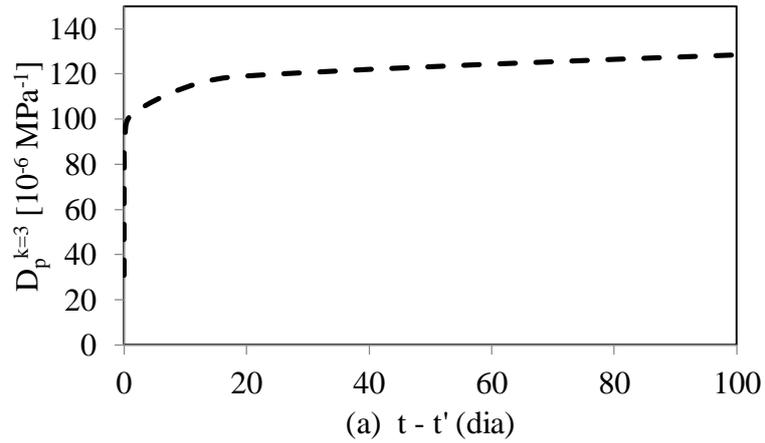


Figura 6.22 – Resultados da simulação em $t' = 3$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_p^{k=3}$ usado na simulação da argamassa para $\phi^{k=3}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação da argamassa em $k = 3$

A simulação também é realizada para $t' = 7$ dias para obtenção da fluência da pasta. As relações entre os resultados experimentais e numéricos são apresentados para três iterações na Figura 6.23.

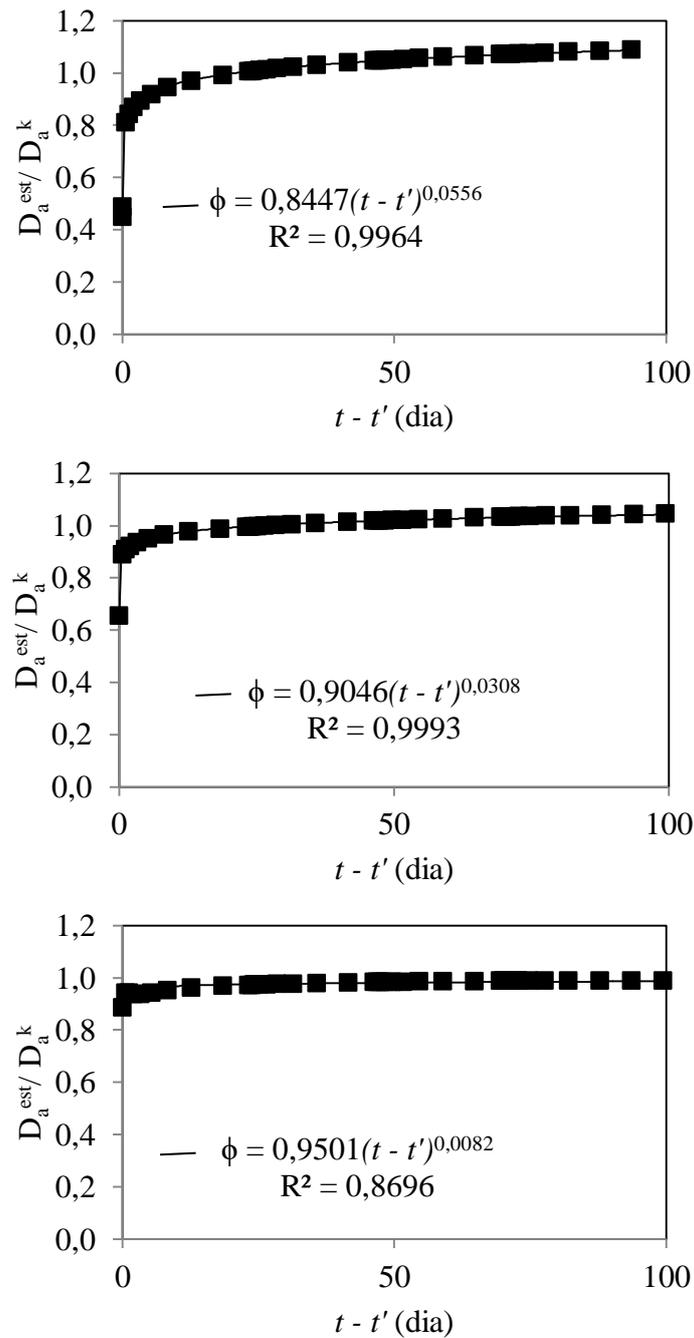


Figura 6.23 - Relação entre os resultados de fluência estimada da argamassa com a simulação em $t' = 7$ dias: (a) correção $k = 2$; (b) correção $k = 3$; (c) correção $k = 4$

Assim como nas idades de carregamentos anteriores, em tempos curtos de simulação há grandes diferenças como pode ser visto na Figura 6.23a. Nas outras iterações, $k = 2$ (Figura 6.23b) e $k = 3$ (Figura 6.23c), nota-se a tendência dos resultados se aproximar de 1. Assim, devido à proximidade dos resultados a propriedade da pasta estimada e da comparação das argamassas experimental e simulada são mostradas na Figura 6.24

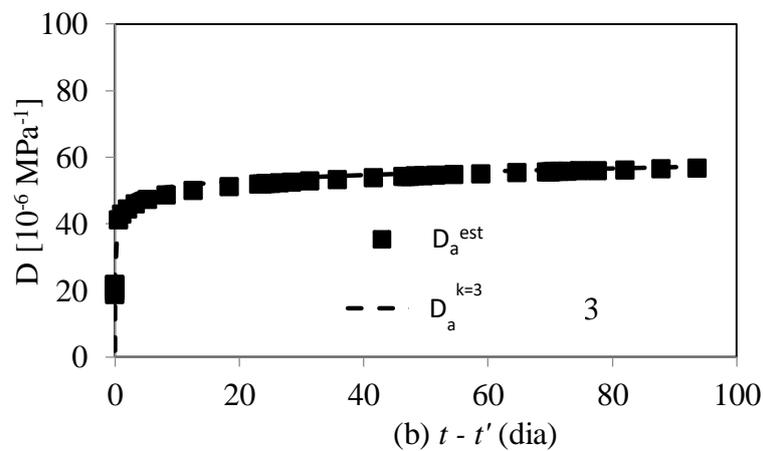
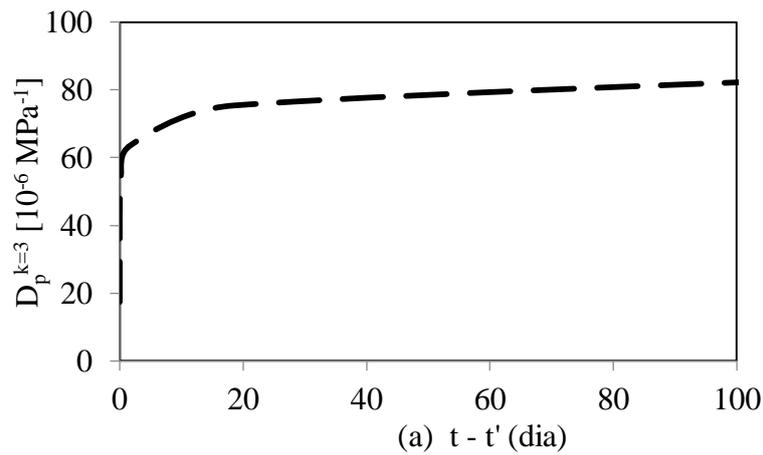


Figura 6.24 – Resultados da simulação em $t' = 7$ dias: (a) Valores corrigidos de $D_p^{k=3}$ usado na simulação da argamassa para $\phi^{k=3}$; (b) comparação entre o resultado experimental e a simulação da argamassa em $k = 3$

A fim de ilustrar a proximidade dos resultados em todas as idades de carregamento são mostrados os valores de RMSE para as diferentes iterações utilizadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Valores de RMSE da simulação do concreto para diferentes iterações

t'	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
1	26,21	2,52	2,18
3	10,52	0,94	0,40
7	6,59	2,98	1,44

Na Tabela 6.6 são mostrados os valores de RMSE em diferentes iterações. Observa-se que há redução do RMSE suficiente para fornecer boas aproximações e assim parar o processo iterativo de correção e a simulação. Diante disso, foi mostrado que apenas

duas iterações de simulação e correção são suficientes para fornecer bons resultados, que ficam claro das observações do RMSE e de forma visual nos gráficos apresentados.

6.4 CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES

As simulações são necessárias para obtenção da fluência de pastas e argamassas por método iterativo. De maneira geral, foram obtidos bons resultados nas simulações quando as propriedades da argamassa são corrigidas pelos coeficientes da seção 6.2.3.

No caso da simulação pasta-argamassa houve algumas diferenças nas idades iniciais, porém com as correções houve significativa aproximação com o experimento.

De forma geral, é possível obter a propriedade $D(t)$ de uma pasta ou argamassa, desde que se tenha ao menos um resultado experimental de $D(t)$ do concreto. Isso foi comprovado, pois a estimativa de um $D(t)$ inicial na simulação com posterior comparação com o experimental fornece uma relação de correção da propriedade estimada.

7 CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou uma nova metodologia para determinar a fluência envelhecida e não envelhecida da interconversão de ensaios à torção de varredura de frequências de curta duração em pastas e argamassas no estado endurecido. Os resultados mostraram o comportamento do ângulo de fase e dos módulos de perda e armazenamento no domínio da frequência. Os resultados do ângulo de fase $\delta(\omega)$ das pastas e argamassas no estado endurecido foram confirmados pela literatura de valor menor que outros materiais tais como asfalto e alguns polímeros. Mesmo assim, o comportamento viscoso não foi desprezado, pois à medida de que a frequência varia, há a variação nas parcelas elásticas e viscosas.

Foram realizados ensaios DMA à torção para cinco misturas distintas de modo a obter as propriedades de relaxação complexa ao cisalhamento. Com esses resultados foram feitas interconversões analíticas, tendo a finalidade de encontrar as propriedades viscoelásticas no tempo, no caso fluência e relaxação. Além disso, foi possível obter o amortecimento de pastas e argamassas. Foi observado para $f = 10 \text{ Hz}$ que o amortecimento diminui com o aumento da idade em pastas e argamassas. Contrário a isso à medida que a frequência diminui o amortecimento aumenta.

A metodologia experimental foi comprovada do ponto de vista de encontrar a fluência e conseqüentemente descobrir a função de envelhecimento, quando são levadas em consideração as diversas idades de ensaios. No entanto, o material praticamente não envelhece durante os ensaios, por serem de curta duração, garantindo assim a fluência desacoplada do envelhecimento quando se considera apenas uma idade de carregamento.

O ensaio DMA foi validado por meio de observações e comparações. A primeira foi pela comparação de E_0 e E . A maioria das comparações mostra boa proximidade. Assim, chegou-se às mesmas conclusões de Granja e Azenha (2016) que o ensaio DMA pode fornecer os resultados de módulos de elasticidade. A segunda foi pela observação de dados encontrados na literatura. A metodologia mostra grande vantagem na obtenção do módulo de elasticidade (Young), pela rapidez do ensaio.

Foi mostrada uma metodologia de obtenção das propriedades de pastas e argamassas por meio de processo inverso de simulação numérica de forma iterativa. Dessa forma, estimou-se a fluência inicial da argamassa que foi corrigida após a simulação do concreto. Assim, para obter a fluência de pastas e argamassas há a necessidade da fluência experimental do concreto. As simulações foram realizadas em duas fases, ou seja, argamassa combinada com agregados graúdos ou pastas combinadas com agregados miúdos.

Essa pesquisa traz grandes avanços nas análises viscoelásticas de materiais cimentícios. Apesar dos ensaios DMA serem utilizados por alguns autores, não foram encontradas pesquisas em materiais cimentícios na literatura com esses objetivos. Assim, esta pesquisa contribui com uma metodologia que facilita e acelera a obtenção das propriedades de fluência e relaxação longitudinal e cisalhante.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como a análise DMA ainda é um vasto campo a ser explorado, ainda há uma série de questionamentos a serem resolvidos. Como sugestão de pesquisas para fortalecer essa metodologia, têm-se:

- Realizar ensaios DMA para diferentes misturas em pastas e argamassas, aplicando a metodologia proposta;
- Comparar a metodologia DMA com o maior número possível de ensaios estáticos de fluência;
- Realizar ensaios DMA para intervalos de frequência menores que 10^{-4} Hz e maiores que 10 Hz.
- Simular a fluência DMA com diferentes formatos de agregados e volumes na matriz cimentícia;
- Comparar a metodologia DMA com modelos reológicos consolidados na literatura e propor alterações;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro - RJ: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008.

ABNT NBR 7211, . **Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011.

ABNT NBR 8522. **Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2008.

ABNT NBR 9775. **Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2011.

ABNT NBR 9776. **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987.

ACI 209.2R-08. **Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete.** ACI Committee 209. Farmington Hills.

ANSYS. **Mechanical APDL release 17.1, Help System, element library, ANSYS Inc.**

ASAMOTO, S.; KATO, K.; MAKI, T. Effect of creep induction at an early age on subsequent prestress loss and structural response of prestressed concrete beam. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 158–164, 2014.

ASTM D4065 - Standard Practice for Plastics : Dynamic Mechanical Properties : Determination and Report of Procedures. West Conshohocken, PA: [s.n.].

ASTM D5279 - 01: Standard Test Method for Plastics : Dynamic Mechanical Properties : In Torsion. West Conshohocken, PA: [s.n.].

ATRUSHI, D. S. **Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete : Testing and Modelling, Doctoral Thesis.** Norwegian University of Science and Technology, 2003.

AZENHA, M.; GRANJA, J. L.; OLIVEIRA, R. B. **Innovative Method for the Continuous Monitoring of Concrete Viscoelastic Properties since Early Ages: Concept and Pilot Experiments.** 10th International Conference on Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures. **Anais.** ASCE, 2015.

BARY, B.; BOURCIER, C.; HELFER, T. **Numerical Analysis of Concrete Creep on Mesoscopic 3D Specimens.** CONCREEP 10. **Anais...**2014

BAŽANT, Z. P. Theory of Creep and Shrinkage in Concrete Structures : A Précis of Recent Developments. **Mechanics Today**, v. 2, p. 1–93, 1975.

BAŽANT, Z. P.; CHERN, J. Triple Power Law for Concrete Creep. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 111, n. 1, p. 63–83, 1985.

BAŽANT, Z. P.; JIRÁSEK, M. **Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures**. Springer, 2018.

BAŽANT, Z. P.; OSMAN, E. Double power law for basic creep of concrete. **Matériaux et Constructions**, v. 9, n. 2, p. 3–11, 1976.

BAŽANT, Z. P.; PRASANNAN, S. Solidification theory for aging creep. **Cement and Concrete Research**, v. 18, n. 8, p. 923–932, 1988.

BENBOUDJEMA, F.; TORRENTI, J. M. Early-age behaviour of concrete nuclear containments. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, p. 2495–2506, 2008.

BOGGS, Daryl; DRAGOVICH, Jeff. The nature of wind loads and dynamic response. **Special Publication**, v. 240, p. 15-44, 2006.

BONICA, C.; TORALDO, E.; ANDENA, L.; MARANO, C.; MARIANI, E. The effects of fibers on the performance of bituminous mastics for road pavements. **Composites Part B: Engineering**, v. 95, n. June, p. 76–81, 2016.

BRIFFAUT, M.; BENBOUDJEMA, F.; TORRENTI, J. M.; NAHAS, G. Concrete early age basic creep: Experiments and test of rheological modeling approaches. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 373–380, 2012.

CARFAGNE, M.; LENZI, E.; PIERINI, M. **The loss factor as a measure of mechanical damping**. Atti del 16th International Modal Analysis Conference. **Anais**. Santa Barbara, CA (USA): 1998

CAROL, I.; BAZANT, P. Z. Viscoelasticity with Aging Caused by Solidification of Nonaging Constituent. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 119, n. 11, p. 2252–2269, 1993.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **A Unified Method for The Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixtures Using the Dynamic Mechanical Analyzer**. Texas A&M University, 2008.

CEB-FIP MODEL CODE. **Comité Euro-Internacional du Béton**. Londres: Thomas Telford, 1993.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity an Introduction**. 2nd ed. New York: ACADEMIC PRESS, 1982.

CHU, T.-J.; ROBERTSON, R. E. Viscoelastic behaviour of macro-defect-free cement. **Journal of Materials Science**, v. 29, n. 10, p. 2683–2690, 1994.

CHUNG, D. D. L. Review: Materials for vibration damping. **Journal of Materials Science**, v. 36, n. 24, p. 5733–5737, 2001.

COMBY-PEYROT, I.; BERNARD, F.; BOUCHARD, P.; BAY, F.; GARCIA-DIAZ, E. Development and validation of a 3D computational tool to describe concrete behaviour at mesoscale . Application to the alkali-silica reaction. **Computational Materials Science**, v. 46, n. 4, p. 1163–1177, 2009.

CORTÉS, F.; ELEJABARRIETA, M. J. Modeling viscoelastic materials whose storage modulus is constant with frequency. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, p. 7721–7726, 2006.

COSTA, C. S. M. F.; FONSECA, A. C.; SERRA, A. C.; COELHO, J. F. J. Dynamic Mechanical Thermal Analysis of Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers. **Polymer Reviews**, v. 56, n. 2, p. 362–383, 2016.

COUTINHO, R. P.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; FREIRE, R. A.; CASTELO BRANCO, V. T. F. The use of stress sweep tests for asphalt mixtures nonlinear viscoelastic and fatigue damage responses identification. **Materials and Structures**, v. 47, p. 895–909, 2013.

CREUS, G. J. **Viscoelasticity — Basic Theory and Applications to Concrete Structures**. v. 16. Springer-Verlag, 1986.

Derrick, B., Ruck, A., Toher, D., White, P. (2018). Tests for equality of variances between two samples which contain both paired observations and independent observations. **Journal of Applied Quantitative Methods**. 13 (2): 36–47.

DU, C.; SUN, L. **Numerical Simulation of Aggregate Shapes of Two-Dimensional Concrete and Its Application**. July, p. 172–178, 2007.

DUBNER, H.; ABATE, J. Numerical Inversion of Laplace Transforms by Relating Them to the Finite Fourier Cosine Transform. **Journal of the ACM**, v. 15, n. 1, p. 115–123, 1968.

DURBIN, F. Numerical inversion of laplace transforms: An efficient improvement to Dubner and Abate’s method. **Computer Journal**, v. 15, n. 12, p. 371–376, 1972.

DUVAL, A.; MOLINA-BOISSEAU, S.; CHIRAT, C. Dynamic mechanical analysis of the multiple glass transitions of plasticized wheat gluten biopolymer. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 14, p. 1–11, 2015.

ASAMOTO, S.; KATO, K.; MAKI, T. Effect of creep induction at an early age on subsequent prestress loss and structural response of prestressed concrete beam. **Construction and Building Materials**. V. 70, p. 158-164, 2014.

EMBORG, M. **Thermal stresses in concrete at early ages**. Lulea University of Technology, 1989.

FAN, L. F.; WONG, L. N. Y.; MA, G. W. Experimental investigation and modeling of viscoelastic behavior of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 814–821, 2013.

FERRY, J. D. **Viscoelastic properties of polymers**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.

FINDLEY, W. N.; LAI, J. S.; ONARAM, K. **Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials**. New York: Dover Publications, INC, v. 19. 1976.

FORAY-THEVENIN, G.; VIGIER, G.; VASSOILLE, R.; ORANGE, G. Characterization of cement paste by dynamic mechanical thermal-analysis Part I: operative conditions. **Materials Characterization**, v. 56, p. 129–137, 2006.

FREIRE, R. A.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; BHASIN, A. Aggregate Maximum Nominal Sizes ' Influence on Fatigue Damage Performance Using Different Scales. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 8, p. 1–11, 2017.

FU, G.; DEKELBAB, W. 3-D random packing of polydisperse particles and concrete aggregate grading. **Powder Technology**, 2003.

FU, Q.; XIE, Y.; LONG, G.; NIU, D.; SONG, H. Dynamic mechanical thermo-analysis of cement and asphalt mortar. **Powder Technology**, v. 313, p. 36–43, 2017.

FU, X.; CHUNG, D. D. L. Vibration damping admixtures for cement. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 69–75, 1996.

FURNAS. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico, Editor Walton Pacelli de Andrade, Editora PINI, São Paulo, 1997.

GARCÍA-TAENGUA, E.; ARANGO, S.; MARTÍ-VARGAS, J. R.; SERNA, P. Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 321–329, 2014.

GIORLA, A. B.; DUNANT, C. F. Microstructural effects in the simulation of creep of concrete. **Cement and Concrete Research**, 2018.

GOMES, J. F. **Estudo Laboratorial de misturas asfálticas Mornas com agregados de escória de Aciaria**. Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-304/2018, Departamento de Engenharia civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.

GRAESSER, E. J.; WONG, C. R. **Relationship of Traditional Damping Measures for Materials with High Damping Capacity**. David Taylor Research Center, 1991.

GRANATA, M. F.; MARGIOTTA, P.; ARICI, M. Simplified Procedure for Evaluating the Effects of Creep and Shrinkage on Prestressed Concrete Girder Bridges and the

Application of European and North American Prediction Models. **Journal of Bridge Engineering**, v. 18, n. December, p. 1281–1297, 2013.

GRANJA, J. L.; AZENHA, M. Continuous Monitoring of Concrete Mechanical Properties since an Early Age to Support Construction Phasing. **CONCREEP 10**, p. 1360–1370, 2014.

____. Assessing Viscoelastic Properties of Concrete During its Early Ages Through Forced Dynamic Excitation of Test Beams. **Key Engineering Materials**, v. 711, p. 103–110, 2016.

GRASLEY, Z. C.; LANGE, D. A. Constitutive modeling of the aging viscoelastic properties of portland cement paste. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, v. 11, p. 175–198, 2007.

GRASLEY, Z. C.; LEUNG, C. Quasi-Static Axial Damping of Poroviscoelastic Cylinders. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 137, n. 8, p. 561–570, 2011.

HAMED, E. Non-linear creep effects in concrete under uniaxial compression. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 16, p. 876–884, 2015.

HASHIN, Z.; MONTEIRO, P. J. M. An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1291–1300, 2002.

HILAIRE, A. **Etude des déformations différées des bétons en compression et en traction , du jeune au long terme : application aux enceintes de confinement**. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2014.

ISO 6721-1:2011 Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 1: General principles. Geneva.

ISO 6721-7 Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 7: Torsional vibration — Non-resonance method. Geneva.

JIANG, W.; SCHUTTER, G. DE; YUAN, Y. Degree of hydration based prediction of early age basic creep and creep recovery of blended concrete. **Cement & Concrete Composites journal**, v. 48, p. 83–90, 2014.

KIM, K.; BAZANT, P. Z. Creep Design Aid: Open-Source Website Program for Concrete Creep and Shrinkage Prediction. **ACI Materials Journal**, v. 111, n. 4, p. 423–433, 2014.

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.

LAVERGNE, F.; SAB, K.; SANAHUJA, J.; BORNERT, M.; TOULEMONDE, C. Homogenization schemes for aging linear viscoelastic matrix-inclusion composite materials with elongated inclusions. **International Journal of Solids and Structures**, 2016.

LEUNG, C. K.; GRASLEY, Z. C. Poromechanical Damping of Cementitious Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. February, p. 232–238, 2012a.

_____. Effect of micrometric and nanometric viscoelastic inclusions on mechanical damping behavior of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 444–451, 2012b.

Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variance". In Ingram Olkin; Harold Hotelling; et al. (eds.). *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford University Press. pp. 278–292.

LI, X.; CHUNG, D. D. L. Improving Silica Fume for Concrete by Surface Treatment. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 4, p. 493–498, 1998.

LIN, F.; MEYER, C. Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 4, p. 255–265, 2009.

LOU, T.; LOPES, S. M. R.; LOPES, A. V. A finite element model to simulate long-term behavior of prestressed concrete girders. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 81, p. 48–56, 2014.

LUO, R.; LIU, H.; ZHANG, Y. Characterization of linear viscoelastic , nonlinear viscoelastic and damage stages of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 72–80, 2016.

MACEDO, F. C.; PINHEIRO, D. G.; DAS, M. P.; FILHO, N.; CAMOZZ, A. B. F.; EVANGELISTA JUNIOR, F. **Evolução das Propriedades Mecânicas de Microconcretos de Alto Desempenho em Várias Idades**. SEMANA DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA 2016 - VII SECITEC / IFG. Anais. Formosa - GO: 2016.

MADI, K.; FOREST, S.; CORDIER, P.; BOUSSUGE, M. Numerical Study of creep in two-phase aggregate with a large rheology contrast: implications for the lower mantle. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 237, p. 223–238, 2005.

MAIA, L.; FIGUEIRAS, J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete. **Construction and Building Materials journal**, v. 34, p. 602–610, 2012.

MANZANO, M. A. R. **Estudo experimental de materiais cimentícios de alta resistência modificados com polímeros superabsorventes (PSAs) como agentes de**

cura interna. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-005A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 324 p, 2016.

MEDINA, L. G. **Influência da argamassa asfáltica na fluência de uma mistura idealizada.** Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília,DF, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 3 ed. São Paulo: **IBRACON**, 2014.

Montgomery, D.C, e Ranger, G.C. (2003). **Applied statistics and probability for engineers**, third edition, John Wiley and Sons, Inc.

MORLAND, L. W.; LEE, E. H. Stress Analysis for Linear Viscoelastic Materials With Temperature Variation. **Transactions of the Society of Rheology**, v. 4, n. 1960, p. 233–263, 1960.

MORLAT, R.; GODARD, P.; BOMAL, Y.; ORANGE, G. Dynamic mechanical thermoanalysis of latexes in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 847–853, 1999.

PARK, S. W.; KIM, Y. R. Interconversion Between Relaxation Modulus and Creep Compliance for Viscoelastic Solids. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, n. February, p. 76–82, 1999.

PARK, S. W.; SCHAPERY, R. A. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I—a numerical method based on Prony series. **International Journal of Solids and Structures**, v. 36, p. 1653–1675, 1999.

RANAIVOMANANA, N.; MULTON, S.; TURATSINZE, A. Basic creep of concrete under compression , tension and bending. **Construction and Building Materials Journal**, v. 38, p. 173–180, 2013.

RILEM. **Application of superabsorbent polymer (SAP) in concrete construction: state of the art report technical committee TC-225-SAP.** LondonSpringer, 2012.

RODRIGUES, E. A.; MANZOLI, O. L.; BITENCOURT JR, L. A. G.; BITTENCOURT, T. N. 2D mesoscale model for concrete based on the use of interface element with a high aspect ratio. **International Journal of Solids and Structures**, v. 94–95, p. 112–124, 2016.

RODRIGUES, I. A. **Análise do Dano em Mistura de Agregados Finos (MAF).** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-306/2018, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150 p. 2018.

ROSSI, P.; CHASON, J. P.; BASTIEN-MASSE, M.; TAILHAN, J.; MAOU, F. LE; RAMANICH, S. Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages :

comparison between normal strength concrete and a very high strength fibre reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1773–1785, 2014.

ROSSI, P.; TAILHAN, J.; MAOU, F. LE. Cement and Concrete Research Comparison of concrete creep in tension and in compression : In fluence of concrete age at loading and drying conditions. **Cement and Concrete Research journal**, v. 51, p. 78–84, 2013.

SABA, N.; JAWAID, M.; ALOTHMAN, O. Y.; PARIDAH, M. T. A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 149–159, 2016.

SANTOS, T. A. C. E. **Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para as Melhorar Propriedades de Concretos de Alto Desempenho**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-02A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145p. CESSÃO, 2016.

SCHAPERLY, R. A.; PARK, S. W. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part II—an approximate analytical method. **International Journal of Solids and Structures**, v. 36, n. 11, p. 1677–1699, 1999.

SCHINDLER, A. K. Effect of temperature on hydration of cementitious materials. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 101, p. 72–81, 2004.

SCHUTTER, G. DE. Degree of hydration based Kelvin model for the basic creep of early age concrete. **Materials and Structures**, v. 32, n. May, p. 260–265, 1999.

SCHWARZL, F. R.; STRUIK, L. C. E. Analysis of relaxation measurements. **Advances in Molecular Relaxation Processes**, v. 1, n. 3, p. 201–255, 1968.

SILVA JUNIOR, P. F. **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com a adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD 005A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universisde de Brasília, Brasília, DF, 345 p., 2017.

SONG, C.; JUN, L. Mesoscopic numerical simulation of the mechanical properties of concrete creep. **Journal of Vibroengineering**, v. 15, n. 4, p. 1634–1641, 2013.

SOUICI, A.; TEHAMI, M.; RAHAL, N.; BEKKOUCHE, M. S.; BERTHET, J. F. Creep Effect on Composite Beam with Perfect Steel-concrete Connection. **International Journal of Steel Structures**, v. 15, n. 2, p. 433–445, 2015.

STROEVEN, M.; STROEVEN, P. SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1299–1304, 1999.

STROEVEN, P.; HE, H.; GUO, Z.; STROEVEN, M. Particle packing in a model concrete at different levels of the microstructure: Evidence of an intrinsic patchy nature. **Materials Characterization**, v. 60, n. 10, p. 1088–1092, 2009.

STROEVEN, P.; STROEVEN, M. Reconstructions by SPACE of the Interfacial Transition Zone. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 2–3, p. 189–200, 2001.

SWAMY, R. N. Dynamic Poisson's Ratio of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 1, p. 559–583, 1971.

TONG, T.; LIU, Z.; ZHANG, J.; YU, Q. Long-term performance of prestressed concrete bridges under the intertwined effects of concrete damage, static creep and traffic-induced cyclic creep. **Engineering Structures**, v. 127, p. 510–524, 2016.

TRIVEDI, N.; SINGH, R. K. Assessment of in-situ concrete creep: Cylindrical specimen and prototype nuclear containment structure. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 16–25, 2014.

ULM, F.-J.; COUSSY, O. Modeling of Thermochemomechanical Couplings of Concrete at Early Ages. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 121, n. July, p. 785–794, 1995.

VOLTERRA, V. Sur les équations intégro-différentielles et leurs applications. **Acta Mathematica**, v. 35, p. 295–356, 1912.

WANG, J.; XU, J.; GAO, D. Numerical relationship between creep deformation coefficients of prestressed concrete beams. **Materials and Structures**, v. 49, p. 1443–1453, 2016.

WANG, Y.; CHUNG, D. D. L. Effects of sand and silica fume on the vibration damping behavior of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 10, p. 1353–1356, 1998.

WANG, Z. M.; KWAN, A. K. H.; CHAN, H. C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh. **Computers & Structures**, v. 70, p. 533–544, 1999.

WILLIAMS, M. L.; FERRY, J. D. Dynamic Mechanical Properties of Polymethyl Acrylate. **Journal of Colloid Science**, v. 10, n. 5, p. 474–481, 1955.

WU, M.; QIN, C.; ZHANG, C. High Strain Rate Splitting Tensile Tests of Concrete and Numerical Simulation by Mesoscale Particle Elements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 1, p. 71–82, 2014.

XU, R.; YANG, X. H.; YIN, A. Y.; YANG, S. F.; YE, Y. A three-dimensional aggregate generation and packing algorithm for modeling asphalt mixture with graded aggregates. **Journal of Mechanics**, v. 26, n. 2, p. 165–171, 2010.

ZHANG, H.; YUAN, L.; REN, D. Dynamic Mechanical Analysis of CRTS II Cement Asphalt Mortar. **Applied Mechanics and Materials**, v. 586, p. 1646–1651, 2014.

ZHANG, Z.; WANG, P.; WU, J. Dynamic Mechanical Properties of EVA Polymer-Modified Cement Paste at Early Age. **Physics Procedia**, v. 25, p. 305–310, 2012.

ZHUANG, Y.; CHEN, C.; JI, T. Effect of shale ceramsite type on the tensile creep of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 13–18, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A Teste de convergência no programa ANSYS

O teste de convergência é feito para a simulação do concreto com os dados da mistura A035 com brita de módulo de elasticidade $E = 28 \text{ GPa}$.

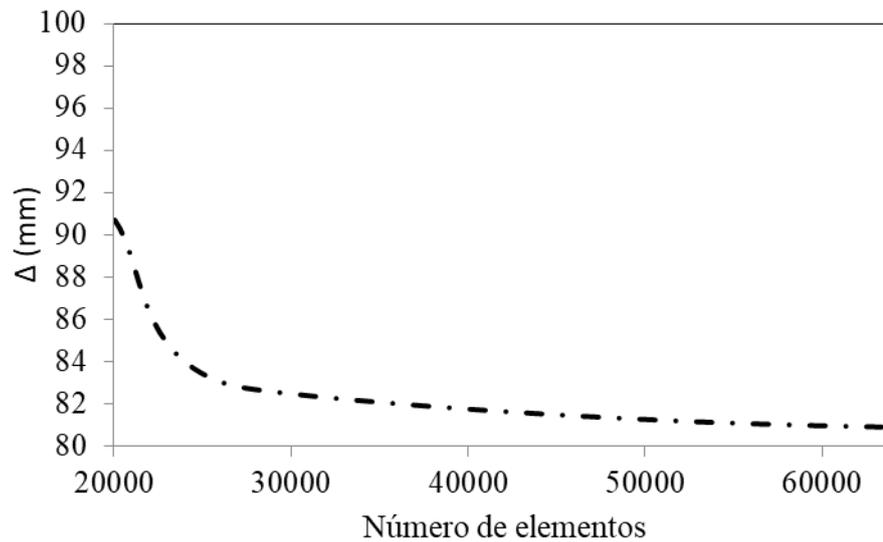


Figura A. 1 – Teste de convergência para a simulação do concreto

Na Figura A. 1, nota-se uma tendência dos deslocamento ao valor $\Delta = 81 \text{ mm}$ no topo do corpo de prova em $t - t' = 115$ dias tendo um número de elementos de 62568. Assim, esse valor é utilizado nas outras simulações do concreto.

APÊNDICE B Validação da análise numérica

Aqui são mostradas as comparações numéricas e experimentais dos deslocamentos de um cilindro de argamassa asfáltica, com e sem agregados. Os dados experimentais foram obtidos por GARCÍA (2017) com os modelos abaixo, sendo que as esferas de 12 mm de diâmetro são de aço. O programa de elementos finitos Ansys é utilizado para as soluções numéricas.

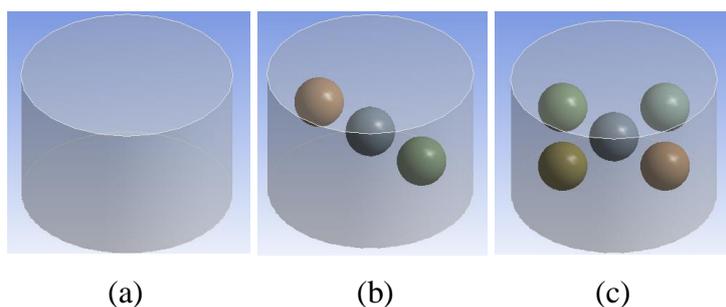


Figura B. 1 – Corpos de prova de argamassa asfáltica: (a) sem esferas de aço; (b) com 3 esferas; (c) com 5 esferas

A análise viscoelástica é realizada através das propriedades em série de Prony obtidas por GARCÍA (2017), sendo viscoelástica para a argamassa asfáltica (Tabela B. 1) com $\nu = 0,4$ e elástica para o aço com $E = 210 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,3$. O carregamento aplicado consiste em 50 KPa nos primeiros 10 s e 100 KPa até 3600 s . Os tempos de relaxação serão de $1, 10, 100$ e 1000 segundos.

Tabela B. 1 – Valores de relaxação da argamassa asfáltica (GARCÍA, 2017)

E_{∞}	E_1	E_2	E_3	E_4	Unidade
14,81	74,41	25,76	14,12	6,68	MPa

As simulações numéricas do cilindro com as esferas são feitas com a utilização de elementos de contato na interface dos corpos. Com isso, estes são considerados aderidos um no outro, “*bonded*”. Logo abaixo são mostrados os resultados obtidos.

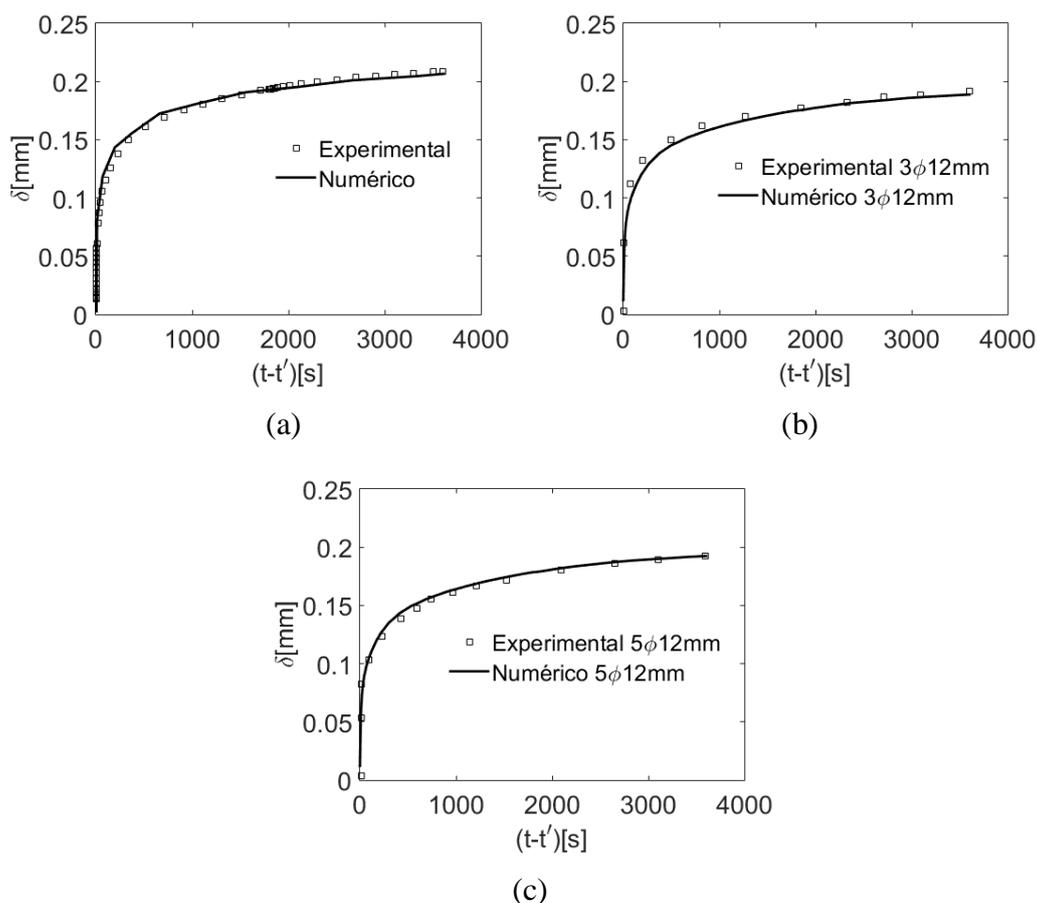


Figura B. 2 – Comparação numérico-experimental dos deslocamentos da argamassa asfáltica: (a) sem esferas; (b) com 3 esferas; (c) com 5 esferas

A comparação entre os deslocamentos experimentais e numéricos se mostra satisfatória. Sendo que para um tempo de 3600 s tem-se uma diferença de 1,2% (Figura B. 2a), 1,52% (Figura B. 2b) e 0,018% (Figura B. 2c) nas soluções. Isso mostra que a modelagem numérica é adequada para resolução de modelos viscoelásticos. Apesar do material ser diferente, a análise é empregada em materiais cimentícios, sendo que a diferença reside no fato de materiais asfálticos terem uma parcela mais viscosa e com isso há uma mudança nos tempos de relaxação que no concreto pode ser dado em dias ou anos.

A simulação do concreto é feita com a mistura REF 0,367 de Silva Junior (2017). A metodologia de ensaio da tese foi empregada para obter as propriedades de pasta e argamassa. Nesse caso foi feita apenas para a idade de 1 dia, com a relação $a/c =$

0,367 e as mesmas proporções dos outros materiais de acordo com o RILEM (2012).

Os resultados são apresentados:

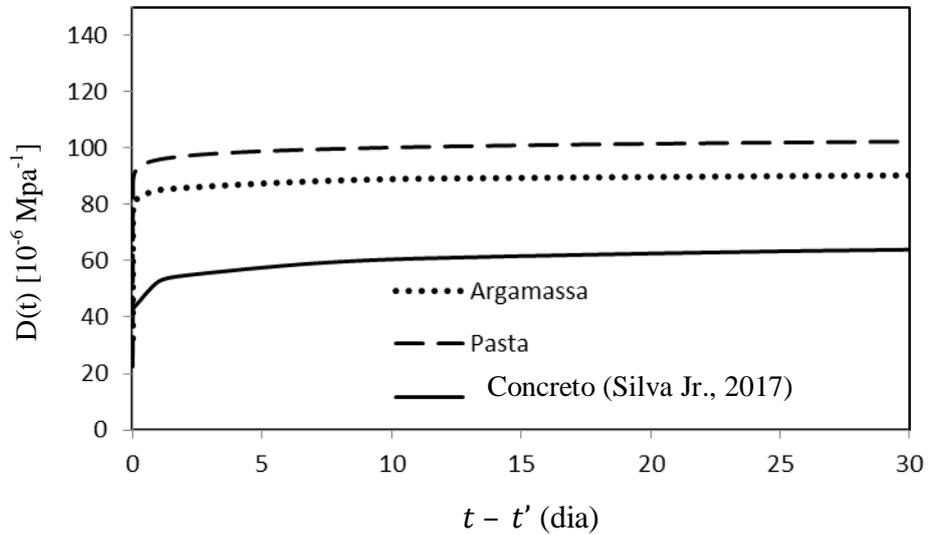


Figura B. 3 – Resultados a 1 dia de pasta argamassa obtidos de ensaios DMAs e do concreto para a mistura REF 0,367

A Figura B. 3 mostra os resultados de $D(t)$ para pasta, argamassa e concreto a 1 dia da mistura REF 0,367. As propriedades de pasta e argamassa foram obtidas por meio de ensaios DMAs e do concreto por Silva Junior (2017). Assim, são adotados dois valores de módulo de elasticidade para a brita, sendo $E = 28 \text{ GPa}$ e $E = 45 \text{ GPa}$.

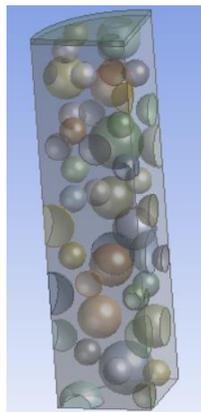


Figura B. 4 – Modelo de simulação do concreto composto de argamassa e agregado

A simulação realizada no programa de elementos finitos Ansys fornece os resultados de concreto que são utilizados na comparação com os resultados de Silva Junior (2017). Os resultados para os dois valores de E estão ilustrados na Figura B. 5.

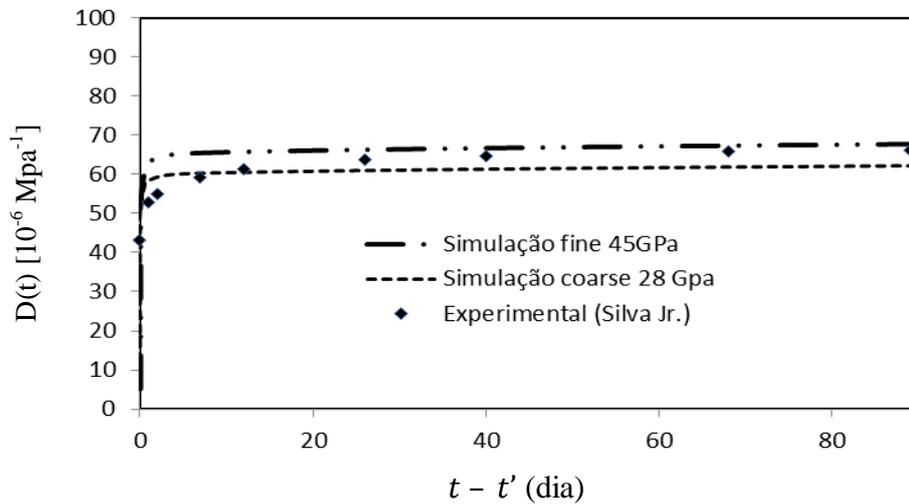


Figura B. 5 – Resultados da simulação do concreto REF 0,367 com diferentes E da brita

A Figura B. 5 apresenta o resultado com dois valores de E , sendo que tanto o $E = 28 \text{ GPa}$ quanto $E = 45 \text{ GPa}$ fornecem bons resultados. Nota-se que até 10 dias de idade simulação com $E = 28 \text{ GPa}$ apresenta bons resultados, diferente de $E = 45 \text{ GPa}$ que tem diferenças significativas. Por outro lado de $E = 45 \text{ GPa}$ mostra uma melhor aproximação a partir dos 10 dias. Assim, o valor de $E = 28 \text{ GPa}$ é adotado para as simulações, sendo as diferenças mostradas por meio de uma função na Figura B. 6.

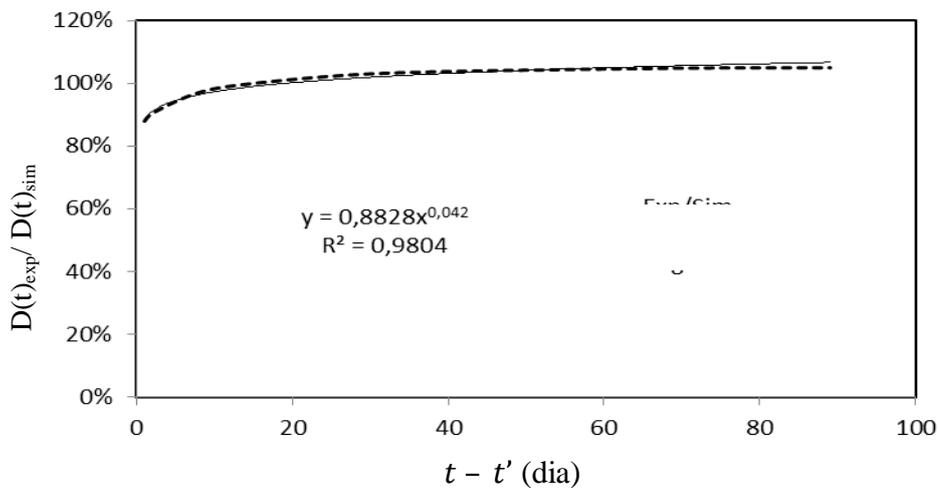


Figura B. 6 – Relação entre a simulação e o experimental do concreto REF 0,367

APÊNDICE C Resultados experimentais

Tabela C. 1 – Resistência à compressão das misturas em diferentes idades

Idade (dia)	Amostra	f_c (MPa)					
		Pasta			Argamassa		
		A030	P035	P042	A035	A0367	A038
1	I	48,00	-	7,90	31,65	18,61	31,52
	II	39,90	-	3,87	29,53	20,62	30,03
	III	47,69	-	2,70	30,02	19,01	32,50
	IV	51,82	-	4,28	30,04	18,07	30,87
	Média	46,85	-	4,69	30,31	19,08	31,23
	Desvio padrão	4,33	-	1,94	0,80	0,95	0,90
3	I	70,80	52,07	-	32,31	27,95	-
	II	75,90	53,16	-	27,31	19,17	-
	III	77,93	51,47	-	33,01	28,87	-
	IV	-	-	-	33,23	29,65	-
	Média	74,88	52,23		31,47	26,41	-
	Desvio padrão	3,00	0,70		2,42	4,22	-
7	I	69,50	82,12	-	91,03	35,89	-
	II	101,20	82,18	-	90,20	34,56	-
	III	85,90	79,19	-	92,67	36,57	-
	IV	-	-	-			-
	Média	85,53	81,16		91,30	35,67	51,00
	Desvio padrão	12,94	1,40		1,03	0,83	-
14	I	-		28,89	-	-	-
	II	-		29,76	-	-	-
	III	-		25,07	-	-	-
	IV	-		18,29	-	-	-
	Média	-		25,50	-	-	-
	Desvio padrão	-		4,52	-	-	-
28	I	91,82	79,69	34,75			-
	II	83,67	80,45	37,78			-
	III	102,42	81,26	27,34			-
	IV	102,00	-	27,44			-
	Média	94,98	80,47	31,83			65
	Desvio padrão	7,79	0,64	4,57			-

Tabela C. 2 – Módulo de elasticidade das misturas em diferentes idades

Idade (dia)	Amostra	E (Gpa)					
		P030	P035	P042	A035	A367	A38
1	I	10,78	-	6,88	25,90	10,80	20,60
	II	11,77	-	8,23	23,50	11,70	22,10
	III	11,54	-	6,29	24,47	12,05	21,56
	Média	11,36	-	7,13	24,62	11,52	21,42
	Desvio padrão	0,42	-	0,81	0,99	0,53	0,62
3	I	19,40	23,55	-	36,70	35,90	-
	II	20,65	19,09	-	37,60	36,90	-
	III	20,08	14,28	-	42,40	43,30	-
	Média	20,04	18,97	-	38,90	38,70	-
	Desvio padrão	0,51	3,79	-	2,50	3,28	-
7	I	21,67	19,99	10,05	40,90	39,20	
	II	21,37	19,36	18,99	41,26	40,10	
	III	21,37	19,29	13,05	39,98	38,72	
	Média	21,47	19,55	14,03	40,71	39,34	
	Desvio padrão	0,14	0,31	3,71	0,54	0,57	
14	I	22,84					
	II	23,02					
	III	-					
	Média	22,93					
	Desvio padrão	0,09					
28	I	25,35	20,20	21,41			36,00
	II	24,24	22,30	19,56			38,20
	III	25,78	22,41	-			34,20
	Média	25,12	21,64	20,49			36,13
	Desvio padrão	0,65	1,02	0,93			1,64

Tabela C. 3 – Módulos G' e G'' da mistura P030 a 1 dia

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	5103,50	79,99	0,90	5116,70	120,06	1,34
1	5003,90	82,80	0,95	4933,20	89,31	1,04
0,1	4748,30	82,09	0,99	4771,90	117,45	1,41
0,017	4819,40	124,21	1,48	4775,40	141,68	1,70
0,0017	4799,70	219,87	2,62	4709,80	277,00	3,37
0,000278	4858,70	349,90	4,12	4597,70	336,19	4,18

Tabela C. 4 – Módulos G' e G'' da mistura P030 a 7 dias

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	7662,50	127,89	0,96	6990,30	117,13	0,96
1	7488,90	133,20	1,02	6848,10	142,34	1,19
0,1	7246,10	181,76	1,44	6641,10	203,70	1,76
0,017	7021,30	296,54	2,42	6499,30	276,94	2,44
0,0017	6575,90	415,80	3,62	6105,50	390,12	3,66
0,000278	5907,20	471,14	4,56	6032,57	467,23	4,43

Tabela C. 5 – Módulos G' e G'' da mistura P030 a 28 dias

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	10532,00	198,47	1,08	10812,00	119,12	0,63
1	9945,90	320,12	1,84	10662,00	256,87	1,38
0,1	9933,11	422,00	2,43	10444,00	318,29	1,75
0,017	9731,02	521,99	3,07	10313,00	418,98	2,33
0,0017	9474,55	688,11	4,16	9924,50	656,36	3,79
0,000278	8949,80	855,12	5,46	9840,96	675,55	3,93

Tabela C. 6 – Módulos G' e G'' da mistura P042 a 1 dia

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	3232,41	66,83	1,18	3393,10	39,67	0,67
1	3159,53	67,05	1,22	3336,80	45,94	0,79
0,1	3107,34	79,67	1,47	3267,80	56,45	0,99
0,017	3055,36	110,30	2,07	3226,70	79,84	1,42
0,0017	2997,83	296,12	5,64	3182,90	138,58	2,49
0,000278	2557,45	306,86	6,85	3134,20	154,02	2,81

Tabela C. 7 – Módulos G' e G'' da mistura P042 a 7 dias

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	5032,20	76,33	0,87	4250,00	60,90	0,82
1	4959,60	102,12	1,18	4151,00	71,16	0,98
0,1	4801,20	125,39	1,50	4077,60	92,19	1,30
0,017	4600,20	200,15	2,49	3986,40	135,89	1,95
0,0017	4269,80	355,23	4,76	3733,80	291,88	4,47
0,000278	3825,80	410,81	6,13	3494,70	317,87	5,20

Tabela C. 8 – Módulos G' e G'' da mistura P042 a 28 dias

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	6548,10	70,19	0,61	5589,40	68,73	0,70
1	6459,80	108,61	0,96	5483,30	96,01	1,00
0,1	6218,00	144,61	1,33	5266,50	153,81	1,67
0,017	6023,20	188,92	1,80	5153,80	222,72	2,47
0,0017	5704,20	471,47	4,72	4701,90	465,88	5,66
0,000278	5596,50	542,49	5,54	4133,00	437,46	6,04

Tabela C. 9 – Módulos G' e G'' da mistura P035 a 1 dia

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	3972,00	114,83	1,66	3131,70	99,18	1,81
1	3898,20	104,60	1,54	3073,30	108,02	2,01
0,1	3844,00	139,66	2,08	3041,90	135,65	2,55
0,017	3850,00	174,62	2,60	3092,20	181,59	3,36
0,0017	3793,58	189,61	2,86	2917,60	197,16	3,87
0,000278	3761,43	210,61	3,21	2844,65	227,06	4,57

Tabela C. 10 – Módulos G' e G'' da mistura P035 a 3 dias

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	5246,41	77,80	0,85	5960,44	149,97	1,44
1	5147,20	95,19	1,06	5807,80	195,15	1,93
0,1	5011,47	111,92	1,28	5655,16	240,33	2,43
0,017	4967,54	157,77	1,82	5537,69	275,09	2,85
0,0017	4855,07	187,69	2,21	5385,05	320,27	3,41
0,000278	4777,46	227,00	2,72	5265,01	355,80	3,87

Tabela C. 11 – Módulos G' e G'' da mistura P035 a 7 dias

f(Hz)	G'	G''	δ	G'	G''	δ
10	7828,18	153,02	1,12	5150,77	75,48	0,84
1	7717,13	158,27	1,17	5098,78	138,51	1,56
0,1	7520,54	240,16	1,83	5011,46	140,20	1,60
0,017	7204,97	268,10	2,13	4714,96	180,03	2,19
0,0017	7126,09	335,97	2,70	4449,52	220,15	2,83
0,000278	6982,86	401,21	3,29	4394,99	252,00	3,28

Tabela C. 12 – Módulos G' e G'' da mistura A035 a 1 dia

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	8970,33	213,96	1,37	8235,80	225,83	1,57
1	8796,47	284,01	1,85	7950,71	264,72	1,91
0,1	8625,98	376,99	2,50	7675,48	310,30	2,32
0,017	8497,03	468,80	3,16	7470,19	350,66	2,69
0,0017	8332,34	622,29	4,27	7211,60	502,75	3,99
0,000278	8205,08	777,53	5,42	7014,55	613,03	5,00

Tabela C. 13 – Módulos G' e G'' da mistura A035 a 3 dias

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	16147,51	194,37	0,69	17600,26	205,70	0,67
1	15938,47	191,86	0,69	17435,05	203,77	0,67
0,1	15493,29	283,82	1,05	17319,39	305,13	1,01
0,017	15469,77	342,78	1,27	17172,65	410,37	1,37
0,0017	15208,20	464,42	1,75	17056,08	612,79	2,06
0,000278	14994,79	538,75	2,06	16940,74	718,81	2,43

Tabela C. 14 – Módulos G' e G'' da mistura A035 a 7 dias

f(Hz)	G'	G''	δ	G'	G''	δ
10	18640	347,66	1,07	16613	172,51	0,59
1	17945	338,54	1,08	16539	276,71	0,96

Tabela C. 15 – Módulos G' e G'' da mistura A038 a 1 dia

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	6472,86	72,91	0,65	5198,10	75,87	0,84
1	6071,60	124,63	1,18	5066,10	132,30	1,50
0,1	5968,80	182,97	1,76	4981,00	175,31	2,02
0,017	5740,90	301,00	3,00	4865,90	321,34	3,78
0,0017	5438,00	490,73	5,16	4706,30	411,15	5,00
0,000278	5148,10	580,83	6,44	4688,00	446,39	5,44

Tabela C. 16 – Módulos G' e G'' da mistura A038 a 3 dias

f(Hz)	G'	G''	δ [°]	G'	G''	δ [°]
10	7131,51	65,05	0,52	5073,15	72,08	0,81
1	6753,30	126,87	1,08	5131,20	82,45	0,92
0,1	6580,90	145,62	1,27	5002,30	153,02	1,75
0,017	6432,10	297,05	2,65	4806,40	288,56	3,44
0,0017	6223,40	448,21	4,12	4497,10	345,28	4,39
0,000278	5764,50	595,86	5,90	4653,70	414,39	5,09

Tabela C. 17 – Módulos G' e G'' da mistura A038 a 21 dias

f(Hz)	G'	G''	δ	G'	G''	δ
10	6425,43	276,13	2,46	7402,97	79,38	0,61
1	6094,60	283,74	2,67	7133,00	107,89	0,87

APÊNDICE D Regressões dos resultados experimentais utilizados

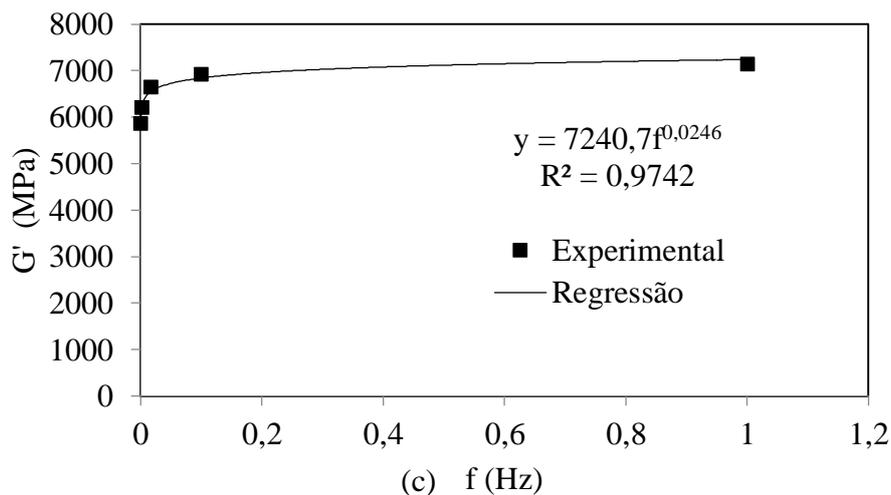
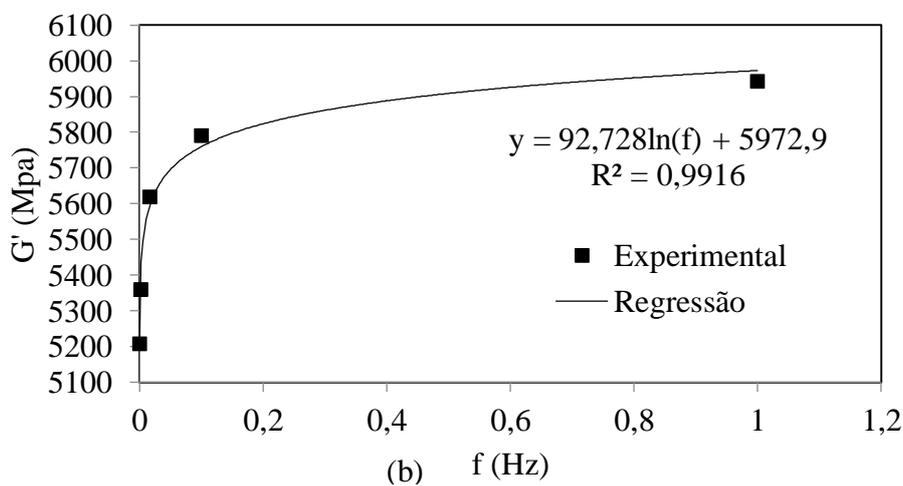
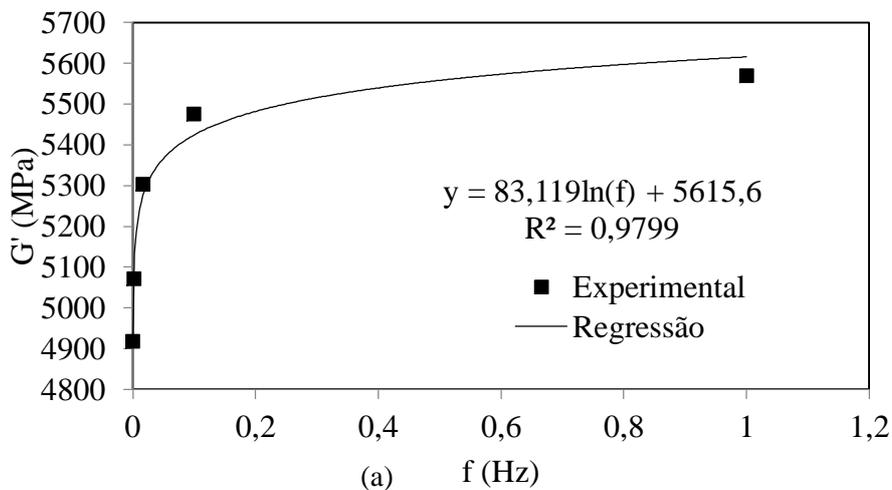


Figura D. 1 – Linha de tendência da média da mistura A038 em t' de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 21 dias

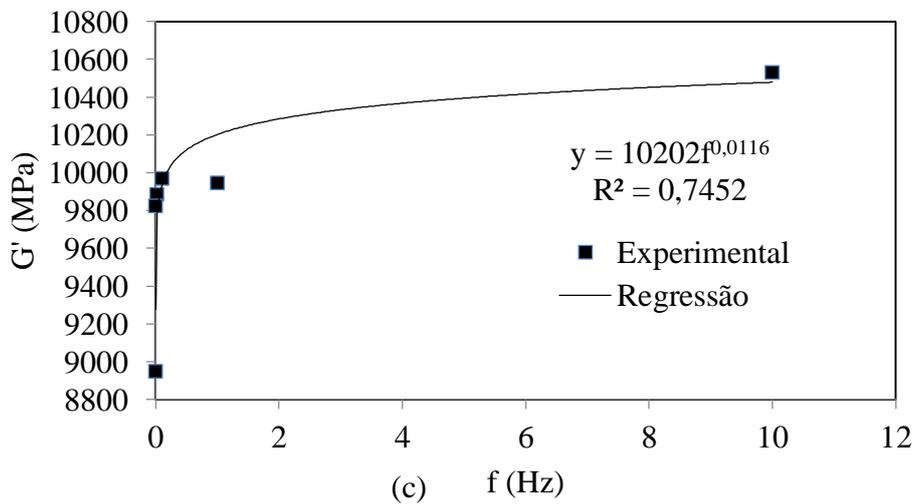
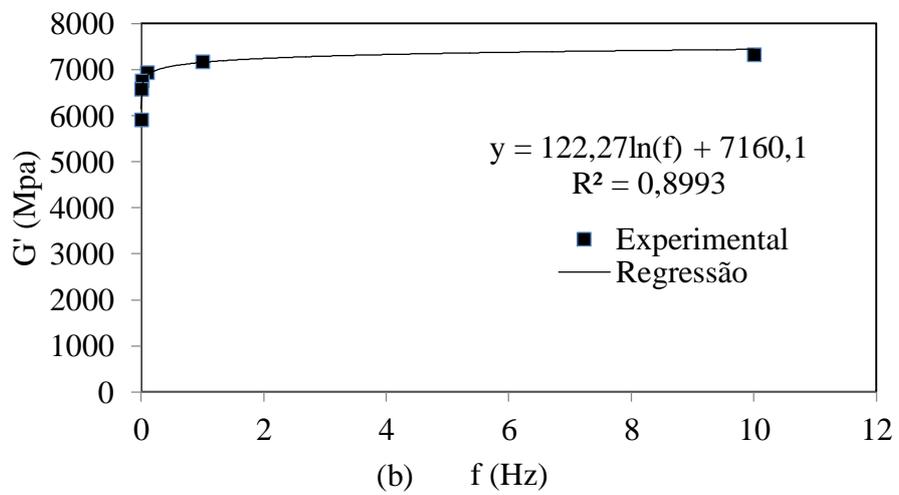
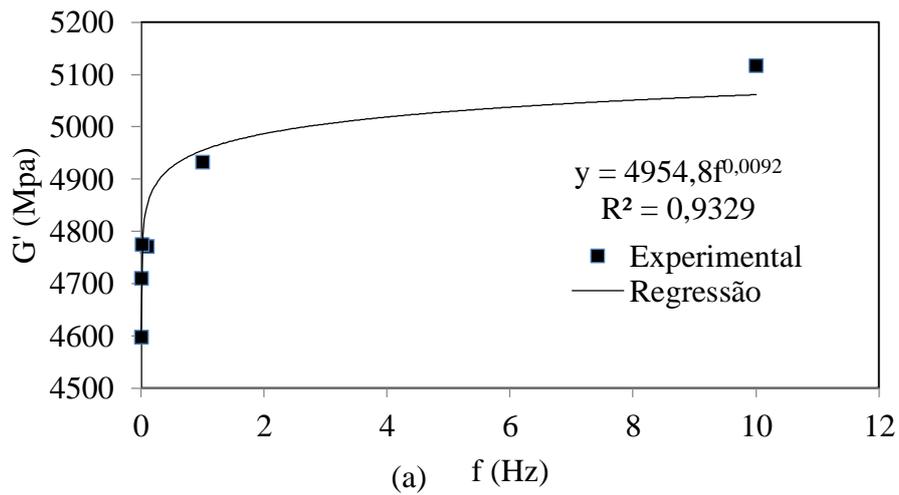


Figura D. 2 – Linha de tendência da média da mistura P030 em t' de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias

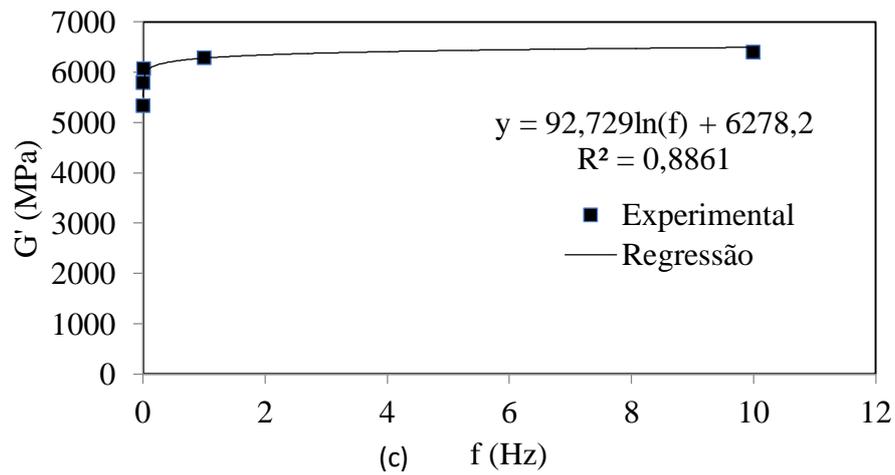
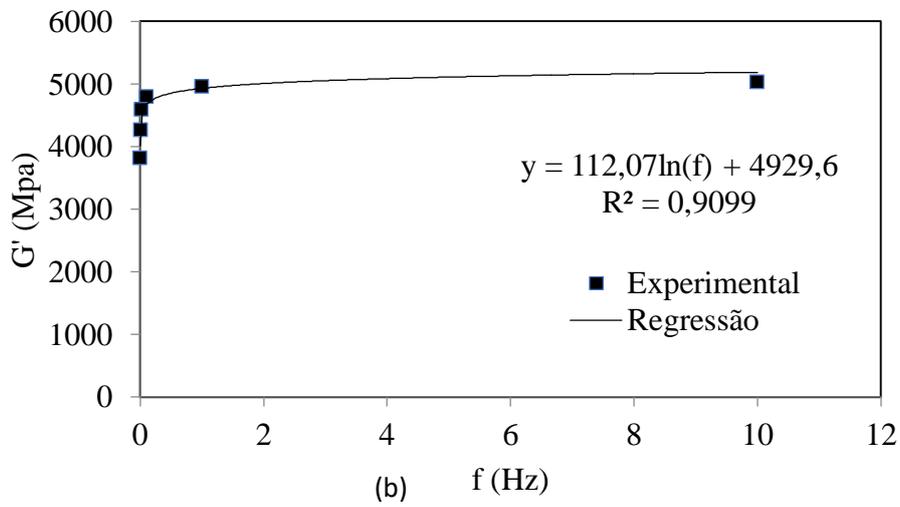
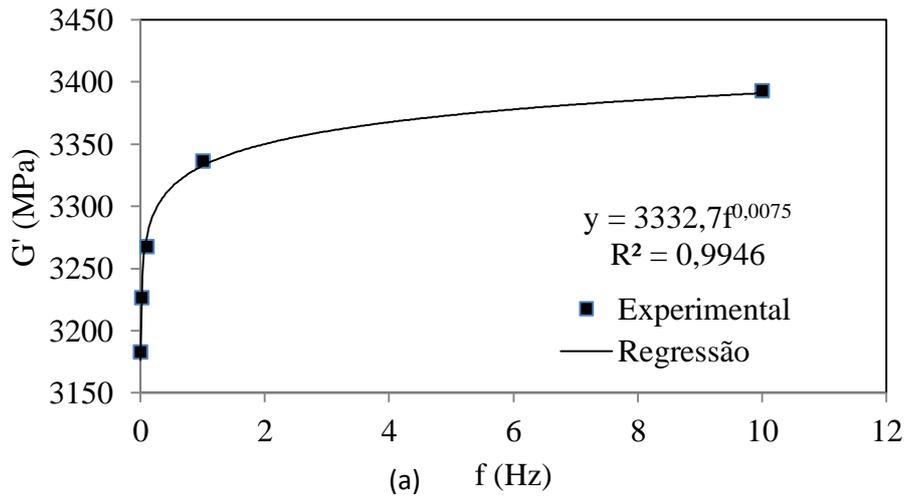


Figura D. 3 – Linha de tendência da amostra utilizada da mistura P042 em t' de: (a) 1 dia; (b) 7 dias; (c) 28 dias

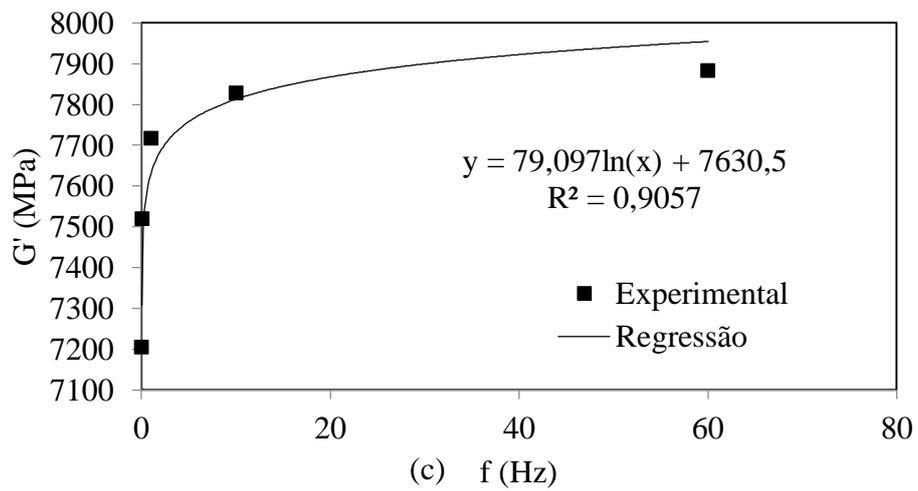
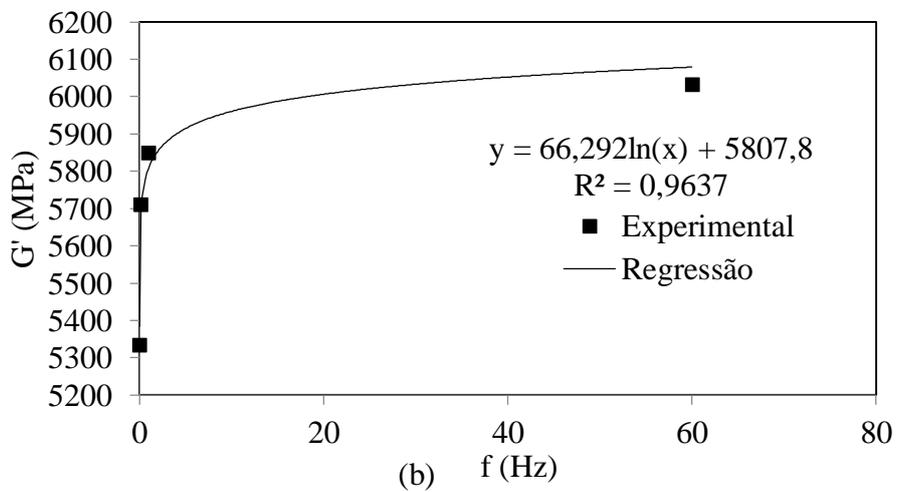
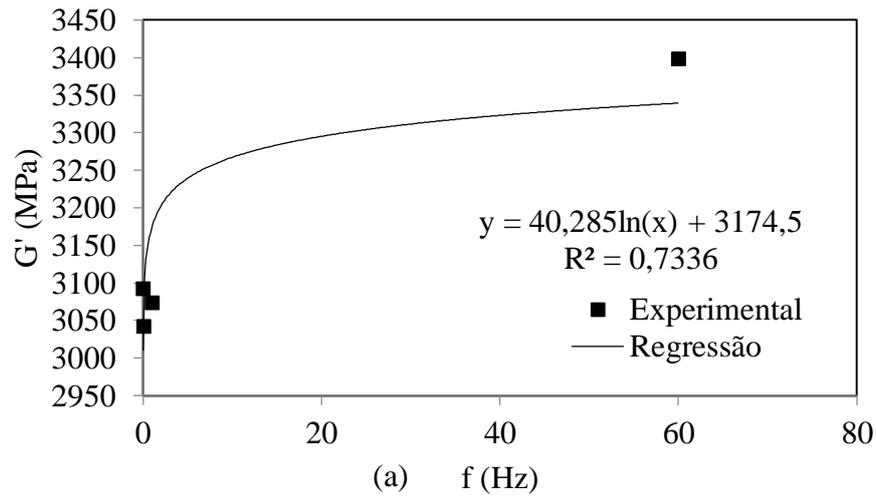
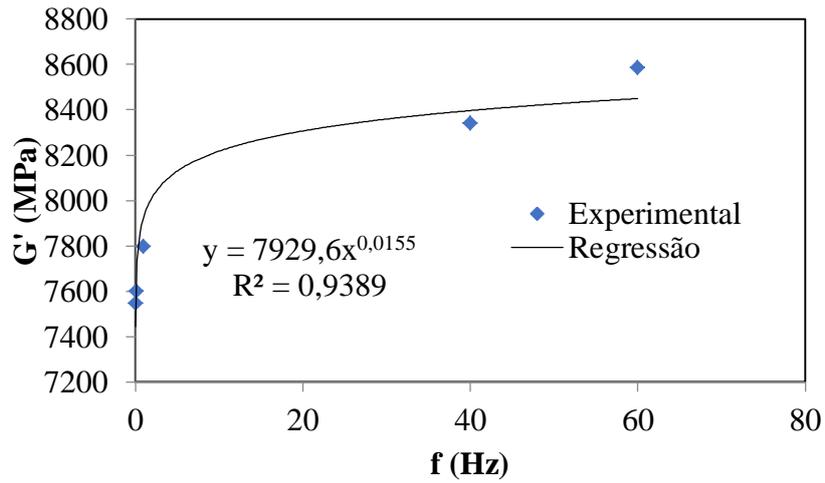
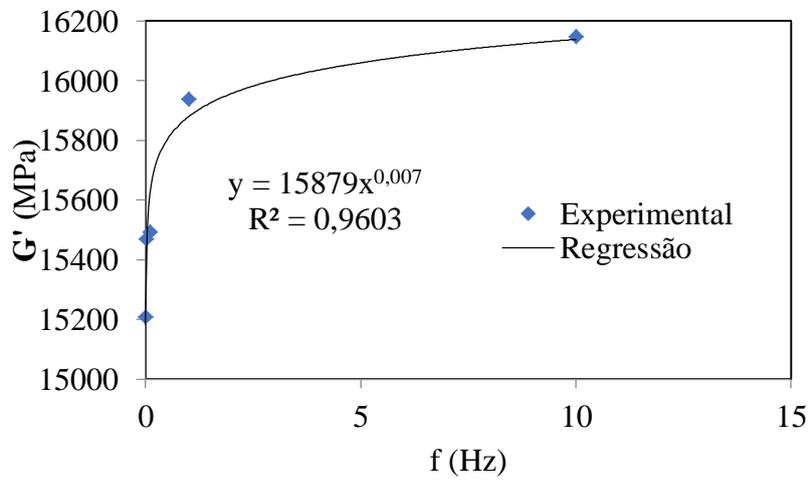


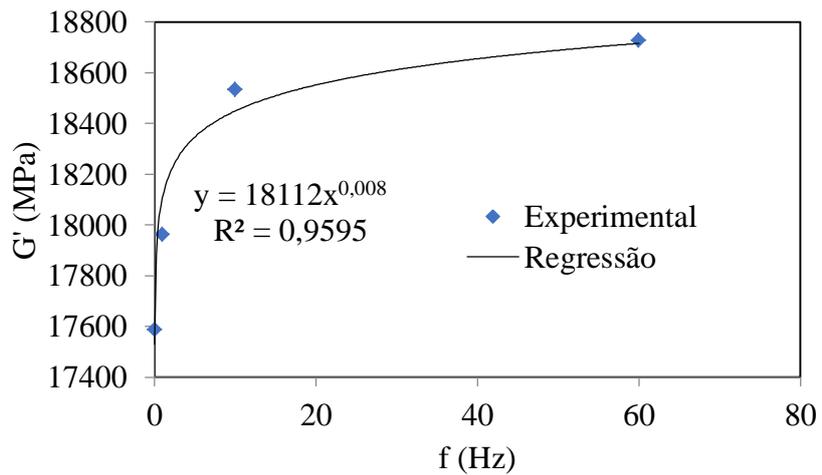
Figura D. 4 – Linha de tendência da amostra utilizada da mistura P035 em t' de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 7 dias



(a)



(b)



(c)

Figura D. 5 – Linha de tendência da amostra utilizada da mistura A035 em t' de: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 7 dias