

**EFEITO DO POLÍMERO SUPER ABSORVENTE E DE NANO
PARTÍCULAS DE SÍLICA NA VISCOELASTICIDADE E
RETRAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMO UMA
RESPOSTA POROVISCOELÁSTICA**

PAULO FRANCISCO DE OLIVEIRA REIS

**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

**EFEITO DO POLÍMERO SUPER ABSORVENTE E DE NANO
PARTÍCULAS DE SÍLICA NA VISCOELASTICIDADE E RETRAÇÃO
DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMO UMA RESPOSTA
POROVISCOELÁSTICA**

PAULO FRANCISCO DE OLIVEIRA REIS

ORIENTADORA: Eugênia Fonseca da Silva

COORIENTADOR: Francisco Evangelista Junior

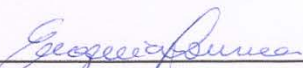
TESE DE DOUTORADO
EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**EFEITO DO POLÍMERO SUPER ABSORVENTE E DE NANO
PARTÍCULAS DE SÍLICA NA VISCOELASTICIDADE E RETRAÇÃO
DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMO UMA RESPOSTA
POROVISCOELÁSTICA**

PAULO FRANCISCO DE OLIVEIRA REIS

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.

APROVADO POR:



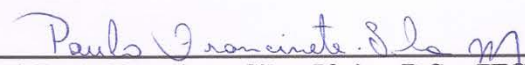
Prof. Eugenia Fonseca da Silva, D.Sc. (ENC/UnB)
(Orientadora)



Prof. Francisco Evangelista Junior, D.Sc. (ENC/UnB)
(Coorientador)



Prof. Valdirene Maria Silva Capuzzo, D.Sc. (ENC/UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Paulo Francinete Silva Júnior, D.Sc. (IFG)
(Examinador Externo1)



Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, D.Sc.(COPPE/URFJ)
(Examinador Externo2)

BRASÍLIA/DF, 12 DE AGOSTO DE 2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

FR375e	Francisco de Oliveira Reis, Paulo Efeito do polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica na viscoelasticidade e retração de materiais cimentícios como uma resposta poroviscoelástica / Paulo Francisco de Oliveira Reis; orientador Eugênia Fonseca da Silva; co-orientador Francisco Evangelista Júnior. -- Brasília, 2019. 192 p. Tese (Doutorado - Doutorado em Estruturas e Construção Civil) -- Universidade de Brasília, 2019. 1. Poroviscoelasticidade. 2. Retração. 3. Materiais Cimentícios. 4. Nano partículas de sílica. 5. Polímero superabsorvente. I. Fonseca da Silva, Eugênia, orient. II. Evangelista Júnior, Francisco, co-orient. III. Título.
--------	---

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REIS, P. F. O. (2019). Efeito do polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica na viscoelasticidade e retração de materiais cimentícios como uma resposta poroviscoelástica. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD 008A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 195p.

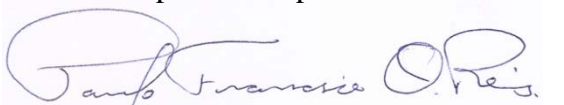
CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Francisco de Oliveira Reis

TÍTULO: Efeito do polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica na viscoelasticidade e retração de materiais cimentícios como uma resposta poroviscoelástica.

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.



Paulo Francisco de Oliveira Reis
Rua das Pitangueiras, Lote 07, Ap. 906
CEP 71938-540 -A. Claras, Brasília- DF- Brasil.

Email: pforeis@gmail.com

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, a professora Eugênia Fonseca da Silva, pelo apoio, pela dedicação, pela paciência e pela orientação para o bom desenvolvimento desta tese. Obrigado por ter sido amiga e conselheira.

Ao meu coorientador Francisco Evangelista Júnior, pela escolha do tema, pela ajuda incondicional e pelas suas recomendações.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM), por me permitir desenvolver o meu trabalho nas suas instalações.

Ao Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB), na pessoa do professor Márcio Muniz, pela realização dos ensaios DSR.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF), pelo apoio financeiro.

À minha esposa Suelene Dias e Silva Reis e aos meus filhos Henri Silva de Oliveira Reis e Breno Silva de Oliveira, pelo incentivo e compreensão.

RESUMO

EFEITO DO POLÍMERO SUPER ABSORVENTE E DE NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA NA VISCOELASTICIDADE E RETRAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COMO UMA RESPOSTA POROVISCOELÁSTICA

Autor: Paulo Francisco de Oliveira Reis

Orientador: Eugenia Fonseca da Silva

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília/DF, Agosto de 2019.

Esta pesquisa tem como propósito investigar a viscoelasticidade e a retração em materiais cimentícios de alta resistência contendo polímero superabsorvente (SAP) e nano partículas de sílica (NS) com abordagem poroviscoelástica. Existem diversos estudos na literatura que mostram a influência destes materiais na microestrutura da matriz cimentícia. Entretanto, ainda existem lacunas a serem esclarecidas sobre os efeitos do SAP e da NS no comportamento viscoelástico e da retração. Neste estudo serão avaliadas cinco misturas de pastas de cimento endurecida com relações a/c de 0,30 e 0,35 nas idades de 3, 7 e 28 dias e cinco concretos com teores de nano sílica e polímeros semelhantes aos das pastas. Considerou-se na metodologia o histórico de perda de massa no tempo, a saturação, a concentração de íons, a porosidade, a difusividade e parâmetros constitutivos viscoelásticos como fluência e envelhecimento. Avaliou-se a previsão da retração por secagem e autógena por diferentes equações poroviscoelásticas. Os resultados obtidos experimentalmente indicam que o SAP eleva a porosidade, incrementa a profundidade de secagem, aumenta a saturação e a fluência nas primeiras idades, já nas misturas com nano partículas estes mesmos fenômenos apresentaram comportamentos opostos ao do polímero. Entretanto, nas misturas terciárias a contribuição das nano partículas foram pequenas diante dos efeitos provocados pelo SAP. Dentre as equações avaliadas, aquelas que levam em consideração a teoria da solidificação para explicar o envelhecimento apresentaram valores da retração por secagem similares às medições de laboratório, porém para a retração autógena elas foram incapazes de prever de maneira eficaz os dados medidos. Este estudo sugere referências sobre a influência do SAP e da NS nas deformações ao longo do tempo, visto que são dados necessários para dimensionamento de estruturas de concreto.

Palavras-chave: Poroviscoelasticidade. Retração. Materiais cimentícios. Nano particulares de sílica. Polímero superabsorvente.

ABSTRACT

EFFECT OF SUPER ABSORBENT POLYMER AND NANO PARTICLES OF SILICA ON VISCOELASTICITY AND SHRINKAGE OF CEMENTITIOUS MATERIALS AS A POROVISCOELASTIC RESPONSE

Author: Paulo Francisco de Oliveira Reis

Advisor: Eugênia Fonseca da Silva

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília/DF, August of 2019.

This research aims to investigate viscoelasticity and shrinkage in high strength cementitious materials containing superabsorbent polymer (SAP) and nano silica (NS) particles with poroviscoelastic approach. There are several studies in the literature that show the influence of these materials on the microstructure of the cementitious matrix. However, there are still gaps to be clarified about the effects of SAP and NS on viscoelastic and retraction behavior. In this study will be evaluated five mixtures of hardened cement pastes with w/c ratios of 0,30 and 0,35 at the ages of 3, 7 and 28 days and five concretes with nano silica contents and polymers similar to those of pastes. It was considered in the methodology the history of mass loss in time, saturation, ion concentration, porosity, diffusivity and viscoelastic constitutive parameters such as creep and aging that are parameters of the poroviscoelastic approach. The prediction of drying and autogenous shrinkage were evaluated by different poroviscoelastic equations. Experimental results indicate that SAP increases porosity, increases drying depth, increases saturation and creep in early ages, in the mixtures with nano particles, these same phenomena presented opposite behaviors to the polymer. However, in the tertiary mixtures the contribution of the nano particles was small due to the effects caused by SAP. Among the equations evaluated, those that take into account the solidification theory to explain aging presented values of drying shrinkage similar to laboratory measurements, but for autogenous shrinkage they were unable to effectively predict the measured data. This study suggests references to the influence of SAP and NS in strain over time that are necessary data for design of concrete structures.

Keywords: Poroviscoelasticity. Shrinkage. Cementing Materials. Nano-silica. Superabsorbent Polymer.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ABRANGÊNCIA DA PESQUISA E SUA IMPORTÂNCIA	2
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 POROVISCOELASTICIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	5
2.2 MECANISMOS DA RETRAÇÃO	6
2.2.1 Variação da Depressão Capilar	7
2.2.2 Variação da Tensão Superficial	9
2.2.3 Pressão de disjunção	10
2.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM	10
2.3.1 Efeitos da Umidade Relativa e/ou Temperatura	11
2.3.2 Concentração de Íons na Solução dos Poros	12
2.3.3 Isotermas de Dessorção	14
2.4 RETRAÇÃO AUTÓGENA	15
2.4.1 Uso do Polímero Superabsorvente (SAP) como Agente de Cura Interna	17
2.5 NANO PARTÍCULAS DE SÍLCA	20
2.5.1 Uso Combinado da Nano Sílica (NS) e do Polímero Superabsorvente (SAP)	20

2.6 FATORES INTERVENIENTES NO TRANSPORTE DE UMIDADE	21
2.6.1 Porosidade (ϕ).....	22
2.6.2 Difusividade.....	24
2.7 FENÔMENOS DA VISCOELASTICIDADE.....	25
2.7.1 Principais Mecanismos Propostos para a Fluência Básica.....	26
2.7.2 Função de Fluência	27
2.7.3 Fatores que afetam a fluência.....	27
2.8 Modelos Clássicos para Previsão da Fluência.....	28
2.8.1 Modelo de Kelvin	29
2.8.2 Modelo de Maxwell	30
2.8.3 Ensaio Dinâmico no Domínio da Frequência para Determinação da Curva de Fluência	32
2.9 PROPRIEDADES CONSTITUTIVAS	37
2.9.1 Introdução	37
2.9.2 Envelhecimento	37
2.9.3 Abordagem Tempo Diferido (Time-Shift)	39
2.9.4 Teoria da Solidificação	40
2.9.5 Contabilização dos Efeitos da Teoria da Solidificação e do Tempo Diferido	40
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	41
3.1 Materiais.....	43

3.2	Produção das Pastas de Cimento.....	48
3.2.1	Procedimentos de Mistura.....	48
3.3	Ensaio.....	49
3.4	Preparação das Amostras	49
3.4.1	Porosidade.....	50
3.4.2	Perda de Massa	51
3.4.3	Retração por Secagem	53
3.4.4	Retração Autógena.....	54
3.4.5	Determinação da RH Interna	55
3.4.6	Ensaio de Fluência no Dinâmico da Frequência.....	56
3.4.7	Módulo de Elasticidade.....	57
3.5	Concentração de Íons nos Poros – Método de Taylor.....	58
3.5.1	Determinação das Concentrações Totais de Íons (<i>nldiss</i>).....	59
3.6	Determinação da Pressão Efetiva (<i>P_{ef}</i>).....	59
3.7	Determinação do Coeficiente de Difusão (<i>D</i>)	60
3.8	Função de Fluência (<i>J_s (t)</i>)	61
3.8.1	Interconversão entre Propriedades no Domínio do Tempo e da Frequência	63
3.8.2	Técnicas de Ajuste de Curva da Série de Prony	64
3.9	Parâmetros Viscoelásticos.....	66
3.9.1	Poromecânica para Meios Porosos Parcialmente Saturados	66

3.9.2 Envelhecimento em Materiais Cimentícios	67
3.9.3 Modelagem da Retração por Secagem Proposto por Grasley e Leung.....	69
3.10 Modelagem da Retração Autógena.....	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1 Propriedades Poroviscoelásticas da Estrutura Porosa	73
4.1.1 Porosidade (ϕ).....	73
4.1.2 Perda de Massa (Δm)	75
4.1.3 Isotermas de Dessorção.....	77
4.1.4 Efeito da Concentração de Íons na Pressão Capilar.....	80
4.1.5 Pressão Capilar Efetiva (P_{ef})	85
4.1.6 Coeficiente de Difusão (D)	87
4.1.7 Perfil de RH interna e profundidade de secagem	93
4.2 Propriedades Viscoelásticas.....	96
4.2.1 Comparação do Módulo de Deformação (E_{θ}) obtido experimentalmente com Dados do Ensaio DSR.....	96
4.2.2 Função de Fluência	97
4.2.3 Avaliação do Envelhecimento.....	99
4.3 Retração por Secagem (ε_s)	109
4.4 Análise Numérica Poroviscoelástica para Previsão da Retração Autógena.....	111
4.5 Análise Numérica Poroviscoelástica para Previsão da Retração por Secagem	115

5 CONCLUSÕES	125
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	128
REFERÊNCIAS.....	129
APÊNDICE A - EQUAÇÃO DE KELVIN-LAPLACE	139
APÊNDICE B - COEFICIENTE DE DIFUSÃO.....	145
ANEXO A - RESULTADOS DA PERDA DE MASSA	150
ANEXO B – RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIDADE.....	174
ANEXO C – ISOTERMAS DE DESSORÇÃO	176
ANEXO D – MÓDULOS DE ELASTICIDADE.....	181
ANEXO E - RESULTADOS DO ENSAIO DSR.....	183
ANEXO F – RH, SATURAÇÃO E PRESSÃO CAPILAR (Previsão da Retração Autógena)	188

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEB	Comité européen du béton
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta resistência inicial
DSR	Dynamic Shear Rheometer
EDX	Espectroscopia de Fluorescência de Raios
FIP	International Federation for Structural Concrete
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura Rodoviária
LEM/UNB	Laboratório de Ensaio em Materiais/ Universidade de Brasileira
NBR	Norma Brasileira
NEXUM	Numerical, Experimental and Uncertainty Mechanics
NS	nano partícula de sílica
RILEM	Réunion International des Laboratories D'Essais et Matériaux
SAP	Polímero superabsorvente
UNB	Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	relação água cimento
a/c_i	relação água cimento de cura interna
γ	tensão superficial
r	raio do poro
P_c	pressão capilar
P_d	pressão de disjunção
P_l	pressão do fluido
P_g	pressão de vapor
P_{avg}	pressão média no poro
P_{ef}	pressão efetiva
P_{sat}	pressão de saturação uma dada temperatura
RH	umidade relativa ambiente
RH_{int}	umidade relativa na estrutura porosa
$RH_{initial}$	umidade relativa inicial
RH_{bound}	umidade relativa final
ΔM	variação de massa
ΔU	variação de energia
ΔW	variação de trabalho
R	constante universal do gás
T	temperatura
v	volume molar da água
Na_2O	óxido de sódio
K_2O	óxido de potássio
\emptyset	porosidade
V_{vazios}	volume de vazios
V	volume do corpo de prova
M_{SSS}	massa na condição <i>SSS</i> (superfície seca saturada)
M_{OD}	massa após secagem em estufa
ρ	densidade de água
V_{SSS}	volume da amostra na condição <i>SSS</i> (superfície seca saturada)
V_{total}	volume total da amostra

D	coeficiente de difusão
L	espessura da amostra
t	Tempo
t_s	Tempo de secagem
$\Delta m(t)$	perda de massa no tempo
$\langle RH \rangle$	umidade relativa interna média
ε_{ij}	componentes do tensor de deformações
σ_{ij}	componentes do tensor de tensões
σ_{kk}	componente do tensor de tensão
δ_{ij}	delta de Kronecker
G_p	módulo de cisalhamento do corpo poroso
K_p	módulo de volumétrico do corpo poroso
b	coeficiente de tensão eficaz de Biot-Willis
K_s	módulo de massa da fase sólida do corpo poroso
Na^+	Cátion de sódio
K^+	Cátion de potássio
SO_4^{2-}	Ânion de Sulfato
OH^-	Hidroxila
Ca^+	Cátion de cálcio
n	Número de termos do somatório
A	Termo da equação de difusão
B	Termo da equação de difusão
σ	Tensão
σ_0	Tensão no instante de tempo igual a zero
ε	Deformação
ε_0	Deformação no instante de tempo igual a zero
S	Saturação
ε	Deformação
ε_0	Deformação no instante de tempo igual a zero
t_0	Tempo igual a zero
$\varepsilon_s(t)$	retração por secagem em função do tempo
$\varepsilon_a(t)$	retração autógena em função do tempo

$\varepsilon_e(t)$	deformação elástica instantânea em função do tempo
$\varepsilon_{ve}(t)$	deformação viscoelástica em função do tempo
$\varepsilon_{cr}(t)$	deformação de fluência em função do tempo
$\varepsilon(t)$	deformação total por causa da retração em função do tempo
$\varepsilon_T(t)$	deformação por cauda da temperatura
$J(t)$	Função de fluência
J_0	Componente da fluência referente à extensão instantânea
$\Delta J(t)$	Componente da deformação de fluência
E	Módulo de elasticidade de Young
E_0	Módulo de elasticidade inicial de Young
η	Coefficiente de amortecimento
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação
σ_E	Tensão correspondente à parcela elástica
σ_η	Tensão correspondente à parcela viscosa
$\dot{\sigma}$	Taxa de tensão
ε_E	Deformação correspondente à parcela elástica
ε_η	Deformação correspondente à parcela viscosa
τ_i	Tempos de retardo
Δt	Intervalo de tempo
P	Período
σ_m	Tensão máxima
ε_m	Deformação máxima
δ	Ângulo de fase
ω	Frequência angular
σ^*	Tensão complexa
σ'	Parcela elástica da tensão complexa
σ''	Parcela viscosa da tensão complexa
M^*	Módulo genérico complexo
M'	Módulo genérico de armazenamento
M''	Módulo genérico de perda
E^*	Módulo complexo na relaxação
E'	Módulo de armazenamento na relaxação

E''	Módulo de perda na relaxação
D^*	Módulo complexo na fluência
D'	Módulo de armazenamento na fluência
D''	Módulo de perda na fluência
$\tan \delta$	Fator de perda
c	Concentração de vapor de água
$\bar{F}(S)$	Função de transformação de Laplace (Transformada de Laplace)
$f(t)$	Função inversa da transformada de Laplace
ε_{ij}	Componentes do tensor de deformações
σ_{ij}	Componentes do tensor de tensões
δ_{ij}	Delta de Kronecker
G_p	Módulo de cisalhamento do corpo poroso
K_p	Módulo de volumétrico do corpo poroso
K_s	Módulo da massa da fase sólida
$\varepsilon_{11}(t, t')$	Deformação axial viscoelástica no tempo t
$J_p(t, t')$	Fluência viscoelástica uniaxial do corpo poroso
$J_s(t)$	Fluência viscoelástica sem envelhecimento do material solidificado
E_p	Módulo elástico de Young do material poroso
$v(t)$	Função de envelhecimento de solidificação
θ	Variável de integração fictícia
t_{ref}	Idade de referência em que a função fluência será ajustada
μ	Parâmetro que define a taxa de envelhecimento
A^t	Função de ajuste de deslocamento do tempo
ξ	Pseudotempo
t''	Variável de integração de tempo simulada
$\nu_p(t)$	Razão de Poisson viscoelástica do corpo poroso
μ_g^v	Potencial químico molar específico do vapor de água
μ_g^{air}	Potenciais químicos molares específicos de cada uma das substâncias presentes no gás (com exceção do vapor de água)
μ_l^w	Potencial químico molar específico da água na fase líquida
μ_l^{diss}	Potencial químico molar dos íons dissolvidos
n_g^v	Concentração molar (em volume) de vapor de água no gás

n_g^{air}	Concentração molar de outras moléculas no gás
n_l^w	Concentração molar da água na fase líquida
n_l^{diss}	Concentração molar de substâncias dissolvidas no líquido
S_g	Entropia do volume da fase gás
S_l	Entropia do volume da fase líquido
v_l^w	Volume molar da água na fase líquida
P_g^{v-0}	Pressão de vapor sobre a mistura de líquido quando $P_l = P_g$
P_g^{v-0*}	Pressão de vapor sobre uma superfície plana de água pura
a_l^w	Atividade química da água na fase líquida
n_i^i	Concentrações molares dos íons dissolvidos
χ	Coefficiente osmótico
I	Carga iônica
F	Parâmetro do coeficiente osmótico de Debye-Hückel
Z	Parâmetro do coeficiente osmótico de Debye-Hückel
n_i^c	Concentrações molares dos cátions na solução
n_i^a	Concentrações molares dos ânions na solução
B_{ca}^χ e C_{ca}^χ	Parâmetros empíricos específicos da interação cátion-ânion
S'	Variável fictícia de integração da saturação
$p(t)$	Função da pressão do fluido poroso
f_i	Coefficientes de ajustes da função de pressão no fluido poroso
$S(t)$	Função de saturação
g_i	Coefficientes de ajustes da função de saturação
K	Módulo de massa instantânea na idade de referência (1 dia)
s	Variável de transformação de Laplace
β_i e ω_i	Parâmetros de envelhecimento
$RH(S)$	Função de ajuste sigmodal da umidade relativa ambiente
F_i	Parâmetros de ajuste de ajuste da função $RH(S)$
C_i, a_i	Parâmetros de ajustes da função da perda de massa no tempo
ΔP_c	Diferença entre pressões capilares
ΔRH	Diferença entre umidades relativas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ponte Koror-Babeldaob em Palau: a) Deformações excessivas a meio vão; b) Colapso da ponte.....	2
Figura 2.1 – a) Raio de poro como função da umidade relativa; b) tensão capilar.....	7
Figura 2.2 – Equilíbrio estático em meniscos capilares (a). Diagrama para resolução de forças na direção Y (b).....	8
Figura 2.3 - Ilustração da diferença entre forças que atuam sobre uma molécula da superfície e sobre outra do interior do líquido.....	9
Figura 2.4 - Mecanismo de pressão de disjunção para: (a) material seco e (b) material com água adsorvida.....	10
Figura 2.5 - Comparação de cálculos de atividade de água usando a lei de Pitzer e lei de Raoult , sendo S a saturação e alw atividade da água na fase líquida.....	13
Figura 2.6 - Comportamento da secagem em função da umidade.....	15
Figura 2.7- Resultados médios da evolução da retração autógena em microconcretos para diferentes teores de SAP.....	19
Figura 2.8- Propriedades viscoelásticas: a) fluência; b) relaxação.....	25
Figura 2.9 - Elementos básicos dos modelos reológicos.....	29
Figura 2.10 – Modelo reológico de Kelvin.....	29
Figura 2.11 – Modelo reológico de Maxwell.....	30
Figura 2.12 - Modelo generalizado de Maxwell.....	31
Figura 2.13 - Modelo generalizado de Kelvin.....	32
Figura 2.14 - Tensão e deformação harmônicas de ensaio no domínio da frequência.....	33
Figura 2.15 – Representação da relação trigonométrica entre o módulo complexo M^* , de armazenamento M' e de perda M'' e o ângulo δ	34
Figura 2.16 - a) Força máxima; b) Ângulo de fase.....	36
Figura 2.17 - a) Estimativa do módulo de armazenamento (E') vs frequência; b) Estimativa do módulo de perda (E'') versus frequência.....	37
Figura 2.18 – Aplicação de carga constante em 3 idades sucessivas simplesmente - desloca o retardo ao longo do eixo do log do tempo.....	39
Figura 2.19 - Diagrama conceitual de material solidificante submetido à tensão aplicada σ ..	40
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia.....	41
Figura 3.2 – Relação de parâmetros para caracterização do transporte de massa.....	42
Figura 3.3 – Relação de parâmetros para caracterização da viscoelasticidade.....	42
Figura 3.4 - Imagem do SAP A: a) Microscópio Digital e b) Polímero Superabsorvente seco (aumentado 1600x).....	45
Figura 3.5 - Ensaio do mini <i>slump</i> a) Minitronco; b) Detalhe do abatimento.....	47
Figura 3.6- Organograma dos principais ensaios.....	49
Figura 3.7 – a) Molde de acrílico; b) Aplicação da pasta no molde.....	50
Figura 3.8 - Corpos de prova de pastas cimento com dimensões.....	50
Figura 3.9 - Detalhe geral do aparato para determinação da perda de massa.....	51
Figura 3.10 –Ensaio de perda de massa, a) Detalhe; b) Detalhe do sistema de aquisição de RH.....	51
Figura 3.11 – Esquema do aparato para medição da retração.....	53
Figura 3.12 –Aparato para medição da retração: a) Detalhe b) Aparato na caixa de PVC.....	54
Figura 3.13 – Ensaio de retração autógena a) Detalhe da forma; b) Tela da aquisição de dados.....	55

Figura 3.14 – a) Esquema da medição da RH interna; b) Aparato de medição da RH interna	55
Figura 3.15 - Equipamento do Ensaio de Fluência Dinâmica	56
Figura 3.16 – a) Corpo de prova nas dimensões para ensaio DSR; b) Corpo de prova no equipamento DSR	57
Figura 3.17 - a) Visão do equipamento do ensaio de módulo de elasticidade; b) Detalhe do ensaio	58
Figura 3.18 – Fluxograma da metodologia para obtenção da função de fluência.	62
Figura 4.1 - Porosidade das misturas: a) Idade até 28 dias; b) Idade até 7 dias	73
Figura 4.2 - Porosidades obtidas com temperatura de 110°C e 50°C a) SAP030; b) SAP030NS1	74
Figura 4.3 – Perda de massa das misturas para cada RH - a) aos 3 dias; b) aos 7 dias; e c) aos 28 dias	76
Figura 4.4 - Isotermas de dessorção das misturas: a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias; e c) idade de 28 dias	79
Figura 4.5 - Isotermas de dessorção para as idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias: a) mistura REF030; b) mistura REF035; c) mistura SAP030; d) mistura NS1; e) mistura SAP030NS1	80
Figura 4.6 - Evolução das concentrações de íons na solução dos poros das misturas REF030, REF035, SAP030 e NS1 nas idades de 3, 7 e 28 dias	81
Figura 4.7 - Diferença entre a pressão capilar pilar (P_C) determinar pela Lei de Kelvin-Laplace e o modelo de Grasley-Leung para mistura REF030; a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias; c) idade de 28 dias.	82
Figura 4.8 - Diferença entre a pressão capilar pilar (ΔP_C) determinar pela Lei de Kelvin-Laplace e a equação de Grasley-Leung para diferentes RH nas idades de 3, 7 e 28 dias; a) mistura REF030; b) mistura REF035	83
Figura 4.9 - RH de equilíbrio das misturas REF030 e REF035 nas idades de 3, 7 e 28 dias	83
Figura 4.10 - Redução da umidade (ΔRH) para cada nível de umidade para as idades de 3, 7 e 28 dias; a) mistura REF030; b) mistura REF035; c) mistura NS1	84
Figura 4.11 – Pressão efetiva nas idades de 3, 7 e 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1	86
Figura 4.12 – Pressão efetiva das pastas nas idades de 3, 7 e 28 dias	87
Figura 4.13 – Perda de massa das pastas para variação de umidade entre 100 e 43,2%; a) 3 dias; b) 7 dias; b) 28 dias	89
Figura 4.14 – Perda de massa dos concretos para variação de umidade entre 100 e 50% para idade de 28 dias	89
Figura 4.15 – Perda de massa acumulada das pastas no período de 24 horas	90
Figura 4.16 – Coeficiente de difusão das pastas (D_p); a) 3 dias; b) 7 dias; c) 28 dias	91
Figura 4.17 – Coeficiente de difusão dos concretos (D_c) para idade de 28 dias	91
Figura 4.18 - Variação de D em função de Δm pasta SAP030NS1	92
Figura 4.19 – Relação entre coeficientes de difusão entre pastas (D_p) e concretos (D_c) para idade de 28 dias; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030N1	92
Figura 4.20 – Valores de $\langle RH(x,t') \rangle$ e $RH(S)$ pasta REF030	94
Figura 4.21 – Perfil de RH em função da espessura (esp) das pastas: a) $t = 3$ dias e $t_s = 1$ dia; b) $t = 3$ dias e $t_s = 28$ dias; c) $t = 7$ dias e $t_s = 1$ dia; d) $t = 7$ dias e $t_s = 28$ dias; e) $t = 28$ dias e $t_s = 1$ dia e f) $t = 28$ dias e $t_s = 28$ dias	95
Figura 4.22 – Perfil de RH em função da espessura (esp) nos concretos para idade de 28 dias, a) Idade de secagem $t' = 1$ dia e b) Idade de secagem $t' = 28$ dias	96
Figura 4.23 – Valores E_0 obtidos experimentalmente e pelo DSR aos 28 dias	97

Figura 4.24 – Curvas de fluência das pastas; a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias; e c) idade de 28 dias.....	98
Figura 4.25 – Fluência dos concretos; a) idade de 3 dias e b) idade de 7 dias.....	99
Figura 4.26 – Resultados experimentais com a teoria da solidificação em pastas; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1	100
Figura 4.27 – Resultados experimentais com a teoria da solidificação em concretos; a) REF030C; b)REF035C; c) SAP030C; d) NS1C e e) SAP030NS1C.....	101
Figura 4.28 – Superposição de curvas tempo diferido em pastas; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1	103
Figura 4.29 – Previsão do envelhecimento com abordagem tempo diferido das pastas; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1	104
Figura 4.30 – Superposição de curvas do tempo diferido em concretos; a) REF030C; b)REF035C; c) SAP030C; d) NS1C; e e) SAP030NS1C	105
Figura 4.31 – Previsão do envelhecimento com abordagem tempo diferido dos concretos; a) REF030C; b)REF035C; c) SAP030C; d) NS1; e e) SAP030NS1C	106
Figura 4.32 –Resultados experimentais da teoria da solidificação e do tempo diferido em pastas; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1	107
Figura 4.33 – Resultados experimentais com a teoria da solidificação e do tempo diferido em concreto; a) REF030C; b)REF035C; c) SAP030C; d) NS1; e e) SAP030NS1C.....	108
Figura 4.34 - Retração por secagem das misturas a) aos 3 dias; b) aos 7 dias; e c) aos 28 dias	110
Figura 4.35 – Retração por secagem para as idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias: a) mistura REF030; b) mistura REF035; c) mistura SAP030; d) mistura NS1; e) mistura SAP030NS1	111
Figura 4.36 – Comparação da retração autógena experimental em pastas com modelos de previsão; a) REF030; b) REF035; e c) SAP030	112
Figura 4.37 – Comparação da retração autógena experimental em concretos com modelos de previsão; a) REF030; b)REF035; e c) SAP030	114
Figura 4.38 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 3 dias; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e)SAP030NS1	116
Figura 4.39 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 7 dias; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e)SAP030NS1	117
Figura 4.40 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e)SAP030NS1	118
Figura 4.42 –Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 3 dias pela proposta de Grasley e Lage (2007); a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e)SAP030NS1.....	119
Figura 4.43 –Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 7 dias pela proposta de Grasley e Lage (2007); a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e)SAP030NS1.....	120
Figura 4.44 –Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 28 dias pela proposta de Grasley e Lage (2007); a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e)SAP030NS1.....	121
Figura 4.45 –Previsão da retração por secagem em pastas aos 3 dias; a)REF035; b) SAP030; e c)SAP030NS1.....	123
Figura 4.46 –Previsão da retração por secagem em pastas aos 28 dias; a)REF035; b) SAP030; e c)SAP030NS1	124

Figura A.1- Perda de Massa aos 3 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1.....	166
Figura A.2- Perda de Massa aos 7 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1.....	169
Figura A.3 - Perda de Massa aos 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1.....	171
Figura C.1- Isotermas de dessecção – Idade de 3 dias ; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1.....	178
Figura C.2- Isotermas de dessecção – Idade de 7 dias ; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1.....	179
Figura C.3- Isotermas de dessecção – Idade de 28 dias ; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1.....	180
Figura D.1- Evolução do módulo de elasticidade com a Idade.....	182
Figura F.1- Ajuste de curvas da saturação em Pastas; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030.....	191
Figura F.2- Ajuste de curvas da saturação em Concretos; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030.....	191
Figura F.3- Ajuste de curvas de P_c em Pastas; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030.....	192
Figura F.4- Ajuste de curvas de P_c em Concretos; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030 ...	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Teores de SAP, NS e a/c para os traços desenvolvidos.....	42
Tabela 3.2– Composições das pastas (kg/m ³)	43
Tabela 3.3 - Caracterização física do cimento CPV-ARI	43
Tabela 3.4- Caracterização química do cimento CPV-ARI	44
Tabela 3.5- Caracterização química da Sílica Ativa.....	44
Tabela 3.6 - Resultados das características do SAP realizada por Manzano (2016) e Andrade Neto (2014).....	45
Tabela 3.7 - Características químicas da NS	46
Tabela 3.8 - Características físicas da NS	46
Tabela 3.9 - Propriedades e características do aditivo superplastificante.....	47
Tabela 3.10 – Resultados do ensaio de espalhamento com mini <i>slump</i> para teor de 2% de aditivo superplastificante (Glenium 51).....	48
Tabela 3.11 - Roteiro de mistura das pastas de cimento.....	48
Tabela 3.13 – Valores de umidade para os diversos níveis RH utilizados no ensaio.....	52
Tabela 4.1- Resultados do ensaio de porosidade (\emptyset) de cada mistura na temperatura de 110 °C	74
Tabela 4.2 – Percentual de secagem que cada mistura atingiu em cada nível de RH em comparação ao tempo final de equilíbrio	75
Tabela 4.3 - Valores de parâmetros F_i das misturas para idade de 3 dias.....	78
Tabela 4.4 - Valores de parâmetros F_i das misturas para idade de 7 dias.....	78
Tabela 4.5 - Valores de parâmetros F_i das misturas para idade de 28 dias.....	78
Tabela 4.6 - Concentração de íons das misturas em função da idade.....	81
Tabela 4.7 - Valores de redução da umidade (ΔRH) para cada mistura	85
Tabela 4.8 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para pastas aos 3 dias de idade	88
Tabela 4.9 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para pastas aos 7 dias de idade	88
Tabela 4.10 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para pastas aos 28 dias de idade	88
Tabela 4.11 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para concretos aos 28 dias de idade	88
Tabela 4.12 – Valores do parâmetro de envelhecimento μ das pastas.....	103
Tabela 4.13 – Valores de g_i e f_i , das funções de saturação e pressão capilar, respectivamente	112
Tabela 4.14 – Valores de g_i e f_i , das funções de saturação e pressão capilar, respectivamente	113
Tabela A.1- Perda de Massa aos 3 Dias.....	151
Tabela A.2- Perda de Massa aos 7 Dias.....	157
Tabela A.3- Perda de Massa aos 28 Dias	161
Tabela B.1- Resultados do Ensaio de Porosidade	175
Tabela C.1- Resultados Experimentais de Umidade Relativa (RH) e Saturação (S) – Idade de 3 dias	177
Tabela C.2- Resultados Experimentais de Umidade Relativa (RH) e Saturação (S) – Idade de 7 dias	177

Tabela C.3- Resultados Experimentais de Umidade Relativa (RH) e Saturação (S) – Idade de 28 dias	177
Tabela D.1 - Resultados Módulo de Elasticidade (GPa) das Pastas	182
Tabela E.1- Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF030 aos 3 Dias	184
Tabela E.2- Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF035 aos 3 Dias	184
Tabela E.3 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030 aos 3 Dias.....	184
Tabela E.4 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta NS1 aos 3 Dias	184
Tabela E.5- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030NS1 aos 3 Dias.....	185
Tabela E.6 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF030 aos 7 Dias.....	185
Tabela E.7 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF035 aos 7 Dias.....	185
Tabela E.8- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030 aos 7 Dias	185
Tabela E.9 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta NS1 aos 7 Dias	186
Tabela E.10- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030NS1 aos 7 Dias.....	186
Tabela E.11 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF030 aos 28 Dias.....	186
Tabela E.12- Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF035 aos 28 Dias.....	186
Tabela E.13- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030 aos 28 Dias.....	187
Tabela E.14- Resultados do Ensaio DSR da Pasta NS1 aos 28 Dias.....	187
Tabela E.15- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030NS1 aos 28 Dias.....	187
Tabela F.1 - Resultados das Medições das RH em Pastas	189
Tabela F.2 - Resultados das Medições das RH em Concretos	190

1 INTRODUÇÃO

O uso de concretos de elevada resistência já é frequente no meio técnico, entretanto eles exigem cuidados adicionais que são considerados desnecessários para os concretos convencionais. São materiais que experimentam fissurações causadas por retrações em idade ainda precoce, por este motivo aumenta o risco de problemas de durabilidade tais como corrosão, ataque de sulfato e reação álcali-agregado.

Embora o desenvolvimento de deformações seja uma característica intrínseca dos concretos, o aumento excessivo nos elementos estruturais tem sido motivo de preocupação. Nas primeiras idades o fator desencadeador é a retração autógena, à medida que o tempo avança e em são originadas retração por secagem provocada por tensões internas e a retração térmica originada por variações de temperatura. A fluência é outro fenômeno característico dos materiais cimentícios que origina deformações permanentes indesejáveis geradas por carregamentos.

A literatura cita que os efeitos da retração e da fluência para as estruturas de concreto são dependentes do tempo. A retração por secagem e a autógena estão relacionadas com o consumo de água pela autodessecação ou pela perda de água para o meio externo. Já a fluência é um fenômeno que ocorre nos concretos que se manifesta ao longo do tempo, produzindo deformações elásticas e plásticas progressivas nas regiões solicitadas.

Os autores Bazant et al. (2008) mencionaram que as deformações decorrentes do processo de hidratação e de cargas incidentes são fenômenos que se sobrepõem. Nos trabalhos dos autores Zuo et al. (2017), Wyrzykowski et al. (2017) e Bella et al. (2017), estes consideram que as deformações permanentes são causadas pela contabilização dos efeitos da fluência e da retração.

Essa temática tem atraído atenção em razão das excessivas deformações diferidas observadas em várias estruturas, como por exemplo, a ponte de Koror-Babeldaob em Palau, construída em 1977. Essas deformações podem ser observadas na Figura 1.1a, e o seu colapso ocorrido em 1996 no meio do vão na Figura 1.1b (BAZANT et al., 2008).

Figura 1.1 - Ponte Koror-Babeldaob em Palau: a) Deformações excessivas a meio vão; b) Colapso da ponte



Fonte: (BAZANT et al., 2008).

1.1 ABRANGÊNCIA DA PESQUISA E SUA IMPORTÂNCIA

A abordagem deste tema tem como objetivo fornecer dados para o meio técnico-científico, já que o foco principal de outros estudos é a ação mitigadora da retração autógena com a utilização do polímero superabsorvente (MANZANO, 2016), (SANTOS, 2016), (SILVA JÚNIOR, 2017) e (KANG; HONG; MOON, 2018). E das nano partículas em razão do seu potencial na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade (SANTOS, 2016), (JANKOVIĆ et al., 2016) e (RUPASINGHE et al., 2017).

Entretanto, autores como Snoeck e Belie (2013) e Manzano (2016) salientaram que a porosidade total da matriz cimentícia é incrementada pelos vazios deixados após a dessorção das partículas de SAP. Já Rupasinghe et al. (2017) e Mendes et al. (2017) sugeriram que ao introduzir pequenas quantidades de nano-sílica no sistema ocorre redução de maneira eficaz da quantidade de poros capilares e aumento do conteúdo da fase sólida da pasta. Em razão das alterações na microestrutura, evidencia-se a importância no aprofundamento dos efeitos causados no transporte de massa e na viscoelasticidade quando se usa esses materiais.

Pesquisadores como Assmann e Reinhardt (2014), Xin et al. (2016) e Ma et al. (2017) ao estudarem misturas com SAP sugeriram que ele aumenta a retração por secagem e a fluência quando compara os resultados com misturas de referência com mesma relação água cimento. Para Varghese et al. (2017), a NS reduz as deformações permanentes causadas por efeitos viscoelásticos e pela perda de água por evaporação.

Apesar disso, na literatura ainda existem lacunas sobre as deformações causadas pela viscoelasticidade e pela retração com uso destes materiais, como é o caso em considerar propriedades poroviscoelásticas, determinar deformações para idades e umidades relativas de ambientes diferentes, incluir a influência da concentração de íons nos poros, contabilizar os efeitos do SAP e da nano sílica conjuntamente e estimar a previsão da retração por secagem e autógena.

Estudos sugerem que metodologias teórico-científicas para previsão das retrações são ferramentas úteis para dimensionamento de estruturas principalmente de concreto protendido. Hoje existem equações clássicas para previsão da retração por secagem que são baseadas em princípios ditos empíricos ou semi-empíricos como por exemplo as encontradas nas normas ACI 209.2R-08 (2008), CEP-FIP Code 2010 (2010) e NBR-6118 (2014) e no modelo clássico B4 (HUBLER et al., 2015).

Para alguns autores as metodologias de previsão de deformações em uso apresentam certas limitações. McDonald e Roper (1993) constataram que modelos empíricos preditivos desenvolvidos fora da Austrália não foram aplicáveis aos concretos locais. Videla et al. (2004) encontraram evidências que as equações desenvolvidas fora do Chile não foram incapazes de prever a retração de concretos feitos com cimentos e agregados chilenos. Para Grasley (2006) os modelos clássicos das principais normas são incapazes de modelarem a retração em concretos de alta resistência.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos do polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica na retração e na viscoelasticidade de materiais cimentícios de alta resistência com uso de abordagem poroviscoelástica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os principais objetivos desta pesquisa são os seguintes:

- Entender como ocorre as deformações em razão dos mecanismos viscoelásticos e de retrações em pastas de cimento endurecida e concretos contendo SAP e NS;
- Determinar a saturação por meio de uma metodologia própria de ensaio de perda de massa;
- Encontrar a umidade relativa (RH) interna e coeficiente de difusão ao vapor de água com Isotermas de dessorção;
- Contabilizar o efeito das concentrações de íons dissolvidas no fluido dos poros na pressão capilar;
- Descobrir a retração por secagem por uma metodologia de ensaio desenvolvida nesta pesquisa;
- Definir parâmetros viscoelásticos por meio de ensaio de relaxação/fluência dinâmico no domínio da frequência;
- Analisar o comportamento viscoelástico de envelhecimento pela teoria da solidificação de Carol e Bazant (1993);
- Avaliar o comportamento viscoelástico de envelhecimento pela abordagem do tempo diferido;
- Analisar o comportamento viscoelástico de envelhecimento pela contabilização da abordagem do tempo diferido e da teoria da solidificação;
- Prever a retração por secagem e autógena com uso de equações poroviscoelásticas, que serão validadas com resultados de laboratório.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será ressaltado o uso da poroviscoelasticidade na previsão da retração e os principais mecanismos da retração. Também será discutida a inter-relação entre a umidade relativa (RH), a retração e o desenvolvimento de tensões internas. Além disso, serão destacados os fenômenos que dão origem ao comportamento viscoelástico dos materiais.

2.1 POROVISCOELASTICIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A poroelasticidade e a poroviscoelasticidade vêm sendo utilizadas para estudos de previsão de deformações provocadas por tensões internas em materiais porosos em diversos ramos da ciência.

A poroelasticidade estuda o comportamento de materiais porosos (materiais compósitos) linearmente elásticos saturados, cuja ligação entre a difusão do fluido dos poros e a deformação da matriz porosa influencia significativamente o comportamento mecânico dos materiais de maneira geral. Por outro lado, a poroviscoelasticidade utiliza o conceito da viscoelasticidade linear que diz respeito a materiais não envelhecidos cujos coeficientes de rigidez dependem do tempo (HOANG, 2011).

Para Wyrzykowski et al. (2017), as descrições poromecânicas da retração por secagem são baseadas nas alterações da pressão do fluido dos poros que atuam no esqueleto sólido, acionando os mecanismos de deformações da massa.

A primeira tentativa para descrever a retração foi obtida por Hansen (1987). O Autor considerou a argamassa como um material de duas fases, a modelagem foi derivada pela teoria da elasticidade com obtenção de resultados satisfatórios para várias relações a/c testadas. No entanto, o modelo não levou em conta os efeitos viscoelásticos no tempo.

As primeiras pesquisas de sucesso que utilizaram a poroelasticidade para prever a retração em pastas de cimento foram as de Coussy et al. (2003); e Constantinides e ULM (2004). Estes estudos consideram que a retração é causada por alterações da pressão do fluido numa matriz porosa de pasta de cimento.

Coussy et al. (2003) formalizaram o uso de um fator de saturação baseado no trabalho de Bishop (1959) e derivaram uma "pressão de poro efetiva" para ser usada com a poroviscoelasticidade, a fim de prever a retração de materiais à base de cimento. Pesquisadores como Lura (2003), Coussy et al. (2003), Weiss et al. (2008), Rougelot et al. (2009), Grasley e Leung (2011), Galitz e Grasley (2016) e Wei et al. (2017) utilizaram a equação de Kelvin-Laplace e a poroviscoelasticidade para modelarem a retração por secagem de materiais cimentícios em função da RH (Umidade Relativa).

Lura et al. (2003) desenvolveram um modelo numérico poroelástico capaz de prever a deformação autógena e a umidade relativa interna de pasta de cimento. Alterações da umidade relativa ambiente, o grau de hidratação e o módulo de elasticidade foram utilizados como dados de entrada para o cálculo da deformação autógena com base na abordagem da tensão capilar.

Leung (2009) pesquisou a diminuição da taxa de difusividade com a diminuição da umidade relativa¹ e modelou a retração por secagem em pastas de cimento endurecida, com relações a/c de 0,40 e 0,50, nas idades de 3 e 7 dias, como uma resposta de poroviscoelasticidade.

2.2 MECANISMOS DA RETRAÇÃO

Os mecanismos mencionados a seguir da retração autógena não são distintos da retração por secagem. Na literatura existe um consenso na relação entre retração e variações na umidade relativa (RH) nos poros (LURA, 2003). O estudo dos mecanismos depende do estado de ligação da água-superfície sólida, dentro do material. O mecanismo básico da retração por secagem é a evaporação da água da rede de capilares, já na retração autógena, é a autodessecação, causada pela diminuição da umidade relativa interna na pasta de cimento pelas reações de hidratação.

Os três principais mecanismos que vêm sendo debatidos para compreender as forças geradoras das retrações (autógena e secagem) são: a variação da depressão capilar, a variação

¹ A perda de massa e retração foram medidas em pequenos incrementos de RH num ambiente de câmara com a temperatura constante. A taxa de difusão não linear na secagem foi modelada com a utilização da segunda lei de Fick, assumindo a linearidade da taxa de difusão nas pequenas quedas de umidade relativa ambiente.

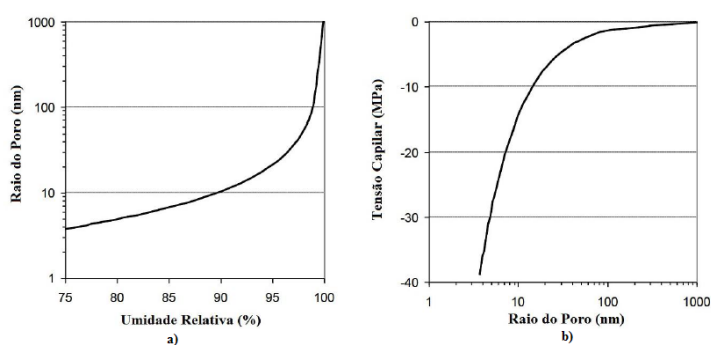
da tensão superficial e a variação da pressão de disjunção (POWERS, 1968; MINDESS et al., 2002; LURA et al., 2003; NUNES, FIGUEREDO, 2007). O efeito sobre a retração de cada um dos mecanismos mencionados depende do poro e da umidade relativa. Para cada uma dessas abordagens, é necessário conhecer o desenvolvimento do volume de poros e da distribuição do tamanho dos poros, do estado da água nos poros capilares (livres ou adsorvidos) e da rigidez do esqueleto sólido à medida que a hidratação prossegue. Para RH abaixo de 45% a tensão superficial capilar não está ativa, os meniscos capilares não são estáveis. Para níveis de uma RH ainda mais baixos, a retração por secagem é tipicamente atribuído à pressão de energia superficial da fase sólida (CHEN et al., 2013).

2.2.1 Variação da Depressão Capilar

A capilaridade é um fenômeno que origina interfaces curvas entre vapor (ar) e fluido (água) nos poros. Para Silva Jr. (2017) ela representa o fenômeno mais importante para explicar a autodessecação. Nesta interface estabelece uma diferença de pressão denominada de pressão capilar (depressão capilar), que depende da tensão superficial líquido-vapor, do raio de curvatura e do ângulo de molhamento.

Com o contínuo consumo de água dos poros da pasta de cimento pelas reações de hidratação, há uma redução do raio dos meniscos até uma fase de equilíbrio da umidade, neste momento a tensão capilar (depressão capilar) aumenta até que haja um equilíbrio com a retração da pasta cimento (SILVA, 2007). A Figura 2.1a apresenta a relação entre a umidade relativa com o raio do poro e a Figura 2.1b a tensão capilar com o raio do poros, assumindo a tensão superficial na interface líquido/gás como 0,073 N/m e aplicando a Lei de Laplace, pode-se plotar a tensão capilar em função do raio do poro cheio de água (ASSMANN, 2013).

Figura 2.1 – a) Raio de poro como função da umidade relativa; b) tensão capilar.



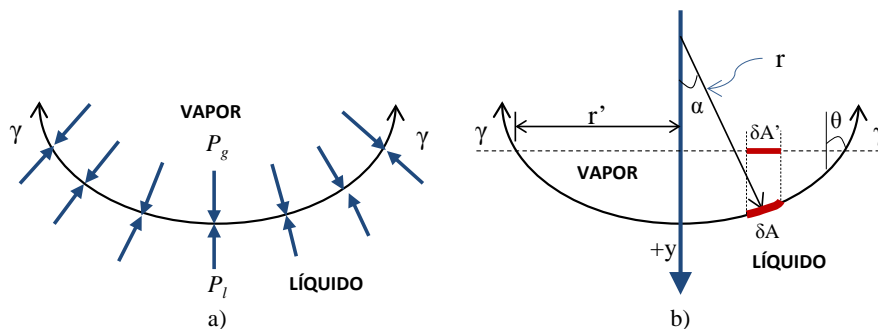
Fonte: (ASSMANN, 2013).

Uma vez que os poros maiores tenham esvaziado e os poros menores (cerca de 50 nm) começam a esvaziar-se, os meniscos capilares desenvolvem-se na interface fluido/vapor (GRASLEY, 2006). À medida que o diâmetro dos poros ainda saturados diminui, a curvatura superficial do menisco aumenta.

Quando os hidratos se percolam e os primeiros caminhos sólidos são formados na pasta em endurecimento, a rigidez aumenta e as bolhas de gás começam a nuclear e crescer nos poros maiores. A Lei de Kelvin está relacionada com formação de menisco líquido-vapor e presença de RH interna. Já a Lei de Laplace quantifica as tensões de tração no fluido de poros provocadas pela existência do menisco causa.

A Figura 2.2a apresenta a curvatura do menisco capilar em equilíbrio estático e a Figura 2.2b apresenta o esquema de forças na direção vertical em um poro cilíndrico. Com base na figura, Grasley (2006) demonstrou analiticamente o modelo de previsão da pressão capilar de Kelvin-Laplace (Lei de Kelvin-Laplace), Apêndice A.

Figura 2.2 – Equilíbrio estático em meniscos capilares (a). Diagrama para resolução de forças na direção Y (b)



Fonte: (R. DEFAY et al., 1966).

A lei de Laplace demonstra que a pressão no líquido do poro (P_l) relaciona com a tensão superficial (γ) e com o raio do poro (r) de acordo com a equação (2.1).

$$P_l = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.1)$$

Para Kelvin a pressão no líquido está associada com a tensão superficial (γ) e o raio do poro (r), equação (2.2).

$$\frac{2\gamma}{r} = \frac{-\ln(RH)RT}{v} \quad (2.2)$$

A combinação das equações (2.1) e (2.2) resulta na equação (2.3), que é conhecida como relação Kelvin-Laplace.

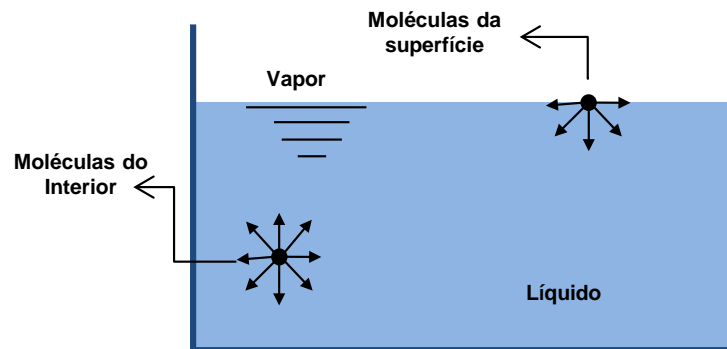
$$p = \frac{-\ln(RH_{int})RT}{v} \quad (2.3)$$

Onde RH é a umidade relativa interna, R é a constante universal do gás, T é a temperatura em (k) e v é o volume molar da água.

2.2.2 Variação da Tensão Superficial

É um fenômeno de atração que ocorre entre as moléculas das interfaces líquido, vapor e sólidos. As moléculas da superfície do líquido, entretanto, sofrem apenas atração lateral e inferior. Esta força para o lado e para baixo cria a tensão na superfície, que a faz contrair e comportar-se como uma película elástica, como apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Ilustração da diferença entre forças que atuam sobre uma molécula da superfície e sobre outra do interior do líquido



Fonte: Adaptado de Daltin (2011).

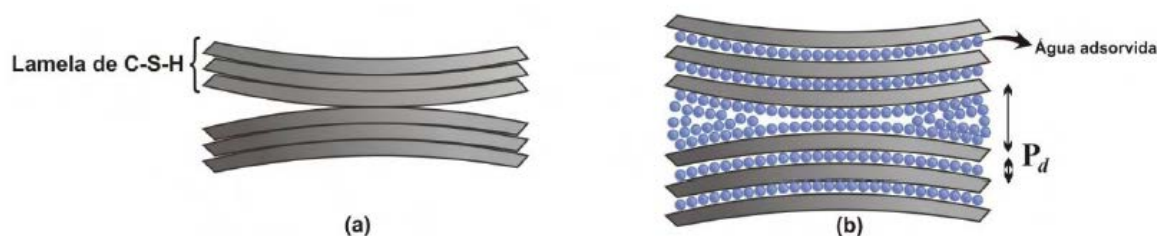
Os sólidos também têm tensão superficial na sua interface com outros materiais. Se um sólido é imerso em um material semelhante, a tensão superficial é zero. Se for imerso em vapor de água, a tensão superficial sólida (C-S-H) é baseada na concentração de moléculas de água no ar (isto é, pressão de vapor parcial) (POWERS, 1968). Desta forma, a tensão superficial sólida depende da espessura das camadas adsorvidas de água. À medida que a pressão de vapor parcial é reduzida, a espessura adsorvida é diminuída, em consequência, a tensão superficial

na fase C-S-H aumenta. Isto cria uma compressão líquida do sólido, resultando em retração em microescala.

2.2.3 Pressão de disjunção

É um fenômeno que ocorre em regiões onde a adsorção é impedida e só será ativada quando as distâncias entre as superfícies sólidas são menores do que duas vezes a espessura da camada de água livre adsorvida como demonstrado na Figura 2.4 (LURA, 2003). Não há um consenso sobre o tema, para os pesquisadores Mindess e Young (1981), se a umidade relativa interna for alta a pressão de disjunção é ativada.

Figura 2.4 - Mecanismo de pressão de disjunção para: (a) material seco e (b) material com água adsorvida



Fonte: Kovler e Zhutovsky (2006) adaptado por Rodrigues (2010).

Para Shen et al. (2016), a retração por secagem autógena é provocada pela energia capilar e superficial induzido pela dessecação e auto-dessecação na pasta de cimento. Entretanto, o processo de hidratação, a estrutura da poros, a taxa de dessorção da água controlam o fenômeno.

2.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM

As deformações por secagem acontecem em razão da perda de água para o meio ambiente por evaporação. Ocorre quando a magnitude das perdas de água por evaporação é maior do que a reposição pela umidade interna. A evaporação provoca o aumento da pressão capilar, o que leva a uma diminuição do volume do material numa fase em que é suscetível à deformação plástica e que ainda não atingiu uma resistência significativa (até aos 28 dias de idade) (DUDZIAK et al., 2010).

Outros mecanismos de secagem em materiais porosos foram estudados por pesquisadores como Scherer (1990), em sua análise percebeu que num período inicial a taxa de perda de massa de água livre se torna constante e evapora a partir da superfície do material, o menisco

recua para o interior dos poros e impulsiona o fluxo da fase de vapor para a superfície, somando a parcela da difusão. Como a água seca a partir dos poros, o fluxo de água para a superfície diminui à medida que o gradiente de pressão capilar é baixo perto da superfície. Quando a evaporação dentro o corpo é controlado por difusão de vapor, é chamada de segundo período ou taxa decrescente. Para materiais porosos como pasta de cimento e concreto, o autor também constatou que a velocidade de secagem para diferentes teores de umidade é considerada não linear.

Li, Xiaodan et al. (2017) sugeriram que a parcela irreversível das deformações causada pela retração por secagem está intimamente relacionadas à idade; a secagem retardada levaria a reduções drásticas na retração irreversível associada à dissolução do grão de cimento e à precipitação de hidratos.

2.3.1 Efeitos da Umidade Relativa e/ou Temperatura

A umidade relativa é uma medida da quantidade atual de vapor de água no ar em relação à quantidade total de vapor de água que pode existir no ar em sua temperatura atual e é expressa em porcentagem. Entretanto, o ar, assim como qualquer outra substância, possui um limite até o qual ele absorve a água (ponto de saturação). Abaixo do ponto de saturação, há o ponto de orvalho, quando a umidade se acumula sob a forma de pequenas gotas.

Neste contexto, quando as taxas de condensação e evaporação são iguais, tem-se a pressão de vapor de equilíbrio. Portanto, mudanças na temperatura/RH, na curvatura dos meniscos capilares da água alteram a taxa de evaporação e, assim, alteram a pressão de vapor de equilíbrio (SHORTLEY; WILLIAMS, 1971).

A queda de RH produz uma alteração na espessura da camada de água adsorvida nas superfícies sólidas (WYRZYKOWSKI; LURA, 2013). Nesta fase inicial de hidratação, a rigidez da pasta é tão baixa e o comportamento viscoso tão pronunciado que a menor tensão que atua no sistema resulta em uma grande deformação.

Outra observação importante foi sugerida por Grasley (2006), uma variação da pressão capilar e da pressão de disjunção dependem de mudanças na RH e/ou temperatura em função da relação de Kelvin-Laplace.

A tensão superficial da água também limita a taxa de evaporação. Na camada superficial, cada molécula de água é atraída para as moléculas de água circundantes. Numa superfície convexa (isto é, uma pequena gotícula), as moléculas de água têm contato com menos moléculas vizinhas do que sobre uma superfície plana de água. A redução das forças atrativas que ligam cada molécula à água líquida reduz a energia necessária para a vaporização. A redução da energia necessária para a vaporização aumenta a taxa de evaporação e, subsequentemente, aumenta a pressão de vapor de equilíbrio (GRASLEY, 2006).

Considerando os efeitos da RH nas propriedades viscoelásticas, Frech-Baronet et al. (2017) verificaram que a taxa de fluência e relaxação são maiores para valores de RH mais altos. Possíveis explicações foram sugeridas, tais como: (i) a redução da RH aumenta a sucção capilar que, por sua vez, pode aumentar as forças de ligação nos pontos de contato dos géis de C-S-H. Este último pode, então, aumentar a fricção entre as camadas de C-S-H e reduzir a fluência a longo prazo (VANDAMME; ULM, 2009); (ii) Para uma menor umidade relativa a disponibilidade de água cai por meio de micro difusão em torno de uma fissura onde a saturação é baixa (ROSSI et al., 2012).

2.3.2 Concentração de Íons na Solução dos Poros

Mudanças na concentração de íons dissolvidos na solução dos poros alteram a taxa de evaporação e, assim, alteram o equilíbrio de pressão de vapor. A pressão de vapor e, portanto, a RH, são reduzidos em função da presença de íons dissolvidos na água dos poros e tem origem nos óxidos de potássio e sódio presentes nos cimentos (LURA; LOTHENBACH, 2010).

Os íons reduzem a RH de equilíbrio porque são rodeados por moléculas de água que são mantidas por uma forte ligação iônica. Estas moléculas de água ligadas são assim impedidas de evaporação. Este efeito é referido na termodinâmica clássica como uma redução na atividade da água. Ao reduzir as moléculas de água disponíveis para evaporação, a taxa de evaporação e a RH de equilíbrio são reduzidas (LURA, 2003).

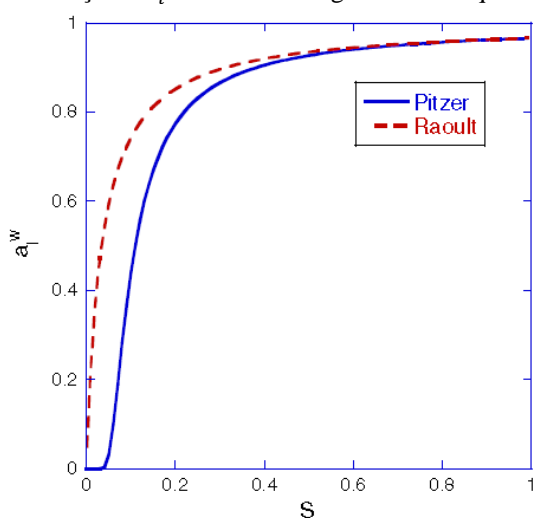
O efeito das diferentes concentrações de íons dissolvidos sobre a RH de equilíbrio pode ser investigado usando a Lei de Raoult. Uma derivação da lei de Raoult pode ser encontrada também em Jensen (1995), Lura (2003) e Lura et al. (2003).

Segundo Lura e Lothenbach (2010) mesmo quando o concreto está saturado, a sua RH interna é inferior a 100%, em razão da presença de íons dissolvidos no fluido dos poros. Esta redução de RH inicial pode ser estimada e pode variar de cimento para cimento de acordo com a concentração da solução dos poros em umidade relativa alta.

No mesmo trabalho, Lura e Lothenbach (2010) compararam a solução dos poros de diferentes cimentos e avaliaram o impacto na queda da RH inicial. Os dados experimentais foram comparados com simulações numéricas da composição da solução dos poros obtida por modelagem termodinâmica. De acordo com os resultados, a retração por secagem pode ser reduzida em pastas de cimento preparadas com cimento de alto teor de álcali, especialmente em RH elevada. Esta redução acontece em função da elevada força iônica da solução porosa, o que pode levar a atividade da água em uma pasta de cimento saturada até cerca de 94%.

Também Chen et al. (2013) mencionaram que a lei de Raoult é estritamente válida para uma solução ideal e só pode ser utilizada no caso de soluções de baixa concentração. Uma abordagem alternativa à lei de Raoult seria empregar o modelo de interação iônica de Pitzer, que é esperado para produzir estimativas de atividade mais precisas para soluções de concentrações de íons. Grasley e Leung (2011) compararam as equações de Pitzer e a lei de Raoult para uma solução de poros à medida que a água era removida por secagem, os pesquisadores encontraram boa correspondência na faixa de saturação elevada da água, como apresentada na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Comparação de cálculos de atividade de água usando a lei de Pitzer e lei de Raoult, sendo S a saturação e a_l^w atividade da água na fase líquida



Fonte: (GRASLEY; LEUNG, 2011).

Íons como o Ca^{2+} podem agir diretamente no SAP, verifica-se que a capacidade de retenção do SAP é reduzida em função da absorção de solução de Ca^{2+} . Entretanto, ao absorver Ca^{2+} o SAP liberta cations monovalentes, tais como Na^{2+} . À medida que a concentração total destes íons aumentam, a capacidade de retenção melhora. A pressão osmótica é mais fraca para maiores Na^{2+} , o que reduz a força motriz para a absorção inicial de SAP. Portanto, a quantidade de Ca^{2+} absorvida no SAP diminui e a capacidade de retenção melhora (KANG; HONG; MOON, 2018).

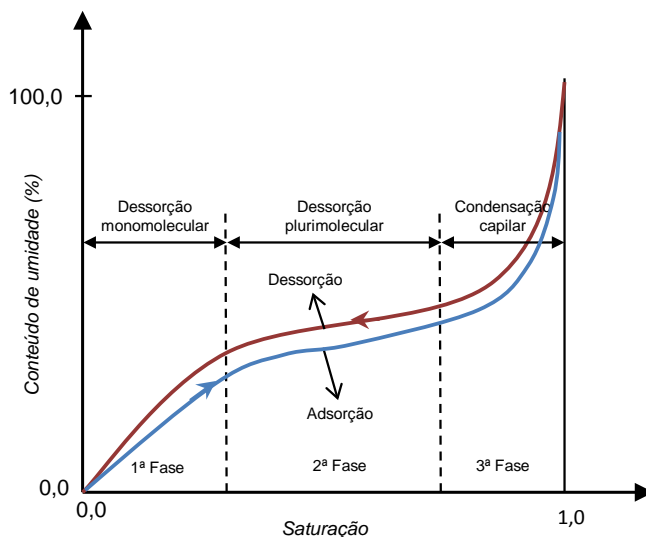
2.3.3 Isotermas de Dessorção

A dessorção é um processo de secagem no qual a água é retirada da superfície dos poros em função da diferença entre a umidade interna e externa (umidade relativa ambiente). As análises da dessorção são realizadas por curvas denominadas de isotermas de dessorção. Essas curvas exibem informações a respeito da estrutura porosa e indicam a capacidade de retenção de líquidos ou vapores (saturação) do material, desde momento em que é exposto a uma variação da umidade relativa ambiente (ANDRADE et al., 2015).

Em geral, as isotermas de dessorção são afetadas por qualquer parâmetro que altere a estrutura porosa e a distribuição dos tamanhos dos poros como, por exemplo, a relação a/c, tipo de cimento, tempo e tipo de cura, temperatura, adições minerais, aditivos e outros (ANDRADE et al., 2015).

A adsorção é o fenômeno inverso da dessorção e é atribuído às forças intermoleculares ou de Van Der Waals. E pode ser dividido em regiões distintas; primeira fase, onde ocorre a fixação de moléculas na superfície do poro (adsorção monomolecular) em seguida, numa segunda fase, em que água é depositada sob várias camadas de moléculas (adsorção plurimolecular) e na última fase, em que há junção das camadas plurimoleculares (condensação capilar), a Figura 2.6 ilustra a ocorrência das três fases (FREITAS, 1992).

Figura 2.6 - Comportamento da secagem em função da umidade



Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2015).

As curvas de adsorção e dessorção apresentam comportamentos diferentes, sendo que a histerese parece ocorrer apenas no domínio de umidade relativa onde há condensação capilar, não ocorrendo na região de adsorção ou dessorção puras (SANTOS, 2006).

Apenas a secagem lenta com pequenos passos de umidade relativa pode garantir uma distribuição bastante homogênea da umidade por meio da amostra, e uma medição confiável do encolhimento do material em razão da secagem. Baroghel-Bouny et al. (1999) e Coussy et al. (2003) usaram essa técnica em parte de suas pesquisas para obter isotermas de dessorção e adsorção de vapor de água, a fim estudar a retração de secagem em fatias finas (3 mm) de pastas e concretos de cimento comuns e de alto desempenho. A técnica de secagem por pequenos passos na umidade relativa que parece ser a mais utilizada no meio científico foi utilizada neste estudo.

2.4 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Não há um fator desencadeador da deformação autógena além das reações de hidratados, por isso ela é independente de outros fatores externos. Nos materiais cimentícios usuais, a deformação autógena é insignificante, contudo nos materiais de alta resistência é bastante relevante em razão da baixa relação água/cimento (a/c) e da adição de material cimentício suplementar, associada ao elevado consumo de cimento (JENSEN; HANSEN, 2001b). Nestes

materiais existem a formação rápida de uma rede porosa fina, dentro da pasta de cimento, que gera tensão capilar mais elevada. Como as estruturas têm uma ou mais formas de restrição, o risco de fissuração de elevada resistência é maior, sobretudo nas idades iniciais, podendo comprometer sua resistência mecânica, durabilidade e estética.

Lura (2003) destaca que a retração autógena é um fenômeno conhecido a muito tempo (desde o início do século 20), porém nos últimos anos ganhou importância no meio científico. Com a chegada dos primeiros concretos de alta resistência, a retração autógena conseguiu aumentar relevância prática (JENSEN; HANSEN, 1996).

Segundo Silva (2007) a deformação autógena é uma deformação livre que acontece num material cimentício selado, submetido à temperatura constante e sem atuação de carregamento, desencadeadas por diversos fenômenos como destacados abaixo:

- A partir de certo grau de hidratação, após o tempo zero (transição suspensão-sólido), quando o material se torna suficientemente rígido para opor às variações volumétricas, a diminuição de volume se torna incompatível com as deformações mecanicamente admissíveis pelo esqueleto mineral recém-formado.
- O volume gasoso dentro da porosidade da pasta de cimento, inicialmente saturada em água, aumenta em função do volume dos reagentes ser maior que o dos hidratos, e pela saída de água dos poros para a hidratação.
- A saída de água provoca uma tensão capilar no interior dos poros não saturados completamente, gerando a aproximação das partículas de cimento hidratado. Este fenômeno que sucede à contração de *Le Chatelier*.

A classificação das deformações autógenas depende do estado do material, sendo que. Quando o material ainda é uma suspensão, ocorre a Contração de *Le Chatelier*. Quando se torna sólido, ocorre a expansão inicial e a retração autógena (BOIVIN, 2001).

A Contração *Le Chatelier* é a redução inicial do volume da pasta que ocorre nos primeiros estágios da hidratação do cimento. A reação de hidratação, quando o cimento entra em

contato com a água, leva a uma redução global do volume porque o volume dos produtos hidratados é menor que o volume dos reagentes (LOPES, 2011).

Em razão da reação de hidratação, pode ocorrer uma expansão inicial. Para Silva (2007), essa expansão é uma variação volumétrica macroscópica que pode ocorrer em sistemas cimentícios com tempo de duração variando de algumas horas (após a transição suspensão-sólido) até cerca de duas semanas, dependendo da mistura. Mesmo que para idades superiores há predomínio da retração autógena, o fenômeno da expansão poderá continuar ocorrendo a nível microscópico e local.

2.4.1 Uso do Polímero Superabsorvente (SAP) como Agente de Cura Interna

Algumas sugestões são apresentadas como alternativa para minimizar os efeitos da retração autógena: (i) o uso de materiais porosos, adicionados ao concreto, previamente saturados em água, para fornecer água aos capilares, à medida que ocorre o avanço das reações de hidratação (processo conhecido por cura interna); (ii) o uso de fibra com alto módulo de elasticidade, combatendo a retração autógena, por restrição mecânica; (iii) modificação da composição mineralógica do cimento; (iv) controle da finura do cimento; (v) a redução do volume de pastas; (vi) uso de aditivo químico compensador de retração, cujos agentes expansivos atuam aumentando o volume do concreto, para compensar a redução de volume causada pela retração; (vii) uso de aditivo químico redutor de retração, desenvolvido para diminuir a retração por secagem, também pode reduzir a retração autógena, uma vez que atua reduzindo a tensão superficial da água, diminuindo assim a tensão no capilar e (viii) uso combinado de mais de uma estratégia (BENTZ; JENSEN, 2004).

Para Silva (2007), quando se usa 2% de aditivo redutor de retração (ARR) em concretos, apresenta-se uma redução da retração autógena livre de 50% com 1 e 3 dias e na retração por secagem de 20-30% após 28 dias de cura ao ar.

Os pesquisadores Wyrzykowski et al. (2016) estudaram diferentes tipos de cinzas provenientes de caldeiras como agente de cura interna. Todas as cinzas tiveram alta porosidade aberta e alta absorção de água (entre 10 e 20% em massa). A adição destas cinzas foi capaz de manter a umidade relativa interna alta e diminuir a retração autógena, com pouco impacto nas propriedades mecânicas das argamassas.

Nos concretos convencionais a cura é realizada para hidratar o cimento e reduzir a retração por secagem do concreto, que são fatores intrínsecos à durabilidade (BATTAGIN et al., 2002).

Para Zhutovsky e Kovler (2017) os métodos de cura tradicionais não são adequados para uso em concretos de alta resistência em razão da baixa relação água/aglomerante e baixa permeabilidade. É notório que a água não pode penetrar no interior do elemento estrutural, contudo estes concretos exibem autodessecação e retração autógena que aumenta a possibilidade de fissuração nas idades iniciais. Portanto, a tecnologia da cura interna foi desenvolvida com a intenção de fornecer uma solução para este problema.

A cura interna consiste em incorporar na etapa de mistura do concreto um elemento que irá atuar como reservatório de água. O princípio básico consiste que o agente de cura seja um depósito de água no interior do concreto e, com o avanço das reações de hidratação, possa liberar essa água para a continuidade dessas reações e prevenir a autodessecação (ASSMANN, 2013).

Os métodos mais eficazes para o processo de cura interna têm sido o uso de agregados leves saturados com água (LURA et al., 2017) e polímeros superabsorventes (JENSEN; HANSEN, 2001).

Os SAPs são cadeias longas de polímeros lineares que estão interligados em diversos pontos. São usados na indústria médica e de higiene como artigos de cuidados ou pílulas inteligentes, e podem ser usados para combate a incêndios ou embalagens de alimentos (BUCHHOLZ; GRAHAM, 1998). Os primeiros estudos em meios cimentícios utilizando SAP como agente de cura interna foram realizados pelos pesquisadores Jensen e Hansen (2001).

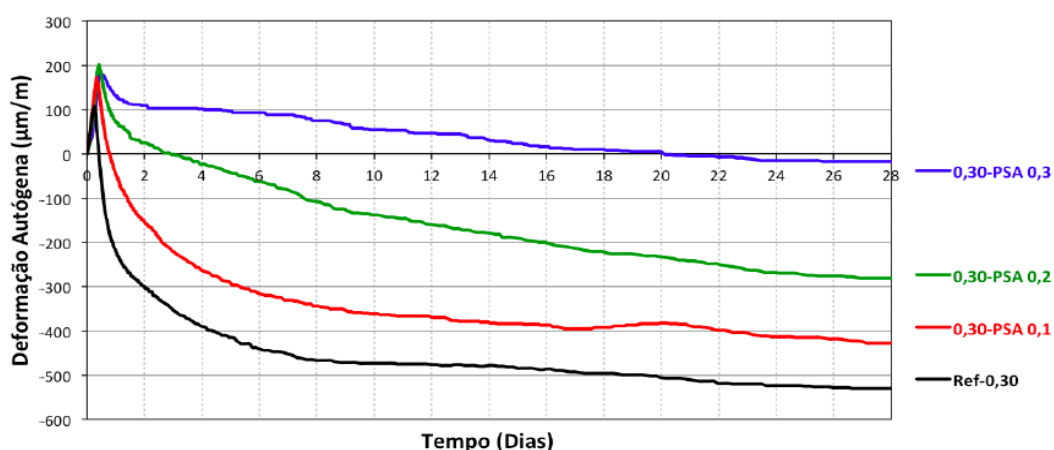
Os SAPs têm a característica de absorver até 500 vezes seu peso próprio em soluções aquosas em razão da pressão osmótica, resultando na formação de inclusões cheias de água (BUCHHOLZ; GRAHAM, 1998). Durante a preparação de uma mistura em concretos, os SAPs absorvem uma pequena parcela de água, úteis para cura interna. A quantidade de água de mistura absorvida pelo SAP independe da composição da mistura, é válida para o cimento, cinzas volantes e escória de alto forno (SNOECK et al., 2015). As quantidades de água determinadas experimentalmente adicional a mistura será liberada na matriz de cimento em

função da queda iminente da umidade relativa. Em razão desta liberação de água, a umidade relativa interna é mantida, as partículas de SAP diminuem e um poro macro vazio permanece na matriz cimentícia (TRTIK et al., 2010).

Brüderl e Mechtcherine (2010) mostraram o processo de cura interna, a diminuição da retração autógena e da autodessecação pela liberação gradual de água das partículas de SAP. Jensen e Hansen (2002) mediram até 3700 micrometros ($\mu\text{m}/\text{m}$) de retração em pasta de cimento de referência em um período de 3 semanas. Quando os SAPs foram usados, houve uma mitigação bem-sucedida da retração e até mesmo uma expansão. Igarash e Watanabe (2006) mostraram também uma mitigação bem-sucedida da retração autógena com uma quantidade de SAPs de 0,7% por massa de cimento em uma pasta com uma relação água-cimento de 0,25.

Manzano (2016) avaliou três teores de SAP 0,1%; 0,2% e 0,3% relativos à massa do cimento para mitigação da retração autógena, o pesquisador concluiu que o teor de 0,3% foi o que obteve melhor resultado, conforme apresentado na Figura 2.7. Nos seus estudos utilizou uma $a/c_{\text{básica}}$ 0.30 e adicionou-se água de cura interna para eliminar a autodessecação ($a/c_i = 0,045$), para uma relação a/c_{total} de 0,345. Dado que a absorção do SAP no meio cimentício foi 15 $\text{g}(\text{água})/\text{g}(\text{SAP})$.

Figura 2.7- Resultados médios da evolução da retração autógena em microconcretos para diferentes teores de SAP



Fonte: (MANZANO, 2016) .

2.5 NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA

Com os conceitos emergentes de nano materiais e nanotecnologias, diversas pesquisas têm avaliado quais destes materiais podem ser usados para melhorar as diferentes características do concreto convencional. As nano partículas de sílica (Nano-SiO₂) é considerado um material promissor para este fim. Alguns destes estudos avaliaram os efeitos da substituição de cimento, seja em pasta, argamassa, concreto com nano sílica em pequenos níveis de substituição (SEFFF et al. 2010; ALEEM, HEIKAL, 2014). A maioria deles apontam para melhorias nas propriedades mecânicas dos sistemas cimentícios na presença de nano sílica.

Essas melhorias se devem a interferência química e física das partículas de nano sílica no sistema. O efeito químico da nano sílica em pastas funciona em duas etapas. Em primeiro lugar, em razão do efeito pozolânico inerente da nano sílica, que aumenta a quantidade de C-S-H pozolânico presente na mistura. Em segundo lugar, em função do tamanho de partículas ultrafinas e sua maior área superficial. As nano partículas atuam como locais de nucleação, ajudando a rápida formação de C-S-H pela própria hidratação do cimento. As nano partículas também promove o empacotamento da pasta de cimento parcialmente hidratada, pelo efeito físico, resultando em uma microestrutura compactada e densa (SAID et al., 2012).

Santos (2016) observou um aumento expressivo na resistência a compressão em micro concretos com a utilização de nano partículas de sílica. Com adição de 2% de NS aos 28 dias a pesquisadora verificou um aumento da resistência mecânica de 10% em relação à referência. Para Silva Jr (2017), concreto com adição de 2% de nano sílica apresentou um aumento na resistência à compressão de 2% a 11% em relação ao concreto de referência.

2.5.1 Uso Combinado da Nano Sílica (NS) e do Polímero Superabsorvente (SAP)

Na pesquisa de Pourjavadi et al. (2012) utilizaram a nano sílica em pó para melhorar as propriedades mecânicas de pastas contendo polímero superabsorvente. Foram desenvolvidas misturas contendo dois teores de nano sílica (0,5% e 1,0% em relação à massa de cimento) e dois teores de polímero superabsorvente (0,1% e 0,3% em relação à massa de cimento). Os autores verificaram que os teores de adição de nano sílica empregados foram suficientes para compensar o efeito negativo do polímero superabsorvente sobre a resistência à compressão das pastas. Deve-se destacar, porém, que a perda de resistência causada pelo polímero

utilizado foi praticamente desprezível, em comparação com a porcentagem de redução relatada na literatura.

Santos (2016) estudou o efeito combinado da NS e do SAP em relação às propriedades mecânicas e a retração autógena em micro concretos. Os teores de nano sílica utilizados foram 1% e 2% e de SAP de 0,2% e 0,3% e relação a/c de 0,30 para todas as misturas. As combinações foram 1% NS com 0,2% e 0,3% de SAP e 2% de NS com 0,2% e 0,3% de SAP. Constatou-se que a efetividade do SAP na redução da retração autógena não sofreu interferência da adição de NS, uma vez que os traços híbridos obtiveram resultados bastante próximos dos resultados apresentados pelas misturas contendo apenas SAP. A mistura 1% de NS e 0,30% de SAP, quando comparada com a mistura com 0,3% de SAP apresentou aumento de 20 e 9% nas resistências à compressão em cilindros. A pesquisadora observou também que o resultado do *slump-flow test* proposto por Mönnig (2005) para obter a absorção do SAP em meio cimentício não sofreu alteração ao utilizar a nano sílica.

Silva Jr (2017) avaliou a capacidade da NS aumentar a resistência mecânica em concretos contendo SAP. Estudou teores de 1% e 2% de nano sílica com 0,3% de SAP e relação a/c de 0,30, porém alterou a relação água incorporada/cimento em 0,045 e 0,067. Realizou misturas híbridas com 1% e 2% de NS e 0,3% de SAP, com variação da água de cura interna. Para os concretos com água incorporado igual a 0,045, a combinação com os teores de nano sílica estudados mostraram-se eficientes quanto à queda de resistência provocada pelo SAP. Entretanto, para teor de água incorporada 0,067 a NS foi incapaz de compensar as perdas de resistência.

Para os pesquisadores Olivier et al. (2018) num período de até 6 horas o calor desprendido no processo de hidratação em misturas com SAP e em misturas com combinação de SAP e NS são semelhantes.

2.6 FATORES INTERVENIENTES NO TRANSPORTE DE UMIDADE

Como quase todos os problemas de degradação com concreto e outros materiais à base de cimento estão relacionados à água, as propriedades de transporte de umidade estão entre os parâmetros mais importantes nos modelos de durabilidade desses materiais (NILSSON, 2005).

O transporte de água através de materiais porosos pode ser descrito de diferentes maneiras; a divisão mais fundamental é em líquido transporte de água descrito com a lei de Darcy e transporte de vapor de água descrito com a lei de Fick.

O coeficiente de transporte é normalmente chamado de permeabilidade na lei de Darcy e coeficiente de difusão na lei de Fick. A força motriz na lei de Darcy é a pressão total da água na fase líquida (NILSSON, 2003), enquanto o transporte na lei de Fick é escrito em termos de difusão de vapor.

Em materiais porosos é uma situação comum que existe tanto poros grandes que são preenchidos com vapor de ar e água e poros menores que são preenchidos com água líquida, e é costume usar a lei de Fick mesmo se parte do transporte ocorrer na fase líquida. Uma das principais razões para isso é que as condições de contorno são geralmente expressas em termos de umidade relativa (pressão de vapor). Em materiais baseados em cimento, os coeficientes de difusão são função da condição de umidade da amostra (BAZANT; NAJJAR, 1971).

O transporte de água em meios cimentício é bastante complexo. As condições de fronteira, como temperatura, umidade relativa, precipitação, pressão do vento e radiação contribuem para isso. Além destes fatores, a migração de umidade é fortemente influenciada pela estrutura porosa uma vez que em escala microscópica, os materiais são heterogêneos (SALOMÃO, 2016).

2.6.1 Porosidade (ϕ)

Qualquer sólido composto de partículas agregadas aleatoriamente é poroso e permeável, como no caso de materiais cimentícios. A porosidade da pasta como um todo geralmente é maior e depende do conteúdo original de água e da extensão em que o espaço se encheu de produtos de hidratação. Depende, portanto, da relação água/cimento original e das condições de cura (POWERS, 1958).

Há um consenso na literatura que a estrutura dos poros e a porosidade das pastas, argamassas ou concreto estão entre fatores que mais afetam as propriedades mecânicas (fluência e retração) e fenômenos como permeabilidade, difusão e absorção.

Para Salomão (2016), o meio poroso pode ser definido como um conjunto macroscópico heterogêneo que associa três fases: sólida, líquida e gasosa. Entretanto, numa pasta de cimento endurecida, a matriz representa a fase sólida e os poros preenchidos de ar ou de água representam as fases gasosas ou líquidas, respectivamente.

A porosidade tem um papel importante no transporte de umidade da matriz cimentícia e está associada essencialmente ao tamanho e à forma dos poros, bem como da sua organização espacial. A porosidade de um material corresponde à razão entre o volume de vazios e o volume total do material. É possível distinguir dois tipos de porosidade: a porosidade fechada, poros que não se comunicam entre si e a porosidade aberta, poros que são interconectados (THOMSON et al., 2004).

A diferença entre as porosidades total e efetiva revela a quantidade de poros isolados, obtendo-se a porosidade não-efetiva (ou fechada). A porosidade aberta é a que importa nos fenômenos de migração de fluido no espaço poroso. No presente trabalho o uso do termo porosidade se refere à porosidade efetiva (aberta) do material (JANSEN, 2007).

A porosidade efetiva (ou aberta) \emptyset é definida conforme a equação (2.4).

$$\emptyset = \left(\frac{V_{vazios}}{V} \right) \quad (2.4)$$

\emptyset – Porosidade;

V_{vazios} – Volume de vazios;

V – Volume total da amostra;

O volume de vazios pode ser definido como $V_{vazios} = \frac{(M_{SSS} - M_{OD})}{\rho}$, M_{SSS} é a massa medida na condição SSS (superfície saturada seca), M_{OD} é a massa medida após secagem em estufa, ρ é a densidade de água e V_{SSS} é o volume medido da amostra, sendo que $V_{SSS} = V_{total}$. Nestas condições a equação (2.4) pode ser reescrita como segue;

$$\emptyset = \frac{(M_{SSS} - M_{OD})}{V_{SSS} \times \rho} \quad (2.5)$$

2.6.2 Difusividade

A difusão é originada pela diferença da pressão de vapor, isto é, as moléculas de água se movem em direção à menor pressão de vapor (FREITAS, 1992).

A difusão de vapor pode ser descrita por equações de difusão e resolvida por vários métodos numéricos, desde que os coeficientes sejam conhecidos. No entanto, apesar dos coeficientes relacionados à difusão terem sido estudados há muito tempo, o comportamento de transmissão nos materiais ainda permanece um problema não resolvido, embora muitos modelos diferentes tenham sido propostos (BAZANT; NAJJAR, 1972).

A principal dificuldade em estabelecer parâmetros de difusão confiáveis é que a difusão da umidade nos materiais cimentícios é basicamente controlada pela microestrutura do material, e pela distribuição do tamanho dos poros. Além disso, a microestrutura e a umidade relativa nos poros alteram com o decorrer da idade. Acrescido a isso, outros parâmetros que afetam a formação da microestrutura, como a relação água/cimento, tipo de cimento e tempo de cura, têm efeitos significativos nos parâmetros de difusão. No entanto, poucos modelos propostos na literatura possuem parâmetros suficientes para essa previsão (LEUNG, 2009).

A difusão de vapor de água tem sido estudada tanto no campo experimental como modelada numericamente. A taxa de secagem em materiais à base de cimento é geralmente modelada pela teoria da difusão com base na Lei de Fick (BAZANT, NAJJAR, 1971; BAZANT, NAJJAR, 1972; HANSEN, 1987b). Bazant e Najjar (1972) propuseram que a difusão da água no concreto não saturado é suficientemente lenta, quando fases de água na estrutura porosa permanecem em equilíbrio térmico.

Saeidpour e Wadsö (2016) mostraram que na adsorção e dessorção o coeficiente de difusão aparecem com diferentes valores. As amostras em dessorção têm maior difusão que as amostras em adsorção, especialmente com RH de 60%. Também verificaram que a presença de escória e sílica ativa diminuem o coeficiente por fator 10 vezes.

2.7 FENÔMENOS DA VISCOELASTICIDADE

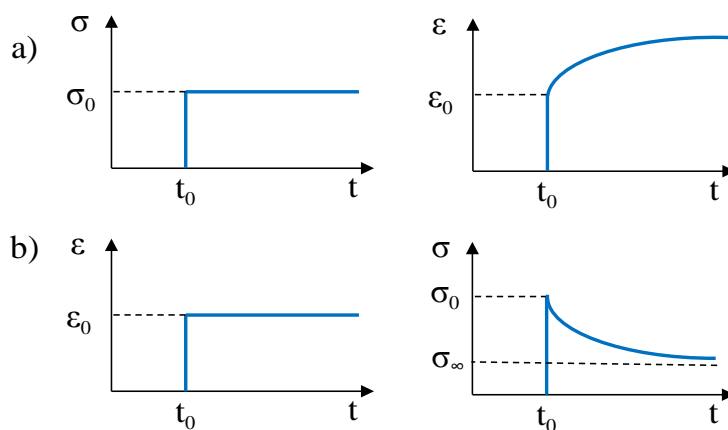
Quando um material é sujeito à aplicação contínua de cargas, a deformação instantânea no momento de aplicação da carga é seguida por outras deformações, que se desenvolvem ao longo do tempo. Este fenômeno viscoelástico é denominado fluência, e tem sido estudado desde a sua descoberta por W.K. Hatt em 1907 na Purdue University (BAZANT; LI, 2008). Além disso, os materiais cimentícios sofrem deformações independentes da tensão aplicada, em razão de fenômenos térmicos e de saída de água.

Nas últimas décadas houve um interesse maior para entender os efeitos dependentes do tempo nestes materiais, particularmente nas primeiras idades. Vários autores publicaram resultados em que o comportamento viscoelástico do concreto, considerando a dilatação térmica e a retração autógena são os principais mecanismos na composição das tensões internas (PANE; HANSEN, 2002).

Os materiais denominados viscoelásticos exibem um comportamento elástico e viscoso, por meio da dissipação e armazenamento de energia mecânica, simultaneamente. Segundo Brinson e Brinson (2008) a viscoelasticidade pode ser traduzida pela dependência das propriedades mecânicas de um material em relação ao tempo.

A fluência é traduzida pelo aumento progressivo da deformação quando é aplicada uma determinada tensão (Figura 2.8a) e a relaxação é a diminuição progressiva da tensão quando o material é sujeito a uma determinada deformação, de acordo com a Figura 2.8b.

Figura 2.8- Propriedades viscoelásticas: a) fluência; b) relaxação



Fonte: Adaptado de GUEDES (2011).

2.7.1 Principais Mecanismos Propostos para a Fluência Básica

- Em sua pesquisa Feldman (1972) sugeriu que a fluência ocorre quando C-S-H gradualmente cristaliza e forma um novo espaço intercamadas. Isto pode ser referido como a teoria de intercalares.
- Sob alta tensão, fases como CH podem se dissolver e reformar em um estado livre de tensões, resultando em deformação por fluência. Esta teoria é referida como a dissolução induzida por tensão (MINDESS et al., 2002).
- Outro mecanismo de fluência envolve a redistribuição da água capilar sob carregamento, proposto por Sellevold e Richards (1972), ocorre em uma escala de tempo curta. Este mecanismo foi posteriormente verificado por Scherer (2000). Deve-se notar que este mecanismo de fluência não envolve a fluência de qualquer material sólido, mas pode contribuir para o entendimento de materiais como concreto ou pasta de cimento quando tratados como um sólido contínuo homogêneo.

Concreto exposto à secagem é conhecido por apresentar maior fluência. A diferença entre a fluência de uma amostra selada (fluência básica) e a fluência medida de uma amostra na secagem é geralmente chamada de fluência por secagem. O fenômeno foi reconhecido primeiramente por Pickett (1942) e é conseqüentemente referido também como o efeito de Pickett. Fluência por secagem tem sido atribuída a muitas fontes diferentes. Algumas das principais explicações propostas incluem:

- Pickett propôs que a não linearidade da relação tensão-deformação levou a uma tensão adicional quando as tensões em razão da retração por secagem e à carga externa foram superpostas.
- O mecanismo de contração induzida pela tensão Bažant e Xi (1994) sugere que quando as cargas externas são combinadas com a secagem (há presença de meniscos capilares), a carga externa influencia as tensões de retração, levando a um aumento da retração sob carga compressiva.

- Outro possível mecanismo para a fluência por secagem é o desenvolvimento de microfissuração em virtude das altas tensões induzidas por gradientes de secagem. A presença de microfissuras pode aumentar a taxa de fluência (PICKETT, 1942) e (BAŽANT; XI, 1994).

Bazant et al. (1997) propuseram a teoria de micro-compressão-solidificação que explica a fluência por secagem e o envelhecimento das propriedades de fluência. Sugere-se que a presença de água adsorvida em áreas de adsorção impedida, que está sempre sob compressão, equilibra a tensão da nanoestrutura com as ligações em ponte de hidrogênio. À medida que o material envelhece, essas pontes lentamente fluem, quebram e se reformam. O relaxamento das tensões de tração na nanoestrutura das ligações resulta no envelhecimento das propriedades viscosas. Ao mesmo tempo, propõe-se que a taxa de fluência da nanoestrutura de ponte aumenta com a diminuição da RH interna, causando assim a fluência de secagem.

2.7.2 Função de Fluência

A relação entre a deformação total $\varepsilon(t)$ e a tensão σ_0 (constante) é designada função de fluência (creep) denominada por $J(t)$ ou $D(t)$, dependendo dos autores, neste trabalho será usado $D(t)$. Como apresentada na equação (2.6).

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2.6)$$

A função de fluência em qualquer instante de tempo é dada pela equação (2.7).

$$J(t) = J_0 + \Delta J(t) = J(0) + \Delta J(t) \quad (2.7)$$

Onde J_0 é a componente da fluência referente à extensão instantânea e o $\Delta J(t)$ é a componente da deformação de fluência (GUEDES, 2011).

2.7.3 Fatores que afetam a fluência

Os mecanismos de fluência têm sido alvo de investigação ao longo das últimas décadas, no entanto o fenômeno ainda não está bem compreendido por ser extremamente complexo. A fluência em materiais cimentícios é fortemente afetada por vários fatores relacionados entre si. Segundo Byfors (1980) a fluência é afetada pelos seguintes fatores: idade de

carregamento (grau de hidratação); tempo de carregamento; composição do concreto; temperatura; estado da mistura do concreto; nível de tensão e umidade relativa ambiente.

Além dos fatores expostos, o aumento do tamanho dos corpos de prova diminui a fluência por secagem, em razão da troca de umidade entre o meio ambiente e o corpo de prova sob tensão. No caso de amostras seladas este efeito não é notado (ARAÚJO, 2015).

2.8 Modelos Clássicos para Previsão da Fluência

Os modelos reológicos permitem simular o comportamento de um material viscoelástico baseados em dois elementos fundamentais: o elemento de mola e o elemento amortecedor. Por meio deste conjunto de elementos encadeados é possível representar a resposta do material quando submetido a um carregamento qualquer.

Na Figura 2.9 são apresentados os elementos base que constituem os modelos reológicos. Para um segmento de mola, a relação entre tensão e deformação é dada pela lei de Hooke, equação (2.8).

$$\sigma(t) = E \varepsilon(t) \quad (2.8)$$

Na equação (2.8), $\sigma(t)$ e $\varepsilon(t)$ representam a tensão e a deformação no instante t , respectivamente e o E o módulo de elasticidade. Num ensaio de fluência, a uma tensão inicial σ_0 (constante), a deformação será σ_0/E , constante ao longo do tempo.

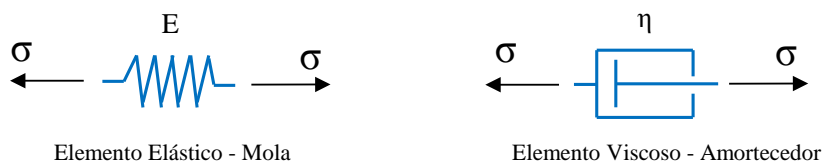
O amortecedor é caracterizado como um pistão que desloca um fluido num cilindro com fundo vazado. A lei da viscosidade de Newton fica representada pela equação (2.9).

$$\sigma(t) = \eta \dot{\varepsilon}(t) \quad (2.9)$$

Sendo η o coeficiente de amortecimento, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação dada por $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$. A taxa de deformação é proporcional à tensão, portanto, para um ensaio de fluência o amortecedor deforma-se a uma taxa constante.

A partir da combinação dos elementos básicos, em série e/ou paralelo, obtêm-se os modelos viscoelásticos presentes na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Elementos básicos dos modelos reológicos



Elemento Elástico - Mola

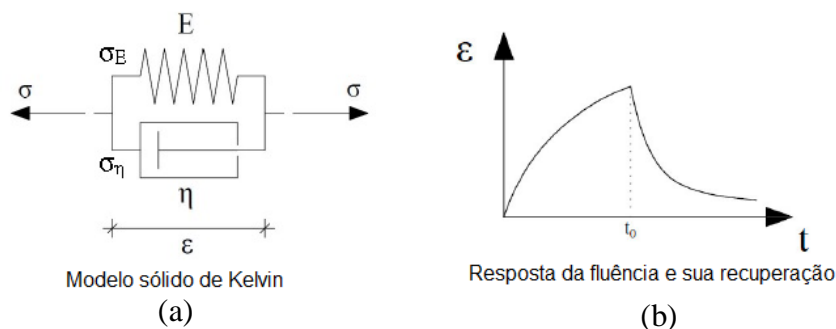
Elemento Viscoso - Amortecedor

Fonte: Adaptado de GUEDES (2011).

2.8.1 Modelo de Kelvin

É constituído pelos dois elementos básicos ligados em paralelo, como apresenta a Figura 2.10a, já a Figura 2.10b apresenta a resposta da fluência e a recuperação da deformação.

Figura 2.10 – Modelo reológico de Kelvin



Modelo sólido de Kelvin

(a)

Resposta da fluência e sua recuperação

(b)

Fonte: Adaptado de GUEDES (2011).

A tensão total é dada pela equação (2.10).

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_\eta \quad (2.10)$$

σ_E – A tensão correspondente à parcela elástica;

σ_η – A tensão correspondente à parcela viscosa;

Utilizando as leis constitutivas dos elementos mola e amortecedor, incorporando-as na equação (2.9), origina-se a equação constitutiva do modelo sólido de Kelvin, dada por:

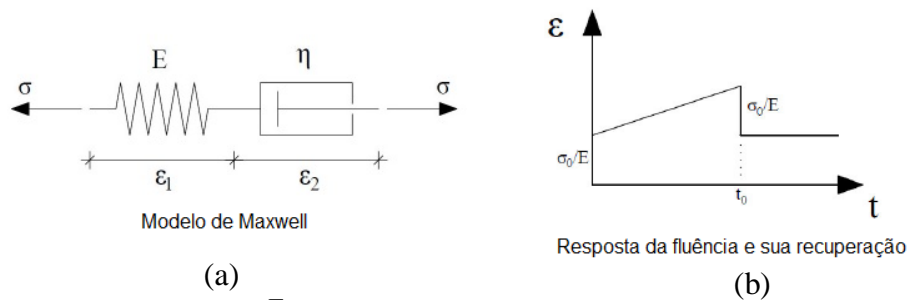
$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\sigma(t)}{\eta} - \frac{E\varepsilon(t)}{\eta} \quad (2.11)$$

No modelo de Kelvin, quando aplicada uma tensão de forma abrupta, o primeiro elemento a ser solicitado é o viscoso, alongando-se, transferindo gradualmente a carga para a mola. Este comportamento é denominado por elasticidade retardada. A recuperação da fluência é do tipo transiente eanelástico, podendo ocorrer em alguns materiais uma recuperação total ou parcial, Figura 2.10b.

2.8.2 Modelo de Maxwell

É constituído por dois elementos base, uma mola e um amortecedor, conectados em série, como apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Modelo reológico de Maxwell



Fonte: Adaptado de GUEDES (2011).

A deformação total é dada por:

$$\varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta \quad (2.12)$$

Derivando as leis constitutivas dos dois elementos base e adotando uma taxa de deformação igual a $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_E + \dot{\varepsilon}_\eta$, a equação constitutiva do modelo de Maxwell obtida é:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E} + \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad (2.13)$$

Fisicamente, no modelo de Maxwell, quando a carga aplicada é removida, a mola reage imediatamente, mas o amortecedor tende a ficar nas mesmas condições, não recuperando carga, como se pode verificar na Figura 2.11b.

A partir da derivada em função do tempo da equação (2.11), a função de fluência do modelo de Kelvin é dada por:

$$J(t) = \frac{1}{E} \left(1 - e^{-t \frac{E}{\eta}} \right) \quad (2.14)$$

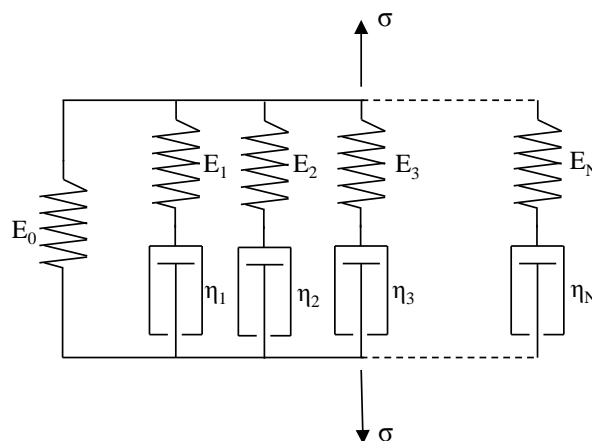
Na mesma linha de pensamento a função de fluência para o modelo de Maxwell é dada por:

$$J(t) = \frac{1}{E} + \frac{1}{n} \quad (2.15)$$

Os modelos de Kelvin e de Maxwell descritos têm limitações na representação do comportamento de materiais viscoelásticos. O modelo de Kelvin revela limitações por não ser capaz de simular a resposta elástica do material, enquanto o modelo de Maxwell não é realista para a caracterização de um comportamento de fluência dos materiais cimentícios, pois só é capaz de simular uma resposta linear com o tempo (GUEDES, 2011).

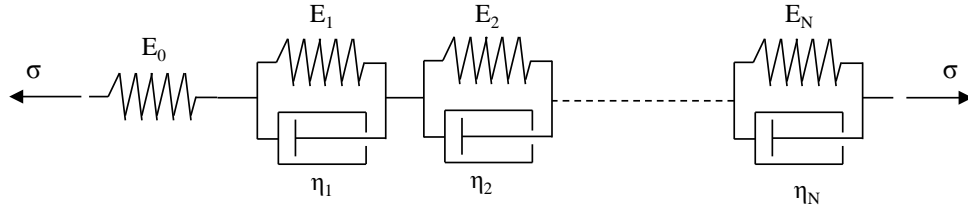
Com conexão de vários elementos de Maxwell ou Kelvin é possível criar inúmeros modelos mecânicos que caracterizam o comportamento viscoelástico do concreto, argamassas e pastas de cimento, alguns deles são designados por modelos generalizados de Maxwell e Kelvin, respetivamente. O modelo generalizado de Maxwell é constituído por uma mola associada em paralelo com N modelos de Maxwell, como é mostrado na Figura 2.12. O modelo generalizado de Kelvin apresentado na Figura 2.13 é constituído por N modelos de Kelvin e uma mola para simular a deformação elástica, interligados em série.

Figura 2.12 - Modelo generalizado de Maxwell



Fonte: Adaptado de GUEDES (2011).

Figura 2.13 - Modelo generalizado de Kelvin



Fonte: Adaptado de GUEDES (2011).

Quando N modelos de Maxwell e um elemento elástico são conectados em paralelo, o modelo é capaz de representar a deformação elástica e, na componente viscosa, a fluência e/ou relaxação. No entanto, este modelo é mais conveniente quando conhece o seu histórico de deformações (GUEDES, 2011).

Segundo Grasley (2006), a cadeia de Kelvin é particularmente apropriada para modelagem da deformação por fluência sob uma tensão imposta enquanto que a cadeia de Maxwell é ideal para modelagem da relaxação da tensão sob um histórico de deformação imposta.

Os modelos de Kelvin são conectados em série com um elemento elástico isolado, o modelo é mais conveniente quando é conhecido o histórico de carregamento (GUEDES, 2011). A resposta da fluência nestas condições é dada por:

$$Js(t) = \left[\frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} (1 - e^{-t/\tau_i}) \right]; \tau_i = \frac{\eta}{E} \quad (2.16)$$

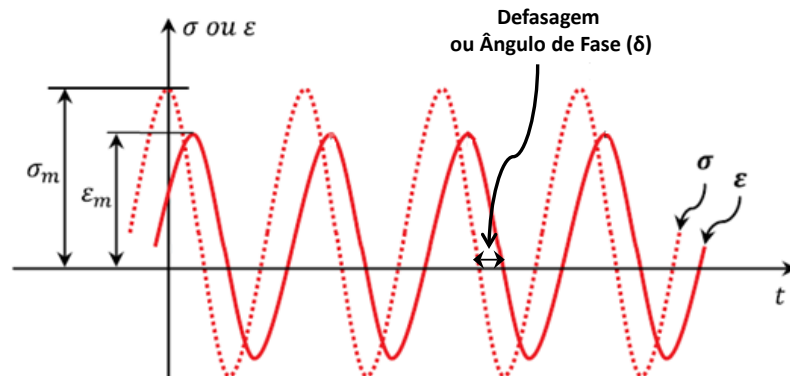
O primeiro termo representa a componente elástica do material e o segundo termo a componente de fluência. $\tau_i = \frac{\eta}{E}$, são chamados de tempo de retardo. A equação (2.16) também é classificada como a série de Prony ou Dirischlet (τ_i são fatores de 10 na escala log de tempo).

2.8.3 Ensaio Dinâmico no Domínio da Frequência para Determinação da Curva de Fluência

Estes ensaios consistem na aplicação de um carregamento oscilatório harmônico (no domínio da frequência) e na medição da resposta, também de natureza harmônica. As propriedades resultantes também são consideradas propriedades constitutivas viscoelásticas fundamentais. A Figura 2.14 ilustra um carregamento (tensão ou deformação) de natureza harmônica e uma

resposta mecânica (deformação ou tensão, respectivamente), obtida em um material viscoelástico.

Figura 2.14 - Tensão e deformação harmônicas de ensaio no domínio da frequência



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Caso o carregamento imposto seja uma deformação harmônica (com deformação máxima aplicada ε_m), a tensão resultante, após o regime permanente ter sido atingido, apresentará uma resposta oscilatória defasada de um determinado ângulo de fase δ , conforme descrito na equação (2.18) (FINDLEY et al., 1989).

Aplicação de uma tensão senoidal (harmônica);

$$\sigma(t) = \sigma_m \cos(\omega t) \quad (2.17)$$

A resposta será uma deformação também senoidal defasada de um ângulo δ .

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_m \cos(\omega t - \delta) \quad (2.18)$$

ε_m e σ_m são valores máximos de deformação e tensão harmônicas, respectivamente;

ω é a frequência angular da oscilação harmônica;

δ é o ângulo de fase.

Quanto mais próximo de 90° (π /rad) for o ângulo de fase δ , maior é o retardo entre carregamento e a resposta, e mais pronunciada é a parcela viscosa do material viscoelástico frente a sua parcela elástica (KIM, 2008).

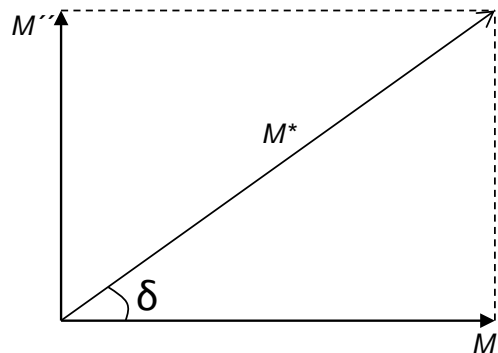
A tensão num experimento dinâmico é referenciada como tensão complexa σ^* . Essa tensão pode ser separada em dois componentes: i) Uma tensão elástica em fase com a deformação $\sigma' = \sigma^* \cos \delta$ (σ' é o grau ao qual o material se comporta como um sólido elástico); ii) Uma tensão viscosa em fase com a taxa de deformação. $\sigma'' = \sigma^* \sin \delta$, σ'' é o grau ao qual o material se comporta como um líquido ideal (LORANDI et al. 2016).

A tensão complexa é dada por;

$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' \quad (2.19)$$

Um módulo complexo genérico é a razão da tensão sobre a deformação $M^* = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m}$, onde cada módulo pode ser representado por um número complexo. O módulo complexo é demonstrado geometricamente na Figura 2.15 e na equação (2.18) (LORANDI et al., 2016).

Figura 2.15 – Representação da relação trigonométrica entre o módulo complexo M^* , de armazenamento M' e de perda M'' e o ângulo δ .



Fonte: Lorandi et al. (2016).

$$M^* = M' + iM'' \quad (2.20)$$

O módulo de M^* é dado pela equação (2.20).

$$|M^*| = \sqrt{(M')^2 + (M'')^2} \quad (2.21)$$

M^* é o módulo complexo,

M' é o módulo de armazenamento,

M'' é o módulo de perda,

e

$$i = \sqrt{-1};$$

- O módulo de armazenamento M' é a parte real do módulo complexo, e é calculado para a determinação da quantidade de energia armazenada e retida durante o ciclo da aplicação da carga, dado pela equação (2.22).

$$M' = M^* \cos \delta \quad (2.22)$$

- O módulo de perda M'' é a parte imaginária do módulo complexo e refere-se à energia dissipada durante o ciclo. Como mostra a equação:

$$M'' = M^* \sin \delta \quad (2.23)$$

- O fator de perda, tangente de perda, $\tan \delta$ – é a razão entre o módulo de perda pelo módulo de armazenamento:

$$\tan \delta = \frac{M''}{M'} \quad (2.24)$$

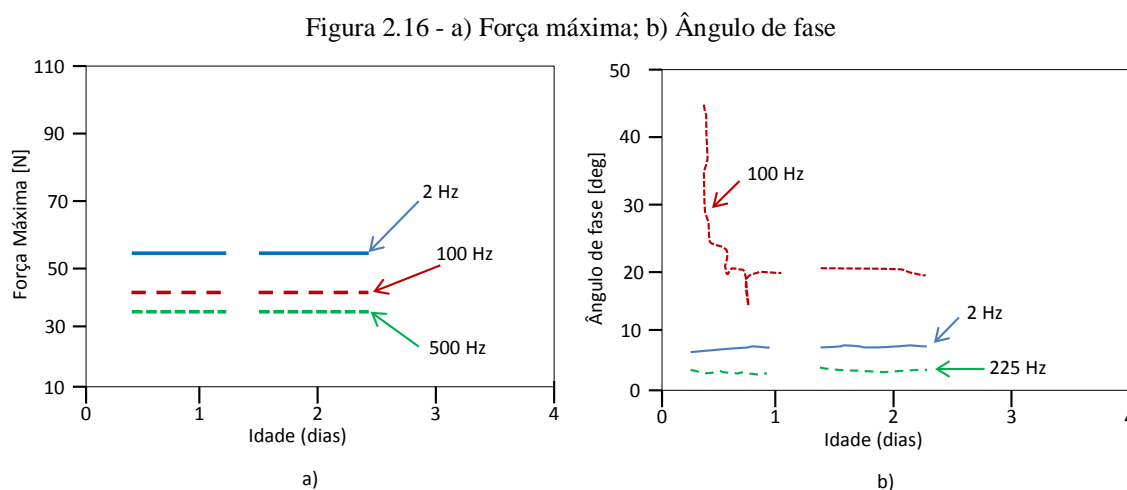
Destaca-se que os ensaios no domínio da frequência, embora tenham um apelo menos intuitivo, apresentam algumas vantagens operacionais frente a seus ensaios correspondentes no domínio do tempo. Uma primeira vantagem decorre da duração mais curta dos ensaios no domínio da frequência.

Os ensaios no domínio da frequência garantem mais facilmente o regime de viscoelasticidade linear, segundo Kim (2008), uma vez que a natureza do carregamento oscilatório resulta em deformações e tensões suficientemente pequenas para que os agregados não causem o efeito de intertravamento.

Os pesquisadores Granja e Azenha (2016) propuseram uma abordagem denominada VisCoDyn para avaliar o comportamento viscoelástico do concreto desde as primeiras idades, introduzindo uma excitação dinâmica conhecida numa amostra simplesmente apoiada. O método envolve o monitoramento contínuo da resposta da amostra ensaiada em termos de

amplitude (força e deslocamento), bem como a avaliação do desfasamento entre a força aplicada e a resposta, como é apresentado na Figura 2.16.

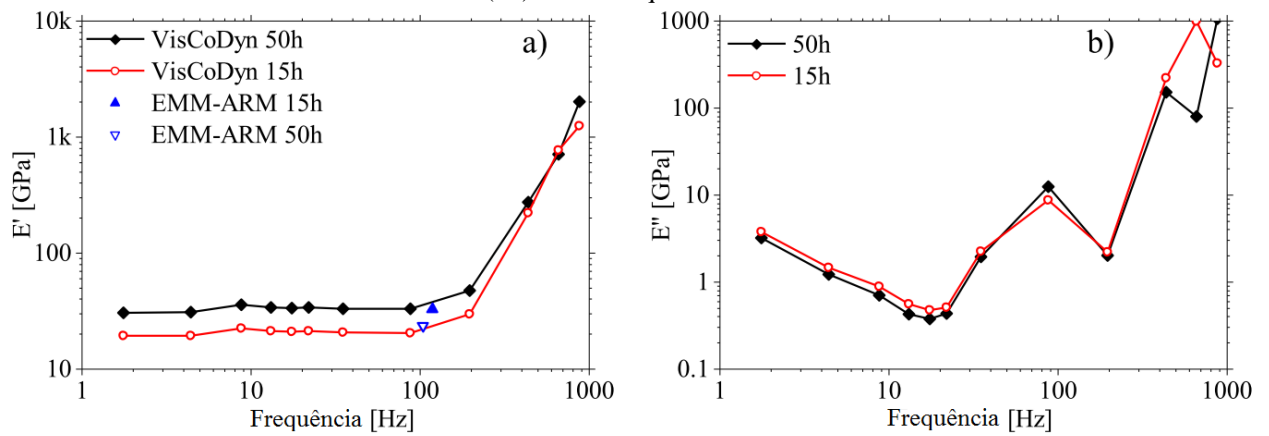
Os autores observaram que as frequências de ensaio conduziram a uma força exercida constante durante todo o período de ensaio. Para a maioria das frequências testadas, a força tende a ser mais alta em frequências mais baixas e a diminuir com o aumento da frequência. Os dados adquiridos são utilizados para calcular os módulos de armazenamento e de perda. Na Figura 2.17 são mostrados os dados determinados experimentalmente e comparados a valores de outra metodologia chamada Medida do Módulo de Elasticidade pelo Método de Resposta Ambiente (EMM-ARM) desenvolvida nos trabalhos de Azenha et al. (2015) e Azenha et al. (2010).



Fonte: Adaptado de (GRANJA; AZENHA, 2016).

Ainda segundo Granja e Azenha (2016), os valores do módulo de armazenamento obtidos são quase independentes de frequência na gama de 2-100 Hz (Figura 2.17a), e também esses valores são bastante semelhantes aos obtidos pelo EMM-ARM (15 e 50 horas). Para frequências mais altas, o módulo de armazenamento tende a aumentar de forma significativa. O módulo de perda (E''), mostrado na Figura 2.17b, tende a diminuir com a frequência entre 2 e 20 Hz em ambos os instantes. Então, para frequências mais altas, E'' parece aumentar significativamente em coerência com a cinética dos módulos de armazenamento.

Figura 2.17 - a) Estimativa do módulo de armazenamento (E') vs frequência; b) Estimativa do módulo de perda (E'') versus frequência



Fonte. Adaptado de (GRANJA; AZENHA, 2016).

2.9 PROPRIEDADES CONSTITUTIVAS

As propriedades e abordagens apresentadas neste capítulo serão utilizadas nas equações constitutivas dos capítulos subsequentes.

2.9.1 Introdução

Uma revisão da literatura revela pouco esforço no desenvolvimento de modelos tridimensionais viscoelásticos constitutivos para a pasta de cimento endurecida. No entanto, os parâmetros constitutivos da fração de pasta são atraentes, pois são mais confiáveis do que em concreto. As propriedades viscoelásticas do concreto não são tão evidentes como na pasta (GRASLEY, 2006).

É desafiador utilizar um modelo constitutivo apropriado para materiais cimentícios uma vez que apresentam envelhecimento. Duas teorias constitutivas que explicam o envelhecimento de maneiras diferentes são mostradas neste capítulo. A primeira é a abordagem do tempo diferido (time-shift), e a segunda é a teoria de solidificação, ambas exigem o uso da integração numérica e a utilização da integral como operador linear (BAZANT, 1966).

2.9.2 Envelhecimento

O envelhecimento é definido como a evolução das propriedades constitutivas mecânicas (tanto instantâneas como transitórias) com a idade. O envelhecimento ocorre independentemente da aplicação de tensões externa (GRASLEY; LANGE, 2007). O problema

do envelhecimento é frequentemente um fator limitante para os modelos matemáticos teóricos que incorporam comportamento viscoelástico.

Os mecanismos que conduzem ao envelhecimento das propriedades de fluência do concreto não são bem compreendidos. O envelhecimento das propriedades elásticas segue bem a curva de hidratação, implicando que o envelhecimento aconteça simplesmente devido ao aumento da resistência mecânica da microestrutura portante, no caso a formação do C-S-H. As propriedades de fluência continuam a envelhecer mesmo quando a hidratação cessa (GRASLEY; LANGE, 2007).

Diversas hipóteses sugeridas por alguns pesquisadores tentam explicar o fenômeno do envelhecimento. Para Bazant et al. (1997), o envelhecimento pode ser em parte o resultado do relaxamento da distribuição de tensões na microestrutura portante C-S-H, ou o aumento da polimerização de C-S-H ao longo do tempo (JENNINGS, 2004). Para Bentur et al. (1978) a secagem foi acelerada com o aumento da polimerização das cadeias de C-S-H. Já para os autores Grasley e Lange (2007), Carol e Bazant (1993) atribuíram o envelhecimento ao aumento da formação de produtos de hidratação ou pela compactação dos produtos formados a partir da hidratação ao longo do tempo.

Grasley e Lange (2007) afirmam que, tal como acontece com cargas aplicadas externamente, é razoável incluir tanto os efeitos viscoelásticos como também o envelhecimento, em um modelo de retração por secagem. Portanto, é razoável supor que a fluência constitui um componente de retração. Além disso, existem evidências experimentais que indicam que a retração por secagem continua, mesmo que a RH interna seja constante (isto é, pressão de poro interna esteja constante).

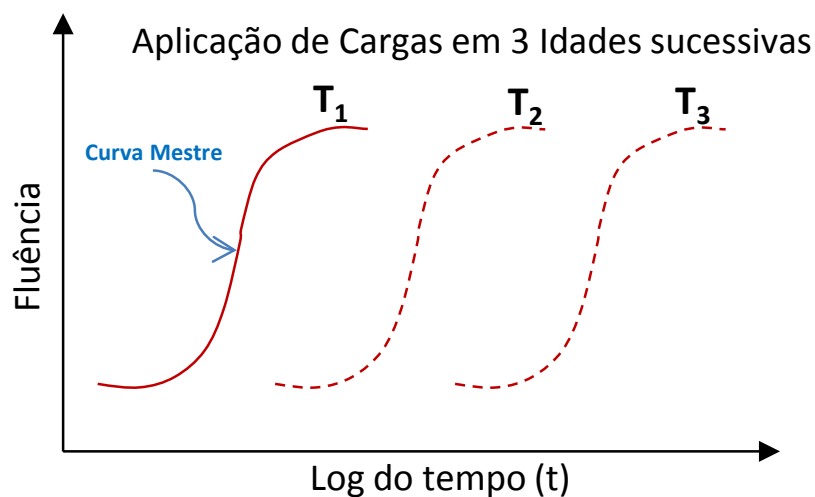
À medida que a fração volumétrica de C-S-H aumenta dentro da pasta de cimento com a idade, o efeito do envelhecimento com C-S-H em relação ao comportamento geral de fluência/relaxamento da pasta de cimento também provavelmente aumenta (LI, X. et al., 2017).

2.9.3 Abordagem Tempo Diferido (Time-Shift)

A abordagem do tempo diferido para considerar o envelhecimento na viscoelasticidade é análoga ao princípio de superposição da temperatura-tempo derivado primeiramente por (MORLAND; LEE, 1960). Segundo esse princípio, o efeito de diferentes temperaturas causa um aumento ou diminuição nos tempos de retardo ou de relaxamento. O resultado é simplesmente uma mudança na conformidade ou funções de módulo ao longo do eixo log de tempo, sem alterar a forma das curvas. Os materiais que exibem esta propriedade são denominados "termorreologicamente simples", ou TRS (SCHERER, 1986).

O envelhecimento de materiais viscoelásticos pode ser tratado da mesma maneira que o princípio da superposição de tempo e temperatura. O efeito de envelhecimento pode ser explicado simplesmente deslocando os tempos de retardo ou relaxamento. Funções típicas de conformidade de um material apropriadas para deslocamento são mostrados na Figura 2.18. Observe que a forma das funções na escala de log do tempo não muda com a idade de carregamento. Medindo a fluência ou módulo em múltiplas idades e selecionando uma idade para ser a "mestre", os tempos de retardo ou de relaxamento para as outras idades são simplesmente deslocados por um fator constante até que caem em linha com a curva mestre plotada em um log-log (GRASLEY; LANGE, 2007).

Figura 2.18 – Aplicação de carga constante em 3 idades sucessivas simplesmente - desloca o retardo ao longo do eixo do log do tempo



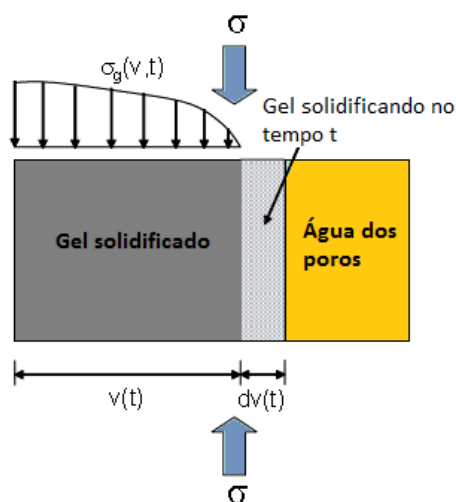
Fonte: Adaptado de Scherer (1986).

2.9.4 Teoria da Solidificação

A teoria da solidificação foi definida originalmente por Bazant (1977) para explicar o efeito do envelhecimento na fluência do concreto. As bases primárias do modelo demonstram que os produtos de hidratação em formação são materiais viscoelásticos não envelhecidos. Entretanto, os efeitos do envelhecimento é resultado da solidificação gradual a partir da deposição de novos produtos de hidratação na rede porosa da matriz cimentícia. Segundo Rosa et al. (2016), esse processo aumenta a rigidez e a viscosidade macroscópica do material e reduz a taxa de fluência.

Cada camada dos produtos de hidratação deve solidificar num estado isento de tensão, o que implica que as camadas que formam uma idade t' só são forçadas por cargas aplicadas após t' . A teoria da solidificação é ilustrada na Figura 2.19.

Figura 2.19 - Diagrama conceitual de material solidificante submetido à tensão aplicada σ



Fonte: Adaptado de Carol e Bazant, (1993)

2.9.5 Contabilização dos Efeitos da Teoria da Solidificação e do Tempo Diferido

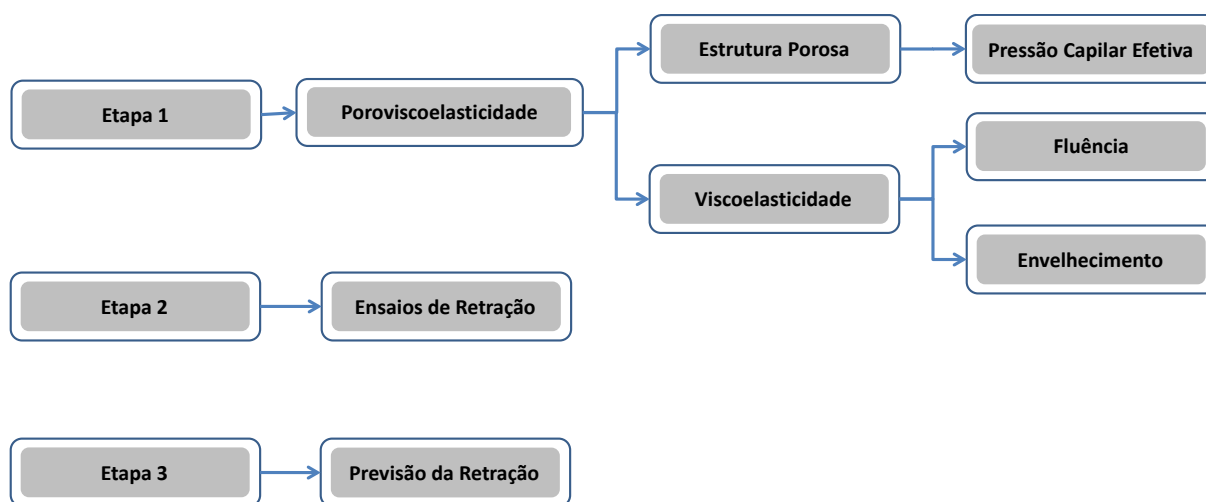
Outra abordagem foi proposta por Grasley e Lange (2007) que combina a solidificação e o tempo diferido. Para o autor, aumentos no grau de hidratação que afetam o módulo elástico também afetam as propriedades viscoelásticas. Portanto, os efeitos de solidificação devem ser contabilizados na análise. É também claro que existem mecanismos adicionais que impactam a taxa de fluência sem interferir nas propriedades elásticas instantâneas. Portanto, a mudança nos tempos de retardo associados a esse efeito também deve ser considerado na análise.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o programa experimental referente às pastas de cimento. Nele estão incluídos os materiais, tipos de misturas, ensaios realizados e metodologias para determinação da perda de massa e retração por secagem.

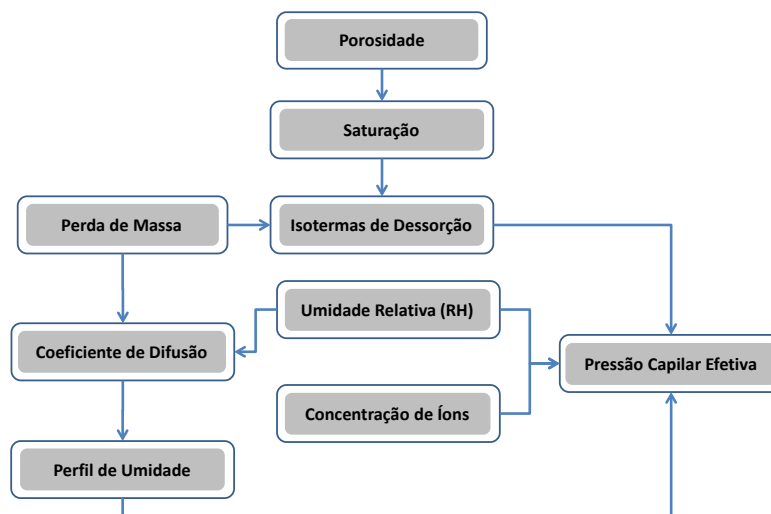
O tratamento numérico e as metodologias utilizadas nos ensaios também são descritos neste capítulo. O fluxograma da Figura 3.1 apresenta a estratégia utilizada nesta fase para alcançar os objetivos propostos, sendo subdividida em três etapas distintas. Uma correspondente à avaliação das propriedades dos parâmetros poroviscoelásticos, a segunda refere-se aos ensaios de retração e a última apresenta uma previsão da retração com as equações poroviscoelásticas.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia.



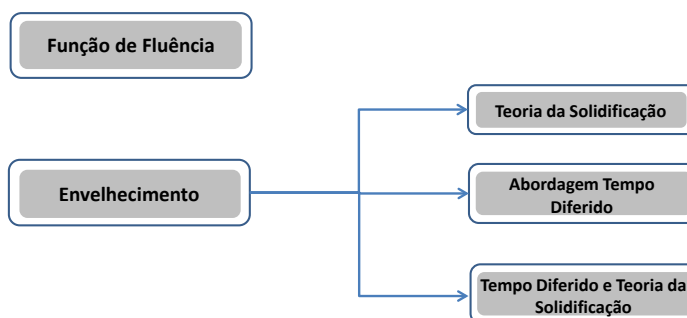
Para a determinação dos parâmetros poroviscoelásticos da estrutura porosa, serão necessários definir as propriedades das misturas apresentadas na Figura 3.2. Algumas delas adquiridas diretamente por medições em laboratório, como a perda de massa e porosidade e outras obtidas por métodos clássicos utilizados na literatura.

Figura 3.2 – Relação de parâmetros para caracterização do transporte de massa



Para caracterização da viscoelasticidade da etapa 1, foram abordadas a função de fluência e a solidificação da matriz cimentícia que será prevista por teorias de envelhecimento. As teorias avaliadas foram três, a teoria da solidificação, a abordagem do tempo diferido e a proposta que reúne ao mesmo tempo a teoria da solidificação e a abordagem do tempo diferido, como apresenta o fluxograma da Figura 3.3.

Figura 3.3 – Relação de parâmetros para caracterização da viscoelasticidade



Na pesquisa foram produzidos cinco tipos de misturas de pastas, sendo duas misturas de referência (REF030) e (REF035). Outras três misturas, uma com SAP (SAP030), nano sílica NS (NS1) e uma terciária com SAP e NS (SAP030NS1). As misturas serão avaliadas para as idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias.

Tabela 3.1- Teores de SAP, NS e a/c para os traços desenvolvidos

Misturas	Pastas	Teor de SAP (%)	Teor NS (%)	Relação a/c	Água Incorporada
1	REF030	-	-	0,30	-
2	REF035	-	-	0,35	-
3	SAP030	0,3	-	0,30	0,05
4	NS1	-	1	0,30	-
5	SAP030NS1	0,3	1	0,30	0,05

Os teores de 0,30% de polímero e 1% de nano partículas de sílica usados foram sugeridos nas pesquisas de Manzano (2016) e Santos (2016), respectivamente. As misturas com SAP possuem uma a/c de 0,30 e a/c_i de 0,05 (água de cura interna). A Tabela 3.2 apresenta os teores e as composições para cada mistura.

Tabela 3.2– Composições das pastas (kg/m³)

Pastas	Materiais Secos (Kg/m ³)			Nano sílica			SP		
	Cimento	Sílica Ativa	SAP	Teor puro (%)	Peso puro (kg/m ³)	Teor Total (%)	Peso Total (kg/m ³)	Teor (%)	Peso (kg/m ³)
REF030	700	70	-	-	-	-	-	2,0	14
REF035	700	70	-	-	-	-	-	2,0	14
SAP030	700	70	2,1	-	-	-	-	2,0	14
NS1	700	70	-	1,0	7,0	3,3	23,3	2,0	14
SAP030NS1	700	70	2,1	1,0	7,0	3,3	23,3	2,0	14

3.1 Materiais

A seleção dos materiais foi realizada de acordo com a disponibilidade da região e dos fornecedores. Os materiais são utilizados da mesma maneira como são comercializados, sem qualquer tipo de alteração nas suas características iniciais.

O cimento é do tipo CPV ARI (alta resistência inicial), foi proposto por ter um elevado teor de clínquer. A sua caracterização física e mecânica foi realizada no laboratório de materiais (LEM) e no laboratório de Geotécnica da Universidade de Brasília (UnB). A caracterização química do cimento foi realizada pela técnica de espectroscopia de fluorescência de Raios-X (EDX) no laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília, a Tabela 3.3 e a Tabela 3.4 apresentam as caracterizações físicas e químicas do cimento.

Tabela 3.3 - Caracterização física do cimento CPV-ARI

Ensaio	Unidade	Resultado	Limites NBR 5733	Referência normativa
Massa específica	g/cm ³	3,290	---	NBR NM 23:2001
Área específica – Blaine	cm ² /g	3.935	≥ 3000	NBR NM 23:2001
Tempo de início de pega	h:min	02:00	≥ 1:00	NBR NM 65:2003
Tempo de fim de pega	h:min	03:40	≤ 10:00	NBR NM 65:2003
Água de consistência – Pasta	(%)	30,60	---	NBR NM 43:2003
Expansão em Autoclave	(%)	0,1	---	ASTM C151
	1 dia	MPa	≥ 14,0	NBR 7215:1996
Resistência à	3 dias	MPa	≥ 24,0	NBR 7215:1996
compressão	7 dias	MPa	≥ 34,0	NBR 7215:1996

Tabela 3.4- Caracterização química do cimento CPV-ARI

Composição química	Teores (%)	Limites		
		NBR 5733	Método de ensaio	
Perda ao fogo	2,68	≤ 4,5	NBR NM 18:2012	
Resíduo insolúvel	0,14	≤ 1,0	NBR NM 15:2012	
Trióxido de enxofre – SO ₃	4,23	*	NBR NM 16:2012	
Óxido de magnésio – MgO	5,19	≤ 6,5	NBR NM 11-2:2012	
Dióxido de silício – SiO ₂	19,44	---	NBR NM 11-2:2012	
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	2,24	---	NBR NM 11-2:2012	
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	3,68	---	NBR NM 11-2:2012	
Óxido de cálcio- CaO	61,13	---	NBR NM 11-2:2012	
Óxido de cálcio livre - CaO	1,2	≤ 3,0	NBR NM 13:2012	
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	7,17	---	NBR NM 16:2012	
Álcalis Totais	Óxido de sódio – Na ₂ O	0,45	---	NBR NM 17:2012
	Óxido de potássio – K ₂ O	0,92	---	NBR NM 17:2012
	Equivalente alcalino	1,11	---	NBR NM 17:2012
Álcalis Solúveis em Água	Óxido de sódio – Na ₂ O	0,22	---	NBR NM 17:2012
	Óxido de potássio – K ₂ O	0,49	---	NBR NM 17:2012
	Equivalente alcalino	0,58	---	NBR NM 17:2012

A sílica ativa utilizada na fabricação das pastas é de origem nacional, do tipo não densificada, com massa específica de 2,21 g/cm³. Fixou-se o teor de 10% em relação à massa do cimento, conforme recomendação do Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012). Os ensaios de caracterização física e química foram realizados no Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A, cujos resultados constam na Tabela 3.5.

Tabela 3.5- Caracterização química da Sílica Ativa.

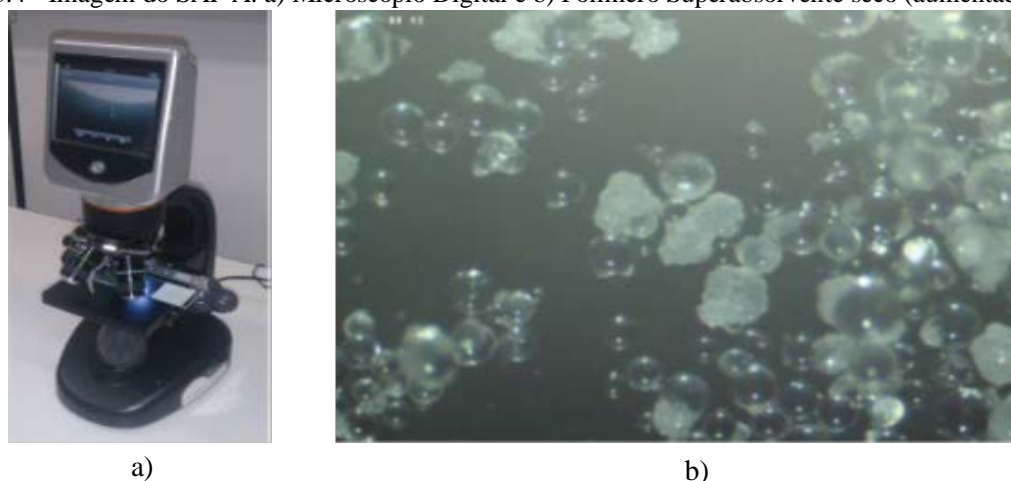
Propriedades	Teores (%)	Limites NBR 13956:2012	Métodos de Ensaio	
Perda ao fogo	3,22	≤6,0	NBR NM 15:2012	
Óxido de Magnésio - MgO	0,49	-	NBR 13956:2012	
Dióxido de Silício – SiO ₂	93,55	≥85	NBR 13956:2012	
Óxido de Ferro – Fe ₂ O ₃	0,16	-	NBR 13956:2012	
Óxido de Alumínio – Al ₂ O ₃	0,15	-	NBR 13956:2012	
Óxido de Cálcio – CaO	0,37	-	NBR 13956:2012	
Álcalis Totais	Óxido de Sódio – Na ₂ O	0,26	-	NBR NM 17:2012
	Óxido de Potássio – K ₂ O	0,85	-	NBR NM 17:2012
	Equivalente Alcalino	0,82	≤1,5	NBR NM 17:2012

O polímero superabsorvente utilizado no trabalho foi fornecido pelo professor e pesquisador Ole Mejlhede Jensen e desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU). Trata-se de um polímero do tipo ácido acrílico/acrilamida, com ligações cruzadas covalentes, produzido pela técnica de polimerização por suspensão.

Este SAP foi especialmente desenvolvido para uso em ambiente de elevada alcalinidade, como é o caso de suspensão em meio cimentício. Fornecido como um pó seco e branco, com

partículas esféricas. Na Figura 3.4 apresenta-se o polímero, no estado seco, visto pelo Microscópio Digital Profissional LCD marca CELESTRON Modelo # 44345, com um aumento de 1600x. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da UnB (MANZANO, 2016).

Figura 3.4 - Imagem do SAP A: a) Microscópio Digital e b) Polímero Superabsorvente seco (aumentado 1600x)



Fonte: (MANZANO, 2016).

Os resultados da caracterização do SAP realizada por Manzano (2016) e Andrade Neto (2014) estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Resultados das características do SAP realizada por Manzano (2016) e Andrade Neto (2014)

Características	Método	Resultado
Massa específica (g/ml)	Picnômetro	1,456
Absorção em meio aquoso (g/g)	Proveta graduada	95,8
	Microscópio ótico	80,3
Absorção em meio cimentício (g/g)	<i>Slump-flow</i>	15,0

A massa específica foi determinada pela média de duas amostras por um analisador automático de densidade (picnômetro), de marca Quantachrome Instruments e modelo PENTAPYC 5200e, conforme metodologia de Manzano (2016). A avaliação da absorção do polímero em meio aquoso foi realizada por dois métodos: o ensaio da proveta graduada de Jensen (2011) e a análise de imagens do microscópio ótico, neste caso as imagens foram geradas pelo Microscópio Digital Profissional LCD marca CELESTRON Modelo # 44345, aumentadas 520x. A absorção no meio cimentício foi realizada utilizando o método de *slump-flow test* ou espalhamento de argamassa, proposto por Mönnig (2005).

Segundo o fabricante, trata-se de uma dispersão aquosa alcalina e estabilizada, em que as partículas de NS amorfa possuem carga superficial negativa, são descontínuas, de forma ligeiramente rugosa, esférica e estreita distribuição granulométrica. A dispersão é um líquido translúcido, ligeiramente mais viscoso que a água. Segundo recomendação, é desenvolvida para uso em meios cimentícios com objetivo de controlar a estabilidade, segregação e perda de água.

O teor de NS utilizado será de 1% em relação à massa do cimento, considerando o teor de sólidos de 30%. Assim, a porcentagem da solução adicionada é de 3,33% para atingir o teor desejado. As características físicas e químicas da nano sílica estão representadas na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8.

Tabela 3.7 - Características químicas da NS

Composição química	Teores (%)
Perda ao fogo	6,19
Óxido de magnésio – MgO	0,10
Dióxido de silício – SiO ₂	90,61
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	0,11
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	<0,01
Óxido de cálcio – CaO	0,02
Óxido de cálcio livre – CaO	1,2
Sulfato de cálcio – CaSO ₄	7,17
Óxido de potássio – K ₂ O	0,03
Óxido de sódio – Na ₂ O	2,03
Dióxido de Titânio – TiO ₂	0,03
Pentóxido de Fosforo – P ₂ O ₅	<0,01

Tabela 3.8 - Características físicas da NS

Propriedades	Valor
Natureza química	Sílica amorfa
Apresentação – estado físico	Solução aquosa coloidal – líquido
Cor – odor	Claro/ligeiramente turvo – odor
Teor de sílica (%)	30
Tamanho aproximado das	~ 22,75 nm
pH	10,5 (9 -11)
Viscosidade (MPa.s)	< 50
Densidade (g/cm ³)	1,2

O aditivo químico utilizado é o Glenium 51, do tipo redutor de água de grande eficiência (superplastificante tipo II – SPII-N), a base de policarboxilato e de pega normal, segundo a classificação da ABNT NBR 11768:2011. A Tabela 3.9 apresenta as características físico-químicas do aditivo empregado fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.9 - Propriedades e características do aditivo superplastificante

Característica/Propriedade	Resultado
Base Química	Éterpolicarboxilato
Massa Específica (g/cm ³)	1,067 - 1,107
pH	6
Teor de Sólidos	30%
Teor de Cloretos	Isento

Utilizou-se um teor de 2% de aditivo superplastificante em todas misturas. Esse teor foi determinado com base na consistência necessária à moldagem dos corpos de prova, realizada com a técnica do miniabatimento. Neste caso fixou-se o espalhamento em 90 ± 10 mm, como sendo o valor mínimo necessário para moldagem.

Para realização do ensaio, utilizou-se o mini *slump*, como mostrado na Figura 3.5a, medindo a abertura do espalhamento da pasta. O ensaio inicia-se com a preparação da base de vidro que deve estar completamente limpa e nivelada. A base de vidro e o mini *slump* foram lubrificados com óleo mineral.

Figura 3.5 - Ensaio do mini *slump* a) Minitronco; b) Detalhe do abatimento



a)



b)

Em seguida o mini *slump* foi preenchido com pasta, aplicando-se 10 leves toques no topo do cone, onde nivelou-se o topo, retirando o excesso de pasta. O mini *slump* foi retirado e ao final de 1 minuto mediu-se o diâmetro da pasta que formou em na base de vidro, conforme Figura 3.5b. Fazem-se duas medidas do diâmetro em forma de “X”, o ensaio é repetido 3 vezes para cada formulação com intervalo entre as repetições máximo de 1 minuto (CAUDURO 2015).

Encontrou-se 92,4 mm como sendo a menor abertura que corresponde à pasta (SAP030NS1), uma abertura de 162,4 mm para mistura de maior consistência (REF035). Os resultados estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Resultados do ensaio de espalhamento com mini *slump* para teor de 2% de aditivo superplastificante (Glenium 51)

Misturas	Aberturas (mm)
SAP030NS1	92,4
NS1	100,3
SAP030	101,3
REF030	131,4
REF035	162,4

3.2 Produção das Pastas de Cimento

As misturas foram produzidas no laboratório de ensaios e materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB).

3.2.1 Procedimentos de Mistura

É importante salientar que, para as pastas, é feita previamente a mistura dos materiais líquidos, ou seja, a água é misturada ao aditivo superplastificante e a nano sílica coloidal, de forma manual.

Após a mistura dos materiais secos no misturador, a solução contendo água, SP e NS é adicionada. Importante observar que, da quantidade de água calculada para cada traço, é adicionada a água de absorção do SAP (ou água de cura interna), e subtraída a água presente na solução aquosa da nano sílica e do aditivo superplastificante.

A produção das pastas de cimento foi adaptada do roteiro recomendado pelo Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012). Trata-se do mesmo procedimento adotado nos estudos de micro concretos de Santos (2016). Na Tabela 3.11 é apresentada a sequência e os tempos de mistura. O SAP foi pré-misturado junto com os materiais secos. A contagem do tempo foi feita a partir da adição da água aos materiais secos.

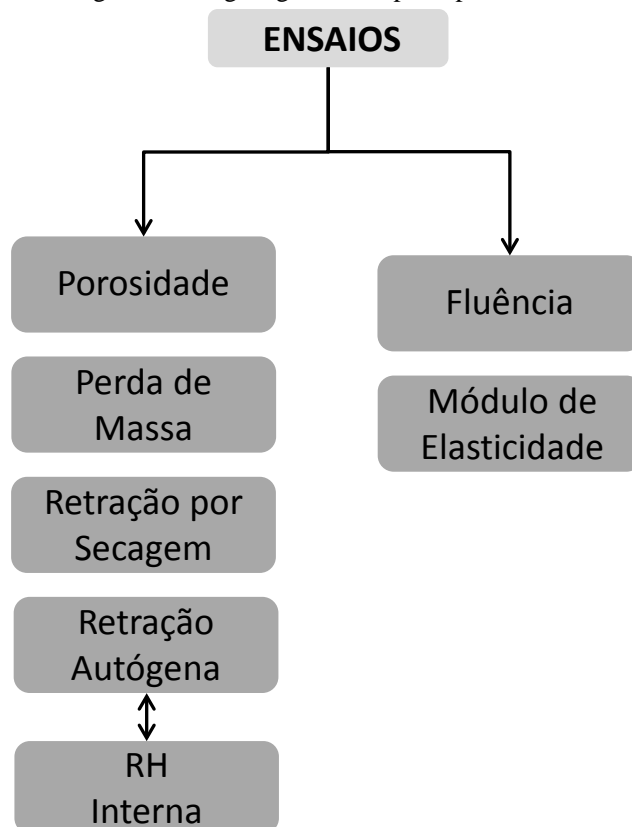
Tabela 3.11 - Roteiro de mistura das pastas de cimento

Tempo (min)	Ação	Duração da etapa (min)
-04:00 - 00:00	Homogeneização dos componentes secos (incluindo o SAP)	4
00:00 - 01:00	Adição de água, incluindo SP e NS pré-dissolvidos	1
01:00 - 04:00	Mistura inicial	3
04:00 - 05:00	Raspagem dos aglomerantes presos as paredes do misturador	1
05:00 - 08:00	Mistura final	3
Tempo total de mistura		12

3.3 Ensaio

Os ensaios foram realizados de acordo com recomendações das principais normas, por métodos ou procedimentos descritos na literatura ou por outras metodologias desenvolvidas na pesquisa. O organograma da Figura 3.6 mostra os principais ensaios realizados.

Figura 3.6- Organograma dos principais ensaios

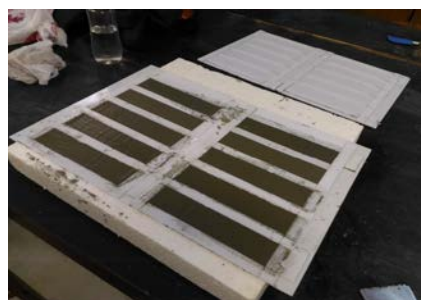


3.4 Preparação das Amostras

Esta seção descreve a preparação das amostras dos ensaios de porosidade, perda de massa e retração por secagem. Elas possuem formato de placas com 45 mm de largura, 200 mm de comprimento e 2 mm de espessura, produzidas em molde de acrílico, como apresentado na Figura 3.7.

Os moldes com a pasta foram colocados em câmara úmida por 24h para garantir ganho de resistência, em seguida, colocados num recipiente fechado preenchido com solução alcalina, sendo retirados no momento do ensaio e secos na condição SSS (superfície saturada seca).

Figura 3.7 – a) Molde de acrílico; b) Aplicação da pasta no molde



a)



b)

No estudo de Bazant et al. (1987), ao usar placas com espessura de 2mm, os pesquisadores perceberam diminuição no tempo de equilíbrio da perda de massa. Outros pesquisadores como Baroghel-Bouny et al. (1999) também utilizaram fatias finas (3 mm) de pastas e concretos para acelerar o equilíbrio da perda de massa. Segundo Bazant et al. (1987), pequena espessura combinada com diminuição gradual de RH evita microfissuração das amostras no decorrer do ensaio, conforme demonstrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Corpos de prova de pastas cimento com dimensões



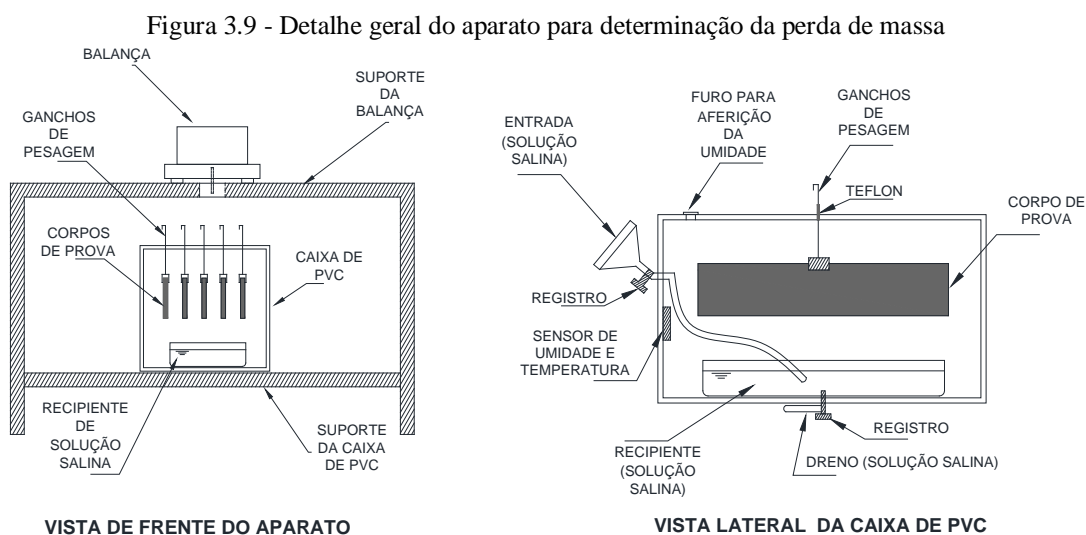
3.4.1 Porosidade

Neste ensaio, os corpos de prova foram secos na condição saturado superfície seca (SSS), em seguida, foram pesados e colocados em estufa a 110⁰C, durante 24 horas, e, ao final, pesados novamente. Com objetivo de verificar a degradação do SAP em função da variação de temperaturas, para corpos de prova com SAP, considerou-se também a temperatura de secagem em estufa de 50⁰C para o mesmo período anterior.

A porosidade, \emptyset , foi determinada de acordo com a equação (2.2). O volume da amostra foi determinado com paquímetro de precisão pela média de três medidas de espessuras, três de largura e três de comprimento.

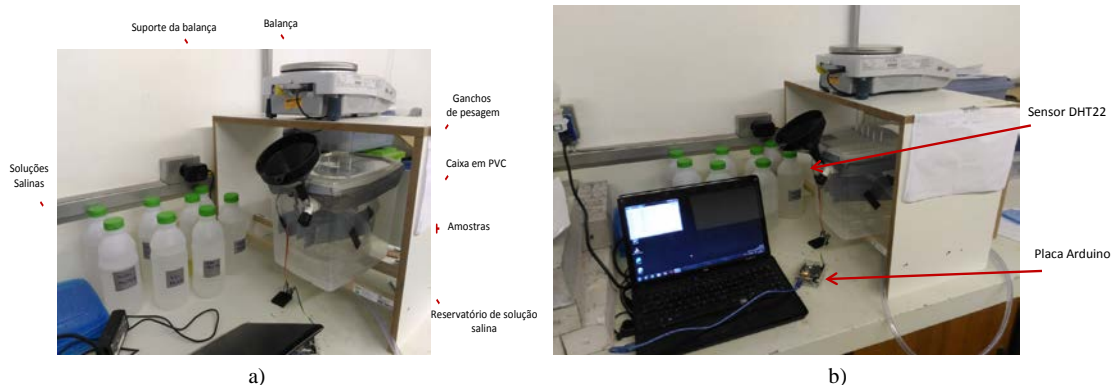
3.4.2 Perda de Massa

Para obtenção das isotermas de desorção e da saturação, foi realizado o ensaio de perda de massa num aparato desenvolvido na pesquisa. Constituído de uma caixa em PVC hermeticamente fechada, contendo um recipiente para armazenamento de soluções salinas, como apresentado na Figura 3.9.



As pesagens dos corpos de prova foram realizadas com balança da marca Ohaus modelo ARD 110 com precisão de 0,01g, instalada na parte superior do suporte. Na Figura 3.10a é apresentada a balança e outros detalhes do ensaio.

Figura 3.10 –Ensaio de perda de massa, a) Detalhe; b) Detalhe do sistema de aquisição de RH



A umidade no interior da caixa foi determinada para diferentes níveis de RH com uso de soluções salinas de acordo com a norma ASTM 104E/2012, como descrito na Tabela 3.13. A temperatura permaneceu constante a $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ durante o período de ensaio.

Inicialmente a umidade na caixa foi elevada a um valor entre 98 e 100%, na presença de água sem uso de soluções salinas. A partir deste instante iniciaram-se as medições e a umidade foi sendo reduzida para diferentes níveis até atingir 15,5% (com sílica gel), conforme apresentado na Tabela 3.13.

A decisão em reduzir a RH em diferentes patamares teve como objetivos baixar a taxa de secagem para evitar fissuras e empenamentos das amostras e permitir construir as isotermas de dessorção.

Tabela 3.12 – Valores de umidade para os diversos níveis RH utilizados no ensaio

	Produto	Nomenclatura	Sigla	Umidade (%)
ASTM E104/2012	Cloreto de Potássio	HP85	KCl	$85,1 \pm 0,3$
	Cloreto de Sódio	HP75	NaCl	$75,5 \pm 0,2$
	Brometo de Sódio	HP59	NaBr	$59,1 \pm 0,5$
	Carbonato de Potássio	HP43	K_2CO_3	$43,2 \pm 0,4$
	Cloreto de Magnésio	HP33	MgCl_2	$33,1 \pm 0,2$
	Acetato de Potássio	HP23	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{K}$	$23,1 \pm 0,4$
	Sílica Gel	----	----	15,5

A aquisição dos dados de temperatura e umidade foram feitos por um termo higrômetro da marca Vaisala modelo HM 34, capacidade de medição da umidade de 0 a 100% e precisão de $\pm 2\%$ na faixa de umidade de 0-90% e de 3% na faixa de 90-100%. E a sua capacidade de medição da temperatura varia de -20 a $+40^\circ\text{C}$ com precisão de $0,1^\circ\text{C}$.

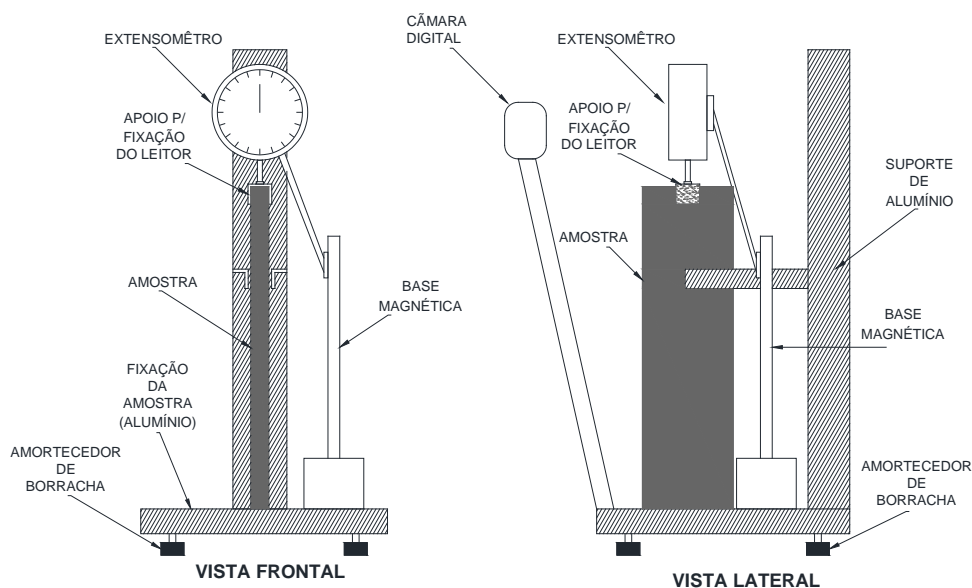
Também utilizou-se uma placa Arduino UNO ligada a um computador com um sensor capacitivo de temperatura e umidade modelo DHT22, com faixa de medição de umidade de 0-100% e precisão de 2-5% e faixa de medição da temperatura entre -40 a 80°C com $\pm 0,5^\circ\text{C}$ de precisão. Este sensor foi instalado diretamente na caixa de PVC conforme mostrado na Figura 3.7 e Figura 3.15, com objetivo de verificar em tempo real os valores de umidade relativa e temperatura, uma vez que o Vaisala leva em torno de 40 minutos para estabilizar a leitura, conforme Figura 3.10b.

Par obtenção do coeficiente de difusão e RH média, adotou-se outra metodologia para determinar o histórico de perda de massa. Neste caso utilizou-se o mesmo aparato já mencionado com a RH no interior da caixa variando entre valores próximos a 100% (na presença de água) até $43,2\pm 0,4\%$ com solução de carbonato de potássio (K_2CO_3) numa única corrida. A duração total do ensaio foi de aproximadamente 24 horas, esse período foi suficiente para o equilíbrio da perda de massa.

3.4.3 Retração por Secagem

Para determinação experimental da retração por secagem foi desenvolvido na pesquisa um aparato com peças de alumínio, como mostra a Figura 3.11. A altura das amostras pôde ser ajustada em razão de um sistema de fixação que possui na base.

Figura 3.11 – Esquema do aparato para medição da retração



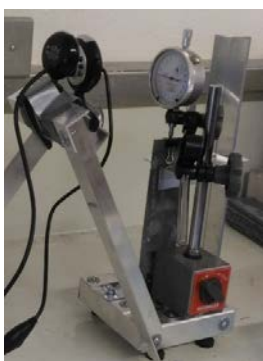
Para realização das medições foram instalados extensômetros com precisão de 0,001mm da marca Digimess. A fim de evitar erros de leituras em razão das vibrações, foram instalados amortecedores de borracha na base do quadro de alumínio. No topo das amostras, montou-se um sistema móvel para apoio dos extensômetros.

A medição foi determinada pela média de dois corpos de prova com uma corrida única de umidade entre 100% a $43,2\pm 0,4\%$. Para evitar interferências ambientais externas, os aparatos

foram colocados dentro de uma caixa de PVC hermeticamente fechada, como mostra a Figura 3.12.

Para realizar o ensaio, inicialmente elevou-se a umidade a 100% com água colocada num recipiente no interior da caixa, em seguida, substituiu-se a água por solução salina de carbonato de potássio (K_2CO_3), neste momento iniciaram-se as leituras. A partir daí aguardou-se um período de aproximadamente 7 dias, que foi o tempo suficiente para a RH alcançar o equilíbrio da solução de $43.2\pm 0,4\%$. Num estudo piloto, também observou-se que neste intervalo a retração das amostras já se encontrava constante.

Figura 3.12 –Aparato para medição da retração: a) Detalhe b) Aparato na caixa de PVC



a)



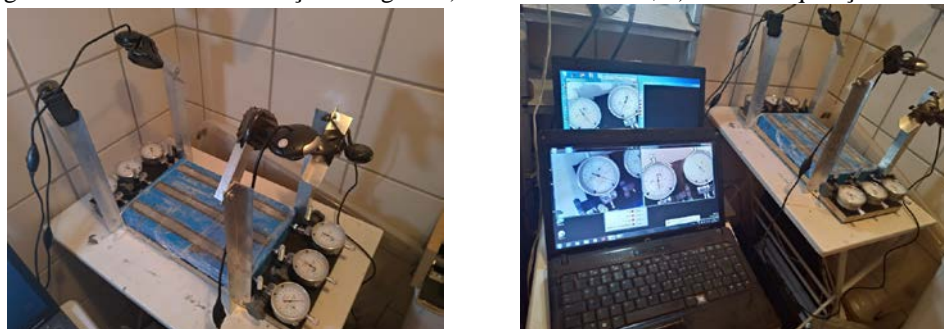
b)

A aquisição dos dados foi realizada por registro automático a cada 20 minutos por meio de câmeras digitais posicionadas na frente dos extensômetros. Os dados foram armazenados no computador por meio do software Yawcam versão 0.6.0 built 11.05.2016 de domínio público, ligado às câmeras.

3.4.4 Retração Autógena

Para realização do ensaio as amostras foram pesadas, misturadas e moldadas em formato prismático nas dimensões de (25x25x255)mm, numa forma flexível de borracha de silicone, como mostra a Figura 3.13. Os corpos de prova foram selados para garantir que toda a retração medida constitua a resultante da retração autógena, também foram pesados para monitoramento da possível retração por secagem.

Figura 3.13 – Ensaio de retração autógena a) Detalhe da forma; b) Tela da aquisição de dados



a)

b)

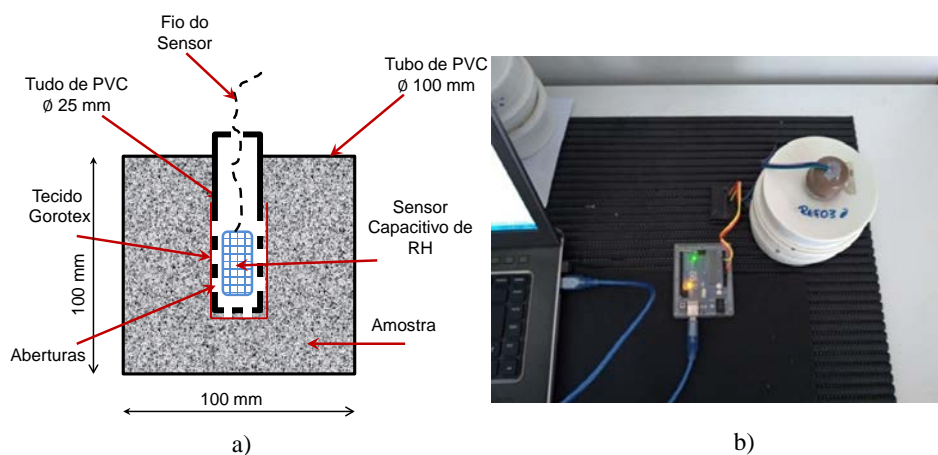
A temperatura do ambiente de ensaio foi mantida em $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. As leituras iniciaram aproximadamente após 1h30 depois que as misturas foram lançadas nas formas, realizadas em intervalos de 20 minutos durante aproximadamente 28 dias para três corpos de prova. Os valores obtidos nas medições foram calculados conforme ASTM C 157, só foram considerados os valores correspondentes às 24h após o lançamento das misturas nas formas

3.4.5 Determinação da RH Interna

Com este ensaio, foi possível determinar o histórico de umidade relativa interna no tempo, que foi um parâmetro utilizado na modelagem da retração autógena.

Na realização do ensaio, a amostra em estado ainda fresco foi colocada num recipiente de cilindro, construído com tubo de PVC com 100mm de diâmetro e 100mm de altura, como mostra a Figura 3.14a, já a ligação do aparato de medição da RH está demonstrado na Figura 3.14b.

Figura 3.14 – a) Esquema da medição da RH interna; b) Aparato de medição da RH interna



a)

b)

A aquisição de dados foi realizada com sensor capacitivo do tipo DTH22 usado nos ensaios de retração por secagem e perda de massa, conectado a uma placa UNO ligada ao computador. As leituras eram realizadas a cada 12 horas aproximadamente num período de 28 dias.

3.4.6 Ensaio de Fluência no Dinâmico da Frequência

Neste ensaio utilizou-se uma metodologia desenvolvida no grupo de pesquisa Numerical, Experimental and Uncertainty Mechanics (Nexum) da Universidade de Brasília. Os dados foram obtidos por Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (Dynamic Shear Rheometer ou DSR), da marca SmartPave 102 Anton Paar, do laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB/UnB), ligado a um software de aquisição de dados do próprio fabricante, como apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Equipamento do Ensaio de Fluência Dinâmica

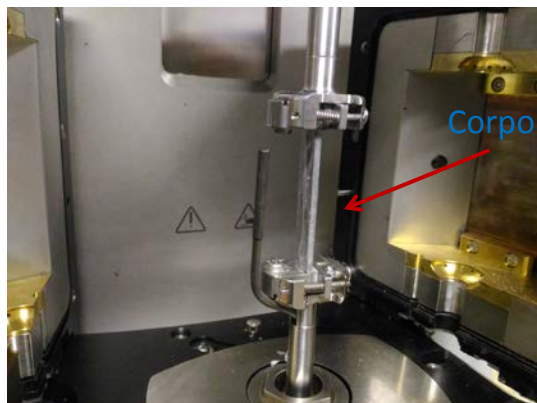


Os resultados obtidos correspondem à média de dois corpos de prova que foram protegidos por filme de PVC para evitar a retração por secagem durante o ensaio. As amostras possuem seção retangular de 10 mm de largura, 43 mm de comprimento e 2,5 mm de espessura, produzidas em pasta de cimento endurecida, como mostra a Figura 3.16a. Aplicou-se uma tensão de cisalhamento constante 0,1 MPa para frequências de 10; 1; 0,1; 1/60 e 1/600hz e temperatura constante de 25°C.

Figura 3.16 – a) Corpo de prova nas dimensões para ensaio DSR; b) Corpo de prova no equipamento DSR



a)



b)

3.4.7 Módulo de Elasticidade

O ensaio para determinar o módulo de elasticidade de Young das pastas de cimento foi realizado nas instalações do Laboratório de Ensaio e Materiais (LEM) da UnB na prensa da marca EMIC com capacidade 300 KN, como apresentado na Figura 3.17a, de acordo com a norma ABNT NBR 8522:2008. Os corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade tiveram seus topos retificados, assim como aqueles destinados ao ensaio de resistência à compressão.

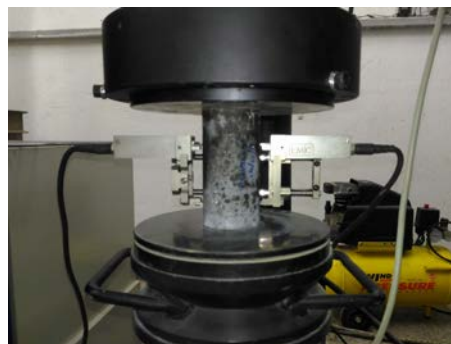
Para a realização do ensaio, determinou-se a resistência à compressão em dois corpos de prova cilíndricos 5x10cm, a fim de elaborar o plano de carregamento, definindo a tensão limite superior (igual a 30% da tensão de ruptura) e limite inferior (0,5 MPa).

Então, três corpos de prova de uma mesma betonada foram submetidos a quatro ciclos de carregamento e descarregamento, obedecendo à velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Nesses intervalos determinaram-se as deformações com ajuda de extensômetros posicionados em duas geratrizes diametralmente opostas. O detalhe do ensaio está ilustrado na Figura 3.17b. Após a leitura, foi necessário carregar o corpo de prova novamente com igual velocidade, até que ocorresse a ruptura. Então, calculou-se o módulo de elasticidade secante em GPa.

Figura 3.17 - a) Visão do equipamento do ensaio de módulo de elasticidade; b) Detalhe do ensaio



a)



b)

3.5 Concentração de Íons nos Poros – Método de Taylor

Em seu trabalho, Taylor (1987) descreveu um método para previsão das concentrações de íons sódio, potássio, cálcio, sulfato e hidroxila nas soluções de poros de concretos, argamassas ou pastas de cimento sem adições minerais e também com o uso de adições para idades acima de um dia.

Os dados mínimos exigidos são os teores totais de Na_2O e K_2O do cimento Portland e da adição, se presente, da quantidade de água e da idade. Outros dados, especialmente os conteúdos de Na_2O e K_2O solúveis em água no cimento e das adições também podem ser introduzidos. O cálculo se baseia no princípio do equilíbrio de massa combinado com equações e constantes que representam a cinética e equilíbrios das reações químicas.

Os pesquisadores Brouwers e Vaneijk (2003) compararam dados de concentração de íons extraída dos poros do material com resultados obtidos por meio da metodologia Taylor (1987). Concluíram que os valores foram aceitáveis, pois ficaram próximos aos resultados experimentais.

3.5.1 Determinação das Concentrações Totais de Íons (n_i^{diss})

Como mencionado, as concentrações de íons foram calculadas de acordo Taylor (1987) por meio da equação (3.1).

$$c = m_r / [V + (b \times P) + (b' \times A)] \quad (3.1)$$

c é a concentração de cada íons e mmol/l

m_r é a quantidade de cátions liberado do cimento;

V é o volume da solução;

b é uma constante chamada "fator de ligação", considerada como um volume equivalente da solução do poro;

P é a quantidade de produtos da hidratação capazes de absorver cátions, divididos pela quantidade de produtos depois da hidratação completa;

b' representa o aumento da quantidade (em mmol) de cátions alcalino tomado a partir de uma solução com concentração de 1 mol/l , como resultado da reação de 1 g de *pfa* (adição mineral de acordo com a norma BS 3892/1997: Part 1);

A é a quantidade de *pfa* que reagiu, em g por 100 g de cimento.

3.6 Determinação da Pressão Efetiva (P_{ef})

Para modelar a pressão capilar dos materiais cimentícios provocada pela saída de água dos poros capilares em qualquer idade, os pesquisadores Grasley e Leung (2011) desenvolveram a equação (3.2) derivada da relação Kelvin-Laplace. Essa relação leva em consideração a presença de íons dissolvidos na solução dos poros

$$P_c \approx \frac{-RT}{v_l^w} \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \ln \left(1 + \frac{n_i^{diss}}{n_l^w S} \right) \right] \quad (3.2)$$

$v_l^w = 1/n_l^w$ é o volume molar da água na fase líquida, n_l^w é a concentração molar da água na fase líquida, n_l^{diss} é a concentração molar de substâncias dissolvidas no líquido, RH a umidade relativa, T a temperatura, S a saturação e R a constante universal dos gases.

Os autores também consideraram uma pressão adicional aplicada dentro da rede de poros induzida pela presença de interfaces, sugerida inicialmente por Coussy et al. (2003). Esta pressão adicional é induzida principalmente quando as películas de água adsorvidas mudam de espessura à medida que a pressão de vapor local é reduzida, sendo que a energia livre na superfície das fases sólidas aumenta, levando à compressão do material.

Coussy et al. (2003) mostraram que a pressão adicional na rede de poros, em processo de secagem, induzida por interfaces, é dada pela equação (3.3).

$$U(S) = \int_S^1 P_c(S') dS' \quad (3.3)$$

S' é a variável fictícia de integração da saturação. Assim, a pressão efetiva na rede de poros (que representa a pressão capilar e a pressão induzida pela interface) é dada por:

$$P_{ef} = P_{avg} - U \quad (3.4)$$

P_{avg} é a pressão capilar média, o sinal negativo em U reflete a natureza à tração da pressão dentro da camada superficial (causando compressão da fase sólida). Como U é uma função de P_c , ela será afetada pela inclusão ou não dos íons dissolvidos no fluido poroso da mesma maneira que P_c .

3.7 Determinação do Coeficiente de Difusão (D)

O coeficiente de difusão linear em função da RH interna (umidade relativa na rede porosa) pode ser expresso de acordo com a equação (3.18), desenvolvida por Grasley (2010), Apêndice B.

$$D = \frac{L^2 \pi (RH_{initial}^2 - A + B)}{16 (RH_{bound} - RH_{initial})^2 t} \quad (3.5)$$

Em que:

D – é o coeficiente de difusão;

L – é a espessura da amostra;

$RH_{initial}$ – é a umidade relativa inicial;

RH_{bound} – é a umidade relativa final; e

t – o tempo.

A e B são dados pelas equações (3.19) e (3.20).

$$A = \frac{215,726RH_{initial}(-\Delta m(t) + 0.75\phi V\rho - 1)^{1/3}}{\phi^{1/3}V^{1/3}\rho^{1/3}} \quad (3.6)$$

$$B = \frac{11634,4(-\Delta m(t) + 0.75\phi V\rho - 1)^{2/3}}{\phi^{2/3}V^{2/3}\rho^{2/3}} \quad (3.7)$$

Em que:

$\Delta m(t)$ – é a perda de massa no tempo;

ϕ - a porosidade;

ρ – a densidade da água; e

V – o volume da amostra.

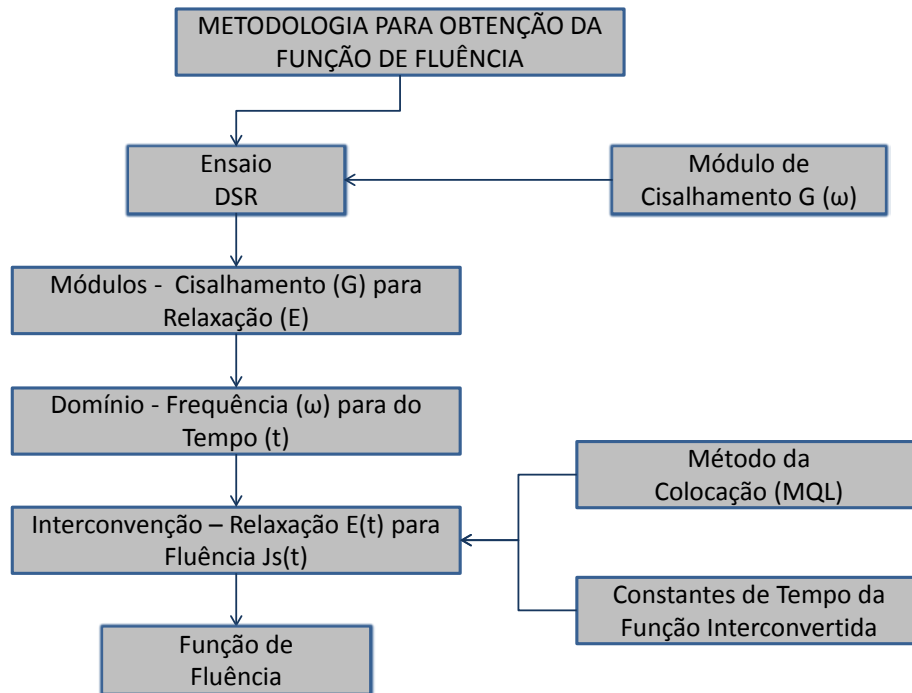
A umidade relativa interna da matriz cimentícia pode ser determinada com base na perda de massa medida conforme equação (3.21), Apêndice B.

$$\begin{aligned} RH(x, t) = & RH_{bound} \\ & + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{RH_{bound} \cos(n\pi) - RH_{bound}}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{L^2}\right) \\ & + \frac{2RH_{initial}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{L^2}\right) \frac{1 - \cos(n\pi)}{n} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.8 Função de Fluência ($J_s(t)$)

O fluxograma da Figura 3.18 apresenta a metodologia para obtenção da função da fluência em pastas a partir de dados de ensaio DSR.

Figura 3.18 – Fluxograma da metodologia para obtenção da função de fluência.



O DSR é um ensaio de relaxação que fornece valores de módulo complexo de cisalhamento (G) no domínio da frequência (ω). Na condição de material isotrópico, para determinar os módulos de (E), utilizou-se a clássica relação dada pela equação (3.22).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3.9)$$

G é módulo de cisalhamento e ν o coeficiente de Poisson.

Schapery e Park (1999) desenvolveram as equações dadas em (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26) que permitem obter a série de Prony (domínio do tempo), a partir dos dados experimentais no domínio da frequência. Vale ressaltar que nesta pesquisa a função de fluência será denominada por $J_s(t)$, diferentemente da usada por Schapery e Park (1999).

$$E'(\omega) = E_e + \sum_{i=1}^m \frac{\omega^2 \rho_i^2 E_i}{\omega^2 \rho_i^2 + 1} \quad (3.10)$$

E' é o módulo de perda da relaxação, E_i módulos de relaxação de cada cadeias, E_e módulo de equilíbrio, ρ_i tempos de relaxação e ω a frequência.

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^m \frac{\omega \rho_i E_i}{\omega^2 \rho_i^2 + 1} \quad (3.11)$$

E'' é o módulo de armazenamento da relaxação.

$$D'(\omega) = D_g + \sum_{j=1}^n \frac{D_j}{\omega^2 \tau_j^2 + 1} \quad (3.12)$$

D' é o módulo de perda da fluência, D_j módulos de fluência de cada cadeias, D_g fluência inicial módulo de equilíbrio, t_i tempos de retardo.

$$D''(\omega) = \frac{1}{\eta_0 \omega} + \sum_{j=1}^n \frac{\omega \tau_j D_j}{\omega^2 \tau_j^2 + 1} \quad (3.13)$$

D'' é o módulo de armazenamento da fluência.

3.8.1 Interconversão entre Propriedades no Domínio do Tempo e da Frequência

A interconversão entre propriedades viscoelásticas é prática comum em função dos problemas de ordem experimentais. Ressalta-se, por exemplo, que a obtenção do Módulo de Relaxação por meio de interconversão a partir de outra propriedade viscoelástica é, em geral, o único meio viável de obter esta propriedade viscoelástica em razão das dificuldades dos equipamentos realizarem ensaios de deformação controlada.

Quando se utilizam séries de Prony para representação matemática de ambas as propriedades viscoelásticas fundamentais no domínio do tempo, é possível, por meio da teoria da viscoelasticidade linear, obter relações relativamente simples de interconversão entre estas propriedades.

Após uma dedução formal baseada no trabalho de Schapery e Park (1999), pode-se chegar à equação de interconversão (3.27), que permite obter a Função Fluência $D(t)$ a partir do Módulo de Relaxação $E(t)$.

$$A_{kj} D_j = B_k \quad (\text{soma em } j; j=1, \dots, n; k=1, \dots, m)$$

$$\begin{aligned}
A_{kj} &= E_e \left(1 - e^{-\frac{tk}{\tau_j}} \right) + \sum_{i=1}^m \frac{E_i t_k}{\tau_j} e^{-\frac{tk}{\rho_i}} && \text{se } \tau_i = \rho_i \\
A_{kj} &= E_e \left(1 - e^{-\frac{tk}{\tau_j}} \right) + \sum_{i=1}^m \frac{E_i t_k}{\rho_i - \tau_j} \left(e^{-\frac{tk}{\rho_i}} - e^{-\frac{tk}{\tau_j}} \right) && \text{se } \tau_i \neq \rho_i
\end{aligned} \tag{3.14}$$

e

$$B_k = 1 - [E_e + \sum_{i=1}^m E_i e^{-\frac{tk}{\tau_i}}] / [E_e + \sum_{i=1}^m E_i] \tag{3.15}$$

t_k representa o tempo correspondente ao limite superior da integração.

3.8.2 Técnicas de Ajuste de Curva da Série de Prony

Uma vez definida a série de Prony como função matemática preferível para representação analítica das propriedades viscoelásticas no domínio do tempo, é importante conhecer as técnicas disponíveis para ajuste de curva. As seções seguintes tratam das técnicas mais comuns para ajuste de séries de Prony a partir de dados experimentais.

Uma das dificuldades encontradas para ajuste de séries de Prony a partir de dados experimentais trata-se da resolução de um sistema de equações não lineares. Um procedimento que pode evitar a resolução desse sistema não linear é a adoção de valores razoáveis para as constantes de tempo (ρ_i ou τ_j), tornando assim o sistema de equações com natureza exclusivamente linear para os termos dependentes E_i ou D_j (SCHAPERLY, 1962).

Devido aos problemas de instabilidade numérica do método da colocação simplificado, é interessante usar uma técnica de ajuste mais robusta, ou seja, que a qualidade dos resultados não seja tão dependente dos pontos de colocação escolhidos. Para tanto, o método dos Mínimos Quadrados Linear (MQL) pode ser utilizado.

Para o caso do Módulo de Relaxação $E(t)$, após a definição da função de mínimos quadrados e derivação em relação às constantes de tempo (ρ_i , no caso), chega-se à equação (3.16).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m e^{-\frac{t_k}{\rho_i}} e^{-\frac{t_k}{\rho_j}} E_i = \sum_{k=1}^m (E(t_k) - E_\infty) e^{-\frac{t_k}{\rho_j}} \tag{3.16}$$

$(i = j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m)$

Para obtenção de resultados satisfatórios de interconversão entre $E(t)$ e $D(t)$, trata-se da escolha das constantes de tempo da função interconvertida (função alvo). Um procedimento simplificado que pode ser adotado segundo Schapery e Park (1999) é simplesmente atribuir constantes de tempo da função interconvertida (função alvo) idênticas àsquelas da função medida experimentalmente (função fonte). No entanto, os autores citam um procedimento de escolha mais acurado das constantes de tempo da função alvo que será descrito na sequência.

As equações da transformada de Carson das séries de Prony dadas pelas equações (3.17) e (3.18) servem de base para obtenção mais acurada das constantes de tempo da função alvo.

$$\tilde{E}(s) = E_e + \sum_{i=1}^m \frac{s\rho_i E_i}{s\rho_i + 1} \quad (3.17)$$

$$\tilde{D}(s) = D_0 + \sum_{j=1}^n \frac{D_j}{s\tau_j + 1} \quad (3.18)$$

Na equação (3.17), caso a variável de Laplace s tenda a $-1/\rho_i$ resulta em $\tilde{E}(s) = \pm\infty$. Da mesma maneira na equação (3.18), a variável de Laplace s tende a $-1/\tau_j$ resulta em $\tilde{D}(s) = \pm\infty$. Pela relação de reciprocidade perfeita entre as transformadas de Carson dada pela equação (3.19) a seguir (SCHAPERY; PARK, 1999).

$$\tilde{E}(s)\tilde{D}(s) = 1 \quad (3.19)$$

Conclui-se que:

$$\lim_{s \rightarrow -1/\tau_j} \tilde{E}(s) = 0 \quad (3.20)$$

$$\lim_{s \rightarrow -1/\rho_i} \tilde{D}(s) = 0 \quad (3.21)$$

Ao plotar o valor absoluto da transformada de Laplace da função fonte $|\tilde{E}(s)|$ ou $|\tilde{D}(s)|$ versus a variável $-1/s$ (com s negativo) num gráfico log-log, verifica-se a existência de valores máximos (tendendo a infinito) e mínimos (tendendo a zero). Neste caso, a abscissa dos pontos de máximo (que tendem a infinito) refere-se às constantes de tempo τ_i

(conhecidas) da Função Fluência $D(t)$ (função fonte), ao passo que a abscissa dos pontos de mínimo (que tendem a zero) indica os valores procurados das constantes de tempo ρ_i do Módulo de Relaxação $E(t)$ (função alvo).

3.9 Parâmetros Viscoelásticos

Neste capítulo foram abordados os parâmetros que descrevem o comportamento viscoelásticos de materiais cimentícios. Além disso, será apresentado nos próximos tópicos a o desenvolvimento da equação que prevê as deformações provenientes da retração e da fluência derivada de estudos poroviscoelásticos.

3.9.1 Poromecânica para Meios Porosos Parcialmente Saturados

A equação constitutiva elástica para um sólido isotrópico associado à interação entre fluidos e sólidos parcialmente saturado foi originalmente desenvolvida por Biot (1955), como mostra a equação (3.22).

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G_p} \left(\sigma_{ij} - \frac{\nu_p}{1 + \nu_p} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right) - \frac{b}{3K_p} P_l \delta_{ij} \quad (3.22)$$

Em que ε_{ij} são componentes do tensor de deformações, σ_{ij} são componentes do tensor de tensões aplicada externamente (ao limite do corpo poroso), σ_{kk} é o componente do tensor de tensão, δ_{ij} é o delta de Kronecker, G_p é o módulo de cisalhamento do corpo poroso, K_p é o módulo volumétrico do corpo poroso, P_l é a pressão do fluido dos poros, b é o coeficiente de tensão eficaz de Biot-Willis dado por $1 - K_p/K_s$, em que K_s é o módulo de massa da fase sólida, compreendendo o esqueleto do corpo poroso.

A água dos poros exerce uma pressão (negativa) quando a RH interna é menor do que 100% e o vapor do ar exerce uma pressão dependente das concentrações de gases presentes (GRAY; SCHREFLER, 2001). Assumindo que a porosidade é invariante à carga ou que os poros cheios de vapores e cheios de líquido se deformam uniformemente (COUSSY, 2008), a pressão do líquido do poro e a pressão na fase gasosa podem ser combinadas com as frações volumétricas relativas (líquido e vapores) para definir uma pressão média dos poros, como demonstrado pela equação (3.23).

$$P_{avg} = (1 - S)P_g + SP_l = -SP_c + P_g \approx -SP_c \quad (3.23)$$

Em que $P_c = P_g - P_l$ é a pressão capilar, S é o fator de saturação da fase líquida ($0 \leq S \leq 1$), P_l é a pressão do líquido no poro e P_g é a pressão da fase gasosa. No caso de secagem, uma vez que a magnitude da pressão gasosa é mínima em comparação com a magnitude da pressão do líquido, $P_g \approx 0$ como mostra a equação (3.23).

Como a retração de materiais cimentícios é puramente dilatacional, é conveniente simplificar a resposta volumétrica na equação (3.22) para resposta volumétrica tal que:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\sigma}{K_p} + P \left(\frac{1}{K_p} - \frac{1}{K_s} \right) \quad (3.24)$$

Em que $\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{ii} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ é a deformação volumétrica e σ é a tensão volumétrica aplicada externamente (isto é, $\sigma_{ii} / 3$). Se os efeitos das interfaces dentro da rede de poros são insignificantes, um modelo elástico para prever a retração volumétrica pode ser obtido substituindo P_l na equação (3.24) por P_{avg} e ajustar $\sigma = 0$.

Para contabilizar o efeito da saturação parcial, fez-se uso de uma abordagem que envolve a correspondência do volume de poros com o volume de poros cheios de líquido em qualquer idade, isto é, na equação (3.23) fez-se $S = 1$ em todos os momentos, tais que $P_{avg} = P_l$. À medida que os poros dessecam, K_s diminui em razão do aumento da compressibilidade dos gases incorporados que são altamente compressíveis no volume de material "sólido". No método da pressão média dos poros, apenas K_p deve ser considerado como viscoelástico.

3.9.2 Envelhecimento em Materiais Cimentícios

A consideração do envelhecimento nas propriedades viscoelásticas é particularmente significativa nas primeiras idades, em que a fluência pode diminuir até 5 vezes em magnitude entre as idades de 1 e 28 dias (GRASLEY; LANGE, 2007).

A equação constitutiva uniaxial básica para um material viscoelástico linear com envelhecimento é dada pela equação (3.25).

$$\varepsilon_{11}(t, t') = \int_0^t J_p(t, t') \frac{\partial \sigma_{11}(t')}{\partial t'} dt' \quad (3.25)$$

Em que $\varepsilon_{11}(t, t')$ é a deformação axial viscoelástica no tempo t , causada pela tensão aplicada no tempo t' , $J_p(t, t')$ é a fluência viscoelástica uniaxial do corpo poroso, e $\sigma_{11}(t')$ é o tensão axial.

A contabilização do efeito da solidificação desenvolvida por Bazant (1977), Carol e Bazant (1993) para materiais solidificantes pode ser expressa como sendo:

$$J_p(t, t') = \frac{1}{E_p \nu(t)} + \int_{t'}^t \frac{1}{\nu(\theta)} \frac{\partial J_s(\theta - t')}{\partial \theta} d\theta \quad (3.26)$$

Em que $J_p(t, t')$ é a fluência do material poroso em massa, $J_s(t)$ é a fluência viscoelástica sem envelhecimento do material solidificado, E_p é o módulo elástico de Young do material poroso, $\nu(t)$ é a função de envelhecimento de solidificação, e θ é uma variável de integração fictícia.

O envelhecimento de $J_s(t)$ também pode ser explicado simplesmente deslocando no eixo real no log do tempo. O deslocamento explica a idade do material e a forma da função de fluência não muda. As constantes de deslocamento para cada idade podem ser geradas e ajustadas a uma função:

$$A_t = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^\mu \quad (3.27)$$

Onde t_{ref} é a idade de referência em que a função fluência será ajustada e para a qual as outras idades são deslocadas, t é a idade atual, e μ é um parâmetro que define a taxa de envelhecimento (CORNELIS; STRUIK, 1977).

A equação constitutiva uniaxial para um material sólido, envelhecido, pode ser escrita como sendo:

$$\varepsilon_{11} = \int_0^t J_s(\xi(t) - \xi(t')) \frac{\partial \sigma_{11}(t')}{\partial t'} dt' + \varepsilon^f(t) \delta_{ij} \quad (3.28)$$

Em que ξ é um pseudo-tempo e $\xi(t) - \xi(t')$ é expressa como mostra a equação (3.29).

$$\xi(t) - \xi(t') = \int_{t'}^t \frac{dt''}{A_t(t'')} \quad (3.29)$$

t'' é uma variável de integração de tempo simulada. Uma combinação das equações (3.28) e (3.29), como resultado da integração, resultam na equação (3.30).

$$\xi(t) - \xi(t') = \left(\frac{(t + t_{ref})^{1+\mu} - (t' + t_{ref})^{1+\mu}}{1 + \mu} \right) t_{ref}^{-\mu} \quad (3.30)$$

Ao substituir $J_s(t)$ na equação (3.26) com $J_s(\xi(t))$, obtém-se a função de fluência viscoelástica uniaxial que simultaneamente contabiliza o envelhecimento em razão da solidificação e do envelhecimento intrínseco do gel C-S-H solidificante, pela mudança de tempo. Este modelo foi proposto por Grasley e Lange (2007) conforme a equação (3.31).

$$J_p(t, t') = \frac{1}{E_p \nu(t')} + \int_{t'}^t \frac{1}{\nu(\theta)} \frac{\partial J_s\{\xi(\theta) - \xi(t')\}}{\partial \theta} d\theta \quad (3.31)$$

3.9.3 Modelagem da Retração por Secagem Proposto por Grasley e Leung

Para um material viscoelástico linear não envelhecido, a equação (3.24) torna-se:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{\partial \sigma(t')}{\partial t'} B_p(t - t') + \frac{\partial P(t')}{\partial t'} \left(B_p(t - t') - \frac{1}{K_s} \right) dt' \quad (3.32)$$

supõe que K_s tem uma dependência de tempo insignificante, e $B_p(t)$ é a fluência viscoelástica transversal.

Para um material viscoelástico linear isotrópico, $B_p(t)$ pode ser determinado a partir de $J_p(t)$ e a razão de Poisson viscoelástica do corpo poroso $\nu_p(t)$ no domínio da Transformada de Laplace de acordo com a equação.

$$\bar{B}_p(s) = \frac{1}{s^2 \bar{K}_p(s)} = 3 \left(1 - 2s\bar{\nu}_p(s) \right) \bar{J}(s) \quad (3.33)$$

Sendo que $\nu_p(t)$ foi aproximado a uma constante igual ao valor elástico, essa aproximação requer que a taxa de fluência transversal seja equivalente à taxa de fluência uniaxial, o que resulta em uma simplificação da equação (3.33).

$$\bar{B}_s(s) = 3(1 - 2\nu_p)\bar{J}(s) \quad (3.34)$$

Invertendo diretamente para o domínio do tempo, tem-se;

$$B_p(t) = 3(1 - 2\nu_p)J_p(t) \quad (3.35)$$

ν_p é o coeficiente de poisson elástico instantâneo.

Combinando as equações (3.34) e (3.35) tem-se;

$$\varepsilon(t) = 3(1 - 2\nu_p) \int_0^t \frac{\partial \sigma(t')}{\partial t'} J_p(t - t') + \frac{\partial P(t')}{\partial t'} \left((1 - 2\nu_p)J_p(t - t') - \frac{1}{K_s} \right) dt' \quad (3.36)$$

Para um material poroviscoelástico linear solidificante com envelhecimento intrínseco do C-S-H, a equação (3.36) torna-se:

$$\varepsilon(t) = 3(1 - 2\nu_p) \int_0^t \frac{\partial \sigma(t')}{\partial t'} J_p(t, t') + \frac{\partial P(t')}{\partial t'} \left(3(1 - 2\nu_p)J_p(t, t') - \frac{1}{K_s} \right) dt' \quad (3.37)$$

Onde $J_p(t, t')$ é definida pela equação (3.31). A retração volumétrica livre da pasta de cimento endurecida pode ser determinada pela equação constitutiva (3.37), quando $\sigma(t) = 0$. Já a tensão axial pode ser determinada dividindo a (3.37) por um fator 3.

Para prever a deformação volumétrica dos materiais cimentícios responsáveis pela pressão capilar, bem como pela pressão adicional induzida pela interface, é necessário substituir P na equação (3.37) pela pressão efetiva, obtendo assim:

$$\varepsilon(t) = 3(1 - 2\nu_p) \int_0^t \frac{\partial \sigma(t')}{\partial t'} J_p(t, t') + \frac{\partial P_{ef}(t')}{\partial t'} \left(3(1 - 2\nu_p)J_p(t, t') - \frac{1}{K_s} \right) dt' \quad (3.38)$$

3.10 Modelagem da Retração Autógena

Em sua pesquisa, Grasley (2006) verificou que a abordagem do tempo diferido para modelar as propriedades viscoelásticas no envelhecimento produziu uma previsão mais precisa da retração autógena do que a utilização da teoria de solidificação. A deformação da retração

linear baseou-se nos estudos de Bentz et al., (1998), que foi calculada como aparece na equação (3.39).

$$\varepsilon = \frac{P_l S}{3} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right) \quad (3.39)$$

Onde P_l é a pressão do fluido poroso, S é o fator de saturação, K é o módulo de massa do corpo poroso e K_s é o módulo de volume da fase sólida.

O histórico da pressão do fluido poroso será determinado a partir da umidade relativa interna. A equação (3.40) é a função de ajuste para os dados experimentais da pressão.

$$p(t) = (e^{-t/f_1})f_2 + (e^{-t/f_3})f_4 + f_5 \quad (3.40)$$

Onde f_i são coeficientes de ajustes.

O fator de saturação S foi determinado utilizando-se um modelo simples apresentado por Bazant e Baweja (1995) como descrito na equação (B.9) do Apêndice B. A função de ajuste $S(t)$, equação (3.54), serve para determinação da saturação.

$$S(t) = -(e^{-t/g_1})g_2 - (e^{-t/g_3})g_4 + g_5 \quad (3.41)$$

Em que g_i são coeficientes de ajustes.

A deformação total (autógena) em uma amostra de pasta de cimento pode ser decomposta de acordo com a equação (3.42):

$$\varepsilon_a(t) = \varepsilon_{el}(t) + \varepsilon_{ve}(t) \quad (3.42)$$

$\varepsilon_{el}(t)$ é a deformação instantânea, e $\varepsilon_{ve}(t)$ é a deformação viscoelástica dependente do tempo.

Obtém-se a deformação instantânea no domínio transformada de Laplace como previsto na equação (3.43):

$$\overline{\varepsilon_{el}}(s, t) = \sum_{i=1}^n \beta_i \frac{S(t)(s - \omega_i)}{3s} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right) \sigma(s - \omega_i) \quad (3.43)$$

Em que s é a variável de transformação, β_i e ω_i são parâmetros de envelhecimento, $S(t)$ é o fator de saturação. A inversão analítica da equação (3.43) produz a parcela da deformação instantânea.

A parcela viscoelástica da deformação será prevista utilizando a abordagem mudança de tempo, como segue.

$$\varepsilon_{ve}(t) = \frac{S(t)}{3} \int_0^t \left[3(1 - 2\nu)J_s(t, t') - \frac{1}{K_s} \right] \frac{\partial p(t')}{\partial t'} dt' \quad (3.44)$$

Nesta seção também foi testada a teoria da solidificação para modelar os componentes elásticos e viscoelásticos da retração autógena. A principal limitação da teoria da solidificação é que ela é incapaz de levar em conta plenamente o envelhecimento das propriedades viscoelásticas da pasta de cimento.

A inversa transformada de Laplace da equação (3.45) resulta na retração autógena prevista no domínio do tempo para o material viscoelástico solidificante.

$$\varepsilon_a(s, t) = \sum_{n=1}^N \frac{S(t)}{3} \left[\frac{\beta_n(s - \omega_n)^2}{s} \bar{B}(s - \omega_n) - \frac{1}{K_s} \right] \bar{p}(s - \omega_n) \quad (3.45)$$

Os termos β_n e ω_n são coeficientes de envelhecimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

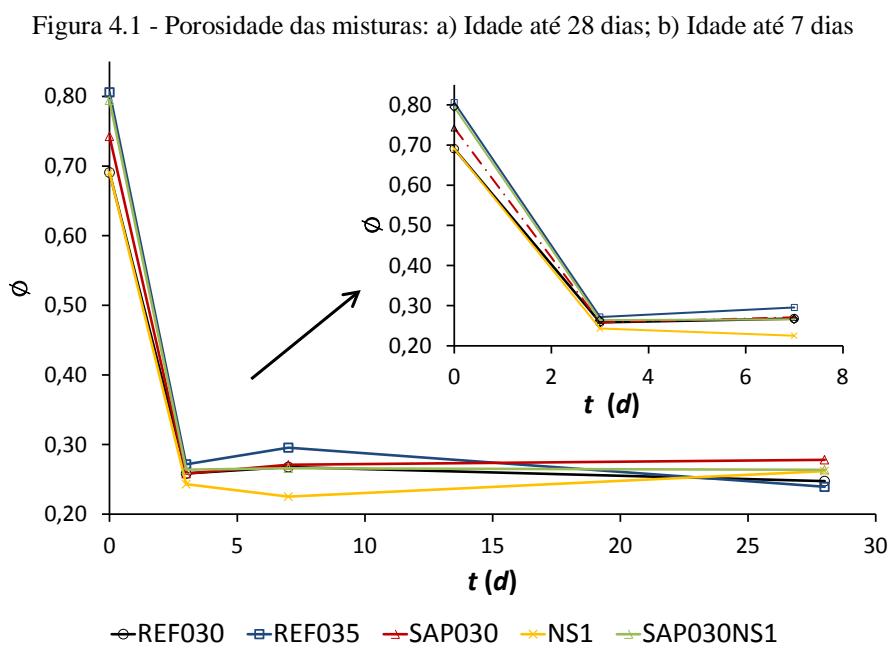
O objetivo deste capítulo é discutir os resultados e associá-los às deformações causadas pela fluência e pela retração. Nesta fase também foram avaliados concretos que possuem os mesmos teores de SAP e da nano partículas de sílica com as mesmas relações a/c das pastas.

4.1 Propriedades Poroviscoelásticas da Estrutura Porosa

Nesta etapa foi realizada uma análise dos dados das isotermas de dessorção, coeficiente de difusão, pressão capilar (pressão capilar efetiva) e a influência da concentração de íons. A análise da difusão foi feita tanto em pastas como em concretos, já os outros resultados foram avaliados somente nas pastas.

4.1.1 Porosidade (ϕ)

Como mencionado no item 3.4.1, a porosidade foi determinada pela pesagem das amostras na condição de superfície saturada seca e após secagem em estufa. O volume de cada amostra foi determinado pela média de três medidas de espessura, largura e comprimento, utilizando paquímetro de precisão. A porosidade inicial foi determinada a partir da composição e dos pesos específicos dos constituintes da mistura. Os resultados da porosidade das misturas estão presentes na Figura 4.1 e no Anexo B.



Como era esperado, a mistura REF035, com maior relação a/c, possui a maior porosidade nas idades de 3 e 7 dias. A mistura com menor porosidade é a NS1. Este fato pode estar relacionado com o refinamento de poros causado pelas nano partículas de sílica.

Não se observa diferenças significativas entre as porosidades das demais misturas (REF030, SAP030, SAP030NS1) para as idades de 3 e 7 dias. Entretanto, verifica-se uma tendência da nano sílica reduzir a porosidade da mistura terciária (SAP030NS1) aos 28 dias. A Tabela 4.1 apresenta os resultados da porosidade das misturas para as idades avaliadas.

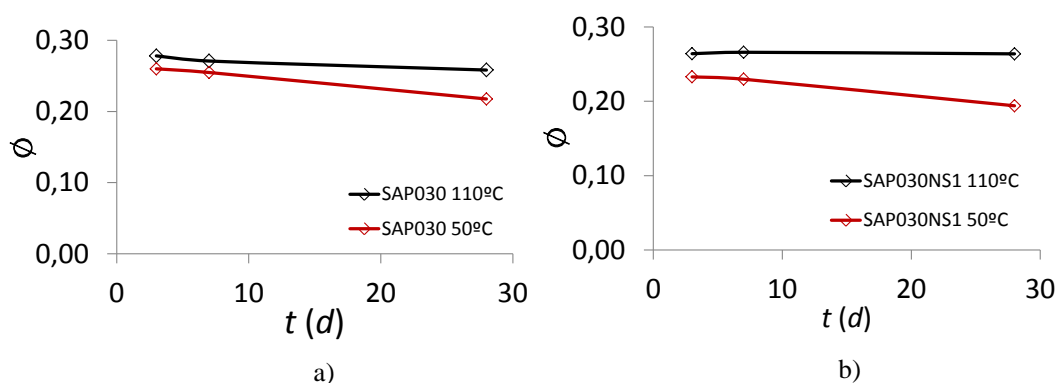
Tabela 4.1- Resultados do ensaio de porosidade (\emptyset) de cada mistura na temperatura de 110 °C

Idade (dias)	Misturas				
	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
3	0,26	0,27	0,26	0,24	0,26
7	0,27	0,30	0,27	0,23	0,27
28	0,25	0,24	0,28	0,26	0,26

Nesta seção também se analisou os efeitos da temperatura sobre a porosidade das misturas contendo SAP. Nota-se que não existe consenso na literatura sobre os danos causados no polímero em meio cimentícios com temperaturas elevadas. Contudo, essas misturas foram avaliadas para temperatura de 50°C que foi a mesma temperatura utilizada em argamassas com SAP no trabalho de Salomão (2016).

Os resultados das misturas SAP030 e SAP030NS1 estão presentes na Figura 4.2a. Como pode ser observado, as diferenças entre as porosidades obtidas a 110°C e 50°C são pequenas, sendo que os maiores valores ocorreram aos 28 dias, com percentuais de 16% e 26% para SAP030 e SAP030NS1 respectivamente.

Figura 4.2 - Porosidades obtidas com temperatura de 110°C e 50°C a) SAP030; b) SAP030NS1



Evidências apontam que em temperaturas mais elevadas o polímero não degrada, ou seja, sua estrutura molecular não é afetada. Entretanto, a redução da porosidade pode estar relacionada com o alcance da capacidade de secagem da temperatura. Secagem em profundidades maiores exigem temperaturas mais elevadas e vice-versa. Contudo, nesta pesquisa serão utilizados os resultados da porosidade obtida com a secagem na temperatura de 110°C.

4.1.2 Perda de Massa (Δm)

Neste ensaio os intervalos de tempo estabelecido para cada umidade foram insuficientes para que a perda de massa atingisse o equilíbrio total, portanto, as umidades internas dos corpos de prova também não se equilibraram. Para que a perda de massa alcançasse o equilíbrio (Δm_f), o tempo na função de ajuste descrita na equação (4.1) foi considerado infinito para cada valor de RH.

$$\Delta m(t) = C_1 e^{-a_1 t} + C_2 e^{-a_2 t} + C_3 e^{-a_3 t} + C_4 \quad (4.1)$$

Em que $\Delta m(t)$ é a perda de massa média no tempo, t é o tempo e C_i, a_i são parâmetros de ajustes.

Nas misturas o tempo para cada umidade foi fixado próximo em 24 horas. Com os resultados da massa equilibrada, foi possível determinar o percentual de perda que cada pasta atingiu entre o tempo infinito e as 24h do ensaio. A Tabela 4.2 apresenta resultados para cada uma das mistura entre o tempo de parada do ensaio e o tempo considerado infinito.

Tabela 4.2 – Percentual de secagem que cada mistura atingiu em cada nível de RH em comparação ao tempo final de equilíbrio

RH (%)	REF030			REF035			SAP30			NS1			SAP030NS1		
	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
85,1 ± 0,3	90	79	92	94	80	86	89	82	86	94	75	88	76	81	91
75,5 ± 0,2	99	92	92	98	94	97	98	95	96	97	94	98	96	82	98
59,1 ± 0,5	90	87	97	85	87	84	92	91	94	80	77	100	95	92	99
43,2 ± 0,4	96	87	94	92	87	97	95	96	92	94	84	93	94	83	96
33,1 ± 0,2	85	87	97	92	98	97	96	95	93	95	82	98	87	96	97
23,1 ± 0,4	89	97	99	94	92	96	93	97	99	95	92	96	88	94	95
15,5 ± 1	94	99	82	88	92	99	95	95	94	87	89	94	92	92	95

Para as idades avaliadas, nota-se que a menor perda de massa ocorre na mistura NS1 nas três idades ensaiadas, este fato pode ter relação direta com a sua menor porosidade. A mistura REF030 que possui relação também a/c de 0,30 tem a segunda menor perda de massa.

Entretanto, as misturas com a/c de 0,35 (REF035) e com SAP não possuíram diferenças significativas. Contudo, acredita-se que misturas com SAP possuem a mesma relação a/c da referência REF035. Os resultados do ensaio de perda de massa estão apresentados na Figura 4.3 e no Anexo A.

Como pode ser observado nos gráficos da Figura 4.3, a nano sílica não foi capaz de reduzir a perda de massa provocada pelo SAP, como pode ser verificado na pasta SAP030NS1. Neste caso prevaleceu o efeito do SAP, essa constatação pode estar relacionada com a maior porosidade total destas misturas.

Figura 4.3 – Perda de massa das misturas para cada RH - a) aos 3 dias; b) aos 7 dias; e c) aos 28 dias

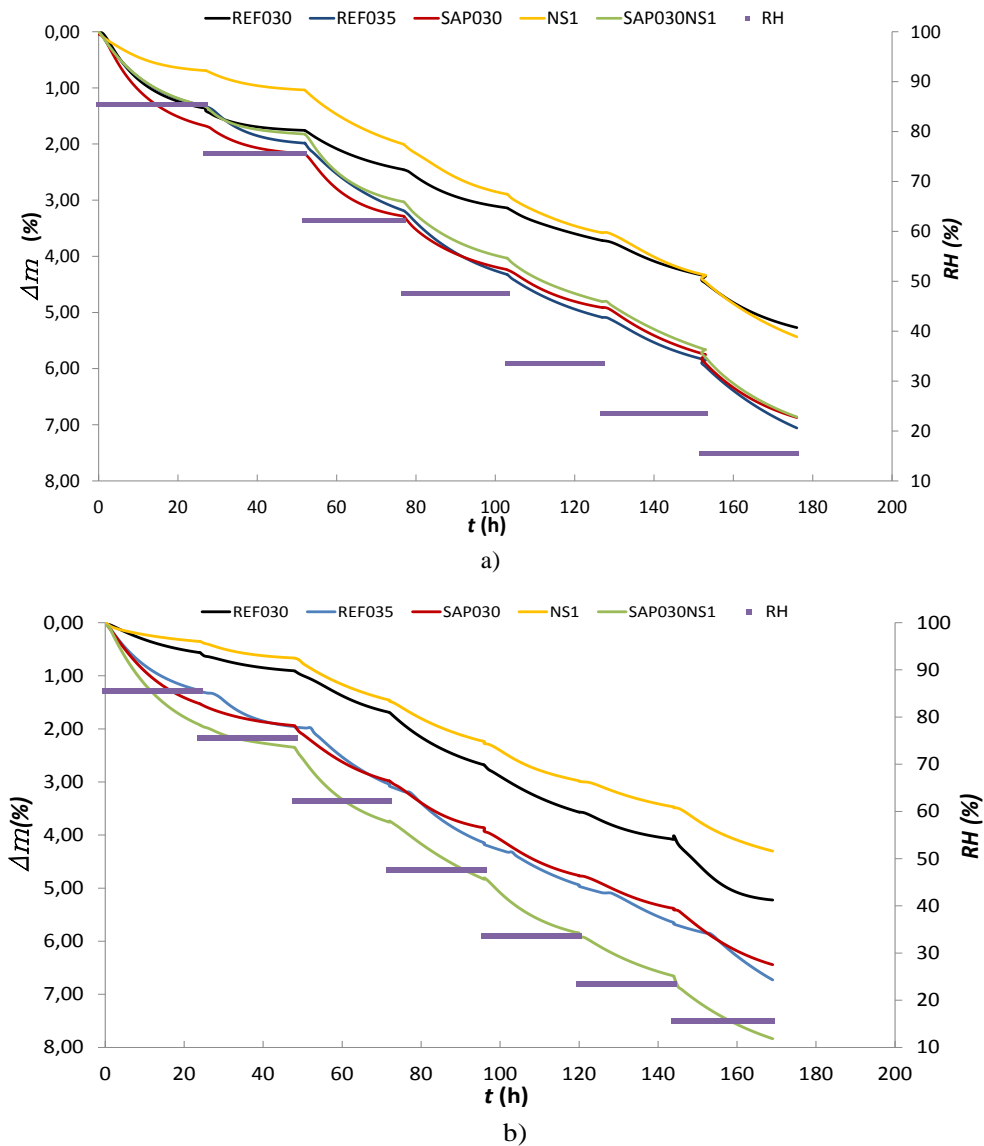
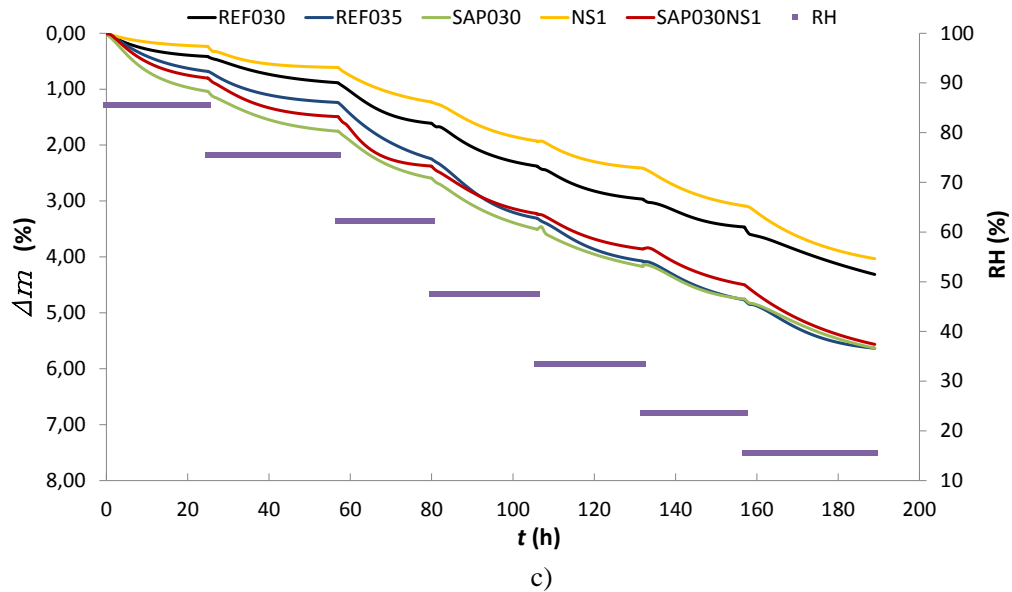


Figura 4.3 - Perda de massa das misturas para cada RH - a) aos 3 dias; b) aos 7 dias; e c) aos 28 dias



4.1.3 Isotermas de Dessorção

As isotermas de dessorção são representadas graficamente pela umidade relativa em função da saturação. A umidade foi obtida pela perda de massa equilibrada como uma função da saturação S (RH). Contudo, para cada nível de RH foi determinada uma saturação S dividindo a perda de massa final (Δm_f) pela quantidade total de vapor de água e líquido no espaço poroso de acordo com a equação (4.2).

$$S = 1 - \frac{\Delta m_f(RH)}{V\phi\rho} \quad (4.2)$$

Em que S é a saturação, V volume do corpo de prova, ϕ a porosidade e ρ a densidade da água.

Uma função sigmodal foi usada para o ajuste $RH(S)$, como descrita pela equação (4.3).

$$RH(S) = F_1 + \frac{F_2 - F_1}{1 + e^{\left(\frac{-(S-F_3)}{F_4}\right)}} \quad (4.3)$$

Em que F_i são parâmetros de ajustes.

Os parâmetros de ajustes F_i para cada mistura aos 3, 7 e 28 dias de idade estão apresentados na Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5 e pelo Anexo da C.

Tabela 4.3 - Valores de parâmetros F_i das misturas para idade de 3 dias

Parâmetros	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
F1	9,362	2,163	7,551	2,112	3,833
F2	112,700	117,500	110,600	155,300	126,600
F3	0,810	0,772	0,691	0,926	0,789
F4	0,093	0,139	0,141	0,140	0,161

Tabela 4.4 - Valores de parâmetros F_i das misturas para idade de 7 dias

Parâmetros	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
F1	1,768E-08	1,076E-08	7,285	3,255E-07	3,300
F2	188,400	153,900	109,500	210,700	111,100
F3	0,981	0,904	0,706	1,020	0,697
F4	0,192	0,165	0,129	0,138	0,137

Tabela 4.5 - Valores de parâmetros F_i das misturas para idade de 28 dias

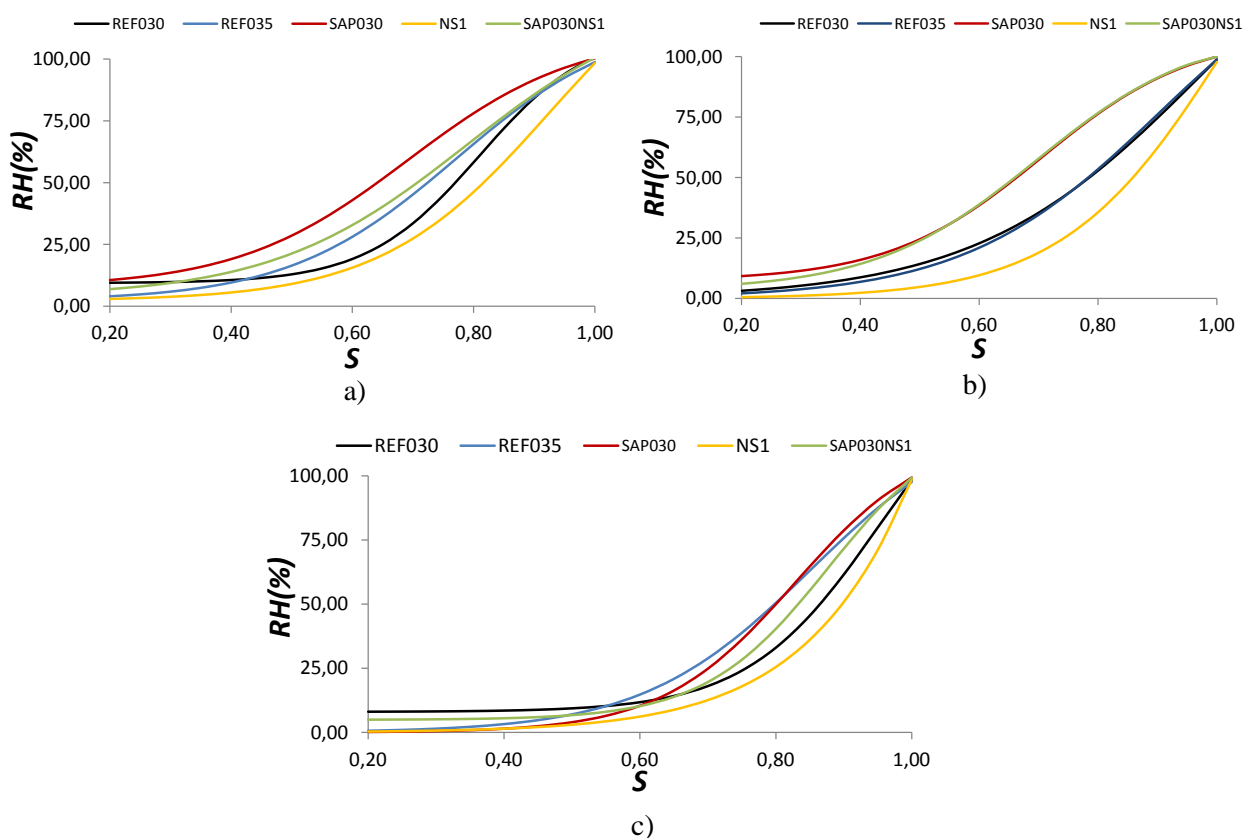
Parâmetros	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
F1	8,021	6,616E-08	1,066E-09	1,835E-08	4,918
F2	154,800	127,300	116,700	898,100	123,900
F3	0,954	0,852	0,829	1,291	0,878
F4	0,097	0,124	0,098	0,139	0,091

Como pode ser observado nas isotermas de dessorção presentes na Figura 4.4, a mistura NS1 possui a maior saturação nas três idades. Este comportamento pode estar relacionado com menores diâmetros da rede capilar causada pelas nano partículas que faz a pasta reter maior quantidade de água no seu interior.

As misturas contendo polímero (SAP030 e SAP030NS1) apresentam o menor nível de saturação nas três idades ensaiadas. Apesar destas misturas apresentarem maior porosidade total, segundo Mignon et al. (2017), os poros deixados pelo polímero são desconectados. Essa situação precisa ser melhor investigada por ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Ao avaliar individualmente as isotermas de dessorção apresentadas na Figura 4.5, percebe-se que as tipologias das curvas diferem entre si. Ao comparar esses resultados com a curva de dessorção típica, demonstrado na seção 2.3.3, percebe-se que as misturas REF030, REF035, SAP030 e SAP030NS1 possuem as três regiões bem definidas. Neste caso, a água é retirada da rede poroso sob a forma de condensação capilar e água adsorvida.

Figura 4.4 - Isotermas de dessorção das misturas: a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias; e c) idade de 28 dias

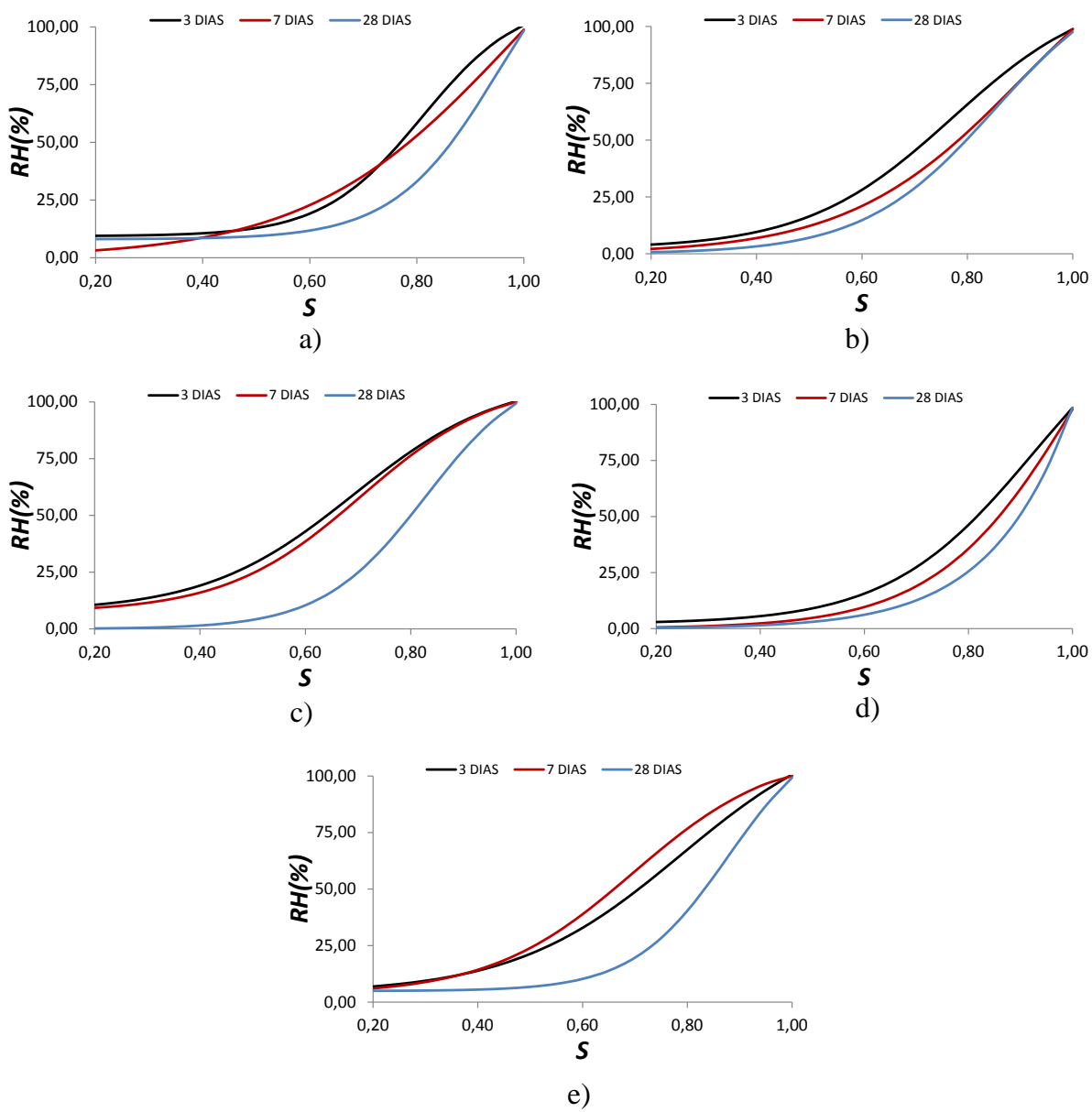


À medida que a hidratação prossegue, a rede porosa diminui e as curvas de dessorção mudam, isso acontece nas misturas REF030 e REF035 na idade de 28 dias. Nestes casos, há evidências de que a secagem só consegue retirar água da rede de poros na forma de água condensada e adsorvida.

A dessorção da mistura com nano sílica (NS1) apresentada na Figura 4.5d não possui tipologia típica, ou seja, não existem as três regiões distintas. Possivelmente a água que saiu estava sob forma condensada e uma pequena parcela de água adsorvida.

Os ensaios de perda de massa e porosidade mostram evidências de que a nano sílica diminui o diâmetro da rede capilar e provoca um refinamento de poros que dificultam a saída da água do interior dos corpos de prova. Mesmo assim, ela não consegue impedir a saída de água da mistura terciária que nesta situação predomina a ação do SAP.

Figura 4.5 - Isotermas de dessorção para as idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias: a) mistura REF030; b) mistura REF035; c) mistura SAP030; d) mistura NS1; e) mistura SAP030NS1



4.1.4 Efeito da Concentração de Íons na Pressão Capilar

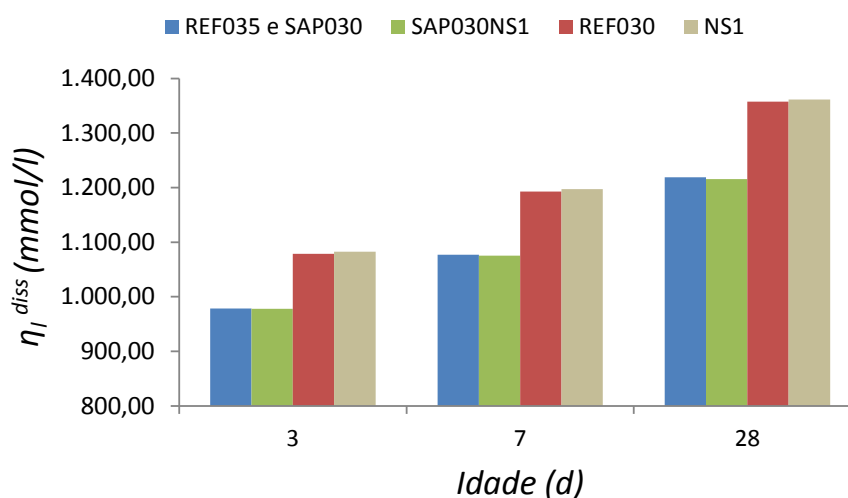
Como mencionado na seção 3.5, os valores das concentrações de íons obtidos pela metodologia de Taylor estão presentes na Tabela 4.6. O valor da concentração correspondente à mistura SAP030 foi o mesmo da REF035, porque não existe óxidos de sódio e potássio presentes na composição química do polímero superabsorvente, que são parâmetros de entrada necessários para esta determinação.

Tabela 4.6 - Concentração de íons das misturas em função da idade

Misturas	Idade (dias)	Concentrações (mmol/l)
REF030	3	1.078,97
	7	1.192,97
	28	1.357,56
REF035 e SAP030	3	978,48
	7	1.076,86
	28	1.218,97
NS1	3	1.082,81
	7	1.197,07
	28	1.361,28
SAP030NS1	3	978,23
	7	1.075,62
	28	1.215,43

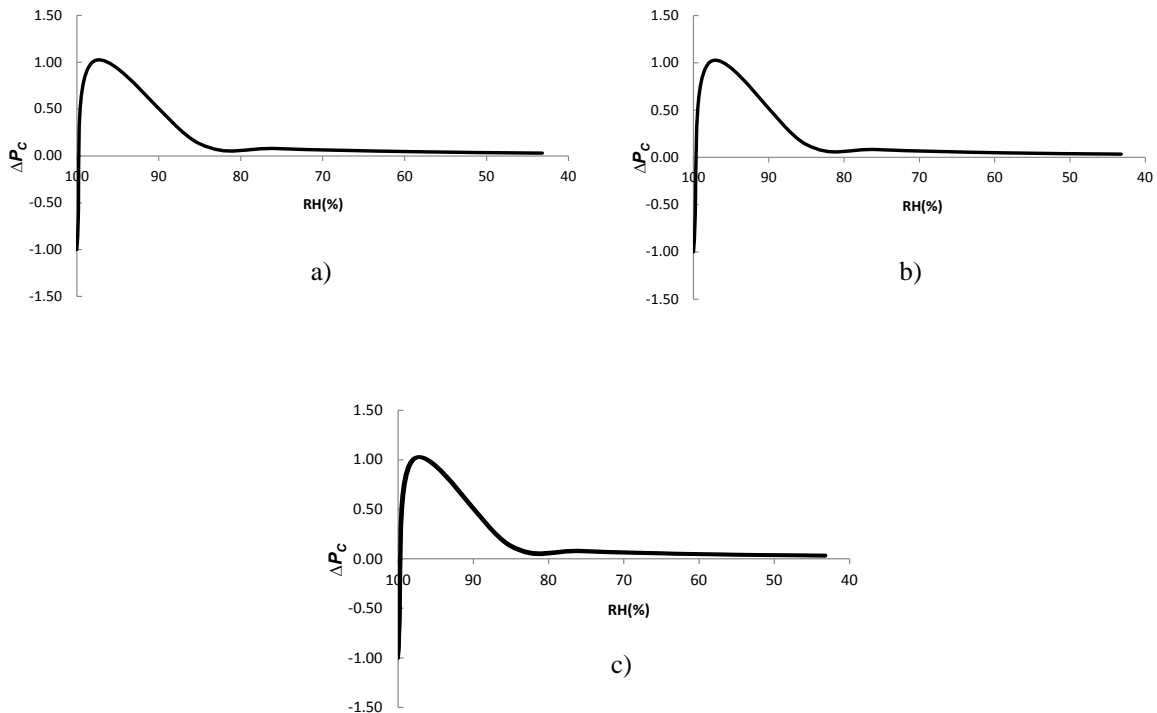
Nota-se que existe um incremento da concentração de íons em função da idade, como demonstra a Figura 4.6. Essa situação é provocada pela menor quantidade de água disponível nos poros a qual foi consumida pelas reações de hidratação. Percebe-se também que a relação a/c desempenha papel importante, para misturas com maiores relações a/c (REF035 e SAP030) as concentrações tendem a diminuir. Nestes casos existe uma maior quantidade de água disponível. Nota-se pouca ou nenhuma influência da nano sílica (NS1) na alteração da concentração de íons, isso pode estar relacionado com o seu baixo teor utilizado nas misturas (1% em relação à massa do cimento).

Figura 4.6 - Evolução das concentrações de íons na solução dos poros das misturas REF030, REF035, SAP030 e NS1 nas idades de 3, 7 e 28 dias



A Figura 4.7 apresenta as diferenças relativas entre as pressões capilares (ΔP_c) obtidas pela lei de Kelvin-Laplace e a equação proposta por Grasley e Leung (2011) para a pasta REF030. Nota-se uma diferença acentuada de ΔP_c para RH entre 99 a 97%. A partir de aproximadamente 82% de RH a diferença se torna pequena, daí em diante, no sentido positivo do eixo de RH, essa diferença alcança variação máxima de 9% e mínima de 2% em relação à pressão obtida pela lei de Kelvin-Laplace.

Figura 4.7 - Diferença entre a pressão capilar pilar (P_c) determinar pela Lei de Kelvin-Laplace e o modelo de Grasley-Leung para mistura REF030; a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias; c) idade de 28 dias.

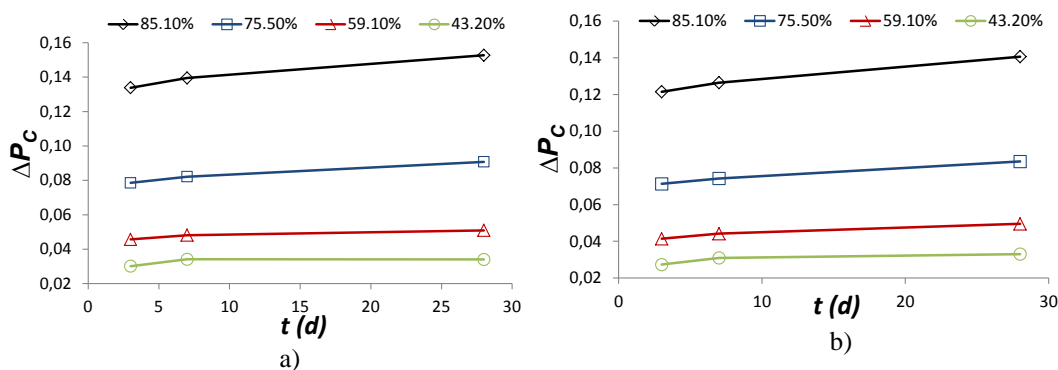


As diferenças entre as pressões (lei de Kelvin-Laplace e a equação de Grasley-Leung) foram avaliadas para níveis de umidade interna de referência (85,1; 75,5%; 59,1% e 43,2%), conforme apresentado na Figura 4.8. A umidade interna média $\langle RH(x, t) \rangle$ em função da espessura x e do tempo t dos corpos de prova foram determinados pelas isotermas de desorção e do coeficiente de difusão linear, dado pela relação de Grasley (2010).

Nota-se um aumento da diferença entre pressões com a idade para o mesmo nível de RH interna de referência. Quando se avalia as ΔP_c para cada RH, evidências mostram que as diferenças entre as pressões diminuem à medida que a RH decresce. Devido à proximidade

entre os valores de NS1 com REF030 e SAP030, SAP030NS1 com REF035 só foi possível plotar os resultados da REF030 e REF035.

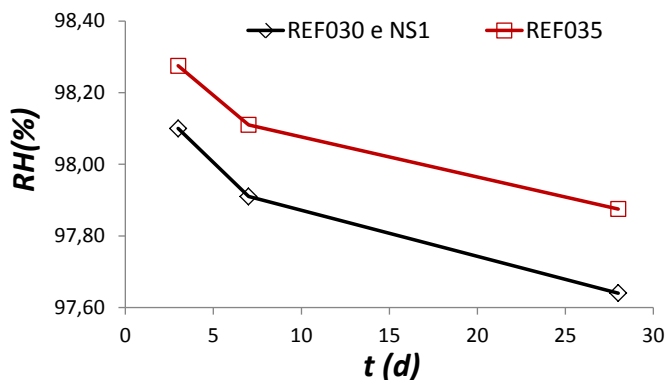
Figura 4.8 - Diferença entre a pressão capilar pilar (ΔP_C) determinar pela Lei de Kelvin-Laplace e a equação de Grasley-Leung para diferentes RH nas idades de 3, 7 e 28 dias; a) mistura REF030; b) mistura REF035



A RH de equilíbrio da solução nos poros pode ser calculada na interface plana líquido/gás, que neste caso a pressão capilar é nula ($P_c=0$) para valor de saturação máximo ($S=1$). A Figura 4.9 apresenta a umidade de equilíbrio para as misturas REF030 e REF035 em diferentes idades. Percebe-se que não houve diferença significativa entre os valores de RH para as misturas REF030 e NS1, ou seja, a nano sílica não foi capaz de influenciar a RH de equilíbrio.

Com o avanço da hidratação, a concentração de íons nos poros aumenta contribuindo para a redução da umidade de equilíbrio, como demonstrado na Figura 4.9. Mesmo que o material cimentício esteja saturado, a sua RH de equilíbrio é inferior a 100%. A presença de íons na solução causa uma queda imediata da pressão capilar. A redução é ainda maior à medida que a idade aumenta.

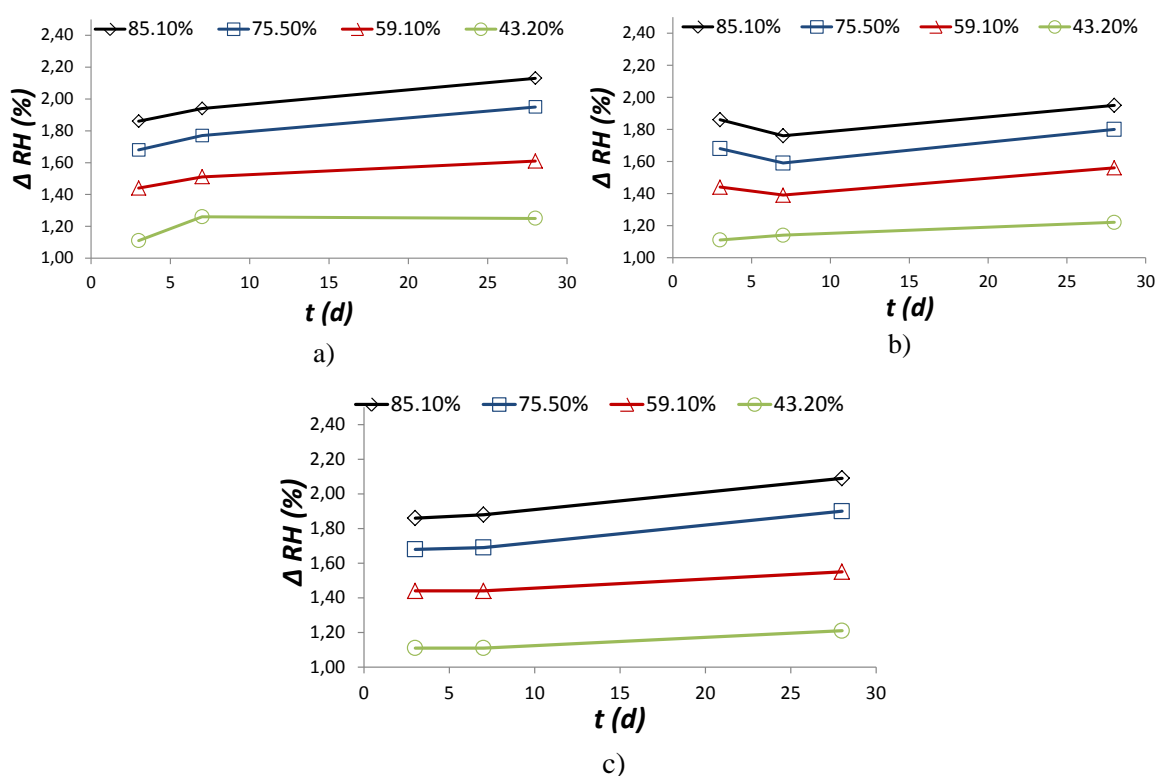
Figura 4.9 - RH de equilíbrio das misturas REF030 e REF035 nas idades de 3, 7 e 28 dias



A redução da umidade (ΔRH) foi analisada para níveis de umidade interna de referência (85,1; 75,5%; 59,1% e 43,2%), conforme apresentado na Figura 4.10. Há evidências de que existe aumento de ΔRH em função da idade. Entretanto, para as misturas REF035 e SAP030NS1 aos 7 dias, não se percebe essa mesma tendência. Este comportamento pode estar relacionado com queda no teor de saturação destas misturas.

A redução na umidade interna das pastas também ocorre em níveis mais baixos de umidade, como apresentado na Figura 4.10. Esta diminuição tende a ser incrementada com a idade. Entretanto, quando os corpos de prova são submetidos a níveis mais baixos de umidade, a queda na RH (equilíbrio) em razão dos íons dissolvidos tende a diminuir.

Figura 4.10 - Redução da umidade (ΔRH) para cada nível de umidade para as idades de 3, 7 e 28 dias; a) mistura REF030; b) mistura REF035; c) mistura NS1



A Tabela 3.14 apresenta os resultados da queda de RH das misturas. Fica evidente que o tipo de mistura não influencia na ΔRH . Para a mesma idade, no mesmo nível de umidade, os valores de ΔRH são próximos.

Tabela 4.7 - Valores de redução da umidade (ΔRH) para cada mistura

Idade (dias)	RH (%) referência	REF030		REF035		NS1	
		RH (%)	ΔRH (%)	RH (%)	ΔRH (%)	RH (%)	ΔRH (%)
3	85,1	83,24	1,86	83,24	1,86	83,24	1,86
7		83,16	1,94	83,34	1,76	83,22	1,88
28		82,97	2,13	83,15	1,95	83,01	2,09
3	75,5	73,82	1,68	73,82	1,68	73,82	1,68
7		73,73	1,77	73,91	1,59	73,81	1,69
28		73,55	1,95	73,70	1,80	73,60	1,90
3	59,1	57,66	1,44	57,66	1,44	57,66	1,44
7		57,59	1,51	57,71	1,39	57,66	1,44
28		57,49	1,61	57,54	1,56	57,55	1,55
3	43,2	42,09	1,11	42,09	1,11	42,09	1,11
7		41,94	1,26	42,06	1,14	42,09	1,11
28		41,95	1,25	41,98	1,22	41,99	1,21

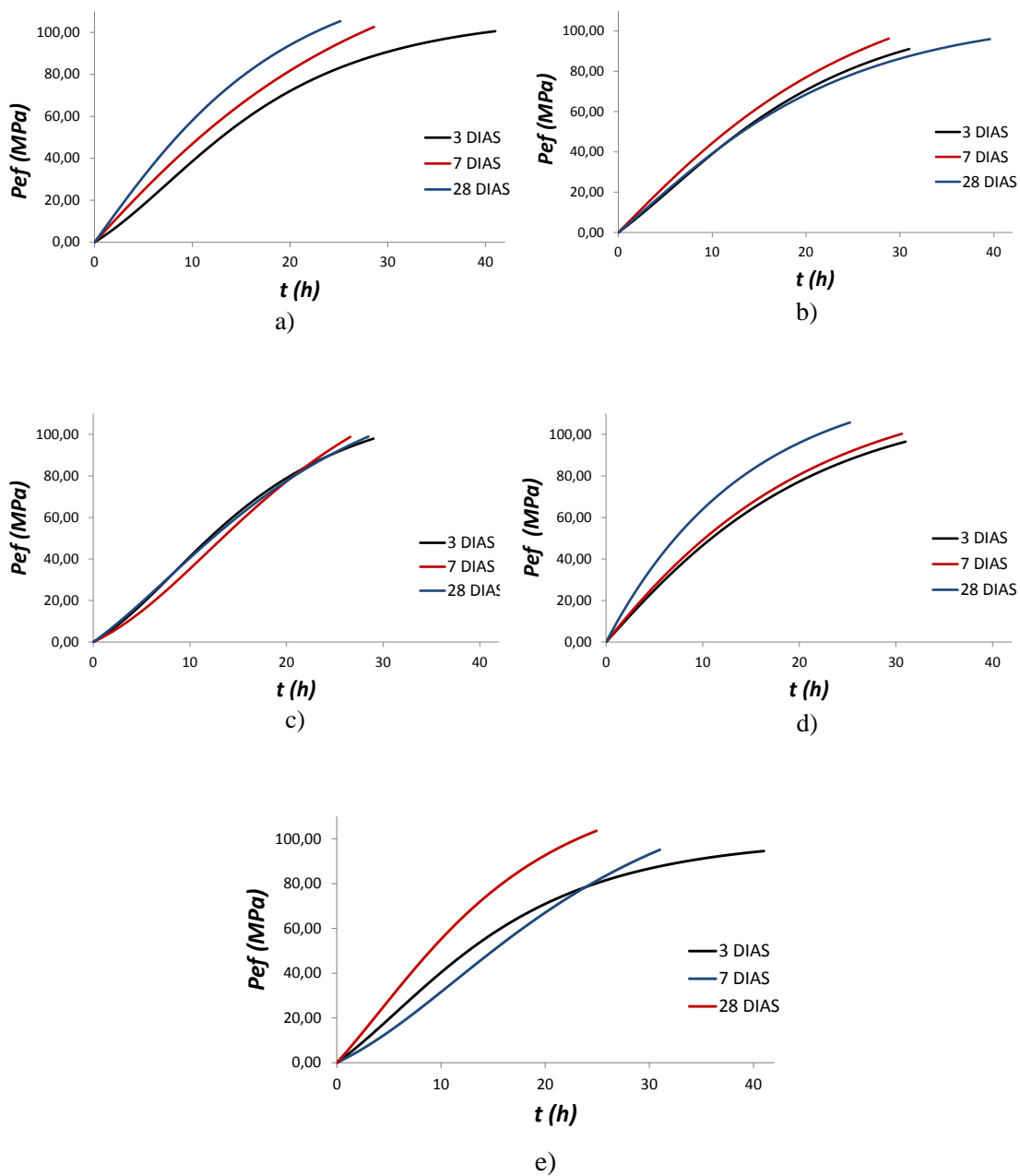
4.1.5 Pressão Capilar Efetiva (P_{ef})

O termo pressão efetiva se deve a subtração da parcela correspondente à pressão da interface líquido-sólida proposta por Coussy et al. (2003) na pressão capilar. Para sua determinação, a RH e a saturação foram calculadas pela média de resultados da seção da amostra. O período de tempo do ensaio foi o suficiente para que a umidade interna dos corpos de prova atingisse a RH de $43,2 \pm 0,4\%$. Sendo assim, o intervalo de tempo para avaliação da pressão passou a ser o mesmo do ensaio.

Para calcular a saturação, a perda de massa foi determinada por ensaio de secagem com variação gradual única de umidade relativa até alcançar $43,2 \pm 0,4\%$. Já as umidades relativas das amostras foram calculadas com base nas isotermas de dessorção e concentrações de íons.

Pelos gráficos da Figura 4.11, percebe-se que as diferenças nas pressões das misturas SAP030 e REF035 foram pequenas para as idades ensaiadas. Este fato pode estar relacionado com a pouca alteração da rede porosa com o avanço da idade. Entretanto, as demais misturas apresentam curvas distintas que denotam mudanças na estrutura capilar com a idade, ou seja, quando há diminuição da porosidade, a pressão efetiva é incrementada.

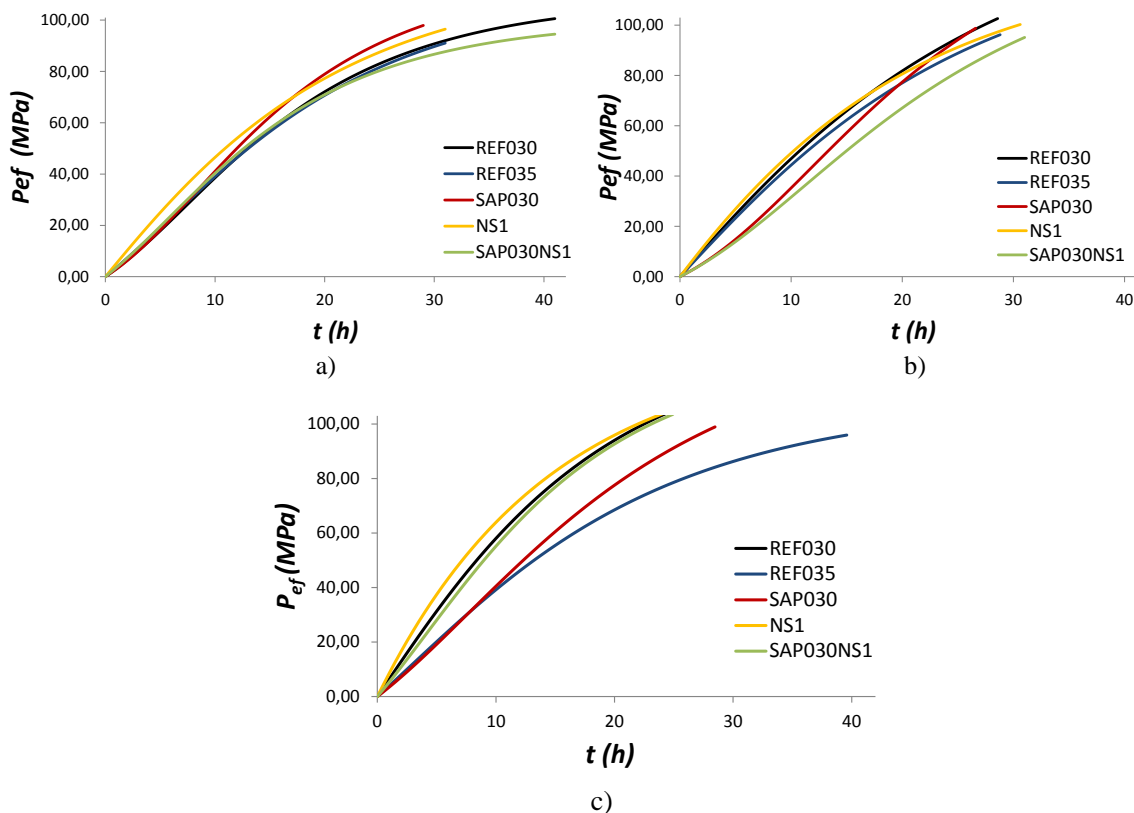
Figura 4.11 – Pressão efetiva nas idades de 3, 7 e 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1



De acordo os gráficos da Figura 4.12, os maiores valores encontrados de pressão foram da mistura NS, nessa análise também se percebe o efeito que a nano sílica causa na redução da porosidade. Não há diferenciação clara das curvas de pressão para idade de 3 dias, com exceção de NS1. Nas idades de 7 e 28 dias, a mistura SAP30 distancia das demais, deixando

evidente que sua pressão efetiva é menor. Esse comportamento pode estar correlacionado com aumento da rede capilar causada pelo polímero.

Figura 4.12 – Pressão efetiva das paras nas idades de 3, 7 e 28 dias



4.1.6 Coeficiente de Difusão (D)

O coeficiente de difusão foi determinado a partir da equação (B.10) do Apêndice B, e do histórico de perda de massa de pastas e concretos do trabalho de Silva Jr. (2017). As pastas foram avaliadas para as idades de 3, 7 e 28 dias e os concretos para idade de 28 dias. A duração do ensaio das pastas foi estabelecida em 24 horas, tempo necessário para que a umidade relativa atingisse $43,2 \pm 0,4\%$. Para os concretos, o tempo de estabilização da perda de massa foi de 200 dias.

Os históricos de perdas de massa no tempo foram ajustados à função de acordo com a equação (4.4).

$$\Delta m(t) = C(1 - e^{-t/a}) \tag{4.4}$$

Em que $\Delta m (t)$ é a perda de massa média de dois corpos de prova, t é o tempo, C e a são parâmetros de ajustes. Fisicamente C representa massa e $1/a$ representa a taxa de perda de massa no tempo. Quando o $t=0$ a perda de massa também se torna $\Delta m (t)=0$. Entretanto, quando o tempo tende a infinito, a perda de massa máxima se aproxima de C .

Os parâmetros de ajustes das pastas para cada idade estão presentes na Tabela 4.8, Tabela 4.9 e Tabela 4.10. Já a Tabela 4.11 apresenta os parâmetros correspondentes aos concretos para a idade de 28 dias.

Tabela 4.8 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para pastas aos 3 dias de idade

Parâmetros	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
a	15,11	16,26	13,66	16,79	12,43
C	1,42	2,00	1,37	1,03	1,20

Tabela 4.9 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para pastas aos 7 dias de idade

Parâmetros	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
a	23,54	20,46	18,48	18,75	19,38
C	1,18	2,02	1,53	0,89	1,88

Tabela 4.10 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para pastas aos 28 dias de idade

Parâmetros	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
a	16,11	17,30	16,94	15,06	13,48
C	0,92	1,17	1,50	0,73	1,19

Tabela 4.11 - Valores dos parâmetros de ajuste da função de perda de massa para concretos aos 28 dias de idade

Parâmetros	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
a	2242,00	1280,00	1466,00	689,00	1492,00
C	0,31	0,34	0,38	0,23	0,41

Nota-se que a menor perda de massa observada foi da mistura NS1, tanto nas pastas como nos concretos, este fato pode ter relação direta com o refinamento de poros causado pelas nano partículas de sílica.

Observa-se que as misturas com SAP a partir da idade de 7 dias (pastas e concretos) apresentam as maiores perdas de massa, mesmo que a nano sílica esteja presente. Esta tendência pode estar relacionada com aumento da porosidade causado pelo polímero, como mostra a Figura 4.13 e a Figura 4.14.

Figura 4.13 – Perda de massa das pastas para variação de umidade entre 100 e 43,2%; a) 3 dias; b) 7 dias; b) 28 dias

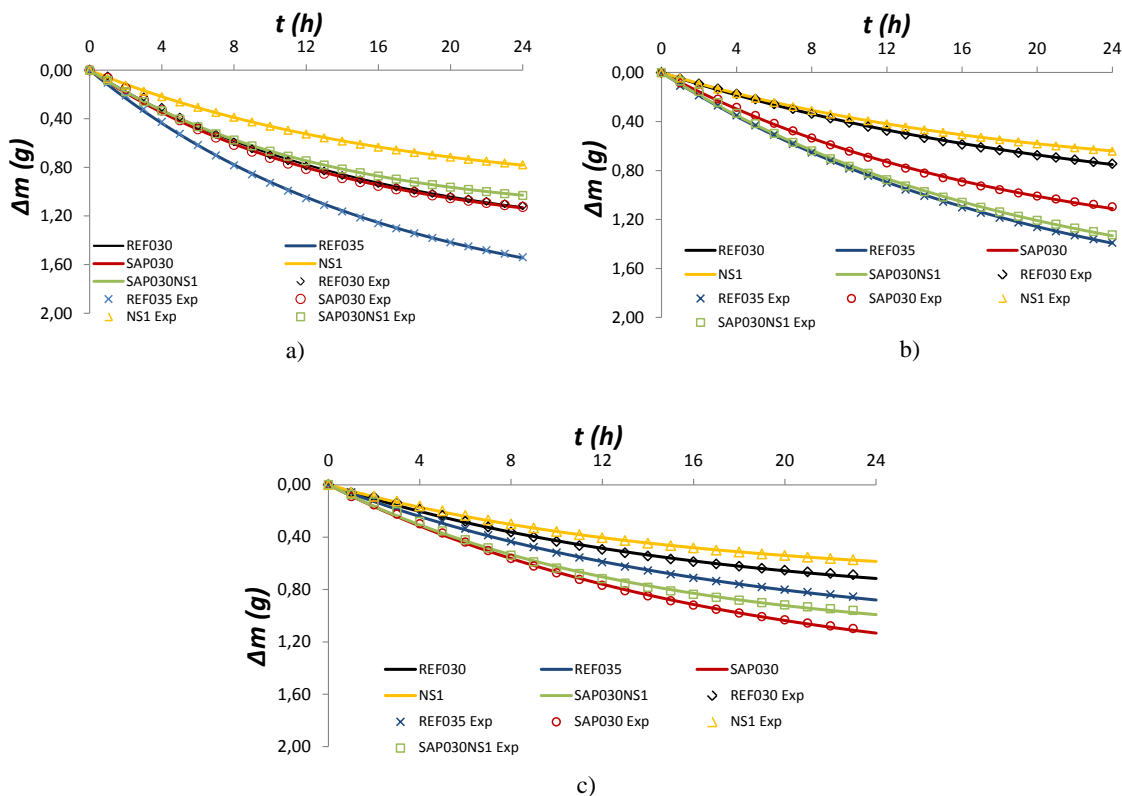
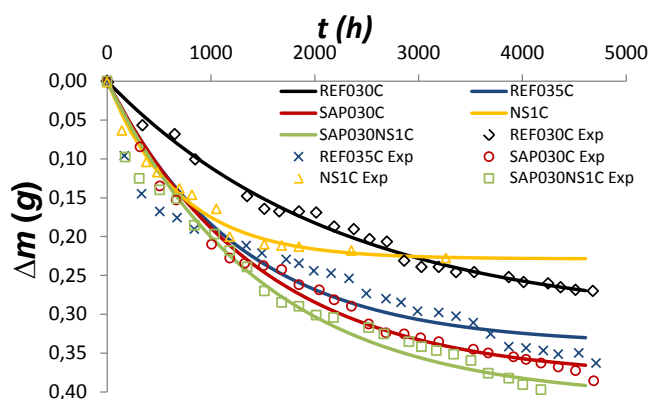


Figura 4.14 – Perda de massa dos concretos para variação de umidade entre 100 e 50% para idade de 28 dias

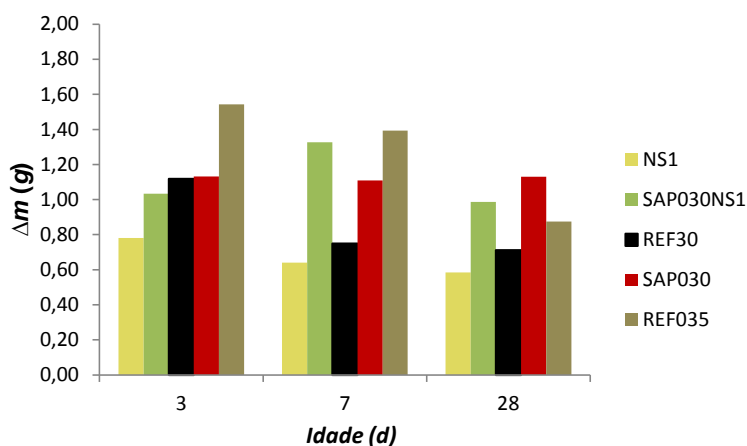


O gráfico da Figura 4.15 mostra os resultados acumulados das perdas de massa das pastas nas 24 horas de ensaio. Ao analisar os resultados, observa-se que a perda de massa do SAP030 permanece a mesma em todas as idades, com tendência dos valores serem maiores que a mistura REF030 e NS1. Esse comportamento pode estar associado com a relação a/c total,

que pode ser comparada com a/c da pasta REF035, que também possui valores elevados de perda de massa.

Aos 7 dias de idade, a pasta SA030NS1 apresentou um comportamento atípico com perda de massa superior aos 3 dias. Possivelmente, neste período, entre 3 e 7 dias, a nano sílica tenha contribuído para retardar a dessecção do SAP, aumentando a capacidade de retenção de líquido nesta fase.

Figura 4.15 – Perda de massa acumulada das pastas no período de 24 horas



Segundo Bazant e Najjar (1972), o coeficiente de difusão em materiais cimentícios é não linear no tempo. Por este motivo, as análises foram realizadas para períodos e secagem (t_s) de 1, 3, 7 e 28 dias após as idades de ensaio (t).

De maneira geral, tanto nas pastas como nos concretos, o coeficiente de difusão diminui à medida que a hidratação progride, como encontrado na Figura 4.16 e Figura 4.17. Ao observar os resultados das pastas nas idades de 7 e 28 dias, percebe-se que os maiores coeficientes de difusão são das misturas que contém SAP.

O coeficiente de difusão das misturas terciárias diminuíram entre as idades de 7 e 28 dias. Este fato pode estar relacionado com o refinamento de poros causado pela NS, como mostra a Figura 4.16b e a Figura 4.16c.

Não se constatou qualquer influência do SAP na idade de 3 dias como mostra a Figura 4.16a, neste caso o maior coeficiente foi o mesmo da referência REF035. Este fato pode estar

associado com a capacidade do SAP em reter certa quantidade de líquido nas primeiras idades.

Os menores coeficientes de difusão encontrados nos concretos e pastas foram das misturas contendo apenas nano partículas de sílica (NS1). Este comportamento pode estar relacionado com a densificação da matriz cimentícia causada pela NS.

Há uma tendência dos coeficientes de difusão se igualarem à medida que o tempo de secagem cresce, como mostra a Figura 4.16 e a Figura 4.17. Este fenômeno pode estar vinculado com a taxa de secagem, que é maior nas primeiras idades e decresce à medida que o tempo aumenta.

Figura 4.16 – Coeficiente de difusão das pastas (D_p); a) 3 dias; b) 7 dias; c) 28 dias

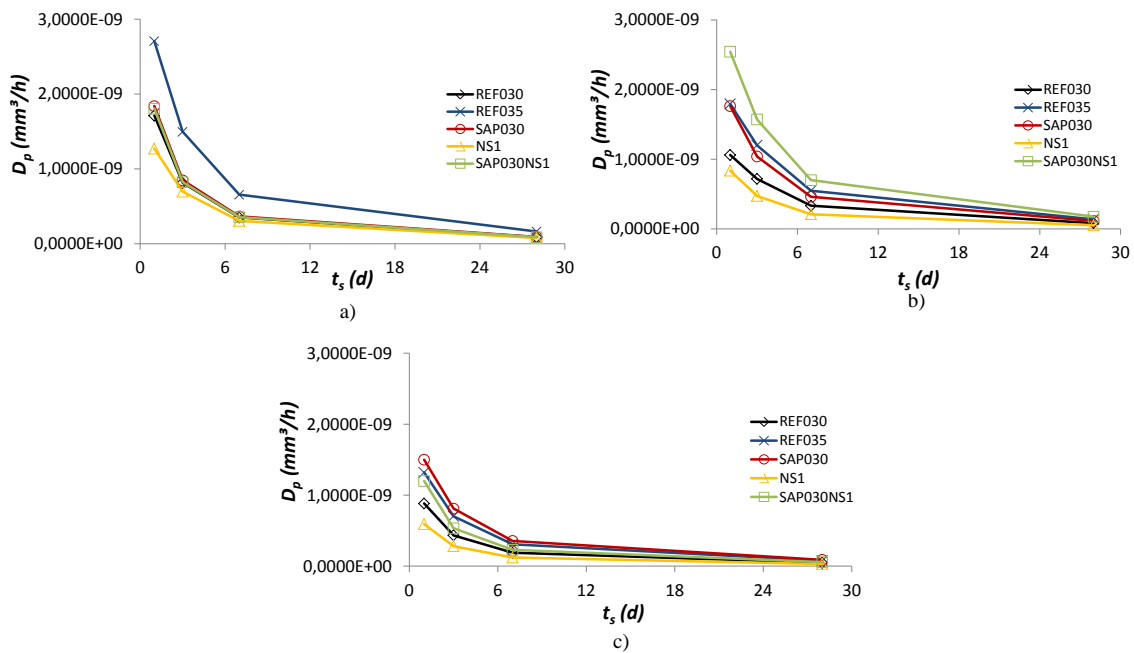
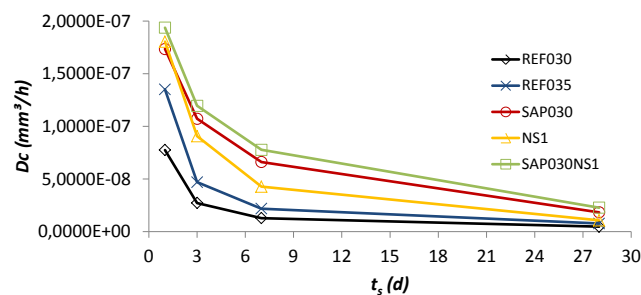
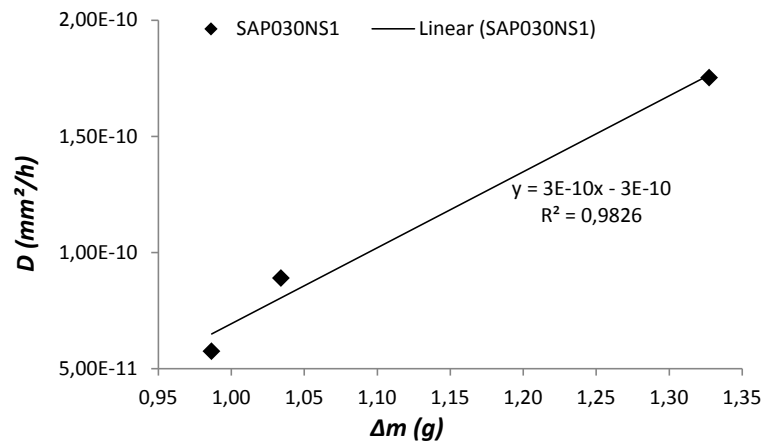


Figura 4.17 – Coeficiente de difusão dos concretos (D_c) para idade de 28 dias



O gráfico da Figura 4.18 foi construído com base nos dados de perda de massa acumulada e difusão no período de 24h de ensaio para todas as idades para período de secagem (t_s) de 28 dias da pasta SAP30NS1. Em todas as pastas analisadas, observou-se uma forte tendência da difusão acompanhar a evolução da perda de massa com uma variação entre 0,96 e 0,99 da regressão linear (R^2) de todas as pastas.

Figura 4.18 - Variação de D em função de Δm pasta SAP030NS1



Apesar dos teores de SAP e NS usados nas pastas e nos concretos serem os mesmos, os valores de difusão foram diferentes por dois motivos. Trata-se de dois materiais com comportamentos de transporte de massa distintos e espessuras dos corpos de prova desigual (2 mm para pastas e 75 mm para concretos). Quando há variação na espessura, a difusão aumentará na razão do seu quadrado de acordo com a equação (3.18). Contudo, estas distinções nos motivou a realizar um comparativo entre os coeficientes das pastas e concretos para idade de 28 dias, conforme apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Relação entre coeficientes de difusão entre pastas (D_p) e concretos (D_c) para idade de 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030N1

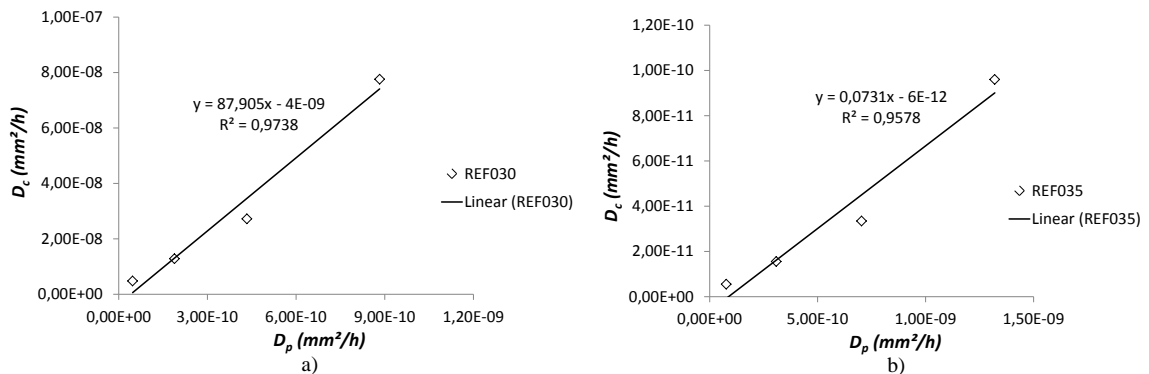
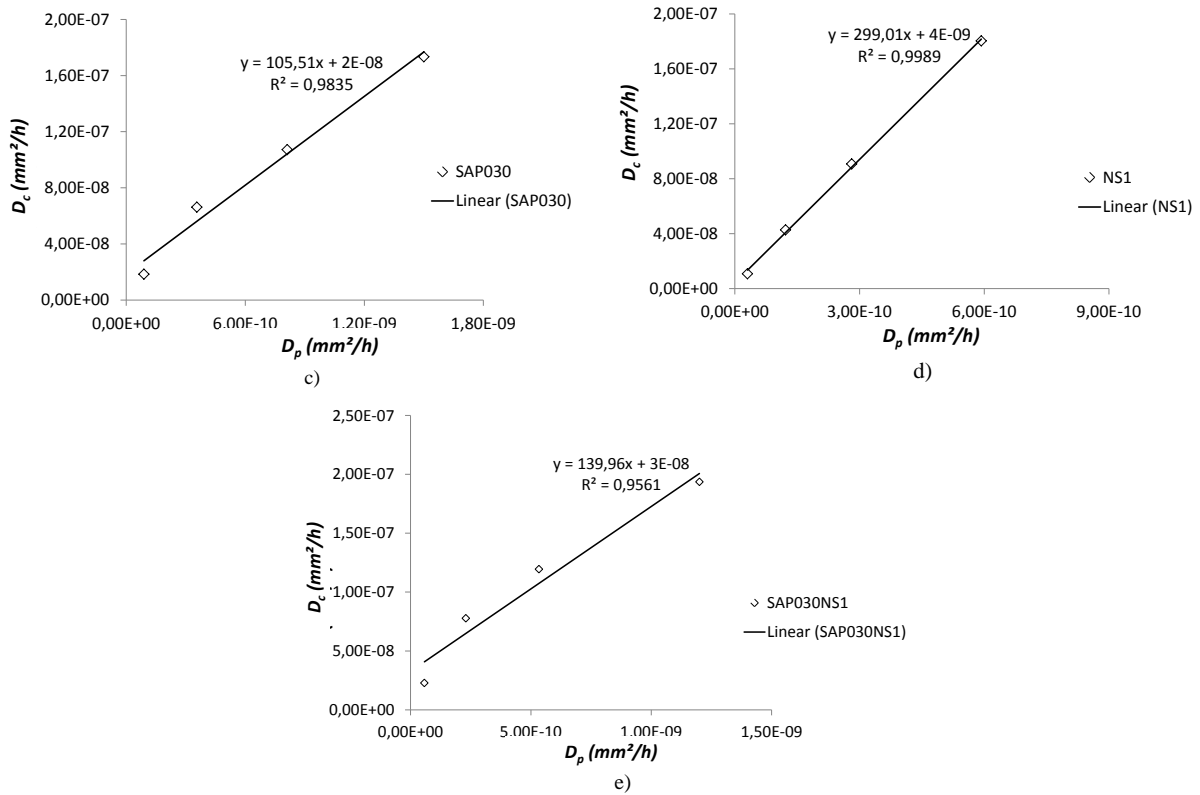


Figura 4.19 – Relação entre coeficientes de difusão entre pastas (D_p) e concretos (D_c) para idade de 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030N1



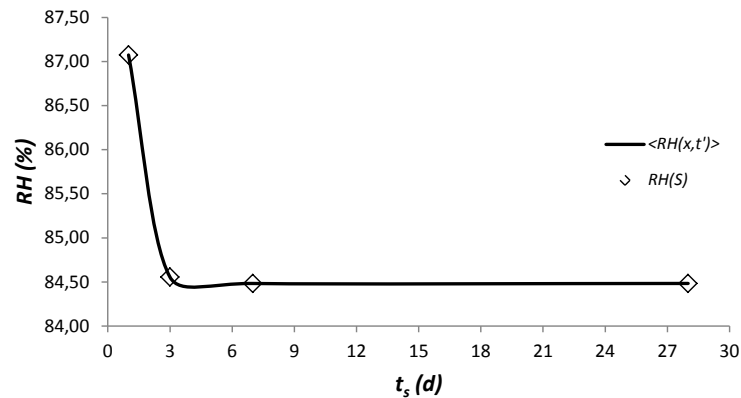
Verifica-se que há tendência de crescimento linear entre os coeficientes de difusão de pastas e concretos, quando os tempos de secagem crescem, as difusões aumentam na mesma proporção. Conclui-se que o comportamento da difusão evidenciado nas pastas é semelhante aos dos concretos.

4.1.7 Perfil de RH interna e profundidade de secagem

Para este estudo, foram construídos perfis de umidade dado pela função $RH(x, t')$ onde x representa a profundidade da amostra para cada período de secagem t_s , determinada pela equação (B.13) do apêndice de pastas e concretos.

Para validação dos resultados obtidos pela metodologia adotada, Grasley (2010) utilizou-se de uma expressão definida por Bazant et al. (1997) em que a umidade relativa interna média é dada em função dos valores experimentais de saturação de acordo com a função $RH(S)$, nesta etapa foram utilizados os valores da pasta REF030. De acordo com o gráfico presente na Figura 4.20, a metodologia proposta produz resultados similares aos de laboratório.

Figura 4.20 – Valores de $\langle RH(x,t') \rangle$ e $RH(S)$ pasta REF030.



Os perfis de umidade foram determinados para os tempos t_s de 1 e 28 dias após as idades de ensaio, construídos espacialmente em relação a menor espessura dos corpos de prova, no caso das pastas 2mm e concretos 75mm.

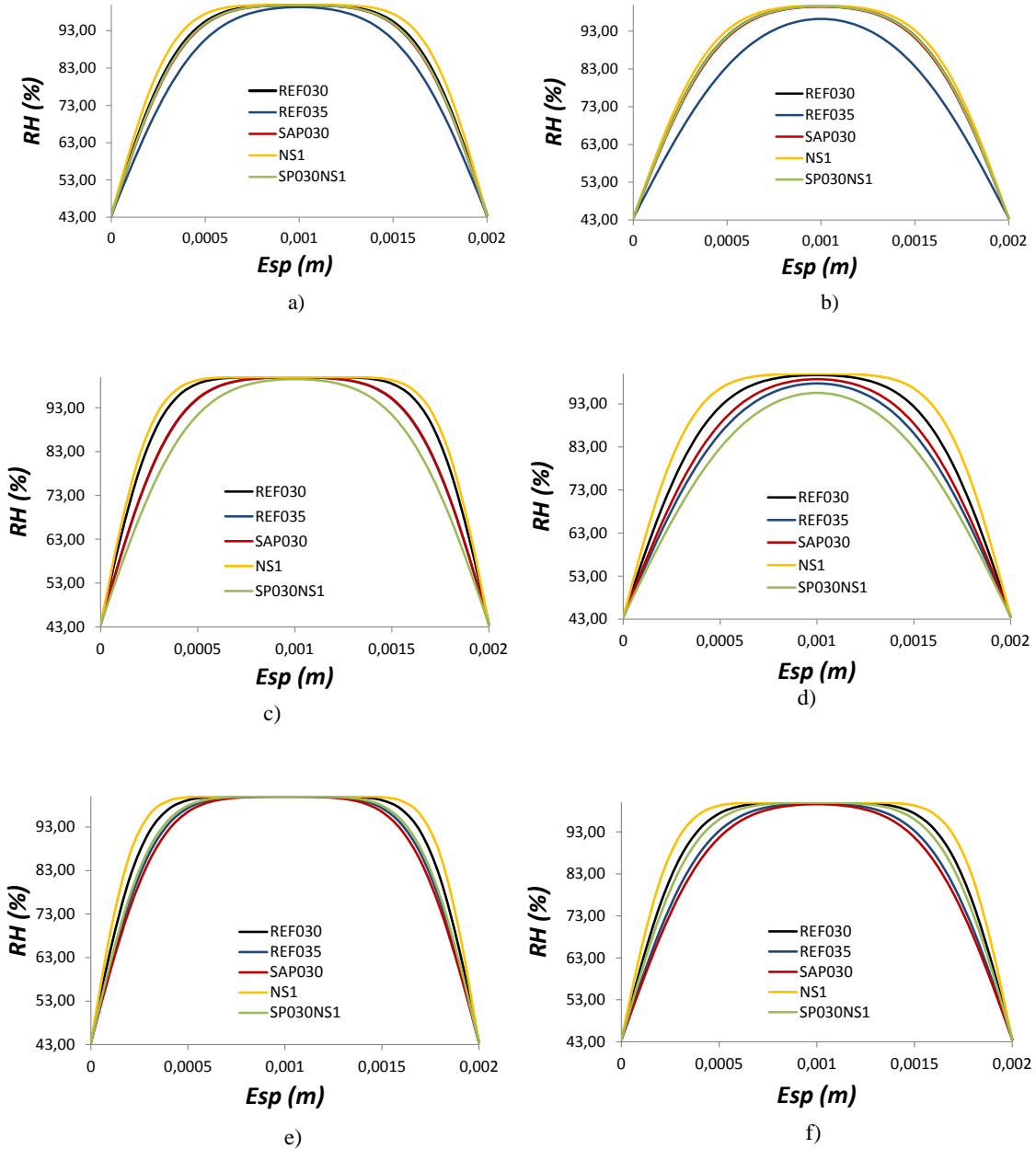
Para as pastas, observa-se uma diminuição na profundidade de RH quando a hidratação avança. Na idade de 28 dias em que já ocorreu a maioria das reações de hidratação, a profundidade é menor do que nas outras idades analisadas.

Para uma mesma idade (t) quando o tempo de secagem (t_s) aumenta, o perfil decresce conseguindo alcançar maiores profundidades, como apresentado na Figura 4.21. Entretanto, o alcance é maior nas primeiras idades (3 e 7 dias). Este fato pode ter relação com a hidratação, ou seja, quando a hidratação prossegue gera menor porosidade e origina menor frente de secagem.

De acordo com a Figura 4.21, a pasta que retém maior quantidade de umidade é a NS1. Como já foi mencionado, este comportamento pode ter relação com menor porosidade causada por estas partículas.

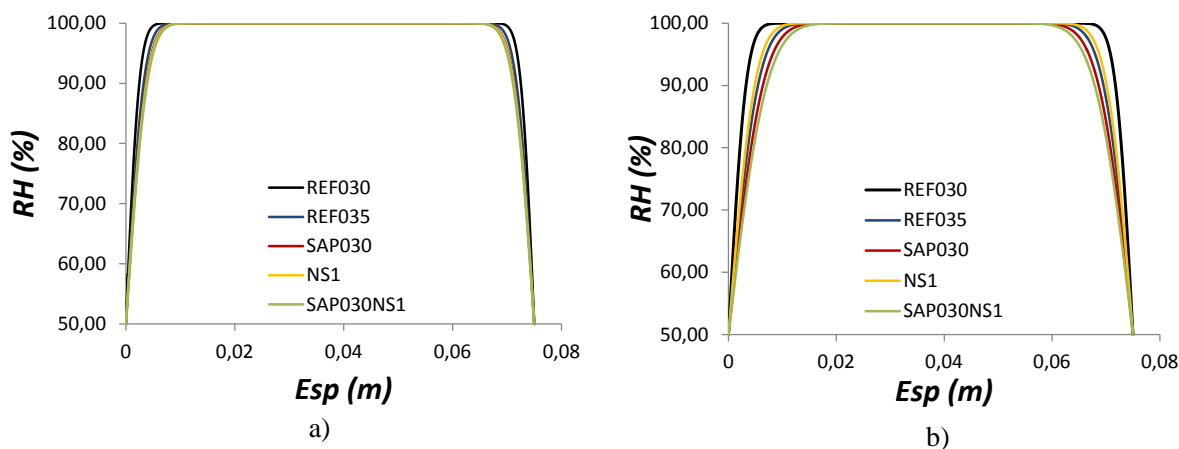
Por outro lado, as misturas que contêm polímero superabsorvente (SAP30 e SAP030NS1) apresentam maiores profundidades de secagem, como mostra os perfis da Figura 4.21. Nas idades de 7 e 28 dias, chega a alcançar toda espessura da amostra. Este fato demonstra que o SAP aumenta a porosidade total das pastas pesquisadas.

Figura 4.21 – Perfil de RH em função da espessura (esp) das pastas: a) $t = 3$ dias e $t_s = 1$ dia; b) $t = 3$ dias e $t_s = 28$ dias; c) $t = 7$ dias e $t_s = 1$ dia; d) $t = 7$ dias e $t_s = 28$ dias; e) $t = 28$ dias e $t_s = 1$ dia e f) $t = 28$ dias e $t_s = 28$ dias.



Nos concretos o aumento da profundidade de secagem também aumenta quando t_s cresce, conforme apresentado na Figura 4.22. Em 1 dia de secagem, observa-se que o concreto REF030 tem o menor perfil, para os demais concretos na mesma idade não se percebe nenhuma diferença. Aos 28 dias de secagem, fica evidente que as misturas contendo SAP apresentam maiores frentes de secagem conforme a Figura 4.22.

Figura 4.22 – Perfil de RH em função da espessura (esp) nos concretos para idade de 28 dias, a) Idade de secagem $t' = 1$ dia e b) Idade de secagem $t' = 28$ dias



4.2 Propriedades Viscoelásticas

Nesta seção serão avaliados os resultados da viscoelasticidade em pastas e concretos. Sendo que o ensaio realizado para fluência das pastas foi feito com a metodologia DSR mencionada no item 3.4.6, e os concretos com base no trabalho de Silva Jr. (2017). A fluência foi determinada de acordo com NBR 8224/2012.

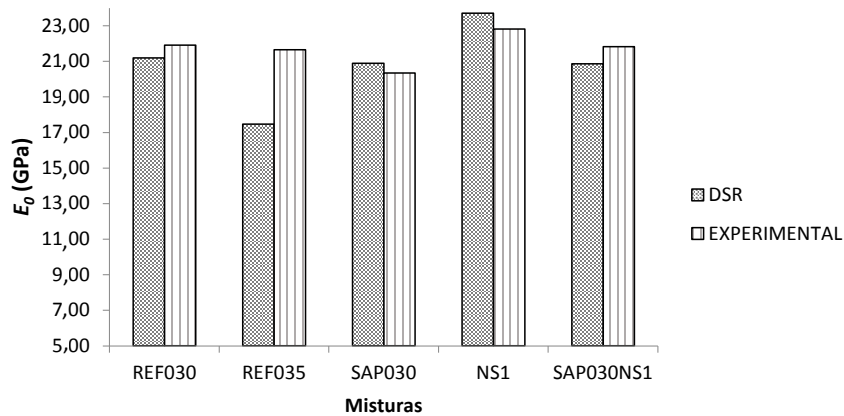
4.2.1 Comparação do Módulo de Deformação (E_0) obtido experimentalmente com Dados do Ensaio DSR

Nesta seção foi realizada uma comparação entre o módulo de deformação obtido experimentalmente de acordo com o Anexo D com resultados do ensaio dinâmico usado na pesquisa. O objetivo foi verificar se a metodologia de ensaio DSR é válida. Os valores de E_0 vindos do DSR foram obtidos fazendo $\rho_i \rightarrow \infty$ na função de relaxação dada pela equação (4.5).

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^m E_i e^{-\left(\frac{t}{\rho_i}\right)} \quad (4.5)$$

O gráfico da Figura 4.23 apresenta comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos pela equação (4.5) para idade de 28 dias.

Figura 4.23 – Valores E_0 obtidos experimentalmente e pelo DSR aos 28 dias



Após analisar a Figura 4.23, verifica-se que os dados do módulo de deformação oriundos do ensaio DSR tendem a serem similares aos experimentais. As diferenças observadas em relação aos dados determinados pela norma são de aproximadamente 4% (para mais ou para menos), com exceção da mistura REF035 onde o resultado foi de 19%. Com essas informações, percebe-se que a metodologia DSR se mostra confiável e vantajosa para determinação de parâmetros viscoelásticos.

4.2.2 Função de Fluência

A função de fluência $J_s(t)$ foi definida por uma série de prony com três cadeias ($n=3$), como descrito na equação (4.5), pelos resultados do DSR presentes no Anexo E.

$$J_s(t) = j_0 + \sum_{i=1}^n j_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (4.6)$$

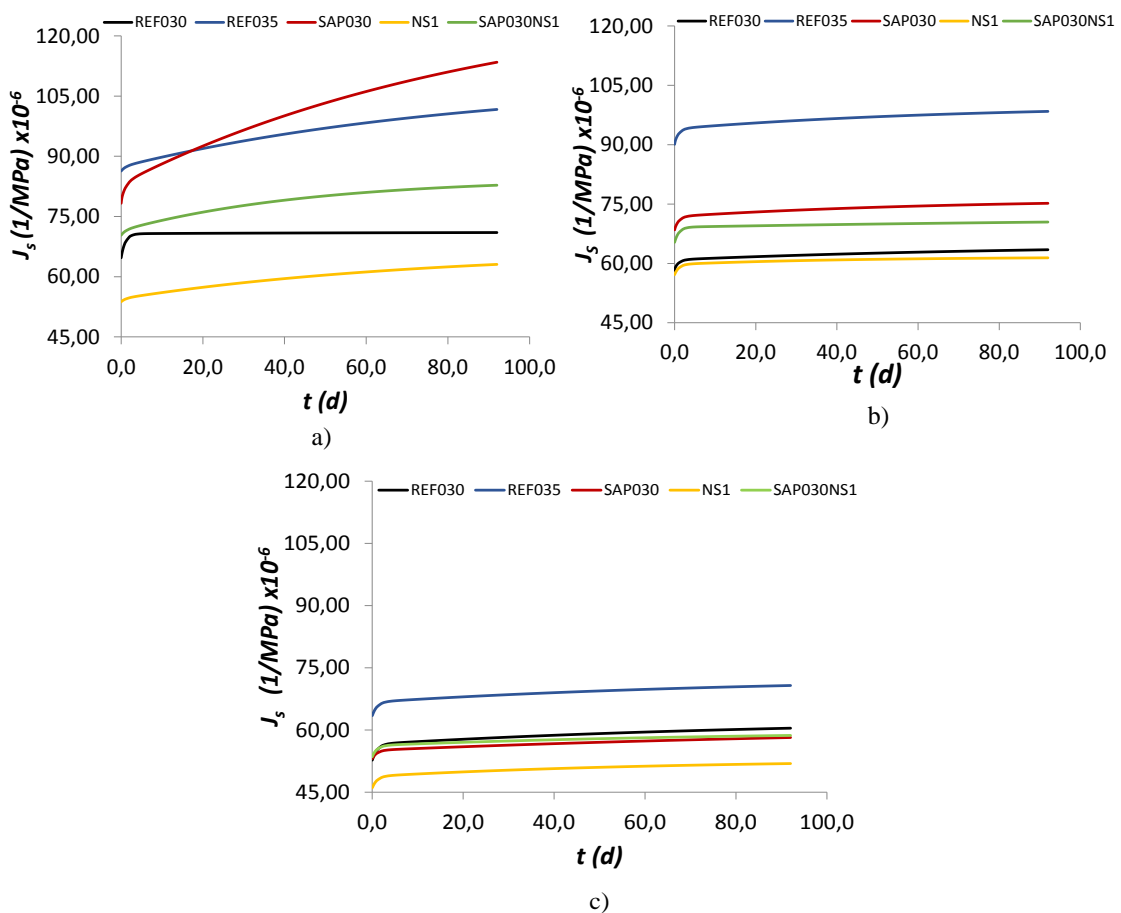
Em que j_i são módulos de fluência e τ_i são os tempos de retardo.

A Figura 4.24 mostra as curvas de fluência das pastas. Percebe-se que os menores valores de fluência são da pasta com nano partículas de sílica (NS1). Este comportamento pode estar associado com a melhoria das propriedades mecânicas observada na microestrutura, que são incrementadas pela atividade pozolânica (ZHANG et al. 2017). A mistura REF030 é a segunda pasta que apresenta a menor fluência. Esta observação provavelmente relaciona-se com a relação a/c , no caso desta pasta é uma das menores.

A mistura SAP030 na idade de 3 dias possui a maior fluência entre as misturas. Entretanto, quando a hidratação avança seus valores tendem a cair, ficando abaixo da fluência de outras misturas. Por exemplo, na idade de 3 dias, a fluência era 9,7% maior do que a REF035 (segunda maior fluência), aos 7 dias já apresentava-se 23,0% menor que a REF35 e aos 28 dias estava abaixo da REF035 (com 17,0 %) e da REF030 (com 1,7%). Este fenômeno pode ter origem na formação de maior quantidade de produtos de hidratação no poro deixado após a desorção do polímero. Manzano (2016) já havia constatado nos seus estudos a presença de silicato de cálcio hidratado C-S-H e CH nos poros vazios deixados pelo polímero em idades avançadas.

No caso da pasta terciária SAP030NS1, o efeito provocado pela NS fez a fluência decrescer. Este fenômeno também pode ter ligação com a elevação da rigidez do material provocado pela formação de produtos de hidratação como o C-S-H pozolânico, melhorando a densificação da microestrutura.

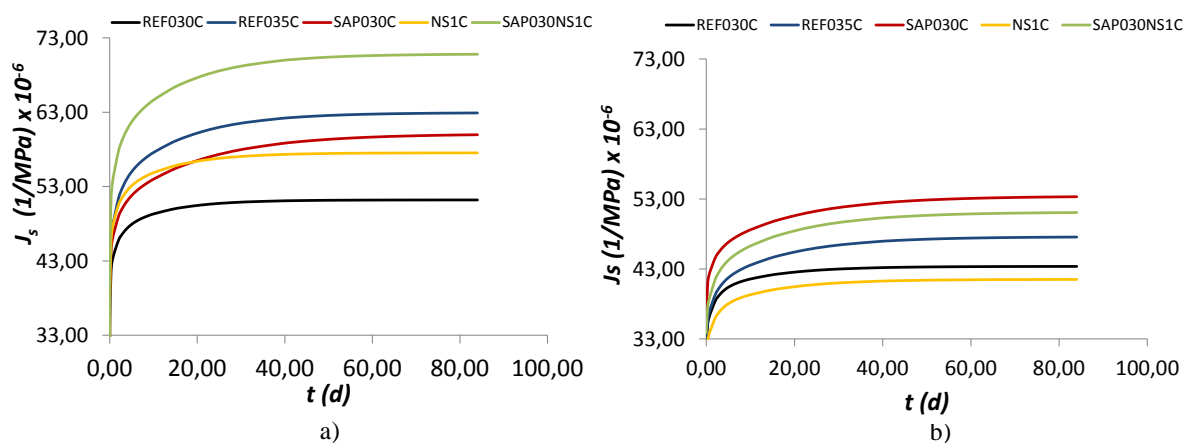
Figura 4.24 – Curvas de fluência das pastas; a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias; e c) idade de 28 dias



Os concretos que possuem as menores fluências são aqueles que possuem relação a/c igual 0,30 no caso (REF030C e NS1C). Este mesmo fato aconteceu nas pastas, isso leva a crer que a baixa relação a/c aumenta a rigidez do material, diminuindo a sua fluência. No caso da NS1C, o declínio da fluência também pode estar relacionado com efeito do refinamento dos poros, como pode ser observado na Figura 4.25b.

As análises dos concretos só foram possíveis em idades precoces (3 e 7 dias) por este motivo a avaliação da atuação do SAP até o período de 28 dias, como aconteceu nas pastas ficou prejudicada. Entretanto, percebe-se que misturas contendo SAP aparecem com os maiores valores de fluência, conforme presente na Figura 4.25a e na Figura 4.25b.

Figura 4.25 – Fluência dos concretos; a) idade de 3 dias e b) idade de 7 dias



4.2.3 Avaliação do Envelhecimento

Para esta avaliação foram usados três estudos, a teoria da solidificação de Bazant (1977) e Carol e Bazant (1993), a abordagem do tempo diferido (time shift) adaptado de Morland e Lee (1960) e a combinação da teoria da solidificação com o tempo diferido proposta por Grasley e Lange (2007). Foi escolhida a idade de 3 dias como sendo a referência para análise do envelhecimento em outras idades tanto para pastas como para os concretos.

As funções de envelhecimento usadas para explicar a solidificação do material de Bazant (1977) e Carol e Bazant (1993) foram determinadas de acordo com a equação (4.7), essa função foi escolhida a fim de encontrar uma solução analítica tratável para a equação (3.31).

$$\frac{1}{v(t)} = \frac{1}{\beta_1 e^{-\omega_1 t}} + \frac{1}{\beta_2 e^{-\omega_2 t}} \quad (4.7)$$

Em que β_i e ω_i são parâmetros de ajustes.

As funções de envelhecimento das pastas foram ajustadas a partir dos valores dos módulos de fluências iniciais (J_0) do ensaio DSR. Esses módulos foram normalizados para valores das idades ensaiadas.

Já as funções de envelhecimento dos concretos foram ajustadas a partir dos valores dos módulos de deformação iniciais (E_0) (SILVA JR, 2017). Esses módulos foram normalizados para valores também das ensaiadas.

Para avaliar a capacidade da teoria expressar as propriedades viscoelásticas do envelhecimento além da idade de referência, no caso de 7, e de 28 dias, os dados experimentais foram comparados com valores previstos conforme a equação (3.26).

Os resultados das pastas estão presentes na Figura 4.26. Percebe-se que a teoria da solidificação prediz razoavelmente o envelhecimento das pastas além da idade de referência. Entretanto, a previsão das pastas REF030 e a SAP030NS1 não foram tão parecidos com os valores medidos, como aconteceu com as demais. Segundo Grasley e Lange (2007) a teoria da solidificação não considera completamente o envelhecimento das propriedades viscoelásticas. A implicação disso é que existem fatores adicionais significativos além da solidificação ou hidratação da pasta de cimento que influenciam no comportamento do envelhecimento do material.

Figura 4.26 – Resultados experimentais com a teoria da solidificação em pastas; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

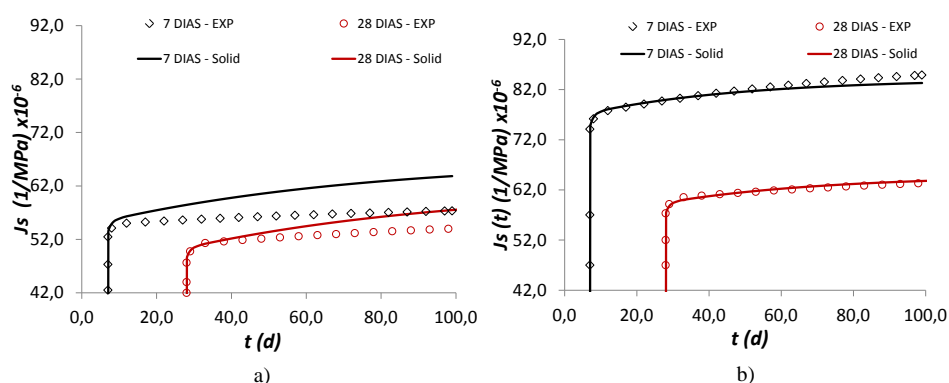
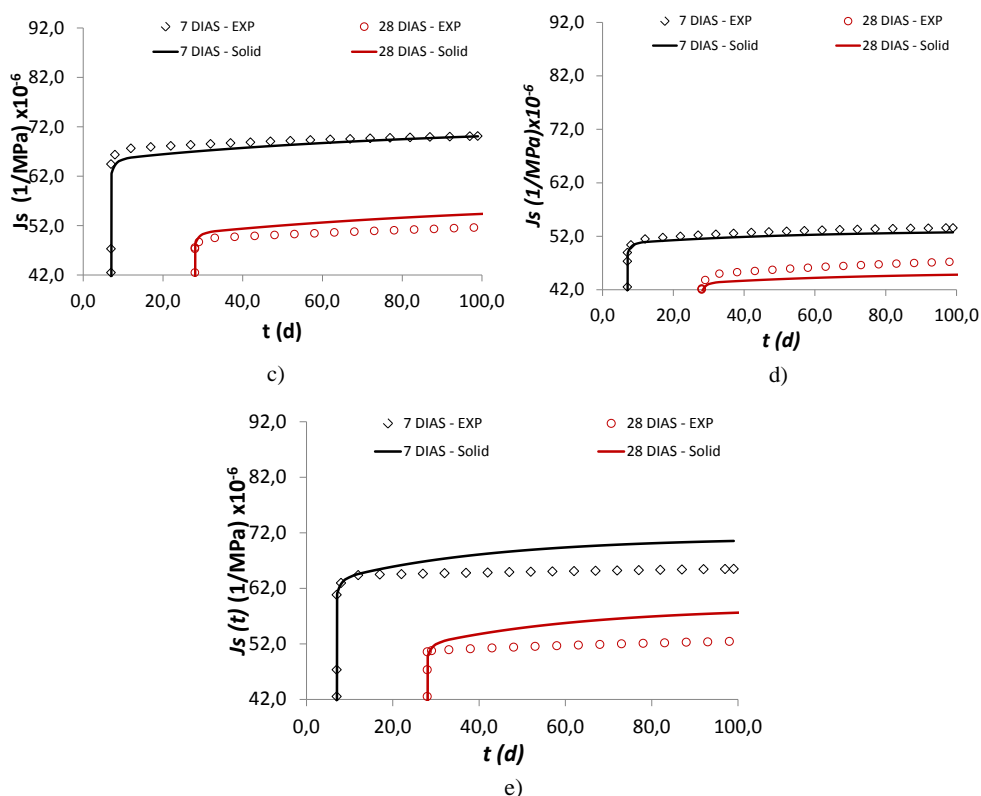


Figura 4.26– Resultados experimentais com a teoria da solidificação em pastas; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1



Como pode ser observado na Figura 4.30, a teoria da solidificação foi capaz de prever a fluência nos concretos tão bem como nas pastas. Apesar de aparecer no concreto SAP030NS1C uma pequena discrepância entre os valores medidos em relação aos valores previstos, como aconteceu também com a pasta.

Figura 4.27 – Resultados experimentais com a teoria da solidificação em concretos; a) REF030C; b)REF035C; c) SAP030C; d) NS1C e) SAP030NS1C

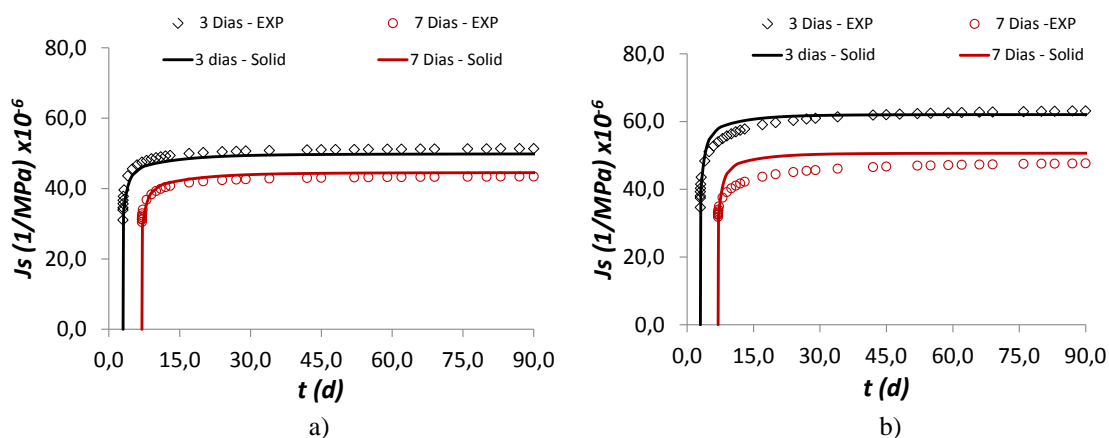
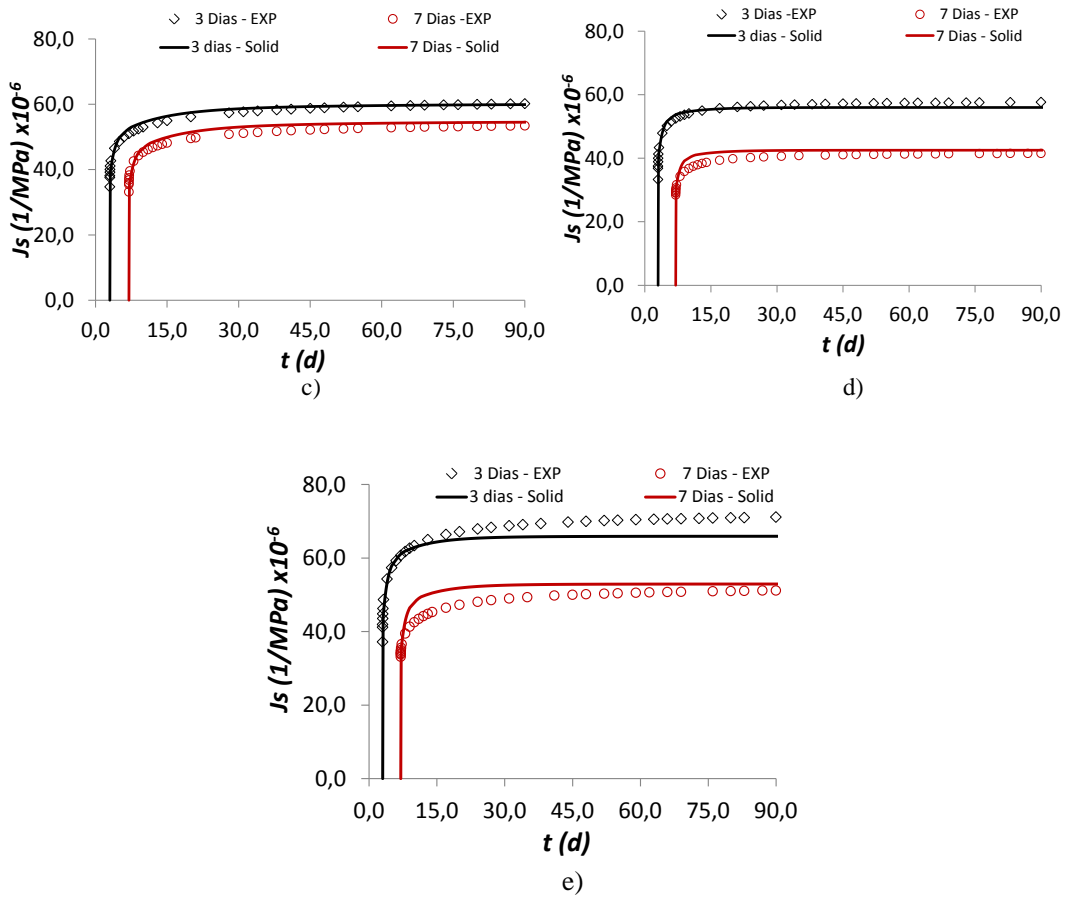


Figura 4.27– Resultados experimentais com a teoria da solidificação em concretos; a) REF030C; b)REF035C; c) SAP030C; d) NS1C e e) SAP030NS1C



Para essa abordagem do tempo diferido (time shift) uma função de deslocamento At foi determinada de acordo com a equação (3.27) definida em função do tempo, da idade do carregamento e do parâmetro μ que estabelece a taxa de envelhecimento do material.

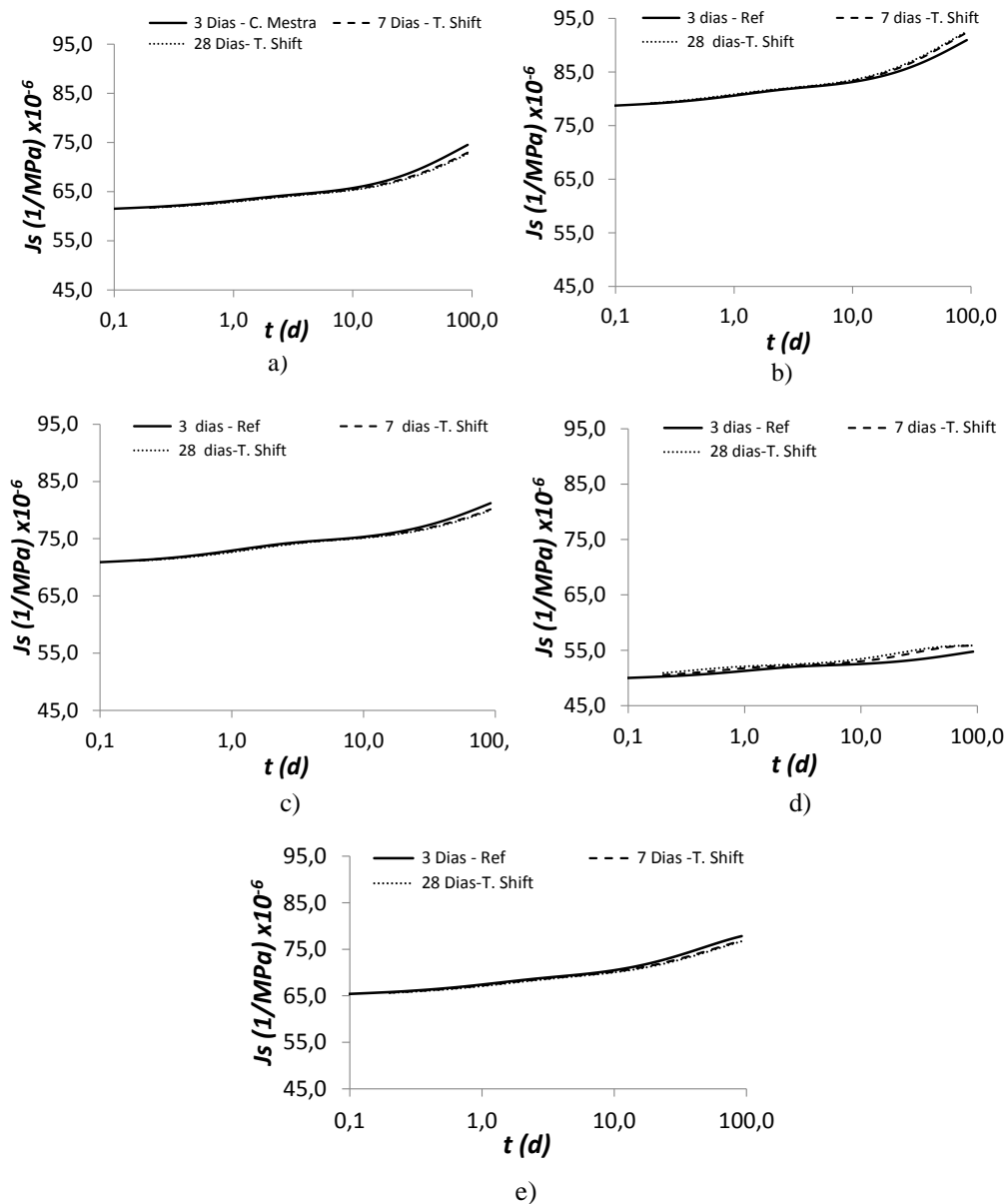
Para definição do parâmetro de envelhecimento μ , foi utilizada a proposta de Grasley e Lange (2007) que consiste em plotar em escala log os dados de fluência versus $(\xi - \xi')$, conforme a equação (3.30). Ao realizar este procedimento, o parâmetro μ foi ajustado até que a fluência das outras idades se sobreponha com a curva de fluência da referência.

Os valores dos parâmetros de ajustes μ determinados para as pastas estão presentes na Tabela 4.12. Os mesmos resultados foram encontrados para os concretos.

REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
-0,20	0,10	-0,10	0,50	-0,50

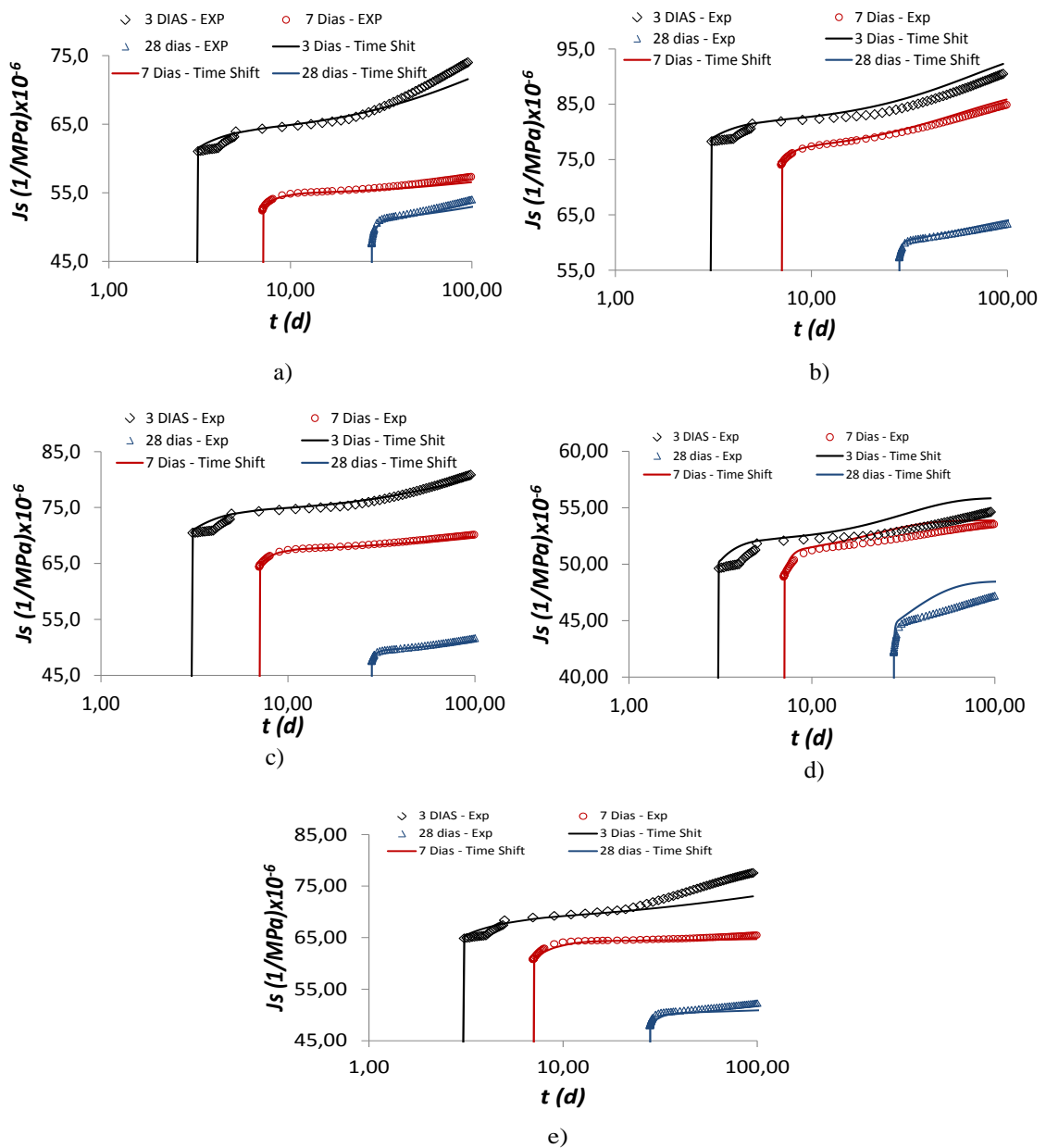
A Figura 4.28 apresenta a superposição das curvas após o deslocamento dado pela equação (3.9), tomando como base a idade referência (3 dias). Verifica-se uma concordância razoável entre as curvas. Entretanto há uma pequena dispersão entre valores das curvas de 7 e 28 dias das pastas e na curva de 7 dias dos concretos em relação à referência para misturas, contendo nano partículas de sílica, conforme apresentado na Figura 4.28 e Figura 4.30.

Figura 4.28 – Superposição de curvas tempo diferido em pastas; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1



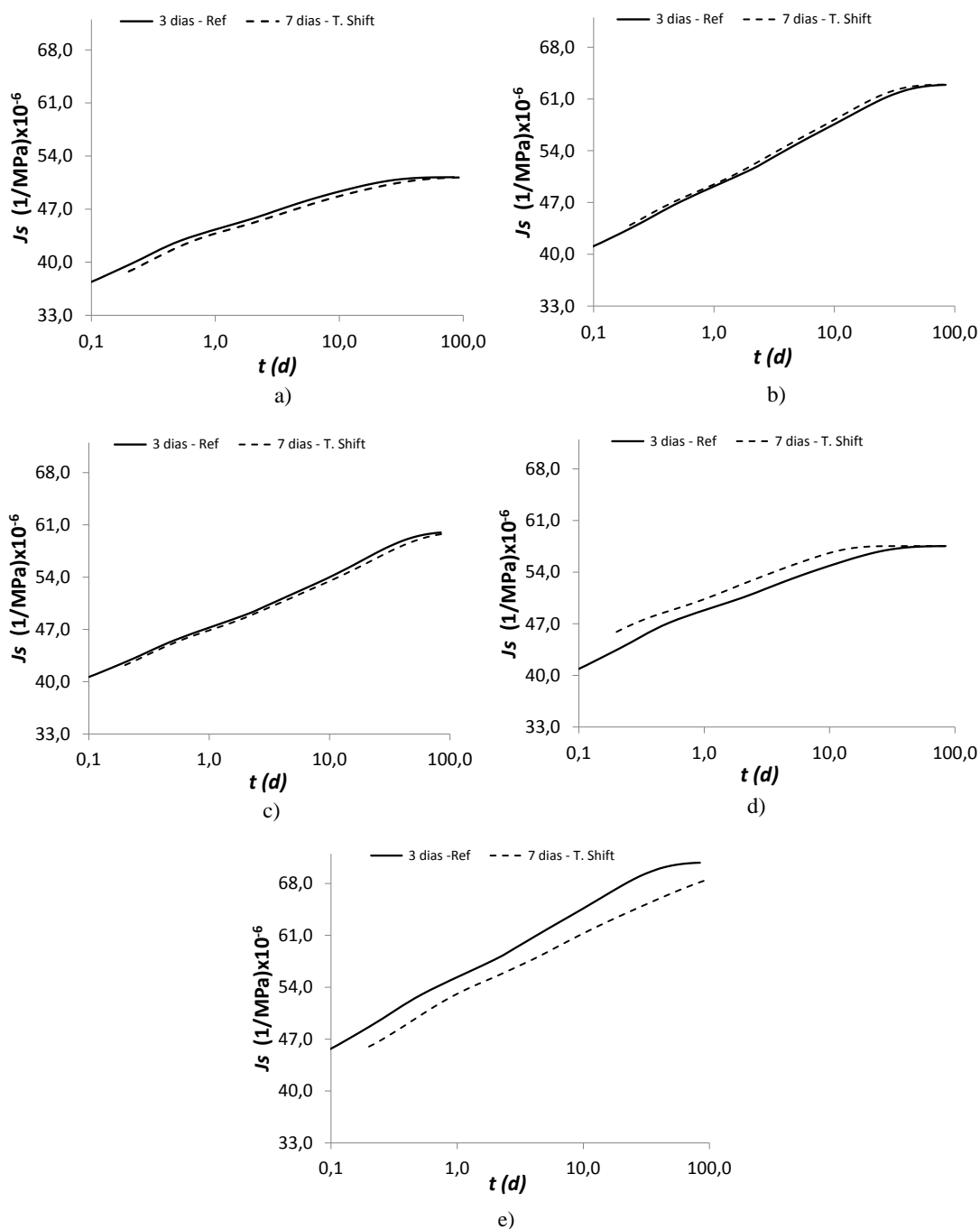
Na Figura 4.29 estão apresentados os resultados referentes à previsão do envelhecimento das pastas com a utilização da metodologia da abordagem do tempo diferido. Ao comparar os valores previstos com os experimentais, percebe-se que a abordagem prevê adequadamente a fluência para outras idades. Nas misturas que possuem nano partículas de sílica, há uma pequena divergência entre os valores medidos e os previstos. Neste caso as nano partículas podem estar contribuindo para aumentar a taxa de envelhecimento, neste caso, a abordagem é incapaz de detectá-la.

Figura 4.29 – Previsão do envelhecimento com abordagem tempo diferido das pastas; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1



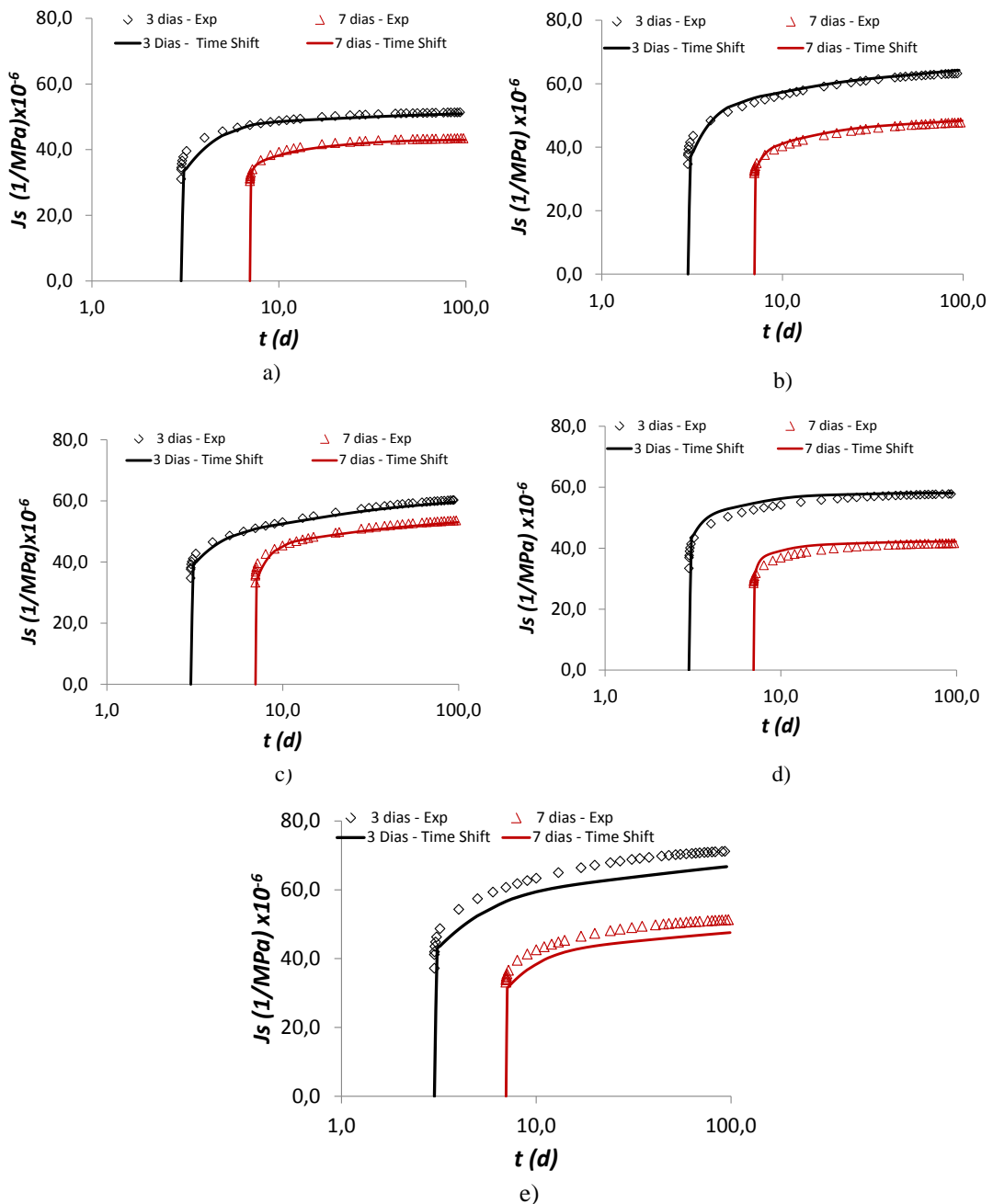
Para os concretos, as curvas de fluência de 3 dias foram utilizadas para realizar a superposição em outras idades, neste caso 7 dias, representados pela Figura 4.30. Nas misturas analisadas, verifica-se que houve alinhamento razoável entre as idades. Isto demonstra que essa metodologia é satisfatória para determinar o envelhecimento nos tipos de materiais cimentícios desta pesquisa.

Figura 4.30 – Superposição de curvas do tempo diferido em concretos; a) REF030C; b) REF035C; c) SAP030C; d) NS1C; e e) SAP030NS1C



As previsões do envelhecimento pela abordagem do tempo diferido estão presentes na Figura 4.31. Assim como nas pastas, os valores calculados foram parecidos com os dados medidos em laboratório. Entretanto, nota-se uma ligeira discordância para a mistura SAP030NS1, nesta situação a nano sílica pode ter contribuído para a aceleração do envelhecimento.

Figura 4.31 – Previsão do envelhecimento com abordagem tempo diferido dos concretos; a) REF030C; b) REF035C; c) SAP030C; d) NS1; e e) SAP030NS1C



Grasley e Lange (2007) propôs que a previsão do envelhecimento pode ser contabilizada pela teoria da solidificação e da abordagem do tempo diferido de acordo com a equação (3.31). Segundo o autor, o tempo diferido consegue prever as propriedades viscoelásticas dos géis de C-S-H, efeito que a solidificação é incapaz presumir.

Como mostra a Figura 4.32, observa-se que a previsão do envelhecimento das pastas com esta proposta apresenta resultados parecidos com os experimentais. Efeitos adversos que não foram incluídos pela solidificação das pastas REF030 e SAP030NS1 puderam ser estimados por esta proposta.

Figura 4.32 –Resultados experimentais da teoria da solidificação e do tempo diferido em pastas; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1

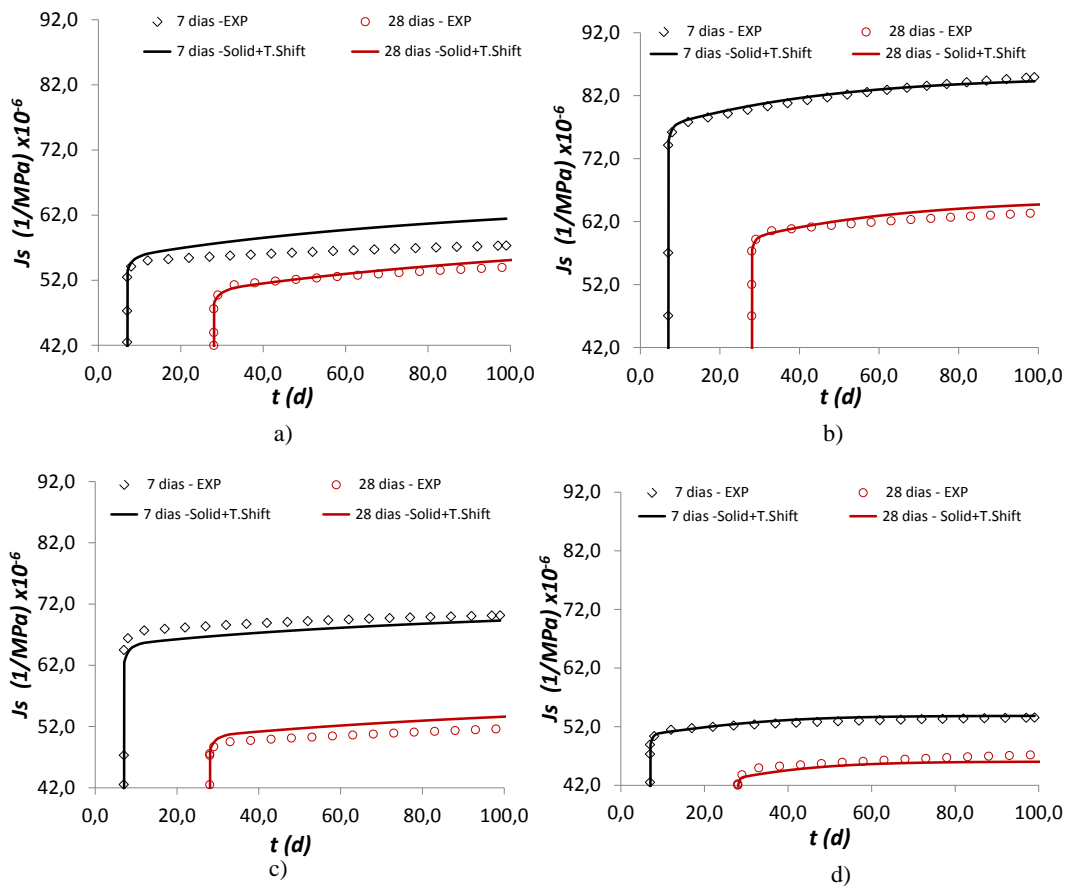
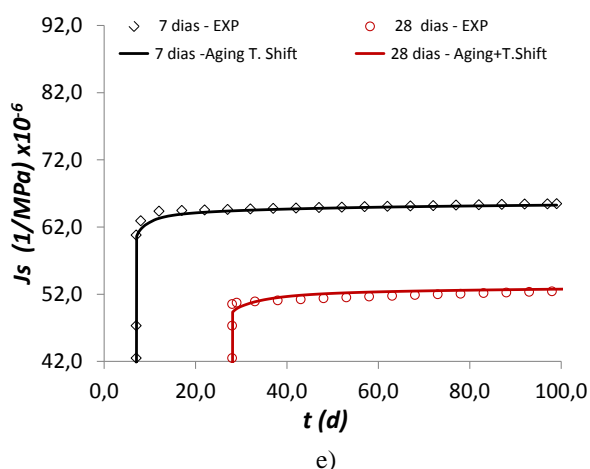


Figura 4.32–Resultados experimentais da teoria da solidificação e do tempo diferido em pastas; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e e) SAP030NS1



A proposta de Grasley e Lange (2007) também causou uma melhoria nos resultados dos concretos quando comparado com valores medidos em laboratório, como pode ser vistos na Figura 4.33. Este comportamento pode estar associado a outros fenômenos, além da hidratação que a proposta é capaz de captar.

Figura 4.33 – Resultados experimentais com a teoria da solidificação e do tempo diferido em concreto; a) REF030C; b)REF035C; c) SAP030C; d) NS1; e e) SAP030NS1C

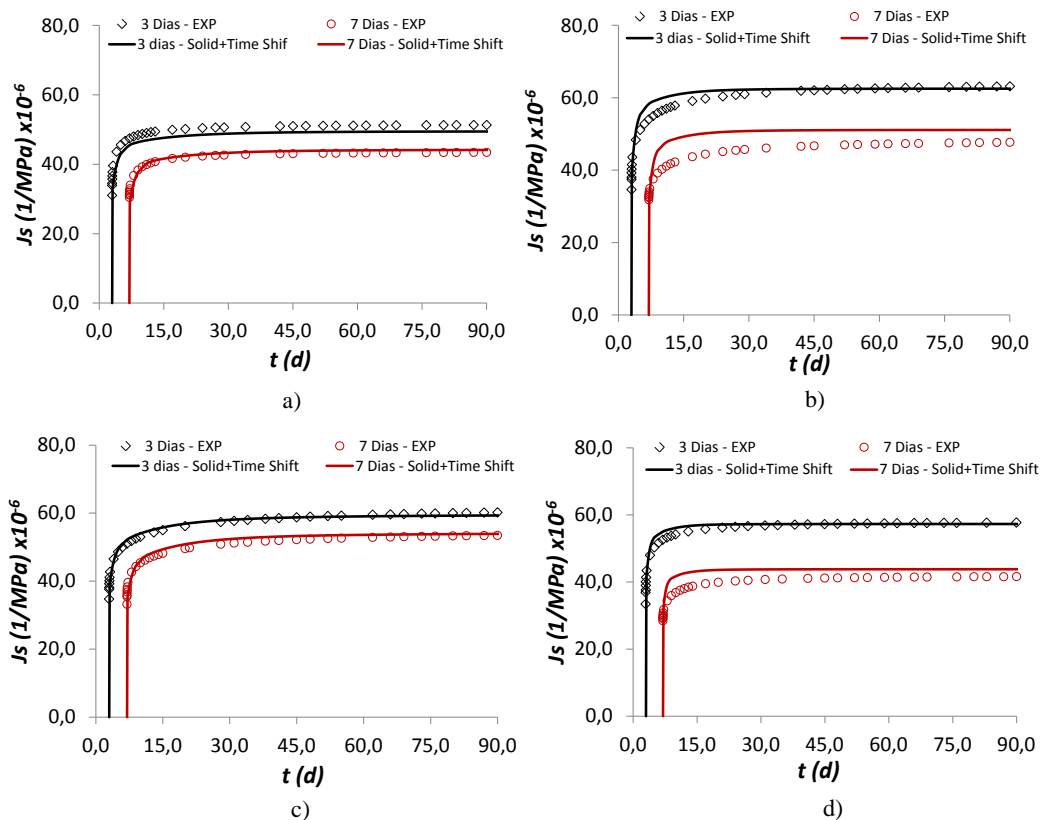
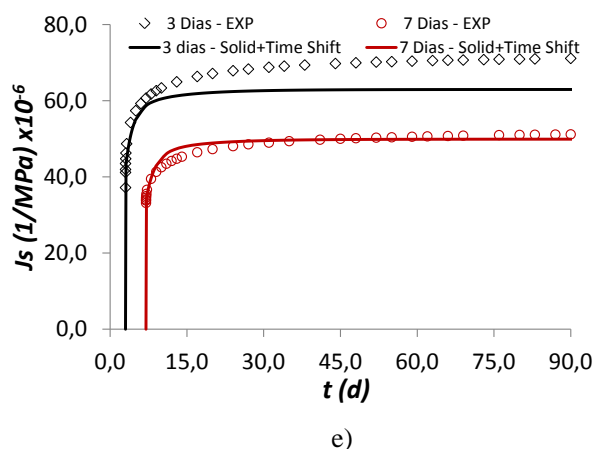


Figura 4.33 – Resultados experimentais com a teoria da solidificação e do tempo diferido em concreto; a) REF030C; b) REF035C; c) SAP030C; d) NS1; e e) SAP030NS1C



4.3 Retração por Secagem (ϵ_s)

A retração por secagem foi calculada a partir dos resultados do ensaio de retração deduzindo os valores da parcela da retração autógena. Neste caso, a retração autógena foi determinada no mesmo aparato sem a utilização da caixa de PVC para os mesmos tempos de medições. Os corpos de prova foram isolados com fitas adesivas plásticas para evitar a retração por secagem. O ensaio transcorreu em sala com ambiente controlado, mantendo-se a umidade em $55\% \pm 5\%$ e a temperatura em $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Ao observar os resultados da retração dada na Figura 4.34, percebe-se que as curvas tendem a valores constantes a partir do segundo dia, após o início do ensaio. As retrações das misturas nas idades ensaiadas variaram entre 1500×10^{-6} a 2900×10^{-6} , sendo que aos 28 dias o maior valor observado não ultrapassou 2500×10^{-6} de retração.

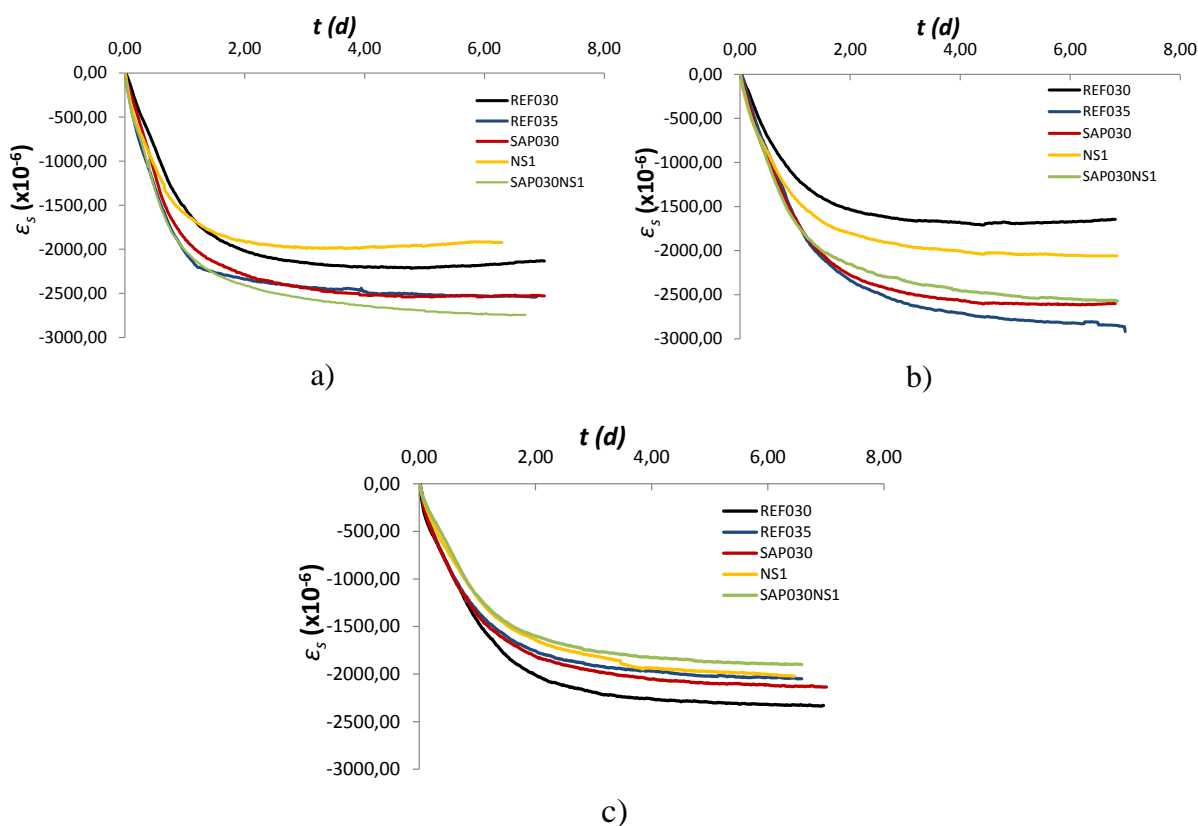
A mistura REF030 na idade de 28 dias apresentou uma discrepância em relação às demais pastas, como mostra a Figura 4.34c. Em função deste resultado, o ensaio foi repetido, porém obteve-se a mesma resposta. Esse comportamento pode estar associado com a diminuição brusca do diâmetro dos capilares que acarreta incremento da pressão capilar e da retração.

Nota-se uma menor retração da mistura NS1, isso demonstra que o efeito físico causado pela nano sílica deixa a estrutura mais compacta com o refinamento da rede porosa. Entretanto, a nano sílica contribuiu para diminuir a retração causada pelo SAP somente aos 28 dias na

mistura terciária. Em outras idades, prevaleceram os efeitos causados pelo SAP, conforme pode ser observado na Figura 4.34.

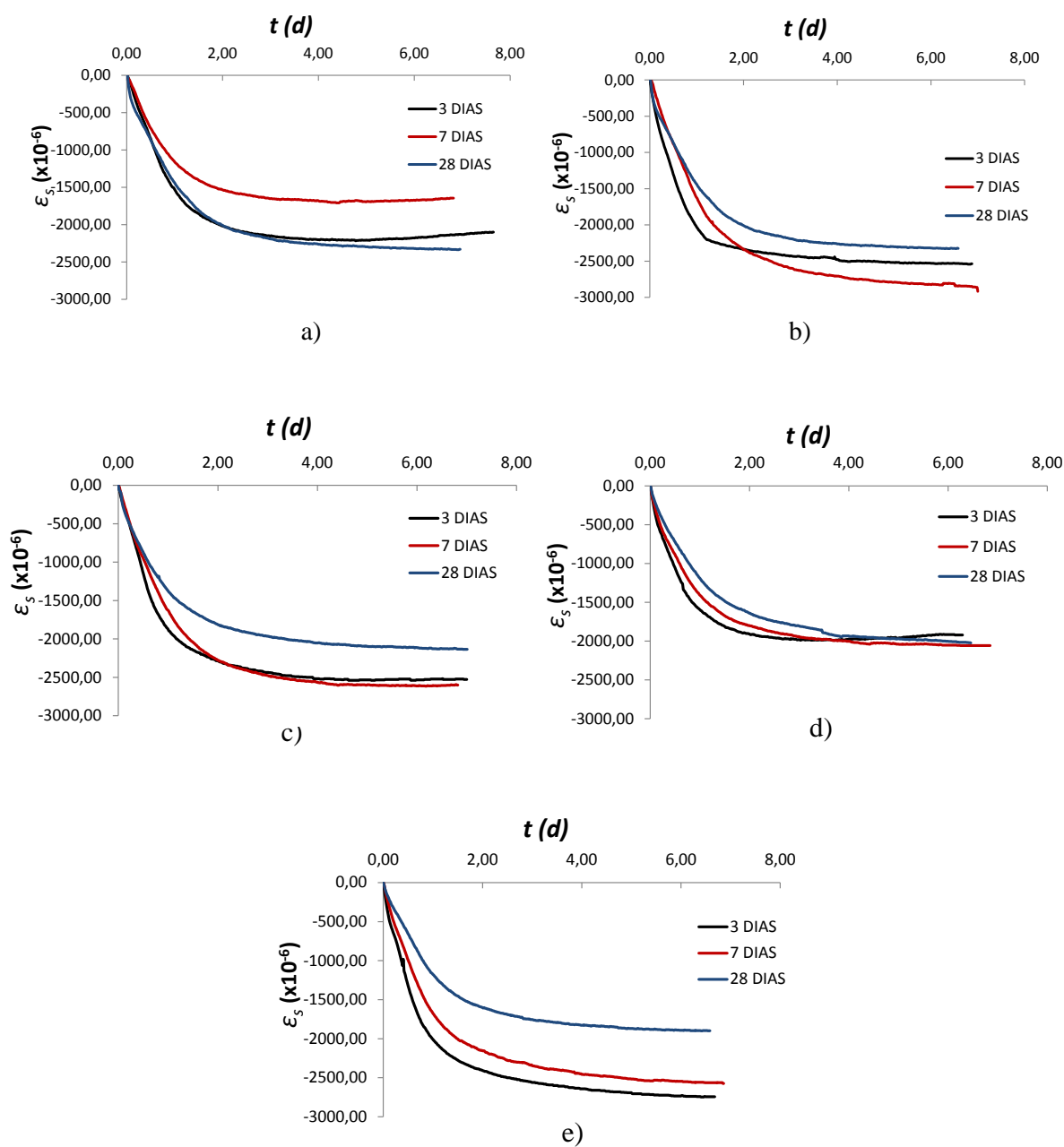
As retrações por secagem das misturas REF035, SAP030 e SAP030NS1 são próximas, isto denota que esse tipo de deformação pode estar correlacionado com a relação a/c. No caso destas pastas, a a/c são equivalentes, induzindo que as misturas com SAP se assemelham com REF035.

Figura 4.34 - Retração por secagem das misturas a) aos 3 dias; b) aos 7 dias; e c) aos 28 dias



Ao analisar as curvas de retração de cada mistura, percebe-se pouca diferença das deformações aos 3 e 7 dias. Entretanto, à medida que a hidratação avança, diminui a rede capilar e a diferença em relação às primeiras idades passa a ser perceptível, conforme demonstrado na Figura 4.35.

Figura 4.35 – Retração por secagem para as idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias: a) mistura REF030; b) mistura REF035; c) mistura SAP030; d) mistura NS1; e) mistura SAP030NS1



4.4 Análise Numérica Poroviscoelástica para Previsão da Retração Autógena

Nesta fase três modelos de previsão da retração autógena foram avaliados conforme descritos na seção 3.9. Para esta etapa foram utilizadas duas misturas de referências REF030 e REF035 e a mistura SAP030, tanto para pastas como para os concretos. A previsão da retração só foi

possível a partir de 1 dia, uma vez que o ensaio para aquisição dos parâmetros viscoelásticos só puderam ser realizados após 24h da moldagem, período em que os corpos de prova já adquiriram resistência suficiente para realização do ensaio.

Os parâmetros g_i e f_i das curvas de saturação e pressão interna utilizados na modelagem da retração autógena das pastas estão presentes na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Valores de g_i e f_i , das funções de saturação e pressão capilar, respectivamente

Parâmetros	Pastas		
	REF030	REF035	SAP030
g_1	33,56	26,20	26,20
g_2	0,18	0,02	0,02
g_3	33,69	26,61	26,61
g_4	0,20	0,24	0,24
f_1	78,14	97,92	97,92
f_2	23,23	33,64	33,64
f_3	79,14	102,60	102,60
f_4	28,83	13,73	13,73

A Figura 4.36 apresenta os resultados da comparação entre os valores experimentais e as previsões da poroelasticidade e da poroviscoelasticidade das pastas. Observa-se que o modelo poroviscoelástico com abordagem do tempo diferido é quem representa melhor os valores experimentais para a REF035. Já o poroelástico apresentou os piores resultados.

Figura 4.36 – Comparação da retração autógena experimental em pastas com modelos de previsão; a) REF030; b) REF035; e c) SAP030

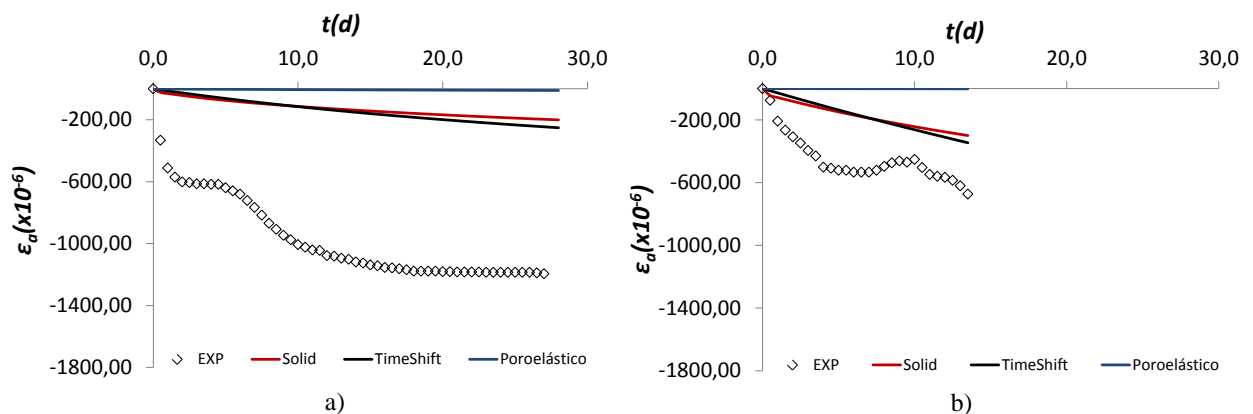
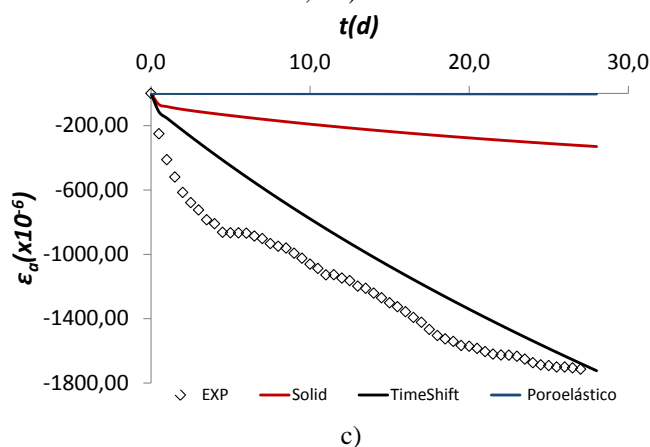


Figura 4.36– Comparação da retração autógena experimental em pastas com modelos de previsão; a) REF030; b) REF035; e c) SAP030



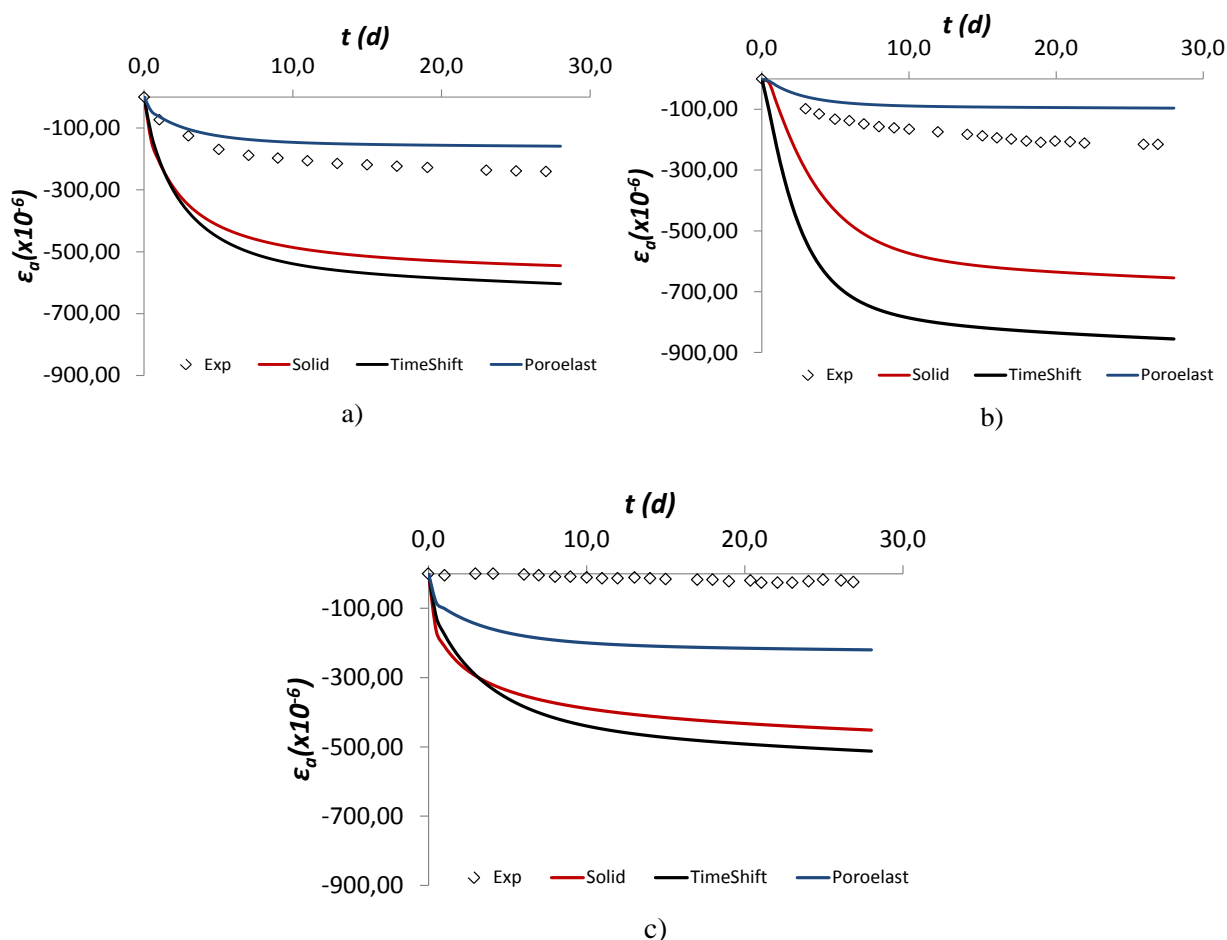
Os parâmetros das curvas de saturação g_i e da curva de pressão interna f_i dos concretos encontram-se na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Valores de g_i e f_i , das funções de saturação e pressão capilar, respectivamente

Parâmetros	Concretos		
	REF030	REF035	SAP030
g_1	44,79	125,50	93,34
g_2	0,06	0,08	0,07
g_3	3,18	2,83	4,06
g_4	0,23	0,21	0,16
f_1	110,90	100,00	100,00
f_2	9,11	5,43	6,41
f_3	3,69	2,96	4,30
f_4	17,05	13,95	11,63

Ao observar a Figura 4.37, a proposta de modelagem para os concretos que melhor aproxima os resultados previstos dos experimentais diferentemente das pastas é o poroviscoelástico. Talvez o esqueleto sólido formado pelos agregados, que possuem comportamento elástico, podem ter influência significativa nos resultados.

Figura 4.37 – Comparação da retração autógena experimental em concretos com modelos de previsão; a) REF030; b) REF035; e c) SAP030



Ao analisar os dados desta seção, percebe-se que nenhuma relação foi capaz de descrever a previsão da retração autógena de maneira satisfatória. Essa discrepância entre os resultados pode estar associada a diversos fatores, um deles, é a dificuldade na determinação da RH interna. No entanto, o desenvolvimento de sensores mais precisos (particularmente a alta RH) provavelmente melhorará a capacidade de prever a resposta da pasta de cimento às tensões internas.

Grasley e Lange (2007) também observaram que a incorporação das propriedades constitutivas viscoelásticas em pastas melhoram a previsão da retração autógena, em comparação com as propriedades estritamente elásticas. Portanto, a porção elástica instantânea apenas representa cerca de 25-45% da retração autógena medida.

Nas pastas, a teoria de solidificação não foi tão precisa quanto à abordagem de mudança de tempo, mas ainda assim mostrou melhoria substancial versus a previsão elástica instantânea, pois a poroelasticidade não leva em conta o efeito de envelhecimento presente nas propriedades viscoelásticas da pasta de cimento na fase de ensaio.

4.5 Análise Numérica Poroviscoelástica para Previsão da Retração por Secagem

Para uma visão mais ampla dos fenômenos que envolvem a retração, as previsões foram feitas assumindo algumas variações na equação (3.38) para que sejam consideradas as seguintes hipóteses:

- Relação poroelástica;
- Poroviscoelástica com a teoria da solidificação;
- Poroviscoelástica com a abordagem do tempo diferido;
- Poroviscoelástica com a abordagem do tempo diferido e da teoria da solidificação.

Todas as quatro previsões foram feitas usando a equação (3.38) dividido por 3 para a obtenção da retração axial. A relação poroelástica foi determinada ao deixar $\tau_i \rightarrow \infty$ tal que o segundo termo na equação (3.31) tendesse a zero. A previsão poroviscoelástica com a teoria da solidificação foi obtida ajustando-se o valor de $\mu = 0$ na equação (3.27). A previsão poroviscoelástica para o tempo diferido foi obtida definindo $\nu(t) = 1$ na equação (3.31). Ao considerar o tempo diferido e a teoria da solidificação na equação (3.31), faz-se $\nu(t) \neq 1$ e na equação (3.27) $\mu \neq 0$.

Como descrito na seção 3.8.5, o coeficiente de Poisson para as pastas utilizadas nesta análise foi considerado como instantâneo elástico com valores em função da relação a/c com base no trabalho de Neville (1971).

As comparações entre as previsões da retração por secagem e valores experimentais encontram-se presentes na Figura 4.38, Figura 4.39 e Figura 4.40, considerando os efeitos poroelástico, poroviscoelástico com a teoria da solidificação e pelo tempo diferido. Nos casos analisados, as previsões foram realizadas para um período de tempo de 7 dias, que corresponde ao mesmo tempo de duração do ensaio de retração em laboratório. Nos resultados das previsões ao aproximar 2 dias, percebe-se que as curvas tendem a se tornarem

constantes, este fato também pode ser observado nos resultados dos ensaios encontrados na seção 4.3.

Figura 4.38 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 3 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

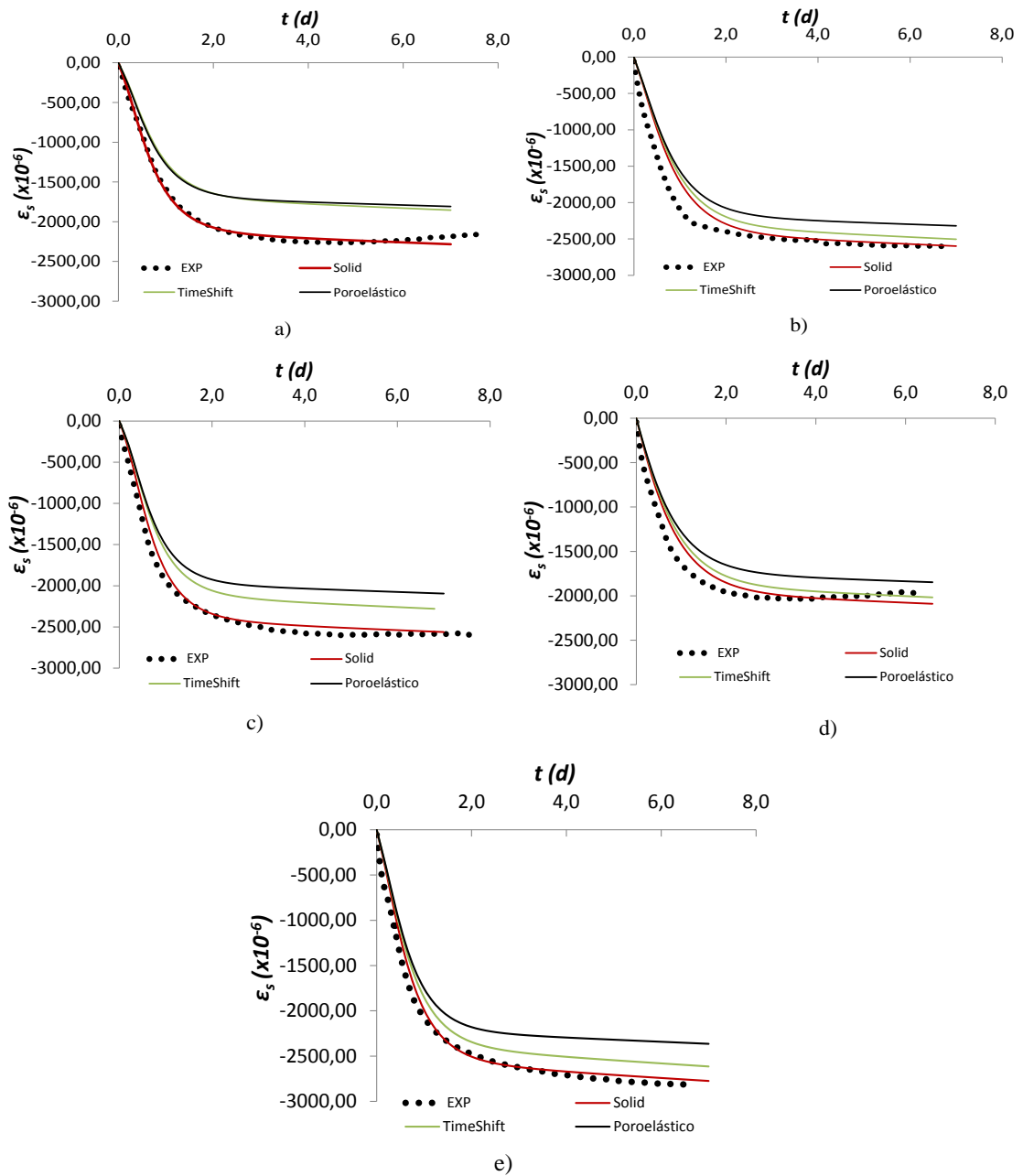


Figura 4.39 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 7 dias; a) REF030; b)REF035; c) SAP030; d) NS1; e)SAP030NS1

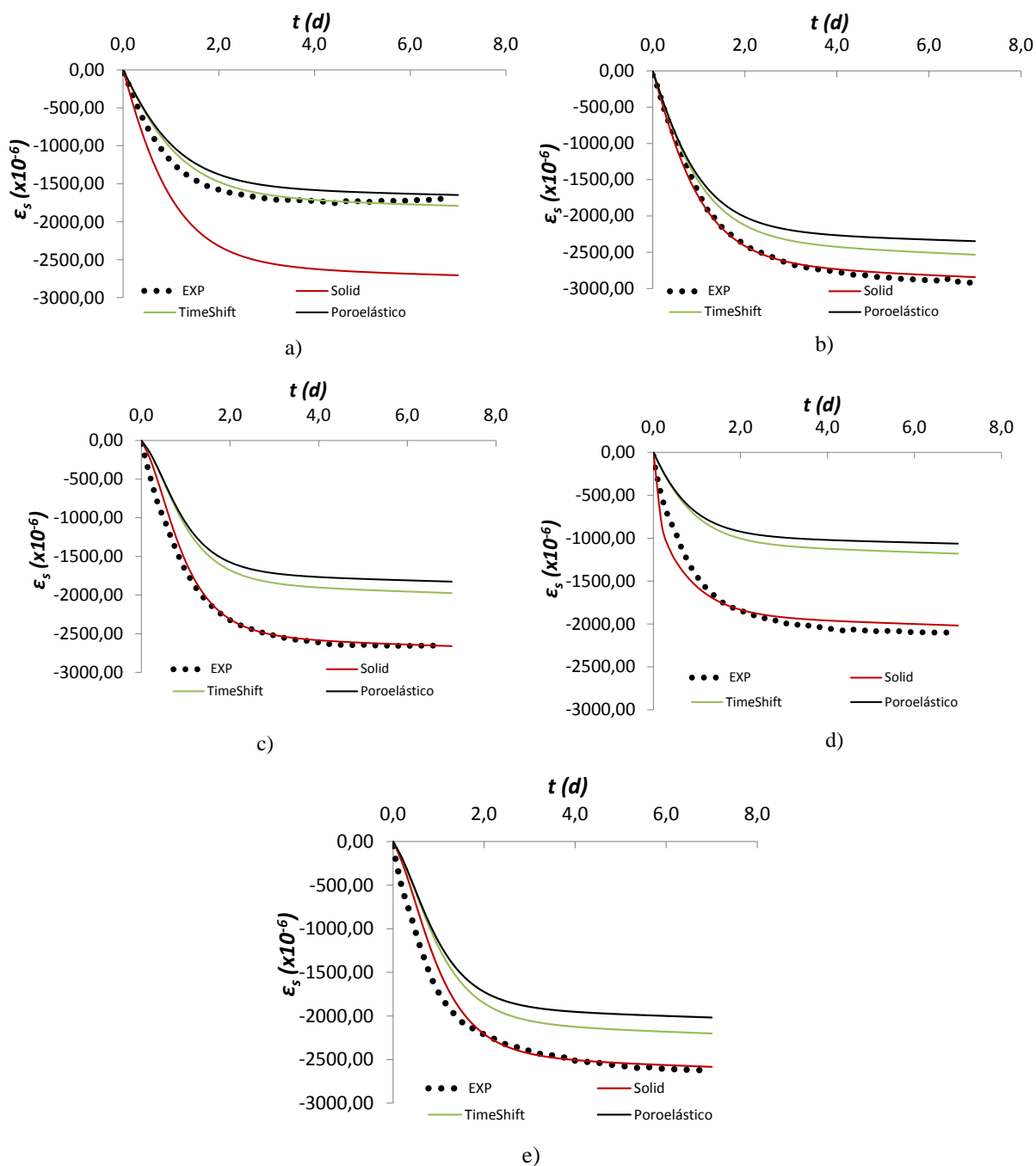
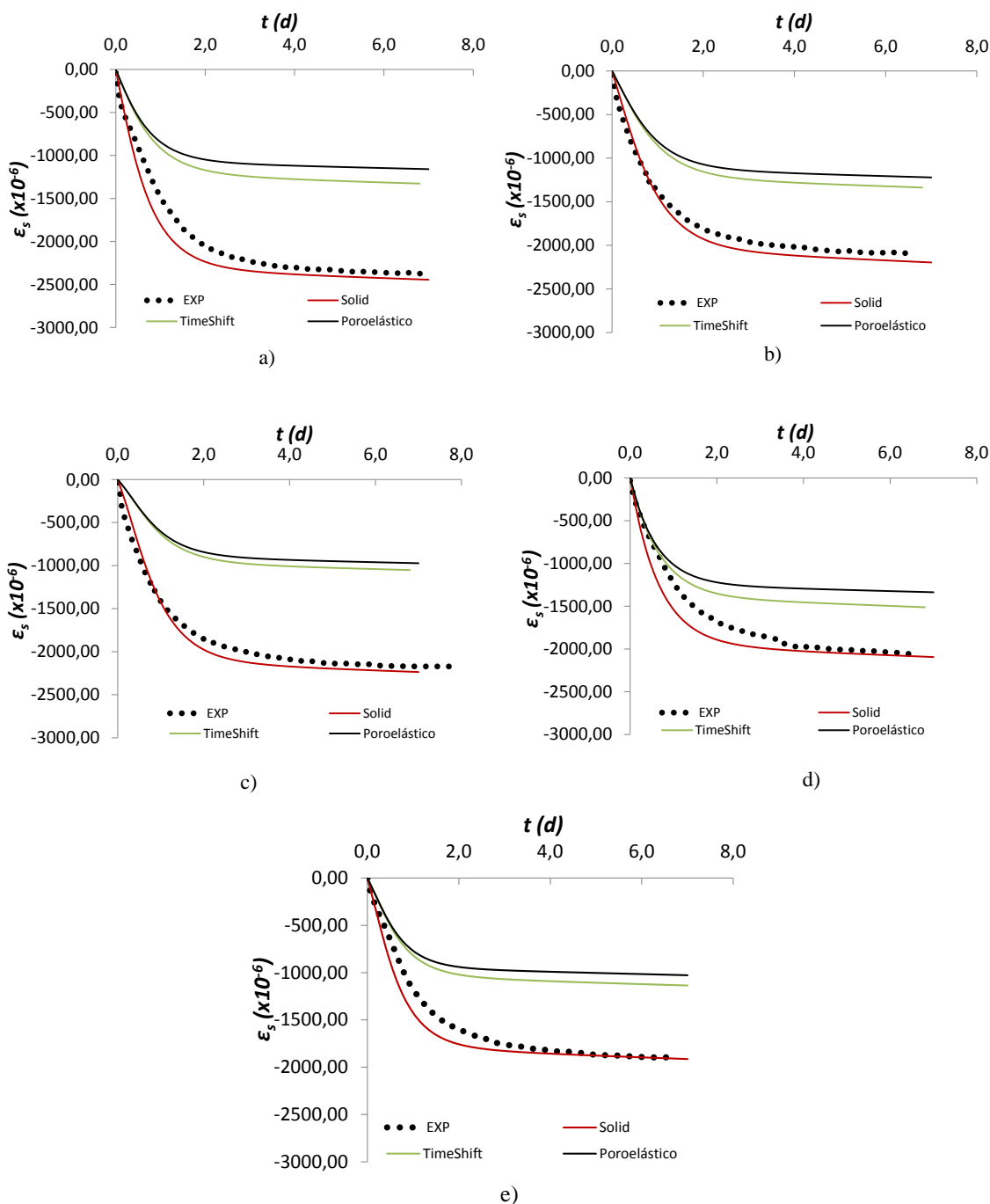


Figura 4.40 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e)SAP030NS1



Os valores previstos para a secagem das pastas com a utilização da equação poroviscoelástica, considerando o envelhecimento pela proposta de Grasley e Lage 2007, estão presentes na Figura 4.42, Figura 4.43 e Figura 4.44. Quando compara as medições com resultados da equação, percebe-se similaridade entre eles, demonstrando que a análise é válida para a

maioria das misturas avaliadas. Entretanto, houve uma discrepância para REF030 na idade de 7 dias, este fato pode ter relação com falhas nas medições de laboratório.

Figura 4.41 –Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 3 dias pela proposta de Grasley e Lage (2007); a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e e)SAP030NS1

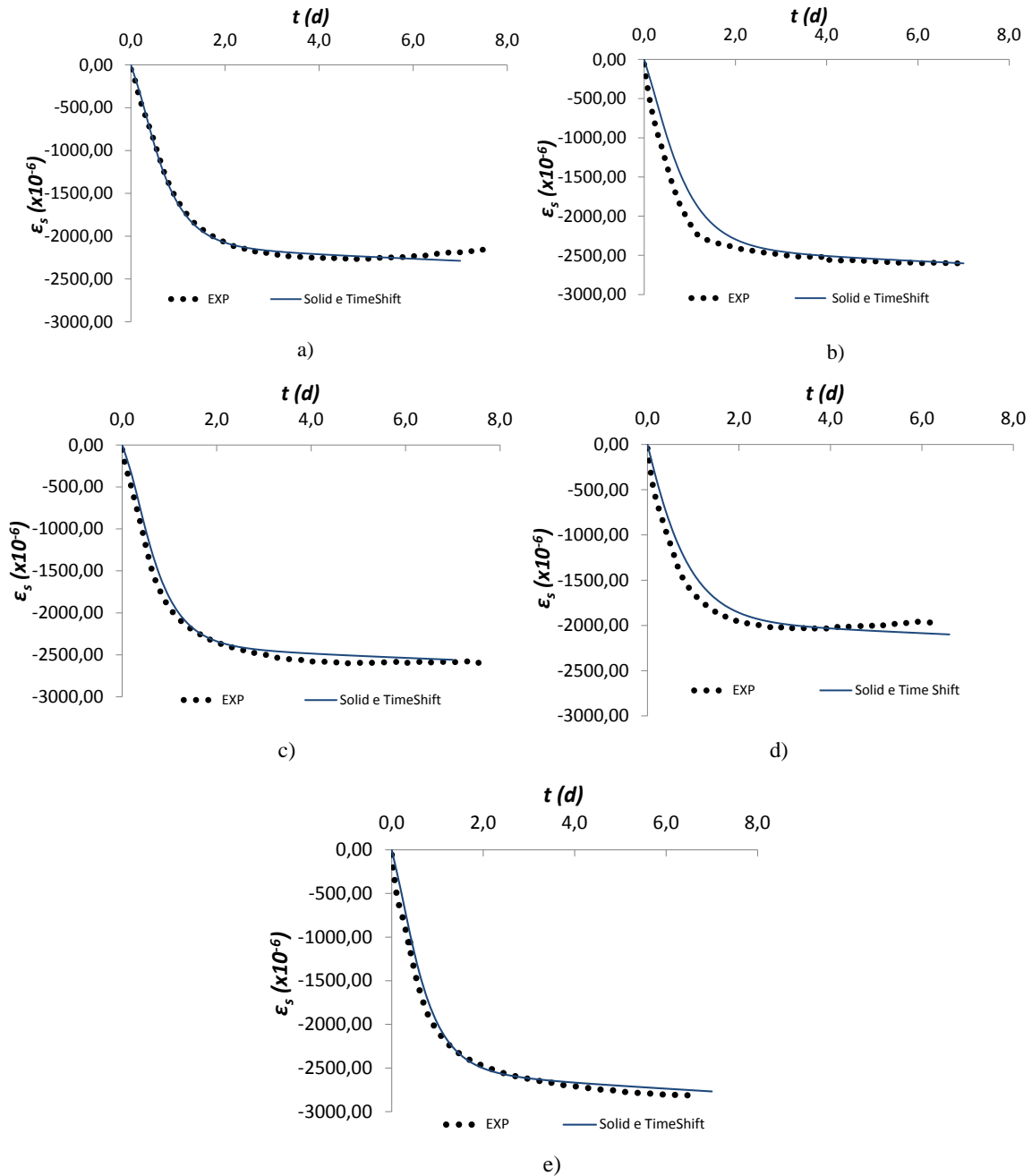


Figura 4.42 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 7 dias pela proposta de Grasley e Lage (2007); a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

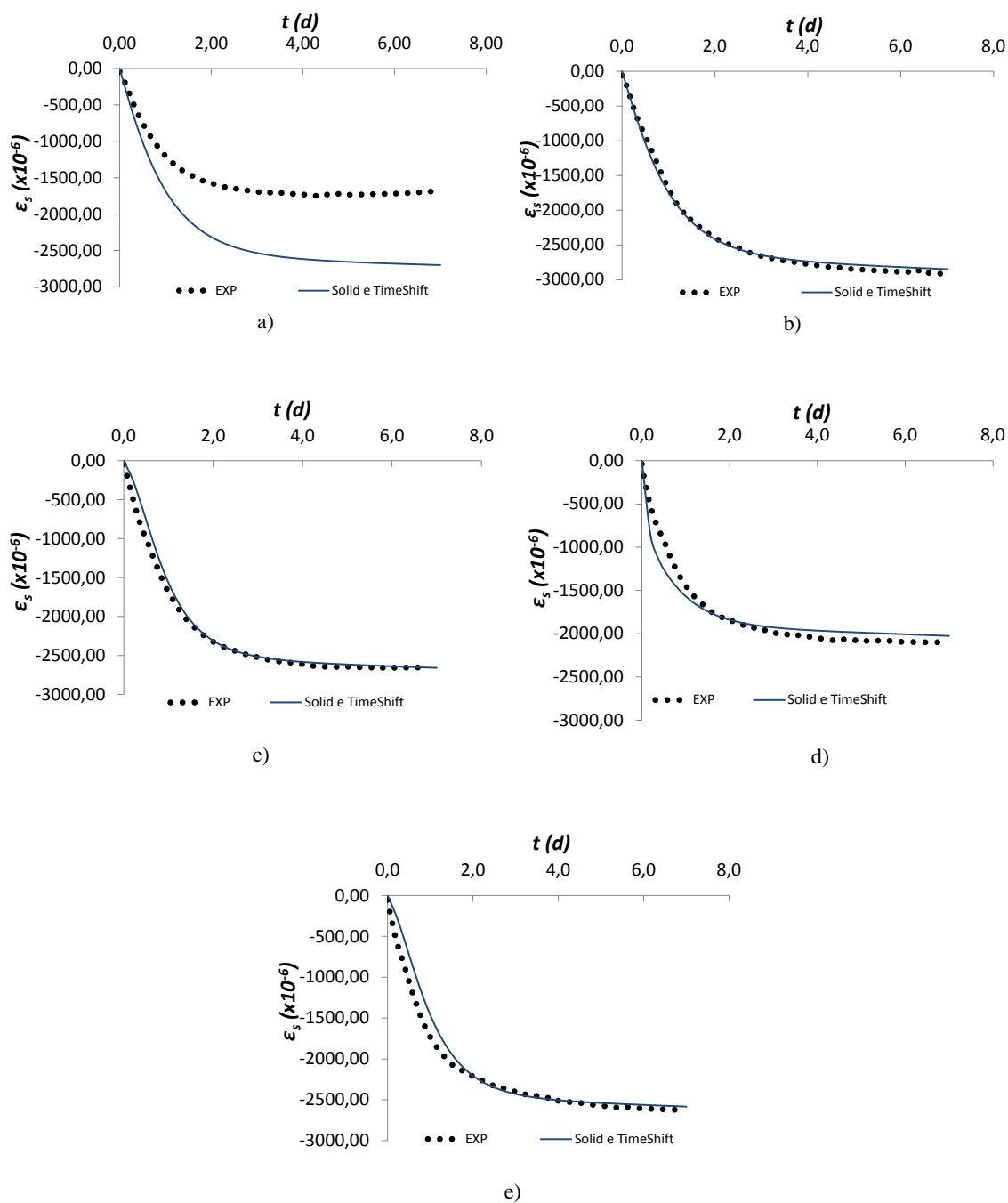
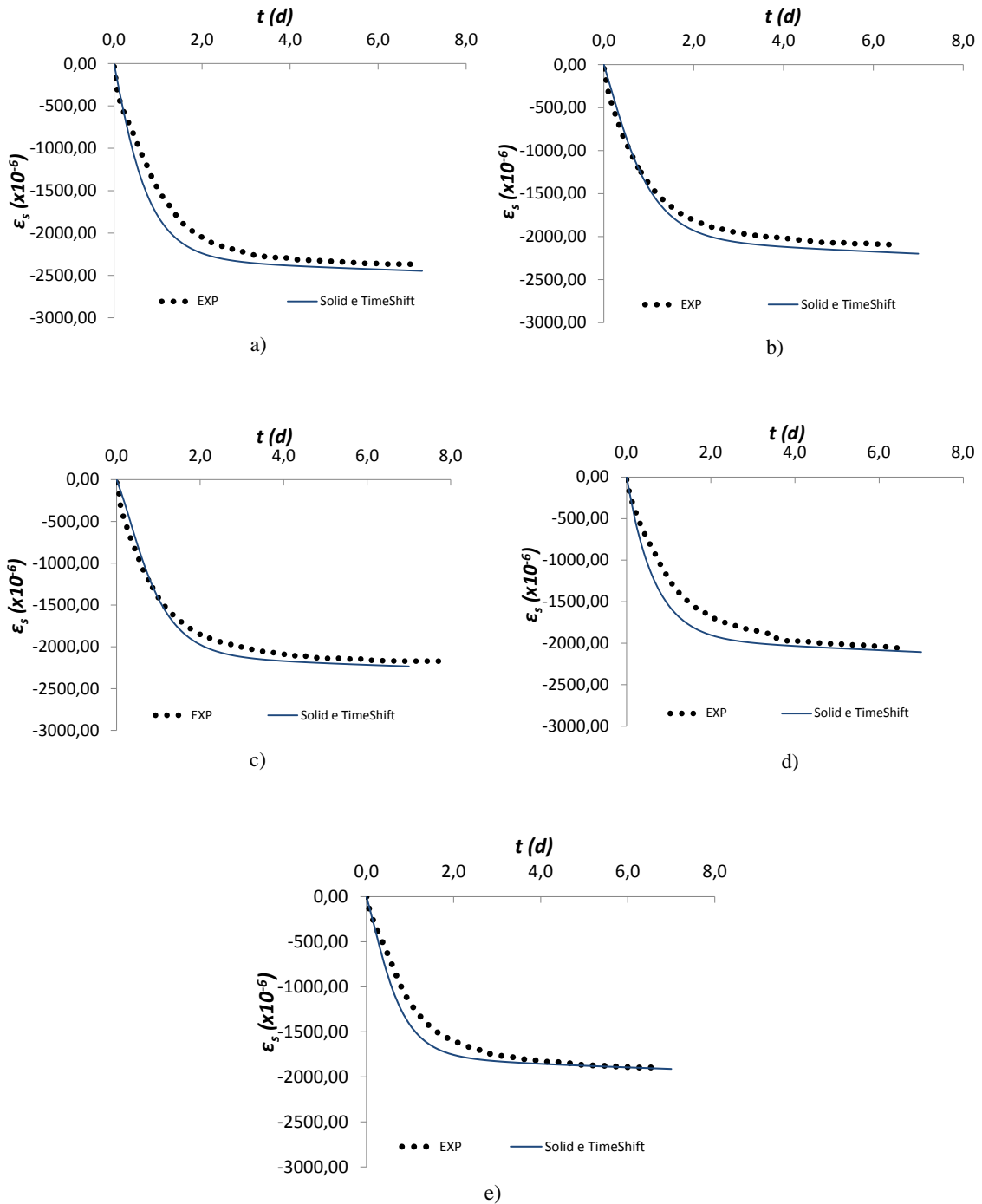


Figura 4.43 – Resultados previstos e experimentais da retração por secagem em pastas aos 28 dias pela proposta de Grasley e Lage (2007); a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1



Na maioria dos casos as respostas poroelásticas são discrepantes dos resultados experimentais, isso leva admitir que na secagem estes materiais possuam comportamento eminentemente viscoelásticos. Entretanto, à medida que a hidratação avança, os efeitos

viscoelásticos são incrementados. Para idade de 3 dias, as medições variaram entre 7-20%, para 7 dias entre 17-31% e aos 28 dias entre 35-53%.

Para a idade de 3 dias, a abordagem do tempo diferido sozinha consegue prever razoavelmente aos dados experimentais das misturas REF035, NS1 e SAP030NS1 a diferença máxima de 5% como mostra a Figura 4.38. Para as demais misturas e em outras idades, essa abordagem não foi suficiente para explicar o envelhecimento adicional, além do produzido pelos efeitos da solidificação.

Os efeitos da abordagem do tempo diferido produzem resultados próximo aos experimentais apenas para a idade de 3 dias com variação entre 1-18%, à medida que o material se solidifica, a diferença aumenta. Em 7 dias a variação chega à 8-41% e aos 28 dias fica entre 27 e 53%.

A modelagem que leva em consideração a teoria da solidificação produziu os melhores resultados de previsão para retração. Entretanto, para a misturas NS1 aos 3 dias e REF030 aos 7 dias, os resultados foram ligeiramente discrepantes, neste caso a abordagem do tempo diferido sozinha produziram os melhores resultados como apresentados na Figura 4.39a. Este comportamento pode estar associado à maior RH interna (Figura 4.4) das misturas, que podem originar outros efeitos além da hidratação.

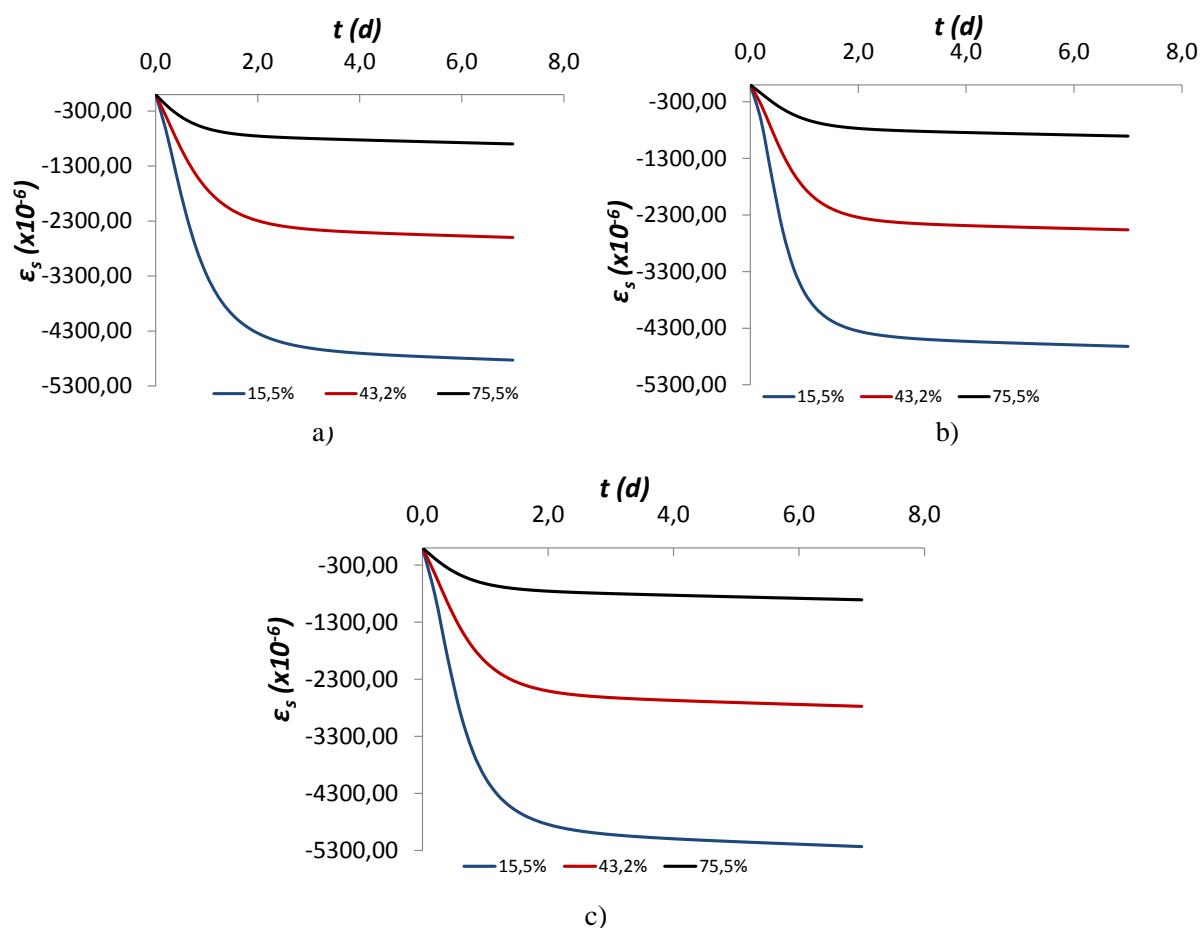
Os efeitos na previsão causados pelo acréscimo da abordagem do tempo diferido não foram capazes de alterar os resultados da solidificação, conforme mostrado nos gráficos da Figura 4.38, Figura 4.39 e Figura 4.40. Nestes casos a solidificação foi suficiente para prever de maneira adequada a retração por secagem da maioria das pastas.

Acredita-se que o tipo de ensaio utilizado para determinação da fluência das pastas pode ter sido decisivo para obtenção de resultados de previsões parecidos com os de laboratório. O curto período de ensaio não foi suficiente para que o equipamento detectasse qualquer outra modificação na microestrutura da amostra em razão do processo de hidratação.

Além do valor de retração por secagem analisado com a umidade relativa ambiente de 43,2%, expandiu-se essa avaliação para valores de umidade relativa ambiente de 15,5%, 43,2% e 75,0%, utilizando-se as pastas REF035, SAP030 e SAP030NS1 nas idades de 3 dias e 28 dias. As retrações foram obtidas com a equação (3.38), considerando a teoria da solidificação.

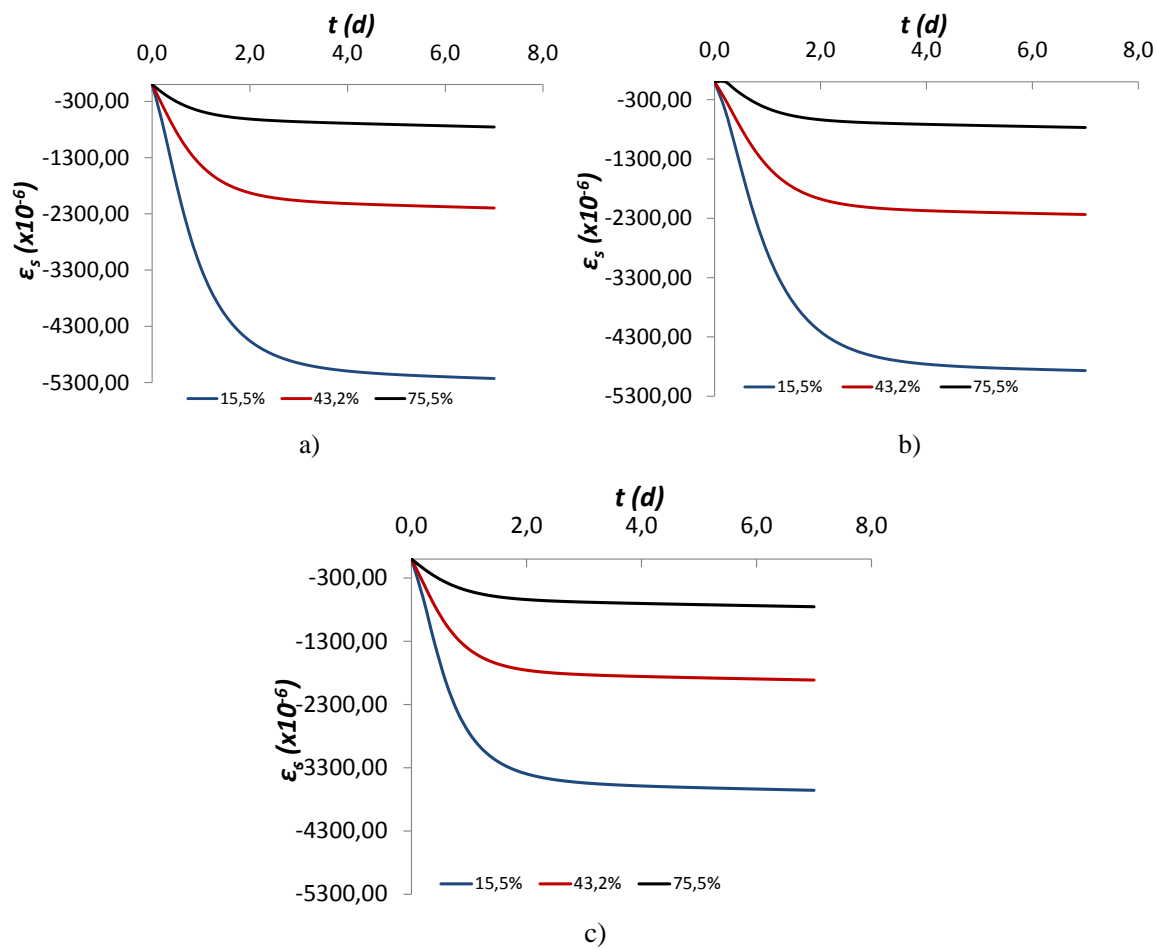
A Figura 4.45 mostra a retração das pastas para cada valor RH. Após fixar a umidade de 75,5% como sendo a referência, nota-se aumento considerável da retração para as outras RH ambiente. Esse alcance chega à 312,6% em relação à RH de 43,2% e de 607,0% se comparado à RH de 15,5% para a pasta SAP030NS1 aos 3 dias.

Figura 4.44 –Previsão da retração por secagem em pastas aos 3 dias; a)REF035; b) SAP030; e c)SAP030NS1



A diferença de retração em relação à RH de referência (75,5%) aos 28 dias foram maiores nas pastas avaliadas, como mostra a Figura 4.46. A maior diferença de retração encontrada nesta idade foi da pasta REF035, 301,3% para 43,2% de RH e 708,1% para 15,5% de RH. Essa observação pode estar associada ao grau de hidratação dos materiais, quando a hidratação progride em RH ambiente menores, a secagem tende a ser incrementada.

Figura 4.45 –Previsão da retração por secagem em pastas aos 28 dias; a)REF035; b) SAP030; e c)SAP030NS1



5 CONCLUSÕES

O uso do SAP e nano sílica em materiais cimentícios já é realidade no meio técnico. Portanto compreender como esses materiais alteram a viscoelasticidade e a retração da matriz é importante. Abaixo encontram-se as principais conclusões tiradas desta pesquisa.

As nano partículas de sílica provocaram as menores deformações em função da retração por secagem e fluência. Isso se deve a maior densificação da fase da pasta devido ao efeito físico causado pelo refinamento e também pela maior rigidez motivada pela maior quantidade de produtos de hidratação formados pelas reações pozolânicas.

Nas misturas com SAP, observou-se uma maior fluência nas idades de 3 e 7 dias, entretanto aos 28 dias os resultados foram similares aos da referência REF030. Existem evidências de que esse fenômeno pode ter relação com a formação de produtos de hidratação dentro dos poros originados pela dessorção do SAP. Não se notaram incrementos significativos nos valores da retração por secagem nestas misturas, os valores foram similares aos da REF035, isso pode prever que os poros gerados pelo SAP não contribuem para aumento da retração.

Percebeu-se pouca influência da nano sílica na retração por secagem na mistura terciária com SAP e NS aos 3 e 7 dias. Entretanto, aos 28 dias as nano partículas de sílica diminuíram a retração por secagem. O efeito provocado pela NS fez a fluência reduzir, este fenômeno pode ter ligação com a elevação da rigidez do material, provocado pela formação de produtos de hidratação pelas reações pozolânicas.

Pelas isotermas de dessorção, a pasta NS1 aparece com a maior saturação nas idades avaliadas. O refinamento de poros causado por essas partículas pode ter contribuído para uma maior retenção de água no interior das amostras. Entretanto, misturas com polímero (SAP030 e SAP030NS1) apresentam o menor nível de saturação, possivelmente a porosidade total destas pastas esteja contribuindo para saída de água, corroborando com os resultados da perda de massa destas mesmas misturas.

Há evidências que o coeficiente de difusão das misturas de pastas e concretos diminuem à medida que a hidratação avança, com tendências de se igualarem à medida que o tempo de secagem cresce. Este fenômeno pode estar relacionado com a proximidade nos valores da

porosidade das misturas, entre 0,23 a 0,30 e também com valores de relações a/c muito próximos.

Os menores coeficientes de difusão encontrados nos concretos e pastas foram das misturas contendo nano partículas de sílica (NS1). Este comportamento também pode ter relação com a densificação da matriz cimentícia causada pelas partículas. Verifica-se que existe uma tendência de proporcionalidade linear entre os coeficientes de difusão de pastas e concretos para os períodos de secagem avaliados.

A RH interna foi avaliada pelo perfil de umidade (profundidade de secagem), observou-se tanto nas pastas quanto nos concretos que os menores perfis encontrados foram das misturas contendo somente NS. Entretanto, os maiores valores encontrados foram de misturas com SAP que atingem toda espessura da amostra. Este comportamento também pode estar relacionado com a porosidade causada pela nano sílica e pelo SAP

Após análise ficou evidente que a relação a/c desempenha papel importante nas concentrações de íons. As menores concentrações observadas foram das pastas REF035 e misturas com SAP030 que têm os maiores valores de a/c. Percebe-se que as concentrações de íons só são significativas para umidade interna acima de aproximadamente 82%.

Os parâmetros viscoelásticos para abordagem do tempo diferido demonstram que as maiores taxas de envelhecimento são das misturas que contêm nano sílica, este fenômeno pode estar associado com o efeito pozolânico causado por essas partículas. Os dados das predições do envelhecimento pela teoria da solidificação e pelo tempo diferido mostraram-se parecidos com as medições realizadas em laboratório.

Nas pastas REF030 e SAP030NS1 houve uma pequena discrepância entre os valores medidos com os de laboratório ao utilizar a teoria da solidificação, pode existir outros fatores adicionais significativos além da solidificação que influenciaram no comportamento das pastas. Entretanto, ao utilizar a proposta de Grasley e Lange (2007), os resultados ficaram próximos aos experimentais. Observa-se que os efeitos adversos que não puderam ser incluídos pela solidificação foram estimados razoavelmente pela proposta.

Para previsão da retração autógena das três equações avaliadas, observou-se que o modelo poroviscoelástico com abordagem do tempo diferido foi a que melhor representou os resultados da pasta REF035, já a equação poroelástica apresentou resultados discrepantes. Já para os concretos os valores desta equação se aproximam dos resultados experimentais. Possivelmente em razão de alguma falha na aquisição de dados de entrada adquiridos em laboratório, ocorreu essa discrepância entre os resultados. Em função da baixa resistência dos corpos de prova nas primeiras horas, os dados viscoelásticos só puderam ser adquiridos 1 dia após a moldagem dos corpos de prova, isso pode ter causado divergência entre valores medidos e previstos, já que a maior parte da retração autógena ocorre nas primeiras horas.

As equações poroviscoelásticas com a teoria da solidificação e a poroviscoelástica com a teoria da solidificação e tempo diferido apresentaram resultados de retração por secagem similares às medições experimentais. Entretanto, os dados das equações poroelásticas são discrepantes, isto leva admitir que na secagem esses materiais possuam comportamento significativamente viscoelásticos.

A abordagem do tempo diferido sozinha só conseguiu prever a retração por secagem das misturas REF035, NS1 e SAP030NS1 aos 3 dias de idade, com diferença máxima observada de 5%. Para as demais misturas e para outras idades, essa abordagem não foi suficiente para explicar o envelhecimento adicional, além do produzido pelos efeitos da solidificação. Para idade de 3 dias, em todas as misturas, a variação entre os dados experimentais e previstos ficaram entre 1 a 18%, à medida que o material se solidifica, a diferença aumenta, em 7 dias a variação chega entre 8 a 41% e aos 28 dias fica entre 27 e 53%.

Também foram avaliadas outras previsões da retração por secagem para outros valores de RH além daquele usado em laboratório ($43,2 \pm 0,4\%$) com a utilização da equação poroviscoelástica e uso da teoria da solidificação. A maior diferença encontrada aos 28 dias foi da pasta REF035, com 301,3% em relação à RH de 43,2% e 708,1% para 15,5% de RH em relação à RH de referência.

Em resumo este trabalho contribuiu para caracterização poroviscoelástica de misturas contendo SAP e NS com ênfase em aspectos relacionados ao transporte de massa. Os dados experimentais de perda de massa e retração foram adquiridos por metodologias próprias. A

viscoelasticidade foi avaliada pela validação de teorias mecânicas de envelhecimento capazes de prever a fluência além das idades ensaiadas. Também foram testadas equações poroviscoelásticas capazes de prever adequadamente a retração por secagem de matrizes cimentícias, contendo polímero superabsorvente e nano partículas de sílica.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

É evidente a necessidade da continuidade de pesquisas sobre a previsão de retrações em matrizes cimentícias contendo polímero e nano partículas de sílica, portanto recomenda-se a realização dos seguintes estudos:

Implementação da metodologia DSR para ensaios de fluência em concretos;

Verificação de outros teores de nano partículas de sílica na previsão do envelhecimento com o uso da abordagem do tempo diferido;

Melhoria nas metodologias existentes para obtenção do histórico de umidade relativa interna com ênfase na previsão da retração autógena;

Implementação de tecnologias capazes de produzirem amostras em concreto com espessuras pequenas, em torno de 2mm, para que os fenômenos de transportes de umidade aconteçam num período menor e os ensaios possam ser realizados de maneira mais rápida;

Aprofundar o conhecimento sobre a microestrutura de materiais cimentícios contendo SAP além das idades iniciais;

Investigar a contribuição do efeito pozolânico da nano sílica e a sua potencialidade com uso conjunto da sílica ativa.

REFERÊNCIAS

- ALEEM, S. A. E.; HEIKAL, M. **Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica**. Construction and Building Materials, v. 59, n. 151–160, p. 9, 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 209.2R-08. **Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete Reported**. 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM 104E. **Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions**. 2012.
- ANDRADE, D. S.; BAUER, E.; PAES, I. N. L. **Isotermas de dessorção de água em argamassas de cimento e cal**. XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2015.
- ANDRADE NETO, W. . **Caracterização de Polímero Superabsorvente para Mitigação de Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência**. 2014. 94 f. Universidade de Brasília. 2014.
- ARAÚJO, A. C. **Fluência no Betão Desde as Primeiras Idades: Um Estudo Experimental**. 2015. 108 f. Universidade do Minho. 2015.
- ASSMANN, A. **Physical Properties of Concrete Modified With Superabsorbent Polymers**. p. 213, 2013.
- ASSMANN, A.; REINHARDT, H. W. **Tensile creep and shrinkage of SAP modified concrete**. Cement and Concrete Research, v. 58, p. 179–185, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6118. **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 238p. 2014.
- _____. **NBR 11768, Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 19p. 2011.
- _____. **NBR 13956, Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: Ensaios químicos**. Rio de Janeiro, 9p. 2012.
- _____. **NBR 5738, Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 6p. 2003.
- _____. **NBR 5739, Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 9p. 2007.
- _____. **NBR 7215, Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 8p. 1996.
- _____. **NBR 8522, Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 16p. 2008.
- _____. **NBR NM 11, Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria. Parte 2: Método ABNT**. Rio de Janeiro, 17p. 2012.

_____. **NBR NM 13, Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.** Rio de Janeiro, 4p. 2012.

_____. **NBR NM 15, Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel.** Rio de Janeiro, 3p. 2012.

_____. **NBR NM 16, Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico.** Rio de Janeiro, 3p. 2012.

_____. **NBR NM 17, Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama.** Rio de Janeiro, 4p. 2012.

_____. **NBR NM 18, Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 4p. 2012.

_____. **NBR NM 23, Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 5p. 2001.

_____. **NBR NM 24, Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2p. 2003.

_____. **NBR NM 43, Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 5p. 2003.

AZENHA, M.; GRANJA, J.; OLIVEIRA, R. **Innovative Method for the Continuous Monitoring of Concrete Viscoelastic Properties since Early Ages: Concept and Pilot Experiments.** Anais... , 2015.

AZENHA, M.; MAGALHÃES, F.; FARIA, R.; CUNHA, Á. **Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration.** Cement and Concrete Research, v. 40, n. 7, p. 1096–1105, 2010.

BAROGHEL-BOUNY, V.; MAINGUY, M.; LASSABATERE, T.; COUSSY, O. **Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials.** Cement and Concrete Research, v. 29, n. 8, p. 1225–1238, 1999.

BATTAGIN, A. F.; CURTI, R.; SILVA, C. O.; MUNHOZ, F. A. C. **Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho.** Instituto Brasileiro do Concreto - 44^o Congresso Brasileiro, 2002.

BAZANT, B. Z. P.; HAUGGAARD, A. B.; BAWEJA, S.; ULM, F. **Microprestress-Solidification Theory For Concrete Creep. I: Aging And Drying Effects.** Journal of Engineering Mechanics, v. 123, n. Pickett 1942, p. 1188–1194, 1997.

BAZANT, Z. .; NAJJAR, L. **Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete.** Matériaux et Contructions, v. 25, n. 17, p. 3–20, 1972.

BAZANT, Z. P. **Viscoelasticity of Solidifying Porous Material-Concrete.** Journal of Engineering Mechanics, v. 103, n. 6, p. 1049–1067, 1977.

BAZANT, Z. P.; BAWEJA, S. **Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage 2. Updating and theoretical basis.** Materials and Structures, v. 28, n. 8, p. 488–495, 1995.

- BAZANT, Z. P.; LI, G.-H.; YU, Q.; KLEIN, G.; KRISTEK, V. **Explanation of excessive long-time deflections of collapsed record-span box girder bridge in Palau. 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures.** Anais. p.1–31, 2008.
- BAZANT, Z. P.; NAJJAR, L. J. **Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem.** Cement and Concrete Research, v. 1, n. 5, p. 461–473, 1971.
- BAZANT, Z. P.; SENER, S.; KIM, J. K. **Effect of Cracking on Drying Permeability and Diffusivity of Concrete.** ACI Materials Journal, v. 84, n. 5, p. 351–357, 1987.
- BAŽANT, Z. P.; XI, Y. **Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms.** Materials and Structures, v. 27, n. 1, p. 3–14, 1994.
- BAZANT, Z. R.; LI, G. **Comprehensive Database on Concrete Creep and Shrinkage.** ACI Materials Journal, v. 105, n. 6, p. 3, 2008.
- BELLA, D. C.; WYRZYKOWSKI, M.; LURA, P. Evaluation of the ultimate drying shrinkage of cement-based mortars with poroelastic models. **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, p. 52, 2017.
- BENTUR, A.; MILESTONE, N. B.; YOUNG, J. F. **Creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes. II. Induced microstructural and chemical changes.** Cement and Concrete Research, p. 721–732, 1978.
- BENTZ, D. P.; GELB, L. D.; GUBBINS, K. E.; et al. **Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials : application to porous Vycor glass.** IOP Science, 1998.
- BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. **Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking.** Cement and Concrete Composites, v. 26, n. 6, p. 677–685, 2004.
- BIOT, M. A. **Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid.** Journal of Applied Physics, v. 26, n. 2, p. 182–185, 1955.
- BISHOP, A. W. The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**, v. 39, n. 4, p. 859–863, 1959.
- BOIVIN, S. G. **Retrait au jeune âge du béton : Développement d’une méthode expérimentale et contribution à l’analyse physique du retrait endogène.** Thèse de doctorat. 2001. 212 f. 2001.
- BRINSON, H. F.; BRINSON, L. C. **Polymer Engineering Science and Viscoelasticity : An Introduction.** New York, NY, United States: Springer-Verlag New York Inc., 2008.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 3892-1 **Pulverized-fuel ash. Specification for pulverized-fuel ash for use with Portland cement.** London. 1997.
- BROUWERS, H. J. H.; VANEIJK, R. J. **Alkali concentrations of pore solution in hydrating OPC.** Cement and Concrete Research, v. 33, n. 2, p. 191–196, 2003.
- BRÜDERN, A.-E.; MECHTCHERINE, V. **Multifunctional use of SAP in strain-hardening cement-based composites.** International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete 15-18 August, p. 11–22, 2010.
- BUCHHOLZ, F. .; GRAHAM, A. . **Modern Superabsorbent Polymer Technology.** A.T.

Graha ed. New York, NY, United States: Wiley-VCH, 1998.

BYFORS, J. **Plain concrete at early ages**. Stockholm ed. Stockholm : Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1980.

CAROL, I.; BAZANT, Z. P. **Viscoelasticity with aging caused by solidification of nonaging constituent**. J. Eng. Mech, v. 119 (11), n. 7, p. 2252–2259, 1993.

CAUDURO, F. **Estudo da Incorporação de Nanotubos de Carbono e Nanossílica em Pasta de Cimento Portland**. 2015. 119 f. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

CHEN, H.; WYRZYKOWSKI, M.; SCRIVENER, K.; LURA, P. **Prediction of self-desiccation in low water-to-cement ratio pastes based on pore structure evolution**. Cement and Concrete Research, v. 49, p. 38–47, 2013.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F. J. **The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 1, p. 67–80, 2004.

COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON (CEB) e FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE (FIP). **Model Code 2010: Final Draft. Model Code prepared by Special Activity Group 5**. Lausanne, September 2011.

CORNELIS, L.; STRUIK, E. **Physical aging in amorphous polymers and other materials door**. 1977.

COUSSY, O. **Particle Shape Effect on Macro-and Micro Behaviours of Monodisperse Ellipsoids**. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 32, n. March 2007, p. 189–213, 2008.

COUSSY, O.; DANGLA, P.; LASSABATARE, T.; BAROGHEL-BOUNY, V. **The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials**. Materials and Structures, v. 37, n. 265, p. 15–20, 2003.

DEFAY, R.; PRIGOGINE, I.; BELLEMANS, A.; EVERETT, D. . Surface tension and adsorption. NY, John Wiley & Sons, Inc, 1966.

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2011.

DUDZIAK, L.; MECHTCHERINE, V.; BRAMESHUBER, W. **Enhancing Early-Age Resistance to Cracking in High-Strength Cement-Based Materials by Means of Internal Curing Using Super Absorbent Polymers**. International RILEM Conference on Material Science, v. III, p. 129–139, 2010.

FELDMAN, R. F. **Mechanism of creep of hydrated portland cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 2, n. 5, p. 521–540, 1972.

FINDLEY, W. N.; LAI, J. S.; ONARAN, K. **Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials**. Ed. Dover ed. Nova York, EUA: Ed. Dover Publications, 1989.

FRECH-BARONET, J.; SORELLI, L.; CHARRON, J. P. **New evidences on the effect of the internal relative humidity on the creep and relaxation behaviour of a cement paste by micro-indentation techniques**. Cement and Concrete Research, v. 91, p. 39–51, 2017.

FREITAS, V. P. **Transferência de humidade em paredes de edifícios. Análise do**

fenómeno de interface. 1992. Universidade do Porto, Portugal. 1992.

GALITZ, C.; GRASLEY, Z. **Effects of strain reversal on elastic and viscoelastic properties of early age cement paste beams.** *Materials and Structures*, v. 49, n. 4, p. 1285–1297, 2016.

GRANJA, J. L.; AZENHA, M. **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. **Measuring and Modeling the Time-Dependent Response of Cementitious Materials to Internal Stresses.** 2006. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2006.

GRASLEY, Z. C. **Closed-Form Solutions for Uniaxial Passive Restraint Experiments.** *International Concrete Abstracts Portal*, v. 270, p. 17–32, 2010.

GRASLEY, Z. C.; LANGE, D. A. **Constitutive modeling of the aging viscoelastic properties of portland cement paste.** *Mechanics of Time-Dependent Materials*, v. 11, n. 3–4, p. 175–198, 2007.

GRASLEY, Z. C.; LEUNG, C. K. **Desiccation shrinkage of cementitious materials as an aging, poroviscoelastic response.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 1, p. 77–89, 2011.

GRAY, W. G.; SCHREFLER, B. A. **Thermodynamic approach to effective stress in partially saturated porous media.** *Eur. Jour. Mech. A/Sol.*, v. 20, p. 521–538, 2001.

GUEDES, R. **Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites.** Woodhead Publishing, 2011.

HANSEN, W. **Constitutive Model for Predicting Ultimate Drying Shrinkage of Concrete.** *J. Am Cerum. Soc.*, v. 32, n. 4, p. 329–332, 1987a.

HANSEN, W. **Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste.** *Journal of the American Ceramics Society*, v. 70, n. 5, p. 323–328, 1987b.

HOANG, S. . **Poroviscoelasticity and Analytical Solutions of Selected Problems in Engineering.** 2011. 144 f. University of Oklahoma. 2011.

HUBLER, M. H.; WENDNER, R.; BAŽANT, Z. P. **Statistical justification of Model B4 for drying and autogenous shrinkage of concrete and comparisons to other models.** *Materials and Structures*, v. 48, n. 4, p. 797–814, 2015.

IGARASH, S.; WATANABE, A. **Experimental study on prevention of autogenous deformation by internal curing using super-absorbent polymer particles.** *International RILEM Conference On Volume Changes Of Hardening Concrete: Testing And Mitigation*, RILEM Publications S.A.R.L. Anais. p.9, 2006.

JANKOVIĆ, K.; STANKOVIĆ, S.; BOJOVIĆ, D.; STOJANOVIĆ, M.; ANTIĆ, L. **The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 126, p. 147–156, 2016.

JANSEN, G. **Caracterização microestrutural e determinação de propriedades higrotérmicas de argamassas com adição de cinzas pesadas.** 2007. Universidade Federal de Santa Catarina. 2007.

- JENNINGS, H. M. **Colloid model of C-S-H and implications to the problem of creep and shrinkage**. *Materials and Structures*, v. 37, n. 265, p. 59–70, 2004.
- JENSEN, O. M. **Thermodynamic limitation of self-desiccation**. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 1, p. 157–164, 1995.
- JENSEN, O. M. **Water absorption of superabsorbent polymers in a cementitious environment**. *International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*, n. September, p. 22–35, 2011.
- JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Autogenous deformation and RH-change in perspective**. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 12, p. 1859–1865, 2001.
- JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations**. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 6, p. 973–978, 2002.
- KANG, S.-H.; HONG, S.-G.; MOON, J. **Shrinkage characteristics of heat-treated ultra-high performance concrete and its mitigation using superabsorbent polymer based internal curing method**. *Cement and Concrete Composites*, v. 89, p. 130–138, 2018.
- KANG, S. H.; HONG, S. G.; MOON, J. **Importance of monovalent ions on water retention capacity of superabsorbent polymer in cement based solutions**. *Cement and Concrete Composites*, v. 88, p. 64–72, 2018.
- KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete**. 1^a ed. Virgínia, EUA.: Editora McGraw Hill–ASCE, Reston, 2008.
- KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. **Overview and future trends of shrinkage research**. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 39, n. 293, p. 827–847, 2006.
- LEUNG, C. K. **Non-Linear Drying Diffusion and Viscoelastic Drying Shrinkage Modeling in Hardened Cement Pastes**. 2009. 115 f. California State University. 2009.
- LI, XIAODAN; GRASLEY, Z. C.; BULLARD, J. W.; GARBOCZI, E. J. **Irreversible desiccation shrinkage of cement paste caused by cement grain dissolution and hydrate precipitation**. *Materials and Structures*, v. 50, n. 2, p. 104, 2017.
- LI, X.; GRASLEY, Z. C.; GARBOCZI, E. J.; BULLARD, J. W. **Simulation of the influence of intrinsic C-S-H aging on time-dependent relaxation of hydrating cement paste**. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 1024–1031, 2017.
- LOPES, A. N. D. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, p. 281, 2011.
- LORANDI, N. .; CIOFFI, M. O. .; ORNAGHI JR, H. **Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos**. *Scientia cum Industria*, v. 4, n. 1, p. 48, 2016.
- LURA, P. **Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete**. 2003.
- LURA, P.; JENSEN, O. M.; BREUGEL, K. VAN. **Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms**. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 2, p. 223–232, 2003.
- LURA, P.; LOTHENBACH, B. **Influence of Pore Solution Chemistry on Shrinkage of**

- Cement Paste.** The 50-year Teaching and Research Anniversary of Prof. Sun Wei on Advances in Civil Engineering Materials, , n. October, p. 191–200, 2010.
- LURA, P.; WYRZYKOWSKI, M.; GHOURCHIAN, S.; et al. **Application of Waste-Derived Lightweight Aggregates for Internal Curing of Concrete.** 71st RILEM Annual Week & ICACMS, p. 8, 2017.
- MA, X.; LIU, J.; WU, Z.; SHI, C. **Effects of SAP on the properties and pore structure of high performance cement-based materials.** Construction and Building Materials, v. 131, p. 476–484, 2017.
- MANZANO, M. A. R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência Modificados Com Polímeros Superabsorventes (PSAS) como Agentes de Cura Interna.** 2016. 324 f. Universidade de Brasília. 2016.
- MCDONALD, D. B.; ROPER, H. **Accuracy of prediction models for shrinkage of concrete.** ACI Materials Journal, v. J 90(3), p. 265–271, 1993.
- MENDES, T. M.; REPETTE, W. L.; REIS, P. J. **Effects of nano-silica on mechanical performance and microstructure of ultra-high performance concrete.** Cerâmica, v. 63, n. 367, p. 387–394, 2017.
- MIGNON, A.; SNOECK, D.; DUBRUEL, P.; VLIERBERGHE, S. VAN; BELIE, N. DE. **Crack mitigation in concrete: Superabsorbent polymers as key to success?** Materials, v. 10, n. 3, 2017.
- MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete.** Englewood Cliffs, NC, Prentice-Hall, Inc, 1981.
- MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete.** 2nd ed. U.S.A, 2002.
- MÖNNIG, S. **Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete.** Otto-Graf-Journal, v. 16, n. 4, p. 193–202, 2005.
- 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.
- NEVILLE, C. A. M. **Dynamic poisson's ratio of portland cement paste, mortar and concrete.** Cemente and Resercha, 1971.
- NILSSON, L. **On the Role of Moisture in Degradation of Concrete Structures.** International Congress - Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities.. **Anais...** . p.15–24, 2005.
- NILSSON, L. O. **Durability concept; pore structure and transport processes.** Woodhead Publishing Limited, 2003.
- NUNES, N. .; FIGUEREDO, A. **Retração do concreto de cimento portland.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento, Departamento de Engenharia de Construção Civil, v. BT/PCC/452, n. 59, p. 59, 2007.
- OLIVIER, G.; COMBRINCK, R.; KAYONDO, M.; BOSHOFF, W. P. **Combined effect of nano-silica, super absorbent polymers, and synthetic fibres on plastic shrinkage cracking in concrete.** Construction and Building Materials, v. 192, p. 85–98, 2018.
- PANE, I.; HANSEN, W. **Early age creep and stress relaxation of concrete containing**

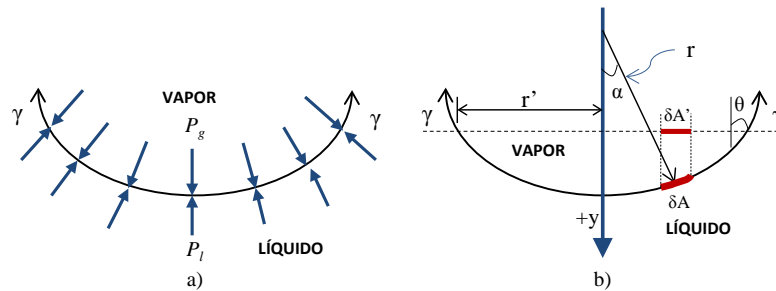
- blended cements.** *Materials and Structures*, v. 35, n. 246, p. 92–96, 2002.
- PICKETT, G. **The Effect of Change in Moisture Content on the Creep of Concrete Under a Sustained Load.** *ACI*, v. J.38, n. 22, p. 333–355, 1942.
- POURJAVADI, A.; FAKOORPOOR, S. M.; KHALOO, A.; HOSSEINI, P. **Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles.** *Materials and Design*, v. 42, p. 94–101, 2012.
- POWERS, T. C. **Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 41, n. 1, p. 1–6, 1958.
- POWERS, T. C. **The thermodynamics of volume change and creep.** *Materiaux et Constructions*, v. 1, n. 6, p. 487–507, 1968.
- R. DEFAY; I.PRIGOGINE; BELLEMANS, A.; H.EVERETT, D. **Surface tension and adsorption.** (I. NY, John Wiley & Sons, Ed.), 1966.
- RODRIGUES, G. S. S. **Contribuição ao estudo da retração e da fluência e seus mecanismos de atuação a baixas idades em concretos estruturais.** 2010. 222 f. Universidade de Brasília. 2010.
- ROSA, G. .; RIBEIRO, M. S. .; OLIVEIRA, S. QIC2016. **Ensaio de Fluência em Tração -** In: LNEC (Ed.); Método de Ensaio. **Anais...** . p.1–11, 2016.
- ROSSI, P.; TAILHAN, J. L.; MAOU, F. LE; GAILLET, L.; MARTIN, E. **Basic creep behavior of concretes investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission.** *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 1, p. 61–73, 2012.
- ROUGELOT, T.; SKOCZYLAS, F.; BURLION, N. **Water desorption and shrinkage in mortars and cement pastes: Experimental study and poromechanical model.** *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 1, p. 36–44, 2009.
- RUPASINGHE, M.; MENDIS, P.; NGO, T.; NGUYEN, T. N.; SOFI, M. **Compressive strength prediction of nano-silica incorporated cement systems based on a multiscale approach.** *Materials and Design*, v. 115, p. 379–392, 2017.
- SAEIDPOUR, M.; WADSÖ, L. **Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption.** *Cement and Concrete Research*, v. 83, p. 179–187, 2016.
- SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 838–844, 2012.
- SALOMÃO, M. C. . **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água.** 2016. Universidade de Brasília-Df. 2016.
- SANTOS, F. I. . . **Avaliação de propriedades higrotérmicas das argamassas : estudo de caso com as cinzas pesadas.** 2006. Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.
- SANTOS, T. A. C. **Estudo da adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência.** 2016. 144p f. Universidade de Brasília. 2016.
- SCHAPERLY, R. A. **A simple collocation method for fitting viscoelastic models to experimental data.** , 1962.

- 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.
- SCHERER, G. W. **Relaxation in glass and composites.** 1986.
- SCHERER, G. W. Theory of Drying. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 73, n. 1, p. 3–14, 1990.
- SCHERER, G. W. **Measuring Permeability of Rigid Materials by a Beam-Bending Method: I, Theory.** Journal of the American Ceramic Society, v. 83, n. 9, p. 2231–2239, 2000.
- SELLEVOLD, E. J.; RICHARDS, C. W. **Short-Time Creep Transition for Hardened Cement Paste.** Journal of the American Ceramic Society, v. 55, n. 6, p. 284–289, 1972.
- SENFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L.; FERREIRA, V. M.; LABRINCHA, J. A. **Mortars with nano-SiO₂ and micro-SiO₂ investigated by experimental design.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 8, p. 1432–1437, 2010.
- SHEN, W.; LI, X.; GAN, G.; et al. **Experimental investigation on shrinkage and water desorption of the paste in high performance concrete.** Construction and Building Materials, v. 114, p. 618–624, 2016.
- SHORTLEY, G.; WILLIAMS, D. **Elements of physics.** Prentice-Hall, 1971.
- SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração.** 2007. 1–5 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.
- SILVA, H. N. **Caracterização Viscoelástica linear de misturas asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos.** , p. 190, 2009.
- SILVA JÚNIOR, P. F. **Estudo da Estabilidade Dimensional de Concretos de Alta Resistência com Adição de Polímero Superabsorvente e Nanopartículas de Sílica.** 2017. 345 f. Universidade de Brasília. 2017.
- SNOECK, D.; BELIE, N. DE. **The influence of superabsorbent polymers on the microstructure and permeability of cementitious materials.** International Conference on Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading, At Nanjing, p. 1–11, 2013.
- SNOECK, D.; JENSEN, O. M.; BELIE, N. DE. **The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials.** Cement and Concrete Research, v. 74, p. 59–67, 2015.
- TAYLOR, H. F. W. **A method for predicting alkali ion concentrations in cement pore solutions.** Advances in Cement Research, v. 1, n. 1, p. 5–16, 1987.
- THOMSON, M.; LINDQVIST, J.-E.; ELSÉN, J.; GROOT, C. **Porosity of historic mortars.** 13th International Brick and Block Masonry Conference, , n. JULY, p. CD, 2004.
- TRTIK, P.; MUENCH, B.; WEISS, W. J.; et al. **Neutron Tomography Measurements of Water Release From Superabsorbent Polymers in Cement Paste.** Int. Conference on Material Science and 64th RILEM Annual Week in Aachen-MATSCI, p. 1–10, 2010.
- VANDAMME, M.; ULM, F.-J. **Nanogranular origin of concrete creep.** Proceedings of the

- National Academy of Sciences, v. 106, n. 26, p. 10552–10557, 2009.
- VARGHESE, L.; RAO, V. V. L. K.; PARAMESWARAN, L. **Effect of nanosilica on drying shrinkage and creep properties of cement concrete.** *Advanced Materials Proceedings*, , n. 56–60, p. 4, 2016.
- VIDELA, C.; COVARRUBIAS, J. P.; MASANA, C. **Updating concrete drying-shrinkage prediction models for local materials.** *ACI Materials Journal*, v. J 101(3), p. 187–198, 2004.
- WEI, Y.; LIANG, S.; GUO, W. **Decoupling of Autogenous Shrinkage and Tensile Creep Strain in High Strength Concrete at Early Ages.** *Experimental Mechanics*, v. 57, n. 3, p. 475–485, 2017.
- WEISS, J.; LURA, P.; RAJABIPOUR, F.; SANT, G. **Performance of shrinkage-reducing admixtures at different humidities and at early ages.** *ACI Materials Journal*, v. 105, n. 5, p. 478–486, 2008.
- WYRZYKOWSKI, M.; BELLA, C. DI; LURA, P. **Prediction of Drying Shrinkage of Cement-Based Mortars with Poroelastic Approaches-A Critical Review.** *Poromechanics VI*, , n. Biot 1941, p. 579–586, 2017.
- WYRZYKOWSKI, M.; GHOURCHIAN, S.; SINTHUPINYO, S.; et al. **Internal curing of high performance mortars with bottom ash.** *Cement and Concrete Composites*, v. 71, p. 1–9, 2016.
- WYRZYKOWSKI, M.; LURA, P. **Controlling the coefficient of thermal expansion of cementitious materials - A new application for superabsorbent polymers.** *Cement and Concrete Composites*, v. 35, n. 1, p. 49–58, 2013.
- XIN, J.; HUANG, D.; LI, J.; LIN, C. **Effect of SAP on the tensile creep of early-age concrete using ring specimens.** , v. 8189, n. September, 2016.
- ZHANG, P.; WAN, J.; WANG, K.; LI, Q. **Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review.** *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 648–658, 2017.
- ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K. **Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 144, p. 311–316, 2017.
- ZUO, W.; FENG, P.; ZHONG, P.; et al. **Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes.** *Cement and Concrete Research*, v. 100, n. August, p. 413–422, 2017.

APÊNDICE A - EQUAÇÃO DE KELVIN-LAPLACE

Equilíbrio estático em meniscos capilares (a). Diagrama para resolução de forças na direção Y (b).



Fonte: (R. DEFAY et al., 1966)

A equação (A.1) representa a força exercida perpendicularmente à superfície do elemento.

$$(P_g - P_l)\delta A \tag{A.1}$$

A força exercida perpendicularmente à superfície do elemento ao longo do plano circular indicado pela linha pontilhada horizontal, é mostrada na equação (A.2).

$$(P_g - P_l)\cos(\alpha)\delta A \tag{A.2}$$

$$(P_g - P_l)\delta A' = (p'' - p)\cos(\alpha)\delta A$$

P_l – pressão no fluido.

P_g – pressão de vapor.

δA – Elemento de área.

$\delta A'$ – Elemento de área na direção horizontal.

A soma das forças verticais em todo o plano horizontal (linha pontilhada). Dada pela diferença entre a pressão de vapor e a pressão do fluido multiplicada pela área de um círculo raio r' . Equação (A.3).

$$(P_g - P_l) \pi (r')^2 \quad (\text{A.3})$$

A componente de força vertical adicional fornecida pela tensão superficial é então dada pela equação (A.4);

$$-\gamma \cos \theta \int_0^{2\pi r'} \delta L \quad (\text{A.4})$$

γ - tensão superficial que ocorre em todo perímetro L

Resolvendo a Integral e substituindo r'/r por $\cos \theta$, onde θ é o ângulo de curvatura do menisco a partir do plano vertical, tem-se a equação (A.5).

$$-\gamma \cdot \frac{r'}{r} \cdot 2\pi r' \quad (\text{A.5})$$

O parâmetro r é o raio médio da curvatura do menisco.

Para que haja equilíbrio a soma das forças na direção Y é zero, logo resultado na equação (A.6).

$$(P_g - P_l)\pi(r')^2 - \frac{2\gamma}{r}\pi(r')^2 = 0 \quad (\text{A.6})$$

Reduzindo a equação (A.6), leva à equação de Laplace que descreve os requisitos mecânicos para o equilíbrio de um menisco esférico. Equação (A.7).

$$P_g - P_l = \frac{2\gamma}{r} \quad (\text{A.7})$$

Para Grasley(2006) a equação de Laplace pode ser aproximada a subpressão P_l (pressão do fluido poroso, equação (A.7)). Porque a pressão de vapor permanece relativamente constante em comparação com as grandes alterações na pressão do fluido,ou seja.

$$P_l = \frac{2\gamma}{r} \quad (\text{A.8})$$

- Demonstração da Equação Kelvin-Laplace (GRASLEY, 2006)

Assim como há exigências para o equilíbrio mecânico, o equilíbrio físico-químico também deve ser satisfeito, equação (A.9).

$$\mu = \mu'' = \mu^\gamma \quad (\text{A.9})$$

Onde μ é o potencial químico da água do poro, μ'' é o potencial químico do vapor, e μ^γ é o potencial químico da camada superficial (DEFAY et al., 1966). Uma mudança de uma condição de equilíbrio para outra pode ser mostrada pelas equações (A.10) e (A.11).

- Para o equilíbrio físico-químico;

$$\delta\mu = \mu'' \quad (\text{A.10})$$

- Para o equilíbrio mecânico a partir da equação de Laplace;

$$\delta P_g - \delta P_l = \delta \left(\frac{2\gamma}{r} \right) \quad (\text{A.11})$$

Além disso, as Equações de Gibbs-Duhem. Equações (A.12) e (A.13);

$$s\delta T - v\delta P_l + \delta\mu = 0 \quad (\text{A.12})$$

e

$$s''\delta T - v''\delta P_g + \delta\mu'' = 0 \quad (\text{A.13})$$

s e s'' são as entropias molares das fases de líquido e de vapor, respectivamente, v e v'' são os volumes molares das fases líquida e de vapor, respectivamente, e T é a temperatura em

kelvins. A uma temperatura constante, as equações (A.9), (A.10), (A.11), (A.12) e (A.13) podem ser combinados para obter

$$v\delta P = v''\delta P_g \quad (\text{A.14})$$

Combinando isso com a equação (A.11) resulta na. Equação (A.15).

$$\delta\left(\frac{2\gamma}{r}\right) = \frac{v - v''}{v}\delta P_g \quad (\text{A.15})$$

Se o volume molar do líquido, v , for negligenciado em relação ao volume molar do vapor, v'' , e o vapor é tratado como um gás perfeito, então a equação (A.15) pode ser escrita como;

$$\delta\left(\frac{2\gamma}{r}\right) = \frac{RT}{v}\frac{\delta P_g}{P_g} \quad (\text{A.16})$$

R é a constante de gás universal e T é a temperatura em (k). Integrando ambos lados da equação de $1/r = 0$ para $1/r$ e $P_g = P_{sat}$ para P_g , resulta na equação (A.17) (Equação de Kelvin).

$$\frac{2\gamma}{r} = -\ln\left(\frac{P_g}{P_{sat}}\right)\frac{RT}{v} \quad (\text{A.17})$$

P_{sat} é a pressão de vapor de saturação à temperatura dada. Como a relação entre a pressão parcial de vapor, P_g e a pressão de vapor de saturação, P_{sat} , pode ser expressa como RH (de 0 a 1) a equação (A.17) pode ser escrita obter a equação (A.18).

$$\frac{2\gamma}{r} = \frac{-\ln(RH)RT}{v} \quad (\text{A.18})$$

γ é a tensão superficial da água, r é o raio médio da curvatura do menisco, RH é a umidade relativa interna, R é a constante universal do gás, T é a temperatura em (k) e v é o volume molar da água.

Ao combinar as equações simplificadas de Laplace (equação (A.8)) e Kelvin (equação (A.18)), a pressão negativa (pressão negativa) desenvolvida no fluido poroso pode estar relacionada com a RH interna, obtém a equação de Kelvin-Laplace (A.19).

$$P_l = \frac{-\ln(RH)RT}{v} \quad (\text{A.19})$$

APÊNDICE B - COEFICIENTE DE DIFUSÃO

O coeficiente de difusão por secagem de um prisma simétrico (de dois lados paralelos) com uma RH inicial uniforme ($RH_{initial}$) exposto a uma RH ambiente constante (RH) pode ser aproximado pela perda de massa medida. Ao aproximar o processo de secagem com um coeficiente de difusão linear, a equação governante, as condições de contorno e a condição inicial são;

$$\frac{\partial RH(x, t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 RH(x, t)}{\partial^2 x} \right) \quad (B.1)$$

$$RH(0, t) = RH_{bound}$$

$$RH(L, t) = RH_{bound}$$

$$RH(x, 0) = RH_{initial}$$

A equação (B.1) pode ser resolvida no domínio da transformação de Laplace. Transformando a eq. (B.1) resulta em;

$$s\overline{RH}(s, x) - RH_{initial} = D \left(\frac{\partial^2 \overline{RH}(x, s)}{\partial^2 x} \right) \quad (B.2)$$

$$RH(0, t) = RH_{bound}/s$$

$$RH(L, t) = RH_{bound}/s$$

A solução da equação (B.2) é;

$$\overline{RH}(x, s) = \frac{e^{\frac{\sqrt{sx}}{\sqrt{D}}}}{\left(1 + e^{\frac{L\sqrt{s}}{\sqrt{D}}}\right) s} \left[\left(e^{\frac{L\sqrt{s}}{\sqrt{D}}} + e^{\frac{2\sqrt{sx}}{\sqrt{D}}} \right) (RH_{bound} - RH_{initial}) \right. \\ \left. + \left(e^{\frac{\sqrt{sx}}{\sqrt{D}}} + e^{\frac{\sqrt{s}(L+x)}{\sqrt{D}}} \right) RH_{initial} \right] \quad (B.3)$$

A média está relacionada diretamente com a perda de massa do amostra. Portanto, resolvemos para $\langle RH(s) \rangle$ como;

$$\langle \overline{RH}(s) \rangle = \frac{RH_{initial}}{s} + \frac{2\sqrt{D}(RH_{bound} - RH_{initial}) \tanh\left(\frac{L\sqrt{s}}{2\sqrt{Di}}\right)}{Ls^{3/2}} \quad (B.4)$$

A equação (B.4) não é útil na sua forma atual, pois não é analiticamente reversível no domínio do tempo. No entanto, como o comportamento da retração por secagem ocorre em idades iniciais, pode-se simplificar a equação (B.4) usando o teorema do valor inicial das transformações de Laplace; este teorema afirma que;

$$f(0^+) = \lim_{t \rightarrow 0^+} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s\bar{f}(s) \quad (B.5)$$

Como $s \rightarrow \infty$, o termo \tanh na equação (B.5) aproxima-se de 1, de modo que, para a secagem por secagem, podemos escrever;

$$\langle \overline{RH}(s) \rangle \approx \frac{RH_{initial}}{s} + \frac{2\sqrt{D}(RH_{bound} - RH_{initial})}{Ls^{3/2}} \quad (B.6)$$

que pode ser analiticamente invertido para obter;

$$\langle RH(t) \rangle = RH_{initial} - \frac{4\sqrt{D}(RH_{bound} - RH_{initial})\sqrt{t}}{L\sqrt{\pi}} \quad (B.7)$$

A perda de massa por secagem é quase inteiramente induzida pela perda de água líquida (a perda de massa de vapor é insignificante). Assim sendo,

$$\Delta m = (1 - S)\phi V \rho \quad (\text{B.8})$$

onde S é uma função da média interna RH tal que $S = S(\langle RH(t) \rangle)$.

Assume que a isoterma de dessorção é dada por (BAZANT e BAWEJA, 1995);

$$S(t) = 1 - 0.75 \left(1 - \left(\frac{RH}{98} \right)^3 \right) \quad (\text{B.9})$$

Combinando as equações (B.7), (B.8), (B.9), (B.10), pode-se obter D pela equação (B.13).

$$D = \frac{L^2 \pi (RH_{initial}^2 - A + B)}{16 (RH_{bound} - RH_{initial})^2 t} \quad (\text{B.10})$$

D – Coeficiente de difusão

L - espessura da amostra;

$RH_{initial}$ – umidade relativa inicial;

RH_{bound} – umidade relativa final;

t – Tempo.

A e B são dados pelas equações (B.11) e (B.12);

$$A = \frac{215,726 RH_{initial} (\Delta m(t) + 0.75 \phi V \rho - 1)^{1/3}}{\phi^{1/3} V^{1/3} \rho^{1/3}} \quad (\text{B.11})$$

$$B = \frac{11634,4(\Delta m(t) + 0.75\phi V\rho - 1)^{2/3}}{\phi^{2/3}V^{2/3}\rho^{2/3}} \quad (\text{B.12})$$

$\Delta m(t)$ – perda de massa no tempo;

ϕ - porosidade;

ρ – densidade da água;

V – volume da amostra;

Para secagem, a lei de Fick unidimensional de uma amostra prismática longa, assume que RH inicial ($RH_{initial}$) seja uniforme, uma RH final (RH_{bound}) constante e $RH(x, \infty) = RH_{bound}$, equação (B.13). Embora seja reconhecido que a secagem em materiais cimentícios não seja linear, um coeficiente linear é considerado aqui para tornar a solução tratável (GRASLEY, 2010).

$$RH(x, t) = RH_{bound} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{RH_{bound} \cos(n\pi) - RH_{bound}}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{L^2}\right) + \frac{2RH_{initial}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{L^2}\right) \frac{1 - \cos(n\pi)}{n} \quad (\text{B.13})$$

D – Coeficiente de difusão

L - espessura da amostra;

$RH_{initial}$ – umidade relativa inicial;

RH_{bound} – umidade relativa final;

t – Tempo.

ANEXO A - RESULTADOS DA PERDA DE MASSA

Tabela A.1- Perda de Massa aos 3 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
85,1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85,1	0,33	0,01	0,04	0,05	0,04	0,02
85,1	0,50	0,00	0,05	0,04	0,05	0,03
85,1	0,90	0,04	0,08	0,09	0,08	0,08
85,1	1,12	0,08	0,08	0,13	0,09	0,08
85,1	1,45	0,07	0,12	0,12	0,11	0,12
85,1	1,95	0,07	0,17	0,17	0,15	0,20
85,1	2,45	0,14	0,19	0,20	0,16	0,24
85,1	2,90	0,17	0,23	0,27	0,18	0,29
85,1	3,28	0,28	0,31	0,39	0,20	0,32
85,1	3,97	0,37	0,38	0,45	0,23	0,36
85,1	4,43	0,38	0,42	0,52	0,26	0,41
85,1	4,93	0,44	0,47	0,58	0,27	0,46
85,1	5,48	0,50	0,52	0,63	0,29	0,51
85,1	10,62	0,83	0,87	1,07	0,47	0,84
85,1	15,42	1,06	1,07	1,34	0,58	1,05
85,1	17,8	1,15	1,14	1,43	0,61	1,13
85,1	19,78	1,19	1,17	1,47	0,61	1,15
85,1	21,22	1,24	1,19	1,54	0,64	1,21
85,1	22,47	1,30	1,25	1,58	0,67	1,26
85,1	23,23	1,32	1,23	1,59	0,67	1,26
85,1	23,90	1,34	1,26	1,63	0,69	1,28
85,1	25,03	1,39	1,30	1,66	0,69	1,28
85,1	25,75	1,41	1,33	1,68	0,69	1,30
85,1	26,40	1,43	1,34	1,68	0,70	1,32
85,1	27,08	1,44	1,33	1,69	0,70	1,34
75,5	0,00	1,42	1,32	1,66	0,69	1,34
75,5	0,65	1,43	1,33	1,68	0,71	1,39
75,5	0,70	1,43	1,34	1,69	0,71	1,38
75,5	1,33	1,46	1,39	1,72	0,73	1,41
75,5	1,42	1,47	1,39	1,73	0,73	1,44
75,5	1,88	1,48	1,41	1,77	0,75	1,44
75,5	2,55	1,52	1,46	1,78	0,78	1,48
75,5	2,72	1,51	1,46	1,79	0,77	1,48

Tabela A.1 - Perda de Massa aos 3 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
75,5	3,17	1,53	1,48	1,80	0,79	1,50
75,5	3,42	1,54	1,48	1,83	0,79	1,52
75,5	4,78	1,56	1,56	1,87	0,82	1,55
75,5	5,77	1,58	1,63	1,91	0,86	1,59
75,5	7,05	1,61	1,66	1,94	0,88	1,62
75,5	8,62	1,66	1,74	1,99	0,89	1,66
75,5	10,62	1,67	1,79	2,03	0,93	1,71
75,5	15,42	1,71	1,89	2,10	0,98	1,77
75,5	17,8	1,73	1,92	2,13	1,00	1,79
75,5	19,78	1,74	1,94	2,14	1,02	1,81
75,5	18,75	1,73	1,92	2,12	1,00	1,77
75,5	19,55	1,73	1,95	2,13	1,00	1,79
75,5	20,65	1,74	1,96	2,15	1,01	1,81
75,5	21,65	1,75	1,97	2,17	1,04	1,83
75,5	23,03	1,76	2,00	2,16	1,03	1,83
75,5	23,67	1,75	1,97	2,17	1,03	1,83
75,5	24,03	1,76	2,00	2,18	1,05	1,85
59,1	0,00	1,76	2,00	2,18	1,04	1,85
59,1	0,72	1,79	2,07	2,21	1,09	1,88
59,1	0,75	1,79	2,06	2,22	1,09	1,89
59,1	1,30	1,81	2,11	2,26	1,13	1,92
59,1	1,32	1,82	2,09	2,27	1,12	1,95
59,1	1,85	1,83	2,13	2,31	1,15	1,99
59,1	1,92	1,86	2,15	2,35	1,16	1,98
59,1	2,42	1,87	2,17	2,39	1,18	2,04
59,1	2,62	1,87	2,18	2,40	1,21	2,08
59,1	2,63	1,89	2,19	2,40	1,20	2,08
59,1	3,32	1,91	2,24	2,44	1,24	2,14
59,1	3,52	1,92	2,25	2,47	1,26	2,18
59,1	4,15	1,94	2,28	2,53	1,29	2,20
59,1	4,18	1,96	2,30	2,52	1,31	2,23
59,1	4,68	1,96	2,32	2,56	1,31	2,27
59,1	5,18	1,98	2,36	2,61	1,35	2,30

Tabela A.2- Perda de Massa aos 3 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
59,1	5,65	2,00	2,38	2,63	1,36	2,32
59,1	5,68	1,99	2,40	2,64	1,36	2,34
59,1	6,32	2,03	2,42	2,68	1,39	2,37
59,1	6,50	2,04	2,44	2,69	1,40	2,40
59,1	7,37	2,05	2,50	2,76	1,44	2,45
59,1	7,57	2,06	2,51	2,77	1,45	2,47
59,1	8,03	2,06	2,52	2,80	1,48	2,48
59,1	8,52	2,09	2,56	2,82	1,49	2,53
59,1	9,07	2,13	2,60	2,86	1,51	2,57
59,1	10,51	2,17	2,66	2,93	1,58	2,63
59,1	12,47	2,22	2,76	3,01	1,65	2,72
59,1	15,21	2,29	2,87	3,11	1,75	2,82
59,1	17,37	2,33	2,96	3,16	1,81	2,88
59,1	18,92	2,36	3,01	3,20	1,86	2,92
59,1	19,76	2,38	3,04	3,21	1,88	2,94
59,1	20,44	2,39	3,06	3,22	1,90	2,95
59,1	21,97	2,41	3,11	3,25	1,93	2,98
59,1	23,97	2,44	3,18	3,27	2,00	3,02
59,1	24,40	2,45	3,17	3,28	1,99	3,02
59,1	24,97	2,45	3,18	3,28	2,00	3,03
43,2	0,00	2,45	3,18	3,28	2,00	3,02
43,2	0,65	2,46	3,22	3,35	2,05	3,08
43,2	0,77	2,47	3,23	3,35	2,05	3,09
43,2	1,25	2,50	3,26	3,39	2,08	3,13
43,2	1,73	2,52	3,30	3,43	2,11	3,18
43,2	1,75	2,52	3,30	3,44	2,12	3,18
43,2	2,40	2,55	3,35	3,49	2,15	3,21
43,2	3,10	2,59	3,40	3,55	2,18	3,29
43,2	3,67	2,61	3,46	3,57	2,20	3,31
43,2	3,75	2,63	3,45	3,58	2,19	3,32
43,2	4,30	2,65	3,49	3,59	2,22	3,33
43,2	4,88	2,67	3,51	3,63	2,25	3,37
43,2	5,52	2,69	3,56	3,66	2,28	3,40
43,2	5,68	2,71	3,58	3,67	2,27	3,40

Tabela A.3- Perda de Massa aos 3 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
43,2	6,52	2,74	3,63	3,70	2,32	3,44
43,2	6,67	2,73	3,62	3,71	2,33	3,45
43,2	7,78	2,79	3,70	3,75	2,38	3,52
43,2	8,80	2,83	3,75	3,82	2,44	3,58
43,2	10,51	2,87	3,83	3,87	2,50	3,64
43,2	12,47	2,92	3,91	3,94	2,57	3,71
43,2	15,21	2,98	4,02	4,02	2,66	3,80
43,2	17,37	3,02	4,09	4,08	2,73	3,86
43,2	18,92	3,05	4,14	4,11	2,76	3,90
43,2	19,76	3,06	4,17	4,13	2,78	3,92
43,2	20,44	3,07	4,19	4,14	2,80	3,93
43,2	22,98	3,11	4,24	4,20	2,85	3,97
43,2	24,08	3,12	4,29	4,21	2,87	4,00
43,2	24,52	3,13	4,31	4,22	2,87	4,01
43,2	25,20	3,12	4,30	4,22	2,88	4,02
43,2	25,52	3,13	4,32	4,22	2,89	4,03
33,1	0,00	3,15	4,34	4,25	2,91	4,05
33,1	0,60	3,17	4,37	4,27	2,94	4,08
33,1	0,73	3,17	4,37	4,27	2,94	4,08
33,1	1,63	3,20	4,41	4,29	2,99	4,13
33,1	2,08	3,21	4,43	4,31	3,00	4,15
33,1	2,48	3,24	4,46	4,32	3,03	4,18
33,1	2,78	3,26	4,47	4,34	3,04	4,20
33,1	3,28	3,28	4,50	4,36	3,08	4,22
33,1	3,97	3,30	4,53	4,43	3,09	4,25
33,1	4,68	3,31	4,56	4,44	3,11	4,29
33,1	5,55	3,33	4,58	4,47	3,13	4,33
33,1	5,88	3,35	4,60	4,49	3,15	4,33
33,1	5,93	3,35	4,59	4,50	3,16	4,35
33,1	6,67	3,37	4,63	4,52	3,17	4,36
33,1	7,73	3,40	4,66	4,55	3,21	4,40
33,1	8,52	3,42	4,69	4,58	3,24	4,43
33,1	10,51	3,47	4,76	4,64	3,30	4,49

Tabela A.4- Perda de Massa aos 3 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
33,1	12,47	3,51	4,82	4,69	3,35	4,54
33,1	15,21	3,56	4,90	4,76	3,42	4,62
33,1	17,37	3,60	4,95	4,80	3,47	4,67
33,1	18,92	3,63	4,99	4,84	3,50	4,70
33,1	19,76	3,65	5,00	4,85	3,51	4,72
33,1	20,44	3,66	5,02	4,86	3,52	4,74
33,1	21,52	3,67	5,05	4,88	3,54	4,75
33,1	22,75	3,71	5,06	4,91	3,56	4,79
33,1	23,78	3,72	5,08	4,92	3,58	4,81
23,1	0,00	3,72	5,07	4,92	3,57	4,80
23,1	0,98	3,74	5,08	4,91	3,58	4,80
23,1	1,47	3,74	5,11	4,93	3,58	4,83
23,1	1,57	3,74	5,11	4,93	3,57	4,84
23,1	2,30	3,75	5,13	4,95	3,61	4,88
23,1	2,92	3,76	5,15	4,97	3,62	4,90
23,1	3,45	3,77	5,18	5,03	3,65	4,92
23,1	3,88	3,79	5,19	5,05	3,66	4,95
23,1	4,42	3,81	5,21	5,08	3,69	4,97
23,1	4,83	3,82	5,23	5,09	3,69	4,98
23,1	5,27	3,85	5,25	5,11	3,71	5,00
23,1	5,63	3,85	5,27	5,11	3,74	5,01
23,1	6,02	3,87	5,26	5,13	3,73	5,03
23,1	6,52	3,90	5,29	5,14	3,75	5,06
23,1	7,15	3,91	5,33	5,17	3,79	5,08
23,1	7,27	3,91	5,33	5,19	3,79	5,10
23,1	7,90	3,94	5,34	5,21	3,80	5,11
23,1	8,52	3,95	5,38	5,25	3,84	5,14
23,1	9,45	3,97	5,41	5,29	3,88	5,20
23,1	12,47	4,07	5,52	5,39	3,99	5,28
23,1	15,21	4,14	5,60	5,48	4,09	5,37
23,1	17,37	4,19	5,66	5,54	4,15	5,44
23,1	18,92	4,22	5,70	5,59	4,19	5,48
23,1	19,76	4,24	5,72	5,61	4,21	5,50

Tabela A.5- Perda de Massa aos 3 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
23,1	20,44	4,25	5,74	5,63	4,23	5,52
23,1	22,72	4,29	5,78	5,69	4,28	5,56
23,1	23,62	4,31	5,81	5,71	4,30	5,62
23,1	24,60	4,33	5,85	5,72	4,32	5,64
23,1	25,67	4,35	5,84	5,75	4,33	5,66
23,1	25,80	4,35	5,84	5,73	4,33	5,65
15,5	0,00	4,35	5,84	5,73	4,33	5,65
15,5	1,37	4,44	5,92	5,89	4,41	5,75
15,5	1,67	4,47	5,94	5,89	4,43	5,76
15,5	2,10	4,50	5,96	5,91	4,47	5,81
15,5	2,12	4,50	5,97	5,92	4,46	5,82
15,5	2,53	4,51	6,00	5,94	4,49	5,84
15,5	2,87	4,52	6,01	5,95	4,50	5,85
15,5	3,23	4,56	6,05	5,98	4,54	5,90
15,5	3,87	4,59	6,08	6,05	4,58	5,97
15,5	4,23	4,60	6,13	6,08	4,59	5,98
15,5	4,37	4,61	6,13	6,08	4,62	5,98
15,5	5,10	4,62	6,18	6,11	4,64	6,03
15,5	5,17	4,65	6,16	6,13	4,66	6,04
15,5	6,77	4,73	6,26	6,21	4,73	6,12
15,5	7,97	4,79	6,35	6,29	4,79	6,22
15,5	8,52	4,80	6,37	6,32	4,82	6,24
15,5	9,45	4,84	6,42	6,36	4,86	6,29
15,5	12,47	4,95	6,57	6,50	5,00	6,43
15,5	15,21	5,04	6,69	6,60	5,11	6,55
15,5	17,37	5,10	6,78	6,68	5,19	6,63
15,5	18,92	5,14	6,84	6,72	5,24	6,68
15,5	19,76	5,16	6,87	6,75	5,27	6,71
15,5	20,44	5,18	6,90	6,76	5,30	6,73
15,5	22,72	5,23	6,98	6,82	5,37	6,80
15,5	23,82	5,25	7,03	6,85	5,41	6,83
15,5	24,60	5,26	7,05	6,86	5,42	6,85

Tabela A.6- Perda de Massa aos 7 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
85,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85,1	0,33	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02
85,1	0,63	0,02	0,04	0,05	0,05	0,08
85,1	0,67	0,02	0,04	0,06	0,05	0,08
85,1	1,00	0,04	0,07	0,11	0,06	0,12
85,1	1,28	0,05	0,08	0,12	0,07	0,15
85,1	1,33	0,06	0,08	0,15	0,07	0,17
85,1	1,83	0,08	0,12	0,20	0,07	0,21
85,1	2,00	0,09	0,11	0,20	0,08	0,23
85,1	2,33	0,09	0,13	0,24	0,10	0,28
85,1	2,67	0,11	0,16	0,27	0,10	0,33
85,1	3,73	0,14	0,21	0,40	0,12	0,49
85,1	4,33	0,16	0,22	0,44	0,12	0,56
85,1	4,93	0,17	0,25	0,49	0,14	0,59
85,1	5,33	0,18	0,27	0,50	0,14	0,66
85,1	5,83	0,18	0,29	0,57	0,16	0,72
85,1	6,33	0,20	0,31	0,58	0,16	0,76
85,1	6,42	0,21	0,32	0,62	0,16	0,78
85,1	7,05	0,23	0,35	0,67	0,17	0,86
85,1	7,33	0,23	0,36	0,65	0,18	0,86
85,1	10,34	0,30	0,47	0,91	0,22	1,16
85,1	13,24	0,37	0,57	1,10	0,26	1,39
85,1	15,32	0,42	0,63	1,21	0,29	1,54
85,1	16,45	0,45	0,66	1,27	0,30	1,62
85,1	17,45	0,47	0,69	1,32	0,31	1,68
85,1	18,23	0,49	0,71	1,35	0,32	1,72
85,1	19,60	0,51	0,75	1,41	0,34	1,80
85,1	20,34	0,53	0,76	1,44	0,34	1,84
85,1	21,60	0,56	0,79	1,50	0,35	1,90
85,1	22,87	0,59	0,83	1,52	0,37	1,96
85,1	23,67	0,59	0,85	1,56	0,37	1,99
85,1	24,00	0,60	0,85	1,58	0,38	2,01
75,5	0,00	0,59	0,84	1,53	0,37	1,97
75,5	0,42	0,61	0,85	1,95	0,38	1,97
75,5	1,00	0,62	0,86	1,57	0,39	1,97
75,5	1,40	0,63	0,89	1,57	0,39	1,97
75,5	2,00	0,65	0,89	1,59	0,40	1,98
75,5	2,40	0,64	0,90	1,60	0,42	2,00
75,5	3,75	0,66	0,95	1,66	0,45	2,02
75,5	3,88	0,67	0,95	1,67	0,45	2,05

Tabela A.2 Perda de Massa aos 7 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
75,5	4,82	0,69	0,99	1,68	0,47	2,10
75,5	4,83	0,69	0,98	1,69	0,47	2,07
75,5	5,73	0,71	1,02	1,70	0,49	2,12
75,5	6,03	0,71	1,02	1,71	0,49	2,11
75,5	6,63	0,73	1,04	1,71	0,51	2,13
75,5	7,23	0,73	1,05	1,73	0,52	2,14
75,5	7,40	0,74	1,06	1,74	0,52	2,14
75,5	8,00	0,75	1,08	1,75	0,53	2,16
75,5	10,18	0,78	1,13	1,78	0,56	2,19
75,5	11,23	0,79	1,16	1,80	0,58	2,21
75,5	13,42	0,82	1,20	1,83	0,60	2,24
75,5	14,22	0,83	1,21	1,84	0,61	2,25
75,5	16,88	0,86	1,26	1,87	0,63	2,28
75,5	18,48	0,87	1,28	1,89	0,64	2,30
75,5	22,22	0,90	1,31	1,93	0,66	2,33
75,5	22,98	0,90	1,32	1,94	0,66	2,34
75,5	23,22	0,90	1,32	1,94	0,66	2,34
75,5	24,00	0,91	1,33	1,95	0,67	2,35
59,1	0,00	0,90	1,33	2,00	0,69	2,42
59,1	1,25	0,97	1,44	2,05	0,76	2,54
59,1	2,10	1,00	1,51	2,09	0,79	2,60
59,1	2,38	1,00	1,55	2,14	0,79	2,60
59,1	3,17	1,03	1,58	2,17	0,81	2,66
59,1	3,57	1,05	1,62	2,19	2,03	2,71
59,1	3,68	1,05	1,63	2,20	0,83	2,71
59,1	4,18	1,07	1,68	2,24	0,87	2,77
59,1	4,68	1,08	1,71	2,25	0,88	2,79
59,1	5,15	1,11	1,75	2,28	0,91	2,84
59,1	5,40	1,11	1,77	2,29	0,92	2,86
59,1	6,40	1,15	1,81	2,34	0,95	2,94
59,1	7,48	1,19	1,89	2,40	0,98	3,02
59,1	8,08	1,21	1,92	2,45	1,02	3,11
59,1	8,75	1,26	1,99	2,47	1,05	3,14
59,1	11,23	1,35	2,12	2,59	1,14	3,31
59,1	14,32	1,46	2,26	2,71	1,24	3,47
59,1	16,36	1,52	2,34	2,79	1,30	3,55
59,1	18,25	1,57	2,42	2,84	1,35	3,61
59,1	19,87	1,61	2,47	2,89	1,38	3,66
59,1	20,87	1,63	2,50	2,91	1,39	3,68

Tabela A.2 Perda de Massa aos 7 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
59,1	21,60	1,63	2,54	2,92	1,41	3,69
59,1	22,27	1,66	2,55	2,96	1,44	3,70
59,1	23,33	1,69	2,58	2,97	1,45	3,73
59,1	24,02	1,69	2,63	2,98	1,46	3,74
43,2	0,00	1,72	2,64	3,00	1,48	3,74
43,2	0,23	1,72	2,65	3,00	1,48	3,74
43,2	0,57	1,73	2,69	3,03	1,49	3,76
43,2	0,98	1,76	2,72	3,05	1,51	3,79
43,2	1,05	1,77	2,73	3,05	1,51	3,80
43,2	1,52	1,79	2,76	3,06	1,53	3,80
43,2	1,73	1,80	2,77	3,07	1,53	3,81
43,2	2,07	1,80	2,78	3,10	1,55	3,84
43,2	2,92	1,89	2,83	3,14	1,59	3,89
43,2	4,08	1,95	2,91	3,19	1,64	3,95
43,2	5,32	2,03	2,98	3,26	1,69	4,01
43,2	6,95	2,11	3,08	3,32	1,77	4,11
43,2	7,78	2,15	3,14	3,38	1,80	4,16
43,2	8,90	2,20	3,22	3,42	1,84	4,21
43,2	11,03	2,30	3,32	3,51	1,90	4,32
43,2	11,23	2,30	3,34	3,51	1,92	4,33
43,2	14,32	2,41	3,50	3,63	2,01	4,47
43,2	16,36	2,48	3,59	3,69	2,07	4,55
43,2	18,68	2,53	3,68	3,76	2,12	4,63
43,2	19,23	2,56	3,71	3,78	2,15	4,69
43,2	19,75	2,57	3,72	3,79	2,16	4,70
43,2	21,38	2,62	3,79	3,85	2,19	4,73
43,2	22,33	2,66	3,80	3,86	2,20	4,78
43,2	23,82	2,67	3,84	3,91	2,23	4,81
43,2	24,28	2,70	3,88	3,92	2,25	4,86
33,1	0,00	2,71	3,89	3,93	2,27	4,87
33,1	0,58	2,75	3,91	3,94	2,29	4,85
33,1	1,12	2,76	3,94	3,97	2,29	4,87
33,1	1,45	2,79	3,95	3,97	2,30	4,90
33,1	2,25	2,81	4,00	4,00	2,33	4,94
33,1	2,70	2,84	4,03	4,00	2,34	4,99
33,1	3,07	2,85	4,05	4,05	2,36	5,00
33,1	3,62	2,88	4,09	4,06	2,38	5,04
33,1	3,98	2,88	4,11	4,09	2,41	5,06
33,1	4,05	2,90	4,12	4,09	2,41	5,07
33,1	5,05	2,94	4,18	4,14	2,46	5,15

Tabela A.2 Perda de Massa aos 7 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
33,1	5,57	2,97	4,22	4,16	2,48	5,16
33,1	6,65	3,02	4,32	4,21	2,53	5,22
33,1	7,77	3,06	4,38	4,25	2,57	5,30
33,1	8,75	3,10	4,45	4,31	2,61	5,34
33,1	11,23	3,20	4,58	4,41	2,70	5,45
33,1	14,32	3,31	4,69	4,52	2,79	5,58
33,1	16,36	3,37	4,75	4,59	2,84	5,66
33,1	18,93	3,44	4,80	4,65	2,89	5,74
33,1	19,75	3,48	4,83	4,69	2,91	5,77
33,1	20,60	3,49	4,84	4,70	2,91	5,79
33,1	21,27	3,50	4,86	4,71	2,93	5,83
33,1	22,27	3,53	4,87	4,72	2,94	5,85
33,1	23,25	3,55	4,86	4,75	2,98	5,89
33,1	23,30	3,55	4,88	4,75	2,97	5,86
33,1	24,35	3,58	4,92	4,77	2,98	5,93
23,1	0,00	3,57	4,90	4,77	2,99	5,92
23,1	0,18	3,57	4,90	4,77	2,99	5,92
23,1	1,40	3,57	4,94	4,78	3,00	5,93
23,1	1,57	3,58	4,92	4,78	3,00	5,94
23,1	2,13	3,59	4,96	4,81	3,00	5,96
23,1	2,35	3,61	4,96	4,80	3,01	5,98
23,1	2,87	3,64	4,99	4,82	3,01	5,99
23,1	3,32	3,65	5,01	4,83	3,03	6,01
23,1	3,37	3,65	5,01	4,84	3,02	6,01
23,1	3,83	3,67	5,02	4,85	3,04	6,04
23,1	4,82	3,70	5,06	4,88	3,06	6,06
23,1	5,73	3,74	5,09	4,91	3,09	6,12
23,1	6,60	3,78	5,13	4,94	3,12	6,16
23,1	7,57	3,78	5,16	4,98	3,15	6,20
23,1	8,89	3,81	5,20	5,03	3,17	6,24
23,1	11,23	3,87	5,28	5,10	3,24	6,33
23,1	14,32	3,93	5,38	5,19	3,31	6,42
23,1	16,36	3,97	5,44	5,24	3,35	6,48
23,1	18,93	4,02	5,51	5,30	3,39	6,55
23,1	19,35	4,02	5,52	5,31	3,39	6,54
23,1	20,40	4,04	5,55	5,32	3,42	6,57
23,1	21,88	4,07	5,61	5,34	3,45	6,62
23,1	22,38	4,08	5,61	5,37	3,45	6,65
23,1	23,15	4,09	5,62	5,37	3,45	6,64
23,1	23,73	4,10	5,64	5,38	3,47	6,65

Tabela A.2 Perda de Massa aos 7 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
15,5	0,00	4,11	5,68	5,41	3,48	6,66
15,5	0,92	4,22	5,68	5,41	3,51	6,61
15,5	1,47	4,15	5,71	5,45	3,50	6,71
15,5	1,60	4,18	5,71	5,46	3,51	6,70
15,5	1,93	4,17	5,74	5,47	3,52	6,71
15,5	2,27	4,18	5,74	5,47	3,53	6,74
15,5	3,37	4,35	5,87	5,56	3,60	6,79
15,5	3,50	4,39	5,91	5,58	3,60	6,79
15,5	4,30	4,43	5,94	5,61	3,63	6,82
15,5	4,50	4,47	5,97	5,63	3,65	6,85
15,5	5,47	4,54	6,01	5,67	3,68	6,89
15,5	6,18	4,59	6,07	5,73	3,74	6,96
15,5	6,67	4,61	6,10	5,75	3,76	6,98
15,5	6,68	4,63	6,12	5,76	3,76	7,01
15,5	7,50	4,66	6,15	5,80	3,81	7,05
15,5	8,25	4,71	6,19	5,83	3,83	7,07
15,5	9,58	4,78	6,27	5,90	3,88	7,14
15,5	11,35	4,86	6,37	5,99	3,95	7,23
15,5	13,38	4,94	6,47	6,08	4,01	7,33
15,5	15,57	5,02	6,57	6,17	4,08	7,42
15,5	16,57	5,06	6,62	6,20	4,11	7,46
15,5	18,47	5,11	6,69	6,27	4,16	7,54
15,5	20,62	5,17	6,77	6,33	4,21	7,62
15,5	22,63	5,22	6,84	6,39	4,26	7,68
15,5	23,25	5,23	6,86	6,40	4,27	7,70
15,5	24,25	5,26	6,91	6,44	4,30	7,72
15,5	24,33	5,25	6,89	6,43	4,29	7,74

Tabela A.7- Perda de Massa aos 28 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
85,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85,1	0,37	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02
85,1	0,40	0,01	0,02	0,04	0,02	0,03
85,1	0,70	0,02	0,03	0,08	0,03	0,03
85,1	1,23	0,05	0,05	0,10	0,04	0,06
85,1	1,82	0,08	0,07	0,15	0,06	0,08
85,1	2,27	0,10	0,08	0,18	0,05	0,10

Tabela A.3 - Perda de Massa aos 28 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
85,1	3,27	0,13	0,14	0,23	0,08	0,17
85,1	3,43	0,14	0,15	0,27	0,07	0,18
85,1	4,03	0,15	0,17	0,30	0,09	0,21
85,1	4,22	0,17	0,19	0,33	0,08	0,23
85,1	5,10	0,18	0,22	0,39	0,10	0,27
85,1	5,22	0,18	0,23	0,39	0,11	0,29
85,1	6,12	0,20	0,28	0,46	0,11	0,32
85,1	6,25	0,20	0,27	0,45	0,12	0,34
85,1	7,10	0,23	0,31	0,51	0,12	0,38
85,1	10,00	0,29	0,41	0,67	0,16	0,52
85,1	13,00	0,33	0,49	0,79	0,18	0,61
85,1	16,00	0,36	0,56	0,88	0,20	0,68
85,1	18,00	0,38	0,60	0,93	0,21	0,72
85,1	19,50	0,39	0,62	0,96	0,22	0,74
85,1	20,30	0,39	0,63	0,97	0,22	0,75
85,1	21,85	0,40	0,65	1,00	0,23	0,79
85,1	21,87	0,40	0,64	1,01	0,22	0,76
85,1	22,85	0,41	0,67	1,02	0,23	0,80
85,1	22,90	0,41	0,66	1,02	0,22	0,78
85,1	24,17	0,41	0,68	1,04	0,24	0,80
85,1	25,05	0,43	0,69	1,06	0,24	0,81
75,5	0,00	0,42	0,69	1,07	0,27	0,84
75,5	0,33	0,44	0,71	1,10	0,30	0,84
75,5	1,05	0,45	0,73	1,12	0,32	0,87
75,5	1,43	0,46	0,75	1,14	0,32	0,89
75,5	2,10	0,48	0,76	1,17	0,34	0,91
75,5	2,13	0,48	0,76	1,16	0,31	0,90
75,5	3,10	0,49	0,80	1,19	0,35	0,96
75,5	3,32	0,50	0,77	1,19	0,33	0,93
75,5	4,02	0,52	0,84	1,23	0,38	1,02
75,5	5,30	0,55	0,90	1,28	0,41	1,06
75,5	6,40	0,56	0,90	1,31	0,44	1,09
75,5	7,42	0,60	0,94	1,35	0,47	1,13
75,5	8,42	0,63	0,98	1,37	0,47	1,17
75,5	12,50	0,70	1,07	1,45	0,52	1,28
75,5	14,00	0,72	1,10	1,53	0,53	1,31
75,5	15,50	0,74	1,12	1,57	0,55	1,34
75,5	16,70	0,76	1,13	1,59	0,56	1,36
75,5	18,50	0,78	1,15	1,62	0,57	1,39
75,5	19,00	0,79	1,16	1,63	0,57	1,39

Tabela A.3 - Perda de Massa aos 28 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
75,5	20,08	0,79	1,16	1,64	0,56	1,38
75,5	21,90	0,81	1,19	1,65	0,58	1,42
75,5	23,38	0,83	1,20	1,69	0,61	1,48
75,5	23,70	0,82	1,22	1,68	0,62	1,48
75,5	24,77	0,84	1,20	1,70	0,63	1,46
75,5	24,83	0,85	1,20	1,71	0,62	1,45
75,5	26,50	0,84	1,21	1,71	0,60	1,46
75,5	27,50	0,85	1,22	1,72	0,60	1,47
75,5	28,90	0,86	1,22	1,73	0,61	1,48
75,5	30,10	0,86	1,23	1,74	0,61	1,48
75,5	31,40	0,87	1,23	1,75	0,61	1,49
75,5	32,00	0,87	1,23	1,75	0,61	1,49
59,1	0,00	0,88	1,23	1,73	0,64	1,54
59,1	0,75	0,92	1,29	1,82	0,68	1,57
59,1	0,88	0,94	1,31	1,81	0,68	1,59
59,1	1,45	0,96	1,33	1,88	0,69	1,61
59,1	1,97	0,99	1,38	1,87	0,71	1,62
59,1	2,45	1,00	1,39	1,89	0,73	1,68
59,1	2,85	1,02	1,43	1,93	0,74	1,68
59,1	3,20	1,05	1,44	1,92	0,76	1,72
59,1	3,70	1,08	1,48	1,95	0,77	1,76
59,1	4,05	1,11	1,53	1,99	0,80	1,84
59,1	5,05	1,15	1,58	2,04	0,84	1,90
59,1	6,05	1,22	1,61	2,09	0,86	1,96
59,1	7,18	1,24	1,69	2,15	0,89	2,03
59,1	8,90	1,33	1,80	2,22	0,97	2,13
59,1	10,60	1,39	1,88	2,28	1,02	2,19
59,1	12,70	1,45	1,96	2,36	1,07	2,25
59,1	14,30	1,49	2,01	2,41	1,11	2,28
59,1	15,80	1,52	2,06	2,45	1,13	2,31
59,1	18,52	1,56	2,12	2,51	1,17	2,31
59,1	20,83	1,59	2,20	2,57	1,20	2,36
59,1	21,62	1,61	2,22	2,60	1,20	2,39
59,1	22,28	1,62	2,22	2,60	1,22	2,38
43,2	0,00	1,62	2,24	2,61	1,21	2,41
43,2	0,88	1,66	2,28	2,66	1,27	2,45
43,2	0,93	1,68	2,27	2,66	1,24	2,45
43,2	1,63	1,68	2,31	2,69	1,28	2,48
43,2	2,23	1,67	2,29	2,70	1,28	2,49
43,2	2,38	1,69	2,34	2,72	1,30	2,51

Tabela A.3 - Perda de Massa aos 28 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
43,2	3,33	1,72	2,41	2,76	1,33	2,55
43,2	3,97	1,74	2,42	2,79	1,35	2,57
43,2	4,27	1,77	2,46	2,82	1,37	2,60
43,2	4,75	1,81	2,48	2,83	1,37	2,61
43,2	5,53	1,83	2,53	2,86	1,42	2,65
43,2	5,63	1,85	2,55	2,89	1,42	2,66
43,2	6,05	1,84	2,55	2,89	1,44	2,68
43,2	7,05	1,92	2,64	2,94	1,48	2,72
43,2	7,93	1,96	2,70	2,99	1,52	2,76
43,2	8,87	2,01	2,73	3,01	1,55	2,81
43,2	9,87	2,03	2,81	3,07	1,60	2,83
43,2	12,50	2,12	2,94	3,17	1,68	2,93
43,2	16,70	2,22	3,10	3,31	1,78	3,06
43,2	18,90	2,27	3,16	3,36	1,83	3,11
43,2	21,22	2,29	3,21	3,41	1,85	3,15
43,2	22,63	2,31	3,26	3,43	1,88	3,18
43,2	23,87	2,35	3,27	3,46	1,90	3,20
43,2	24,82	2,38	3,31	3,48	1,92	3,22
43,2	25,00	2,36	3,29	3,49	1,91	3,22
43,2	25,72	2,39	3,32	3,51	1,93	3,22
43,2	25,98	2,39	3,30	3,50	1,93	3,23
43,2	26,52	2,41	3,33	3,53	1,94	3,24
33,1	0	2,43	3,32	3,52	1,94	3,24
33,1	0,98	2,44	3,36	3,45	1,92	3,24
33,1	1,50	2,45	3,39	3,56	1,95	3,27
33,1	1,92	2,46	3,39	3,58	1,94	3,26
33,1	2,42	2,49	3,42	3,62	1,98	3,30
33,1	2,75	2,49	3,41	3,61	1,99	3,31
33,1	3,37	2,50	3,44	3,62	2,03	3,35
33,1	3,65	2,52	3,47	3,65	2,03	3,35
33,1	4,45	2,53	3,51	3,69	2,05	3,37
33,1	4,83	2,55	3,51	3,68	2,06	3,40
33,1	5,37	2,57	3,54	3,71	2,09	3,41
33,1	5,93	2,57	3,54	3,73	2,11	3,43
33,1	7,65	2,63	3,63	3,75	2,15	3,48
33,1	7,67	2,64	3,64	3,77	2,14	3,50
33,1	8,53	2,68	3,68	3,82	2,19	3,52
33,1	10,30	2,73	3,75	3,87	2,23	3,59
33,1	12,38	2,79	3,82	3,92	2,27	3,65
33,1	17,45	2,89	3,94	4,04	2,35	3,76

Tabela A.3 - Perda de Massa aos 28 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
33,1	19,53	2,92	3,98	4,07	2,37	3,79
33,1	22,85	2,96	4,06	4,13	2,41	3,83
33,1	23,50	2,96	4,06	4,13	2,41	3,83
33,1	24,30	2,96	4,04	4,15	2,41	3,83
33,1	25,80	2,98	4,07	4,16	2,43	3,86
23,1	0,00	2,98	4,08	4,14	2,43	3,86
23,1	1,13	3,04	4,08	4,15	2,46	3,84
23,1	1,17	3,02	4,10	4,15	2,44	3,85
23,1	1,85	3,03	4,10	4,16	2,48	3,86
23,1	2,17	3,03	4,12	4,16	2,49	3,88
23,1	3,20	3,05	4,15	4,20	2,55	3,91
23,1	4,15	3,06	4,21	4,24	2,57	3,94
23,1	4,20	3,07	4,17	4,22	2,55	3,94
23,1	5,13	3,09	4,22	4,28	2,62	3,97
23,1	5,28	3,09	4,23	4,27	2,62	3,98
23,1	6,15	3,11	4,26	4,31	2,67	4,02
23,1	6,82	3,14	4,29	4,34	2,70	4,04
23,1	7,37	3,15	4,33	4,36	2,71	4,08
23,1	7,45	3,16	4,28	4,37	2,70	4,06
23,1	8,48	3,18	4,35	4,41	2,75	4,10
23,1	11,38	3,27	4,48	4,51	2,85	4,21
23,1	13,55	3,32	4,54	4,57	2,91	4,28
23,1	17,45	3,39	4,64	4,65	2,99	4,38
23,1	19,02	3,41	4,67	4,68	3,01	4,41
23,1	21,97	3,45	4,71	4,70	3,03	4,45
23,1	22,82	3,47	4,76	4,73	3,07	4,48
23,1	23,37	3,47	4,73	4,74	3,05	4,47
23,1	24,25	3,48	4,75	4,75	3,07	4,50
23,1	24,90	3,51	4,77	4,78	3,10	4,52
15,5	0,00	3,51	4,79	4,77	3,10	4,51
15,5	0,95	3,57	4,84	4,80	3,16	4,55
15,5	1,20	3,59	4,82	4,81	3,13	4,57
15,5	1,28	3,62	4,86	4,84	3,17	4,60
15,5	2,95	3,63	4,90	4,91	3,23	4,69
15,5	3,03	3,63	4,89	4,85	3,19	4,66
15,5	3,80	3,64	4,90	4,86	3,22	4,70
15,5	4,25	3,64	4,90	4,88	3,23	4,71
15,5	6,83	3,72	5,03	4,97	3,35	4,83
15,5	7,60	3,73	5,05	4,99	3,39	4,88
15,5	8,05	3,74	5,06	5,01	3,42	4,89

Tabela A.3 - Perda de Massa aos 28 Dias

Umidade (%)	Tempo (horas)	Δm (%)				
		REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
15,5	10,40	3,81	5,18	5,11	3,53	5,01
15,5	14,23	3,91	5,32	5,24	3,69	5,16
15,5	16,71	3,98	5,40	5,31	3,76	5,24
15,5	18,54	4,02	5,45	5,36	3,81	5,29
15,5	19,98	4,06	5,48	5,39	3,84	5,33
15,5	20,88	4,07	5,49	5,42	3,84	5,32
15,5	24,68	4,17	5,55	5,50	3,90	5,40
15,5	25,25	4,18	5,56	5,52	3,95	5,44

Figura A.1- Perda de Massa aos 3 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

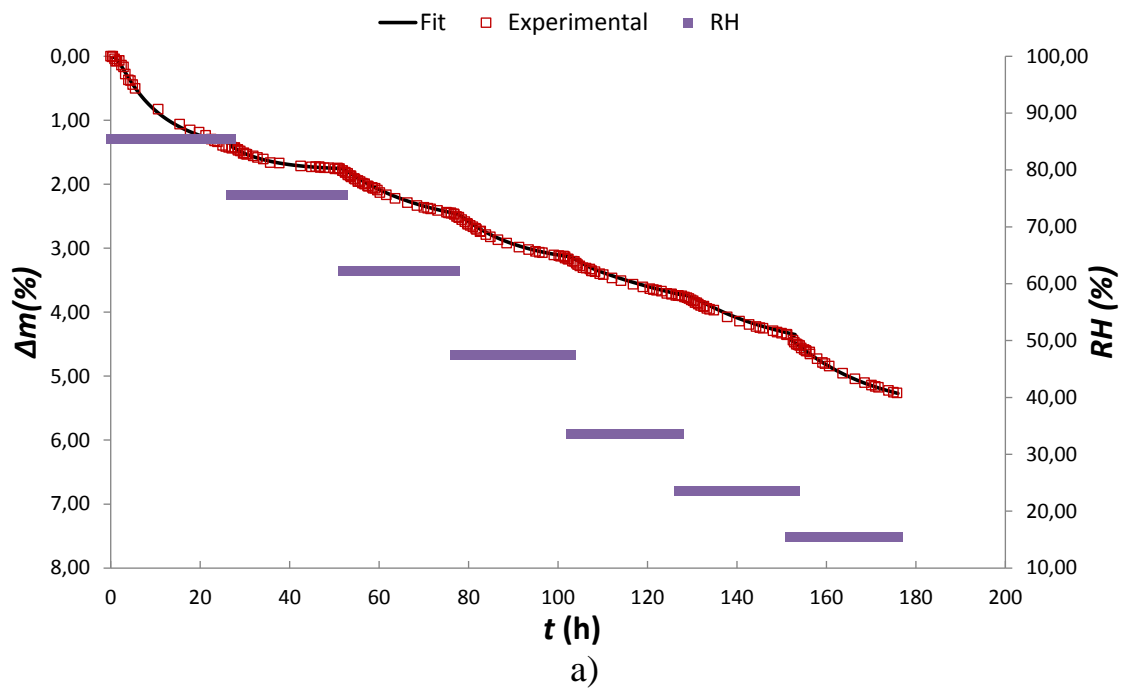
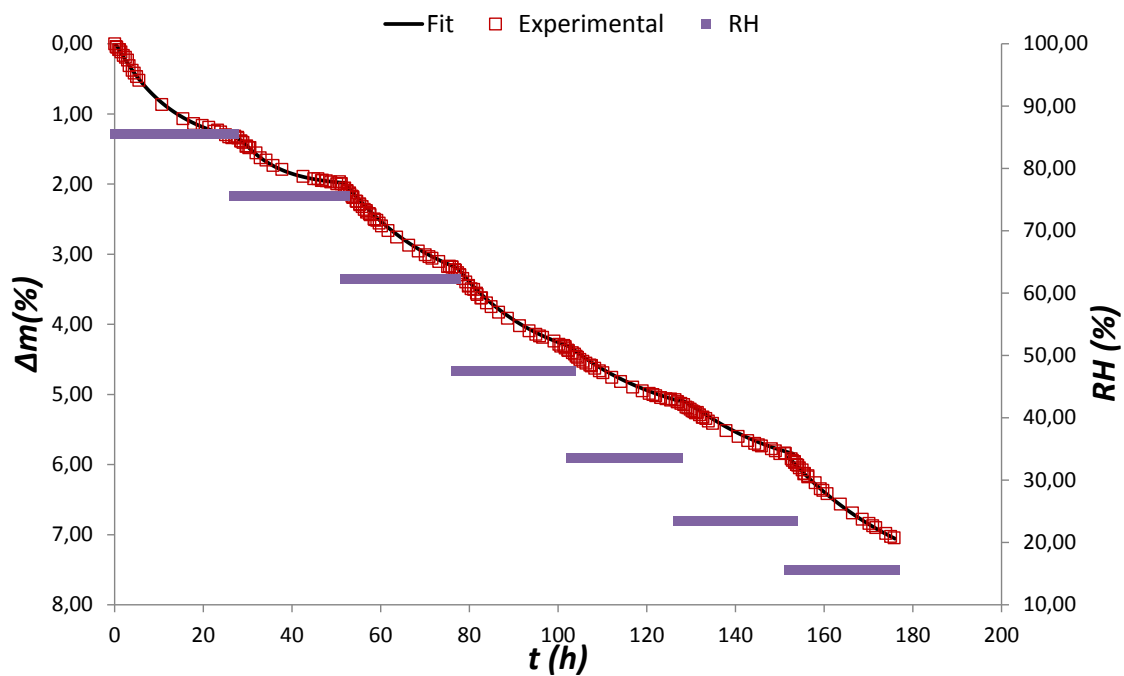
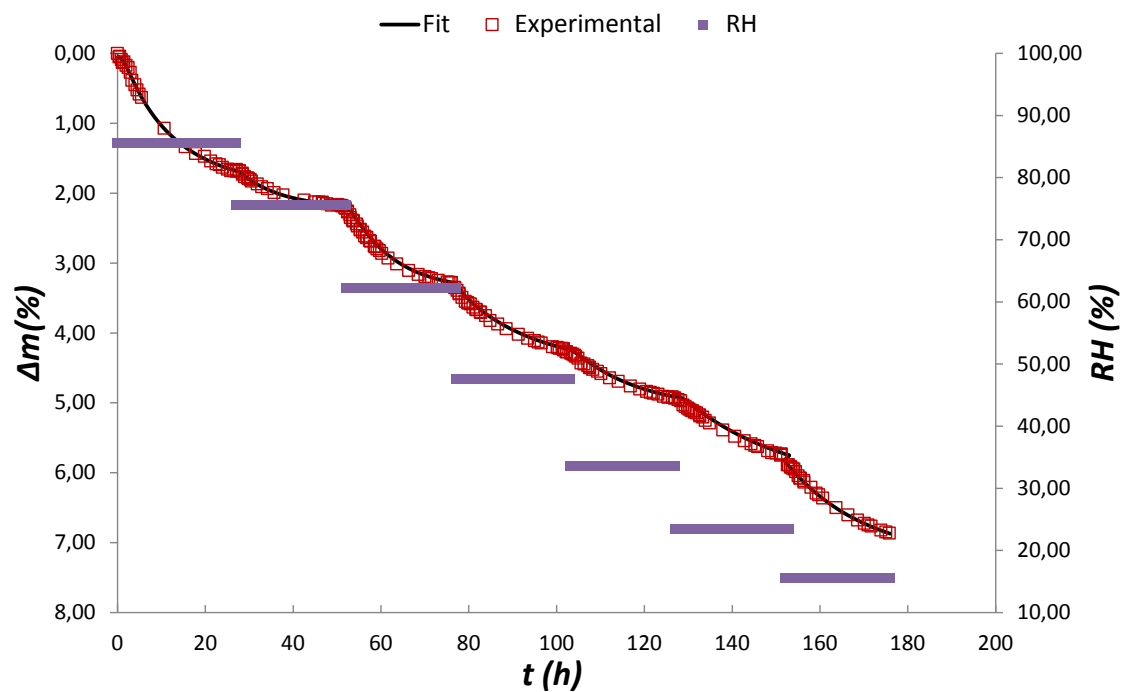


Figura A.1 - Perda de Massa aos 3 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

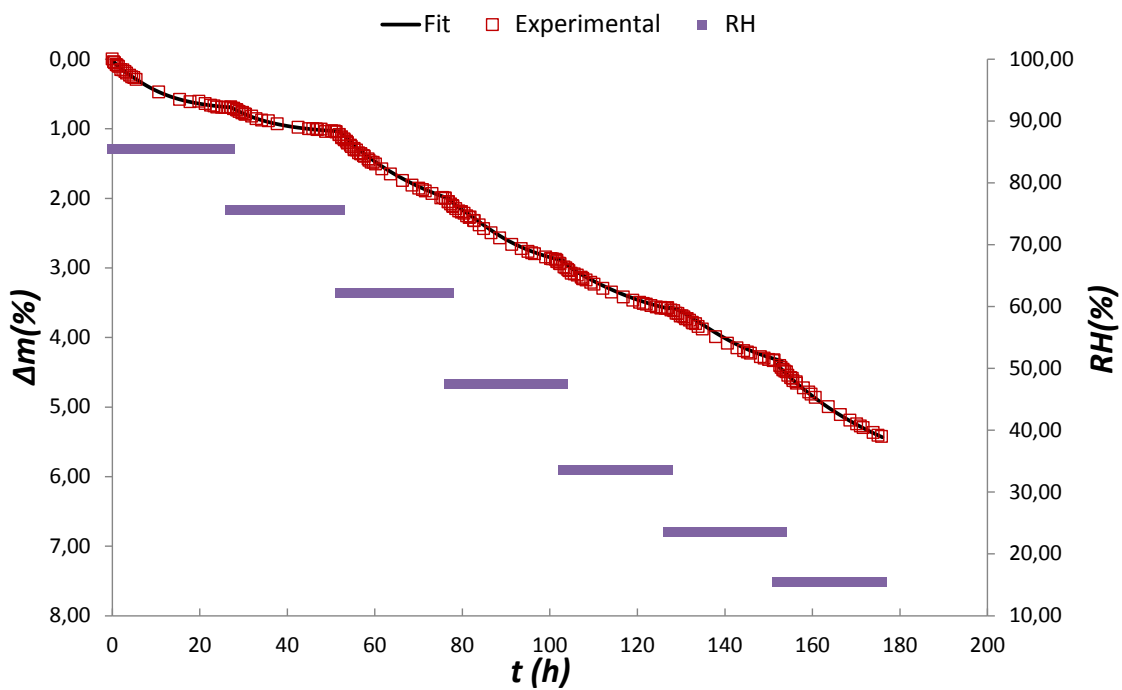


b)

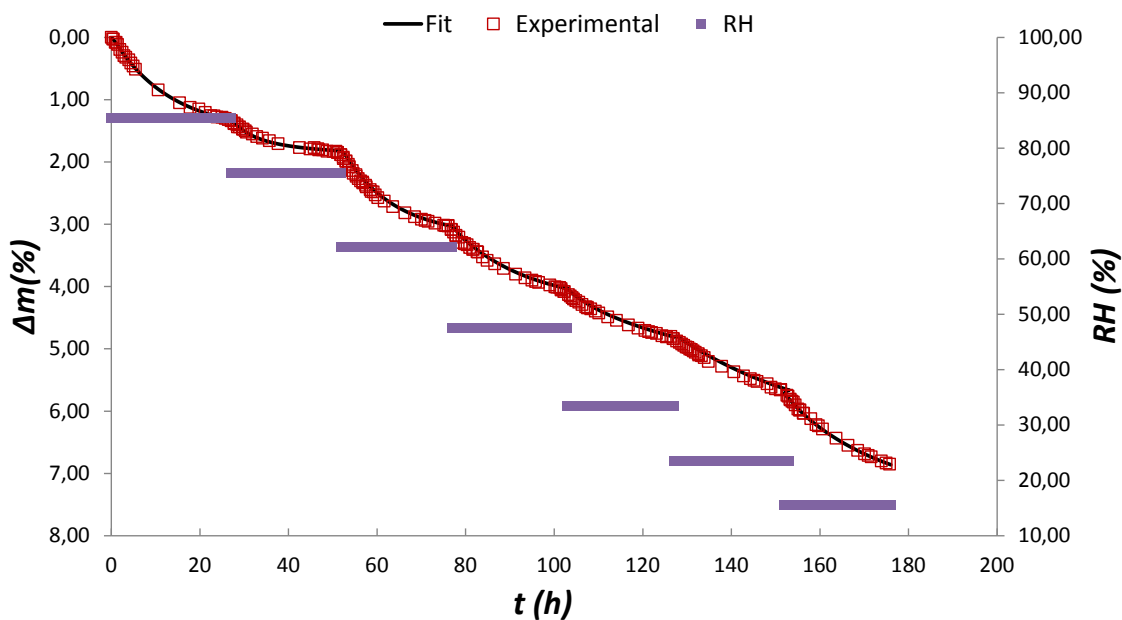


c)

Figura A.1 - Perda de Massa aos 3 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1



d)



e)

Figura A.2- Perda de Massa aos 7 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

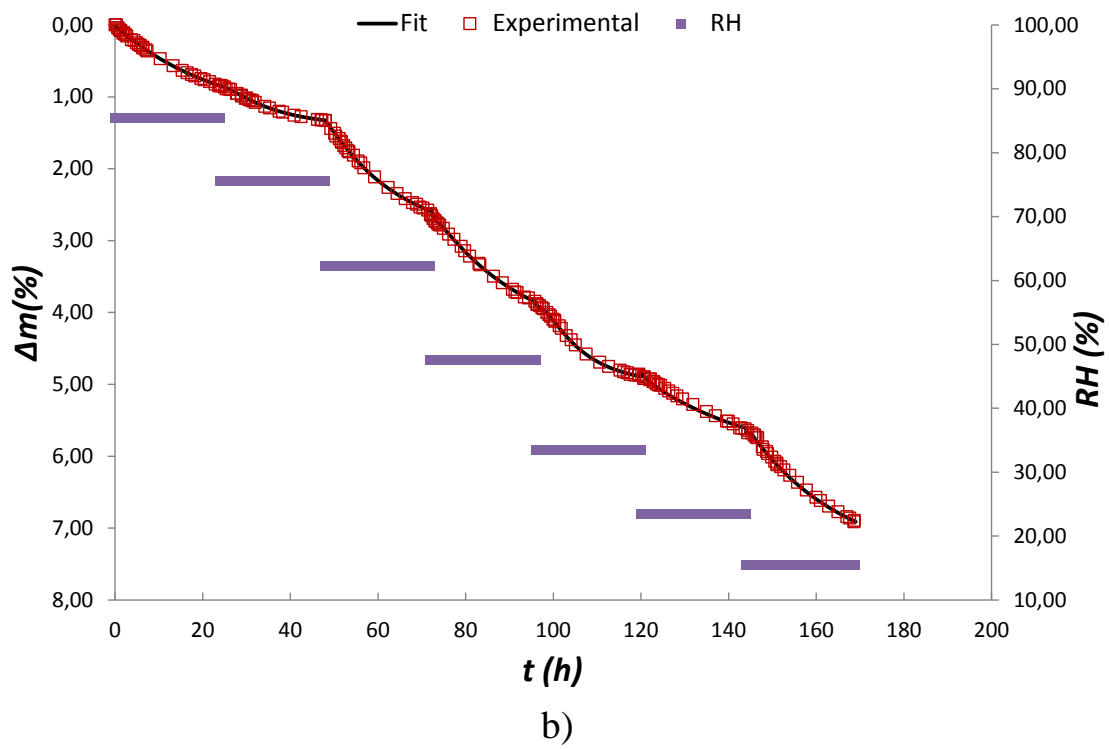
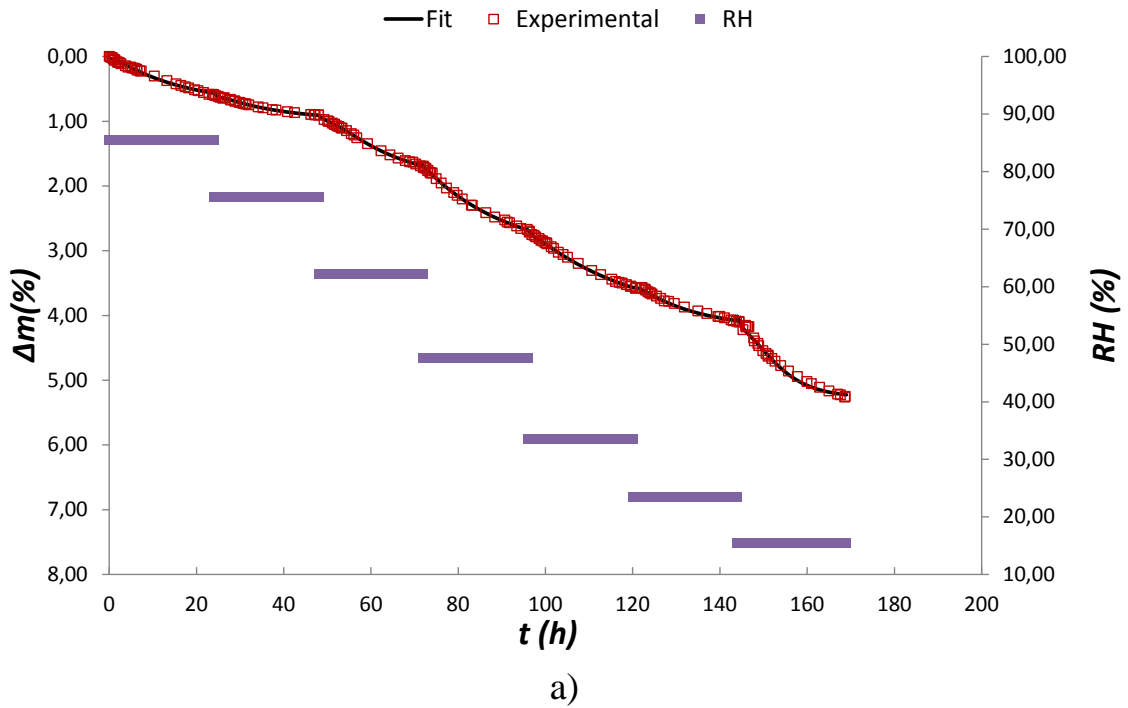
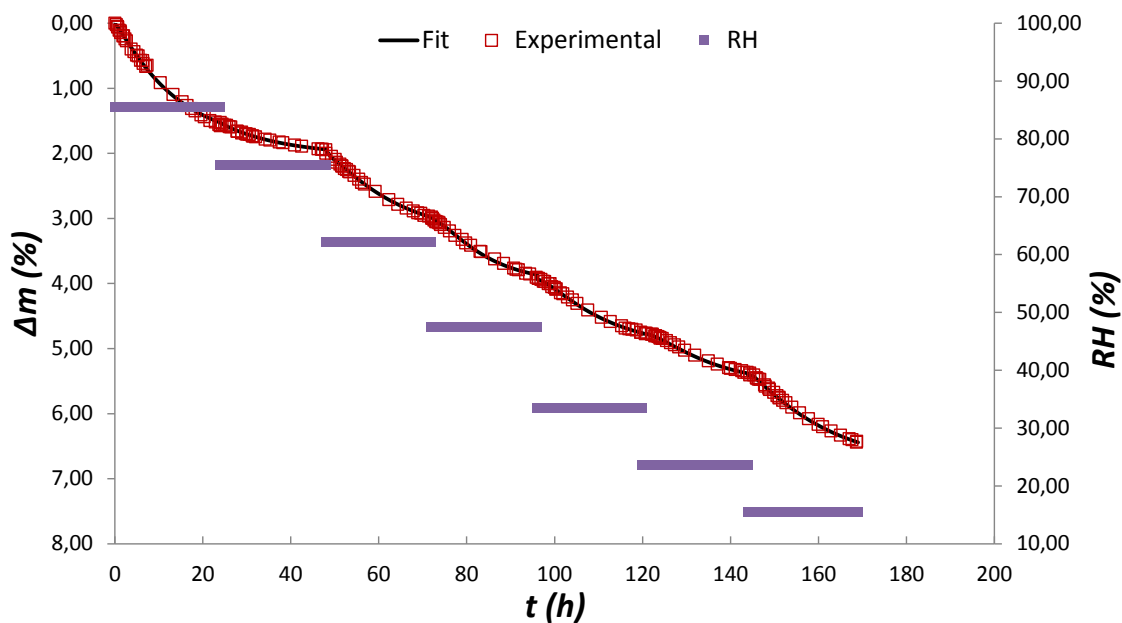
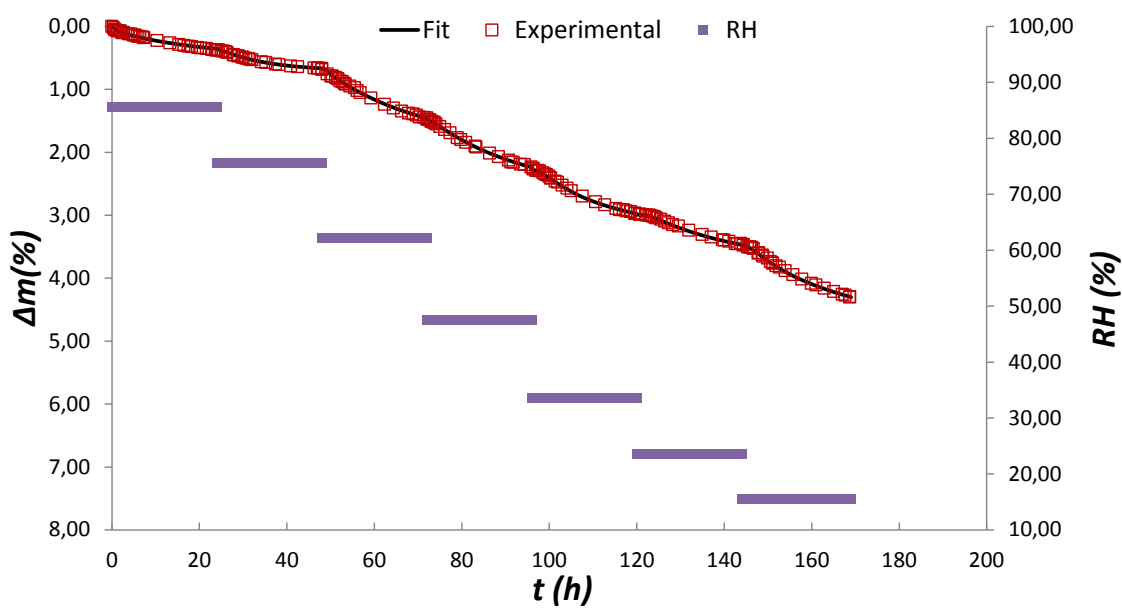


Figura A.2 - Perda de Massa aos 7 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1



c)



d)

Figura A.2 - Perda de Massa aos 7 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

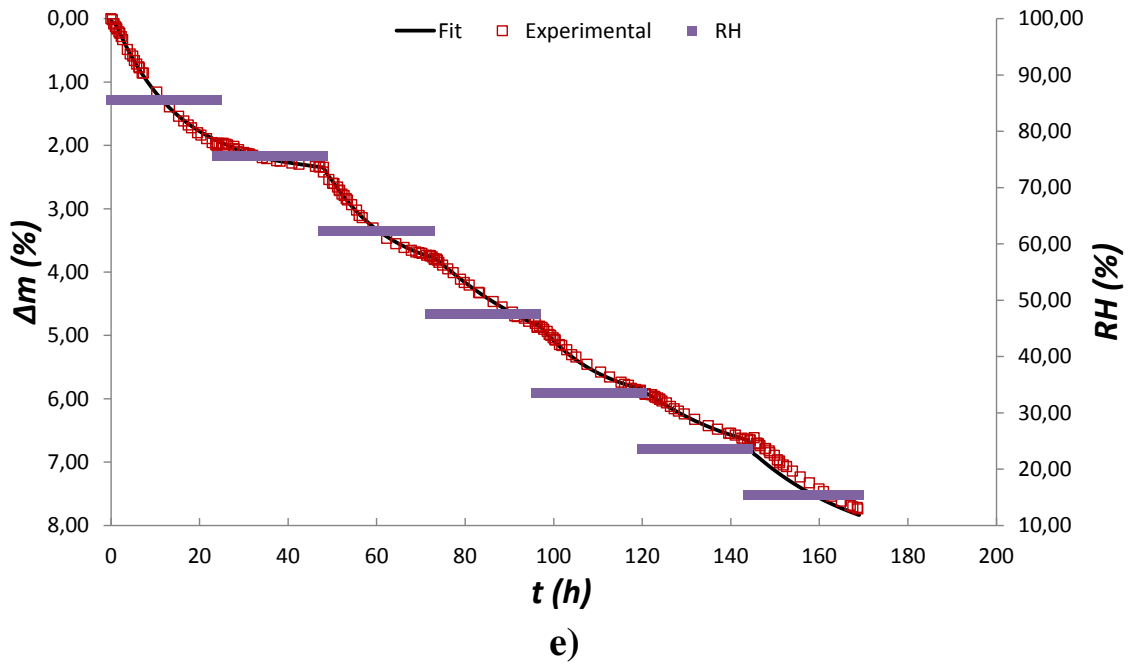


Figura A.3 - Perda de Massa aos 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

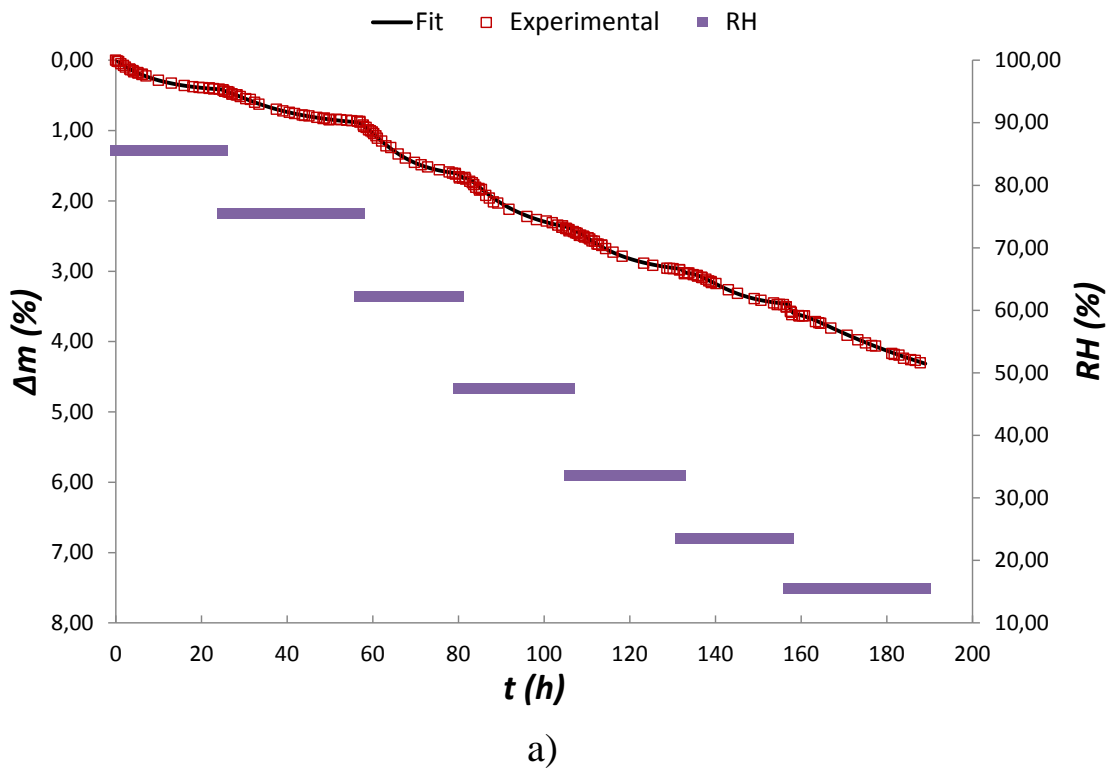


Figura A.3 - Perda de Massa aos 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

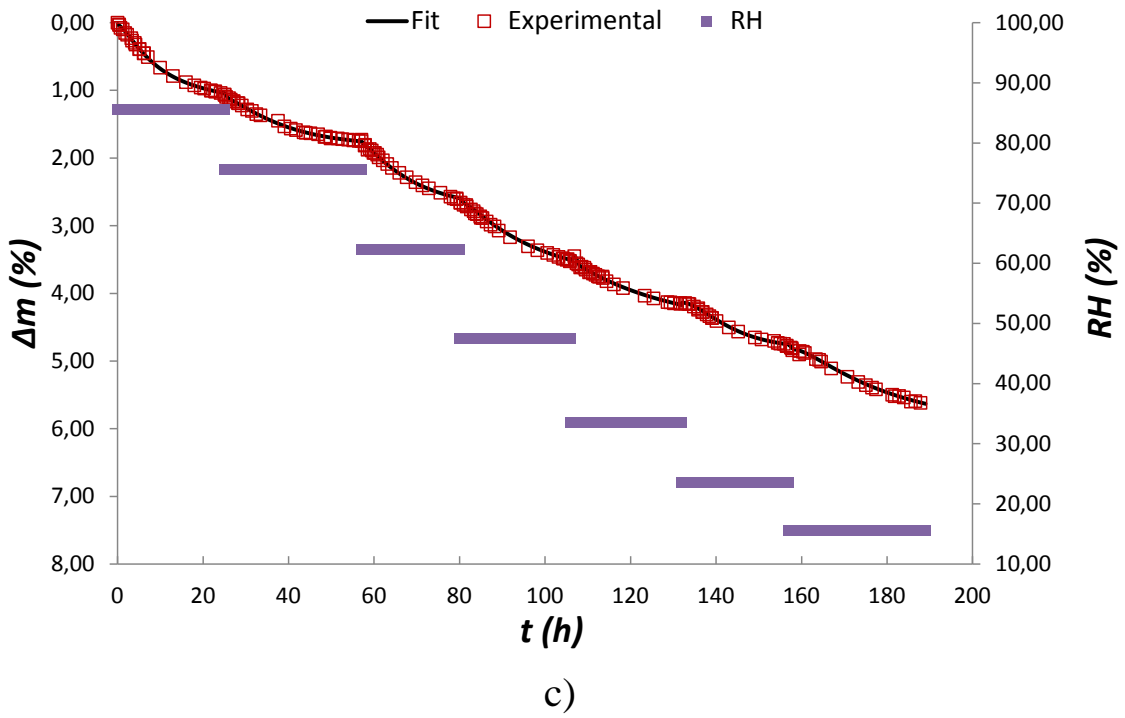
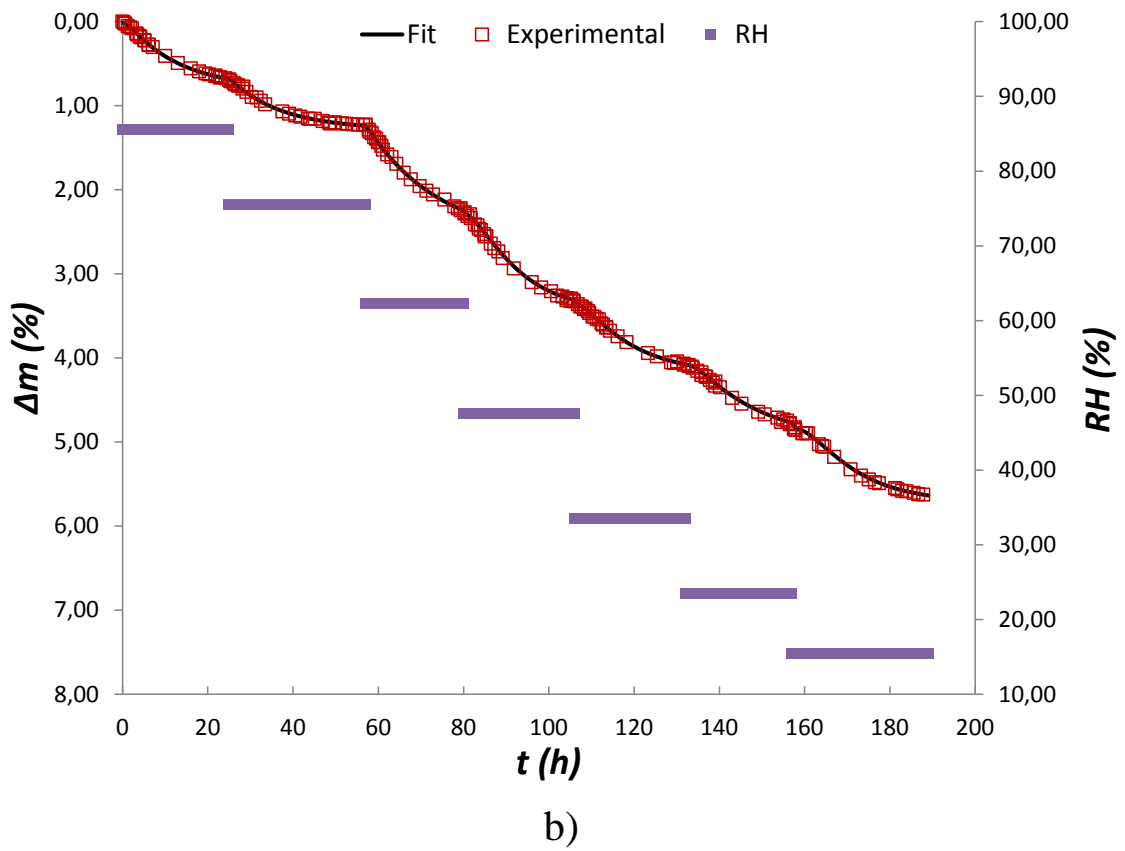
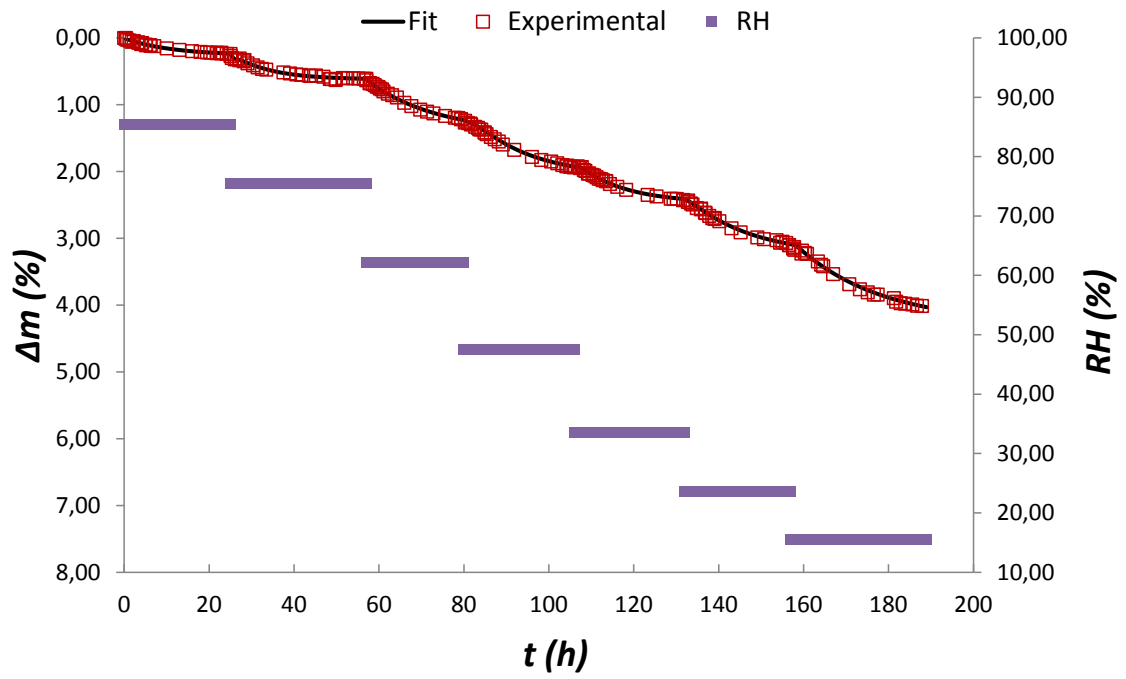
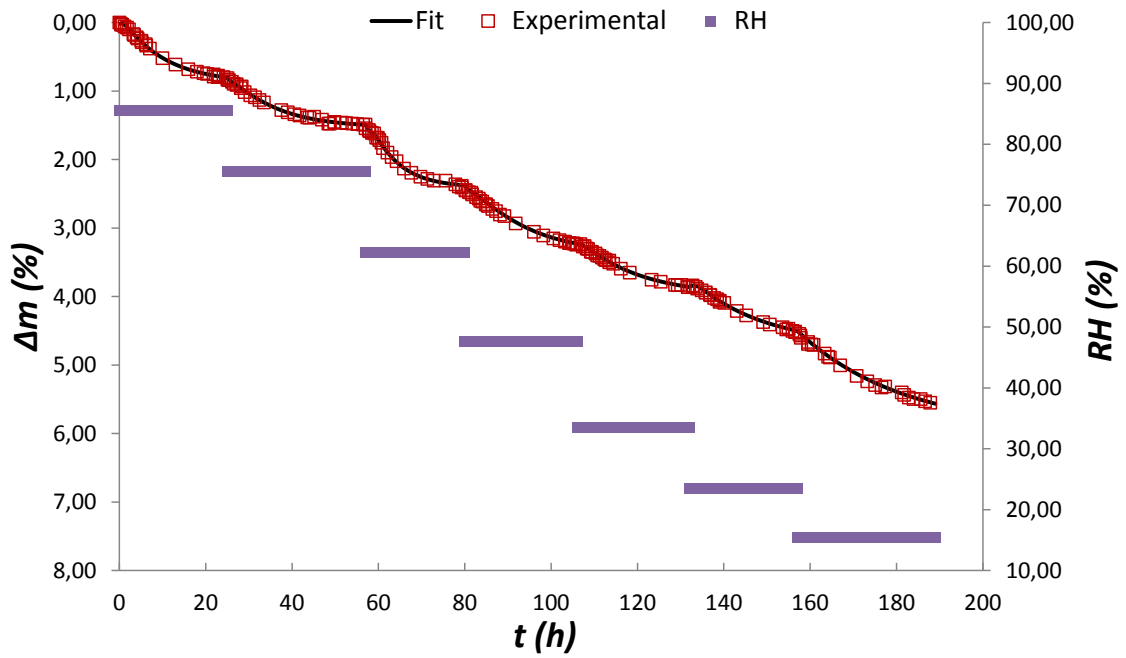


Figura A.3 - Perda de Massa aos 28 dias; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1



d)



ANEXO B – RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIDADE

Tabela B.1- Resultados do Ensaio de Porosidade

Misturas	Amostra	Idade	Pesos		Volume (mm ³)	Mat, Secos (g)	Δm	Δm (média)	ϕ	ϕ Média	ϕ Inicial
			Peso Sat, (g)	Seco Estufa (g)							
REF030	1	28	30,25	25,67	19088,97	13,19	4,5842	4,590	0,240	0,247	0,691
	2	28	30,07	25,48	18036,90	12,46	4,5959		0,255		
REF035	1	28	29,31	24,85	18988,72	15,31	4,4652	4,492	0,235	0,239	0,806
	2	28	30,35	25,83	18557,77	14,96	4,5197		0,244		
SAP030	1	28	31,23	26,09	18385,83	12,70	5,1457	5,411	0,280	0,278	0,691
	2	28	34,67	28,99	20538,24	16,32	5,6769		0,276		
NS1	1	28	30,97	26,15	18763,67	12,96	4,8199	4,816	0,257	0,262	0,691
	2	28	30,73	25,92	18025,29	12,45	4,8118		0,267		
SAP030NS1	1	28	32,39	26,86	19598,82	15,57	5,5356	5,325	0,282	0,264	0,795
	2	28	29,42	24,31	20864,53	16,58	5,1137		0,245		
REF030	1	7	29,78	25,27	14746,86	10,19	4,5184	4,285	0,306	0,268	0,691
	2	7	26,49	22,44	17690,45	12,22	4,0512		0,229		
REF035	1	7	35,92	29,96	20422,40	16,46	5,9563	6,073	0,292	0,296	0,806
	2	7	35,82	29,63	20664,57	16,66	6,1889		0,299		
SAP030	1	7	28,77	23,87	18863,17	13,03	4,9029	4,864	0,260	0,271	0,691
	2	7	27,84	23,02	17119,13	13,60	4,8246		0,282		
NS1	1	7	27,89	23,77	18063,83	12,48	4,1225	4,257	0,228	0,225	0,691
	2	7	29,48	25,09	19770,71	13,66	4,3911		0,222		
SAP030NS1	1	7	25,99	21,45	18851,41	14,98	4,5373	4,838	0,241	0,266	0,795
	2	7	29,06	23,92	17650,96	14,02	5,1383		0,291		
REF030	1	3	30,62	26,28	18396,61	12,71	4,34	5,015	0,236	0,258	0,691
	2	3	43,78	38,09	20257,74	16,10	5,69		0,281		
REF035	1	3	35,68	30,28	20316,16	16,14	5,4	5,470	0,266	0,272	0,795
	2	3	37,36	31,82	19964,1	15,86	5,54		0,277		
SAP030	1	3	26,07	21,28	18193,42	14,46	4,79	4,760	0,263	0,258	0,795
	2	3	28,98	24,25	18687,49	14,85	4,73		0,253		
NS1	1	3	27,92	23,73	17104,49	13,59	4,19	4,090	0,245	0,243	0,795
	2	3	27,24	23,25	16550,31	13,15	3,99		0,241		
SAP030NS1	1	3	26,24	21,66	16570,57	13,17	4,58	4,485	0,276	0,264	0,795
	2	3	26,2	21,81	17452,05	13,87	4,39		0,252		

ANEXO C – ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

Tabela C.1- Resultados Experimentais de Umidade Relativa (RH) e Saturação (S) – Idade de 3 dias

RH(%)	Saturação (S)				
	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
100,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
85,1	0,89	0,91	0,83	0,95	0,87
75,5	0,87	0,86	0,80	0,93	0,86
59,1	0,80	0,75	0,69	0,83	0,76
43,2	0,76	0,69	0,60	0,79	0,68
33,1	0,67	0,63	0,54	0,74	0,58
23,1	0,64	0,59	0,44	0,69	0,52
15,5	0,58	0,47	0,35	0,58	0,44

Tabela C.2- Resultados Experimentais de Umidade Relativa (RH) e Saturação (S) – Idade de 7 dias

RH(%)	Saturação (S)				
	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
100,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
85,1	0,94	0,94	0,83	0,97	0,83
75,5	0,92	0,91	0,82	0,95	0,80
59,1	0,83	0,82	0,70	0,88	0,72
43,2	0,73	0,73	0,64	0,83	0,59
33,1	0,65	0,70	0,55	0,76	0,58
23,1	0,64	0,63	0,50	0,76	0,51
15,5	0,55	0,55	0,39	0,69	0,41

Tabela C.3- Resultados Experimentais de Umidade Relativa (RH) e Saturação (S) – Idade de 28 dias

RH(%)	Saturação (S)				
	REF030	REF035	SAP030	NS1	SAP030NS1
100,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
85,1	0,97	0,95	0,93	0,98	0,95
75,5	0,94	0,91	0,89	0,96	0,91
59,1	0,89	0,82	0,83	0,92	0,86
43,2	0,83	0,77	0,77	0,87	0,81
33,1	0,80	0,72	0,73	0,84	0,77
23,1	0,77	0,67	0,71	0,79	0,73
15,5	0,65	0,62	0,64	0,73	0,66

Figura C.1- Isotermas de dessorção – Idade de 3 dias ; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

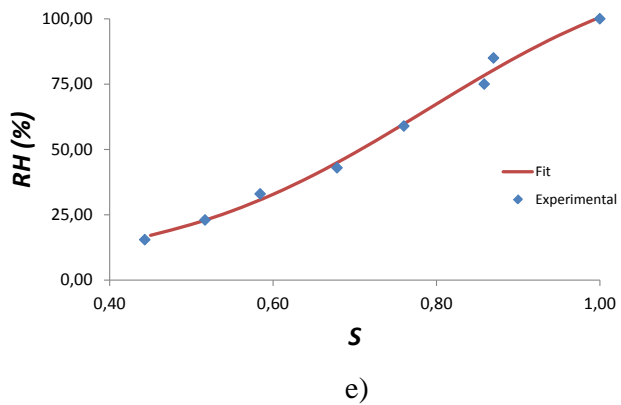
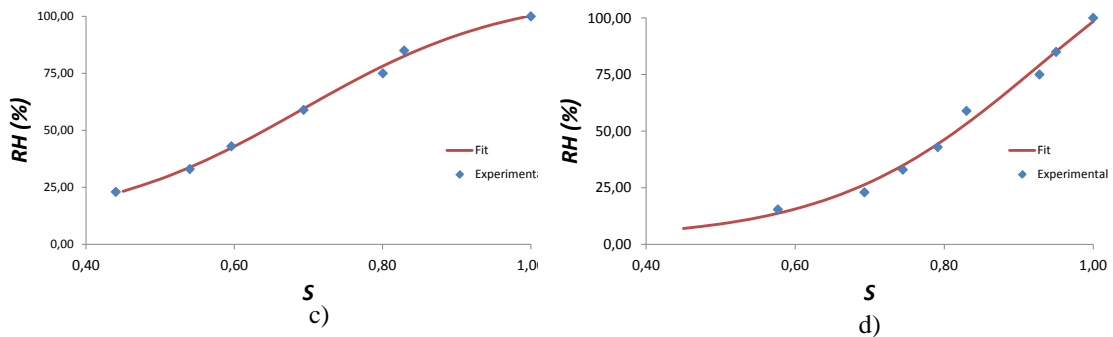
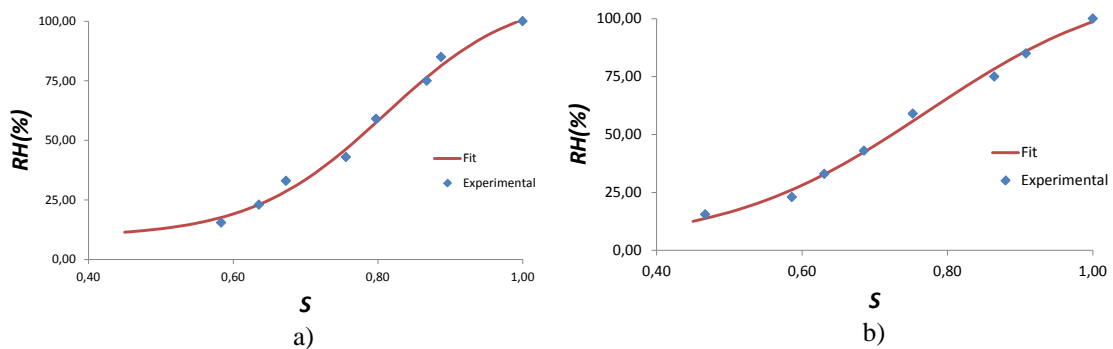
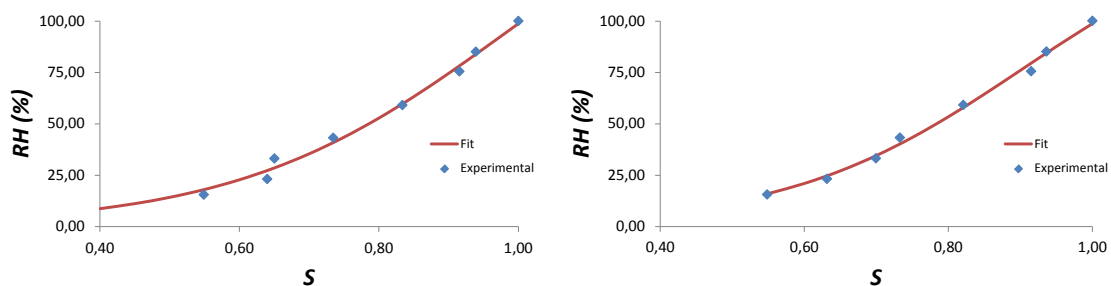
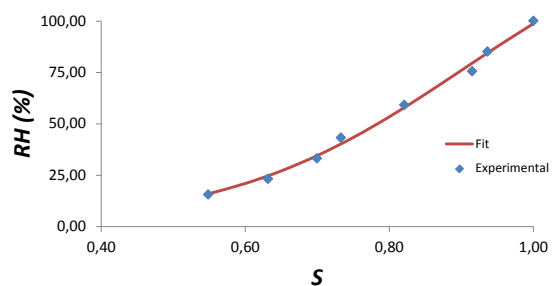


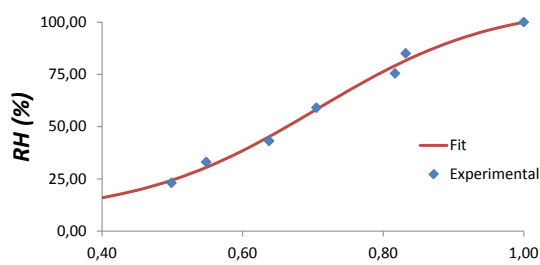
Figura C.2- Isotermas de dessorção – Idade de 7 dias ; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1



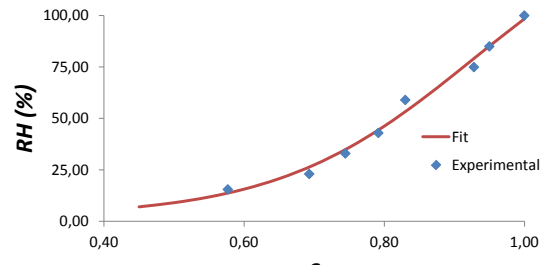
a)



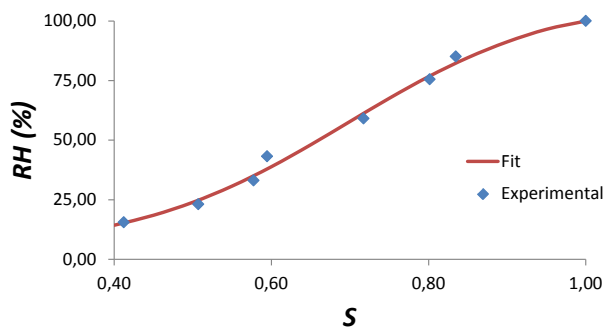
b)



c)

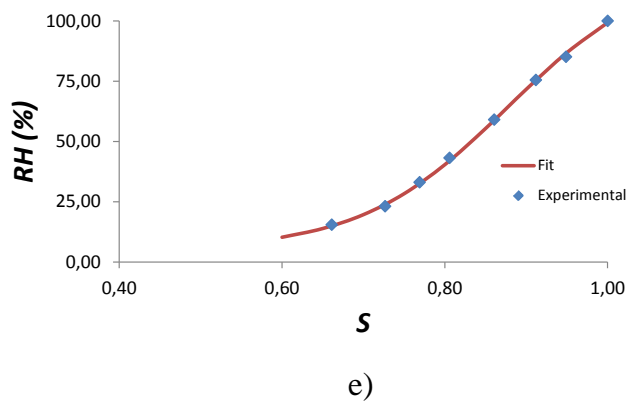
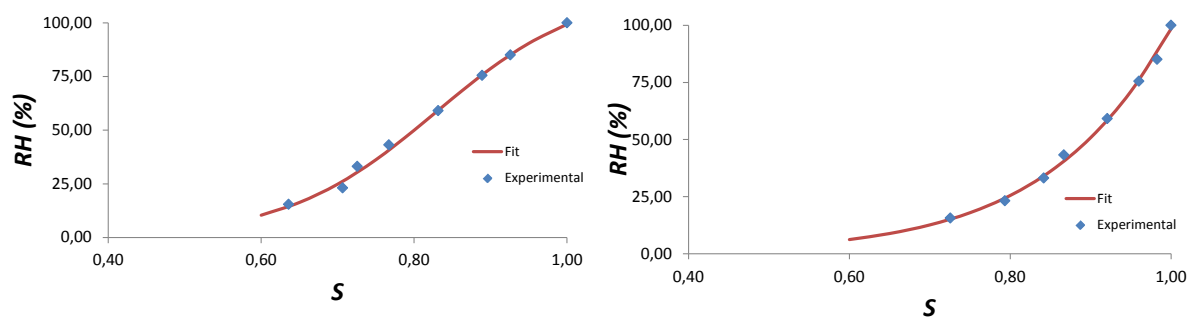
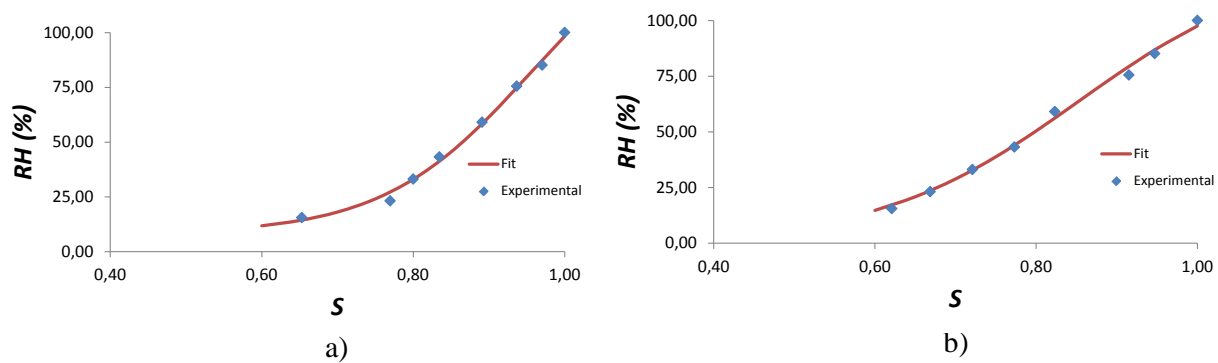


d)



e)

Figura C.3- Isotermas de desorção – Idade de 28 dias ; a) REF030; b) REF035; c) SAP030; d) NS1; e) SAP030NS1

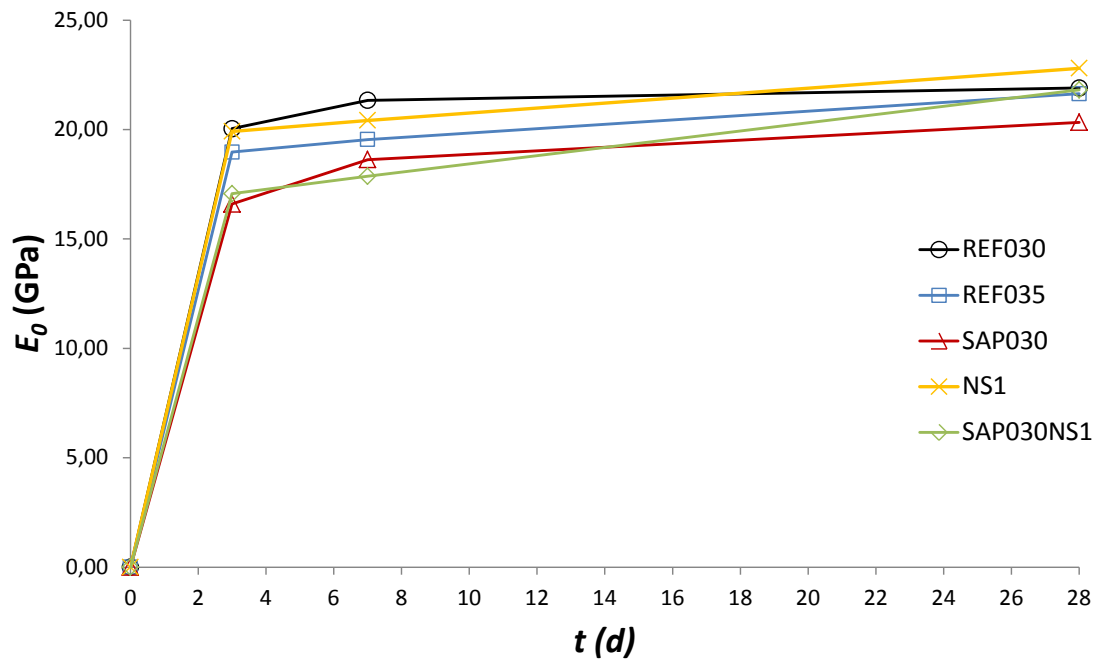


ANEXO D – MÓDULOS DE ELASTICIDADE

Tabela D.1 - Resultados Módulo de Elasticidade (GPa) das Pastas

AMOSTRAS	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
REF030	20,04	21,34	21,90
REF035	18,97	19,55	21,64
SAP030	16,60	18,63	20,33
NS1	19,92	20,42	22,80
SAP030NS1	17,07	17,87	21,81

Figura D.1- Evolução do módulo de elasticidade com a Idade



ANEXO E - RESULTADOS DO ENSAIO DSR

Tabela E.1- Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF030 aos 3 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	6186,15	121,82	6187,35	1,13
1	6034,50	124,37	6035,45	1,18
1/10	5893,70	126,92	5895,10	1,23
1/60	5759,90	172,45	5762,50	1,71
1/600	5550,35	301,47	5558,65	3,11

Tabela E.2- Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF035 aos 3 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	4795,15	81,31	4795,84	0,97
1	4691,60	71,48	4692,14	0,87
1/10	4593,30	83,28	4594,05	1,04
1/60	4510,75	106,45	4512,01	1,35
1/600	4359,05	157,61	4361,90	2,07

Tabela E.3 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030 aos 3 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	5912,70	121,94	5913,96	1,18
1	5746,80	114,65	5747,94	1,14
1/10	5584,00	140,96	5585,78	1,45
1/60	5407,00	199,03	5410,66	2,11
1/600	5302,70	272,61	5309,70	2,94

Tabela E.4 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta NS1 aos 3 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	7726,50	129,48	7727,58	0,96
1	7549,15	119,04	7550,09	0,90
1/10	7382,90	136,02	7384,15	1,06
1/60	7174,80	179,53	7177,05	1,43
1/600	6876,90	311,81	6883,97	2,60

Tabela E.5- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030NS1 aos 3 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	5912,70	121,94	5913,96	1,18
1	5746,80	114,65	5747,94	1,14
1/10	5584,00	140,96	5585,78	1,45
1/60	5407,00	199,03	5410,66	2,11
1/600	5302,70	272,61	5309,70	2,94

Tabela E.6 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF030 aos 7 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	7141,30	226,72	7144,90	1,82
1	6985,30	212,70	6988,54	1,74
1/10	6850,85	248,92	6855,37	2,08
1/60	6719,50	373,39	6729,87	3,18
1/600	6440,15	762,92	6485,18	6,76

Tabela E.7 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF035 aos 7 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	4610,65	58,81	4611,03	0,73
1	4516,40	56,91	4516,76	0,72
1/10	4425,80	70,74	4426,37	0,92
1/60	4312,85	100,34	4314,02	1,33
1/600	4164,05	172,56	4167,62	2,37

Tabela E.8- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030 aos 7 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	6053,10	113,87	6054,17	1,08
1	5913,40	115,53	5914,53	1,12
1/10	5772,45	154,45	5774,52	1,53
1/60	5619,50	202,83	5623,16	2,07
1/600	5440,50	270,25	5447,21	2,84

Tabela E.9 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta NS1 aos 7 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	7285,65	121,60	7286,66	0,96
1	7134,75	128,08	7135,90	1,03
1/10	6966,30	174,21	6968,48	1,43
1/60	6817,40	240,61	6821,64	2,02
1/600	6736,40	298,40	6743,01	2,54

Tabela E.10- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030NS1 aos 7 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	5912,70	121,94	5913,96	1,18
1	5746,80	114,65	5747,94	1,14
1/10	5584,00	140,96	5585,78	1,45
1/60	5407,00	199,03	5410,66	2,11
1/600	5302,70	272,61	5309,70	2,94

Tabela E.11 - Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF030 aos 28 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	7893,40	192,04	7895,74	1,39
1	7637,75	208,70	7640,60	1,57
1/10	7359,35	261,96	7364,01	2,04
1/60	7074,25	375,95	7084,23	3,04
1/600	6543,45	447,90	6558,76	3,92

Tabela E.12- Resultados do Ensaio DSR da Pasta REF035 aos 28 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	6560,15	124,14	6561,32	1,08
1	6403,70	138,15	6405,19	1,24
1/10	6237,65	103,37	6238,51	0,95
1/60	6034,90	215,29	6038,74	2,04
1/600	5686,90	345,17	5697,37	3,47

Tabela E.13- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030 aos 28 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	7842,90	116,11	7843,76	0,85
1	7708,95	110,90	7709,75	0,82
1/10	7560,55	136,97	7561,79	1,04
1/60	7398,75	188,61	7401,15	1,46
1/600	6777,45	340,97	6786,02	2,88

Tabela E.14- Resultados do Ensaio DSR da Pasta NS1 aos 28 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	9037,50	158,31	9038,89	1,00
1	8805,00	165,76	8806,56	1,08
1/10	8518,10	215,90	8520,84	1,45
1/60	8188,80	304,00	8194,44	2,13
1/600	7825,90	388,56	7835,54	2,84

Tabela E.15- Resultados do Ensaio DSR da Pasta SAP030NS1 aos 28 Dias

Frequência (Hz)	Módulo de Armazenamento (MPa)	Módulo de Perda (MPa)	Módulo de Cisalhamento Complexo (MPa)	Ângulo de Fase (°)
10	7774,85	118,96	7775,76	0,88
1	7592,85	129,73	7593,96	0,98
1/10	7407,00	172,28	7409,00	1,33
1/60	7225,90	234,17	7229,69	1,86
1/600	6926,05	347,62	6934,77	2,87

**ANEXO F – RH, SATURAÇÃO E PRESSÃO CAPILAR (Previsão da
Retração Autógena)**

Tabela F.1 - Resultados das Medições das RH em Pastas

REF030		REF035		SAP030	
Tempo (dias)	RH(%)	Tempo (dias)	RH(%)	Tempo (dias)	RH(%)
0,00	97,90	0,00	99,00	0,00	98,70
1,02	97,70	2,02	98,50	2,22	98,70
1,95	97,50	2,94	98,00	3,24	98,20
3,01	97,00	4,01	97,90	4,41	98,10
4,02	96,80	4,96	97,80	5,46	98,00
5,04	96,20	6,04	97,70	6,64	97,90
6,10	96,40	7,10	96,60	7,81	96,79
7,05	95,90	8,05	95,70	8,85	95,89
8,14	96,50	9,14	96,30	10,06	96,49
9,00	93,50	10,03	95,60	11,03	95,79
10,08	94,50	12,13	97,00	13,35	97,19
10,98	93,90	12,98	95,10	14,28	95,29
12,05	94,50	14,04	95,70	15,44	95,89
13,07	94,20	15,09	96,30	16,60	96,49
14,07	94,60	16,09	95,00	17,70	95,19
15,03	93,00	16,90	95,20	18,59	95,39
16,27	94,80	18,25	95,40	20,07	95,59
18,05	92,70	20,06	94,50	22,06	94,69
19,12	91,50	21,04	92,70	23,14	92,89
20,09	93,20	22,22	93,20	24,44	93,39
21,19	90,10	24,18	92,10	26,60	92,28
22,04	90,20	25,07	92,30	27,58	92,48
22,96	90,10	25,99	92,10	28,58	92,28
24,06	87,30	27,11	92,70	29,82	92,89
25,01	91,30	27,99	92,40	30,79	92,58
26,71	85,40	29,72	90,00	32,70	90,18
28,12	85,60	31,05	89,00	33,00	89,18

Tabela F.2 - Resultados das Medições das RH em Concretos

REF030		REF035		SAP030	
Tempo (dias)	RH(%)	Tempo (dias)	RH(%)	Tempo (dias)	RH(%)
0,30	97,52	0,71	98,38	0,40	96,07
0,91	97,09	2,03	96,50	1,62	94,27
1,42	95,56	2,95	95,13	3,96	91,97
1,00	92,65	3,56	93,59	5,90	90,68
0,90	94,44	4,78	92,14	8,35	89,74
3,55	90,43	7,13	91,88	11,82	88,46
4,77	89,40	9,78	90,77	14,79	88,38
7,12	87,69	11,11	90,17	17,24	88,38
9,46	86,50	12,75	91,37	21,02	88,46
12,22	86,32	14,49	90,51	26,24	88,29
15,19	86,24	17,35	91,03	30,33	87,44
17,74	85,64	18,06	89,66	32,47	88,12
20,71	85,38	19,40	91,20	36,46	88,12
24,29	86,07	21,95	90,85	39,73	87,18
24,89	84,19	23,99	89,49	43,11	87,18
27,97	85,73	25,33	91,11	-	-
32,16	84,87	28,09	90,60	-	-
36,56	85,73	31,77	90,85	-	-
38,90	83,59	34,63	89,23	-	-
41,97	84,36	37,90	90,26	-	-
44,43	85,47	41,58	88,97	-	-
47,19	84,19	43,83	89,83	-	-
-	-	47,41	89,91	-	-

Figura F.1- Ajuste de curvas da saturação em Pastas; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030

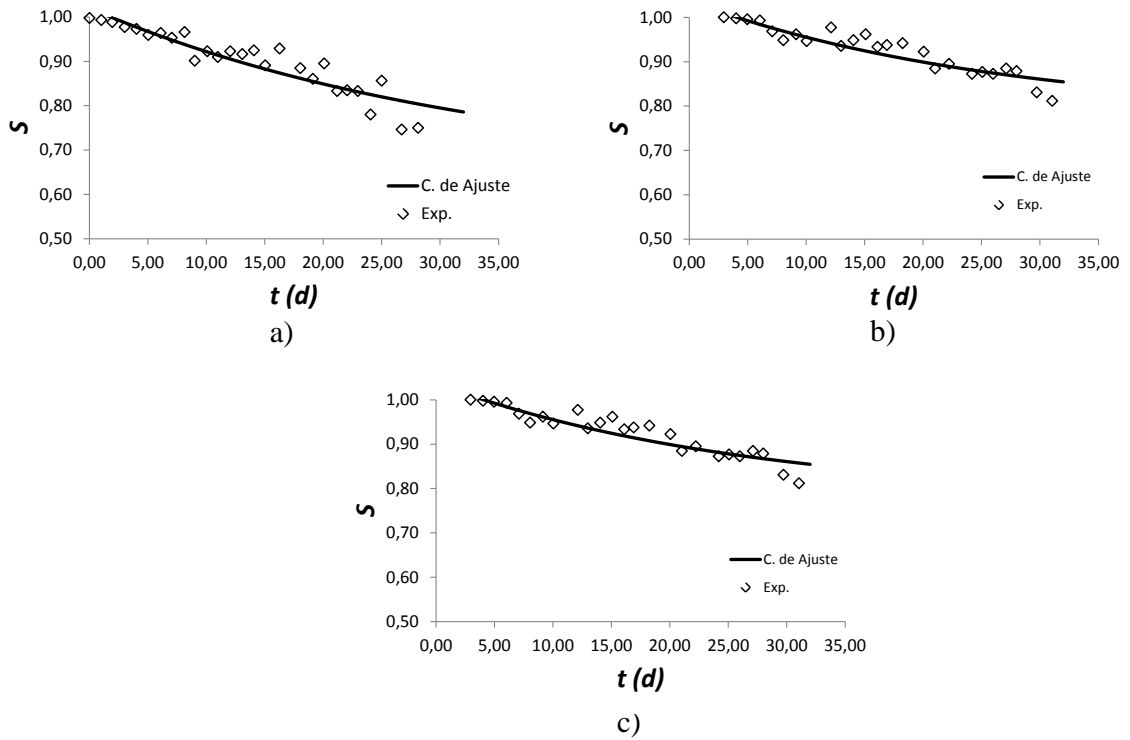


Figura F.2- Ajuste de curvas da saturação em Concretos; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030

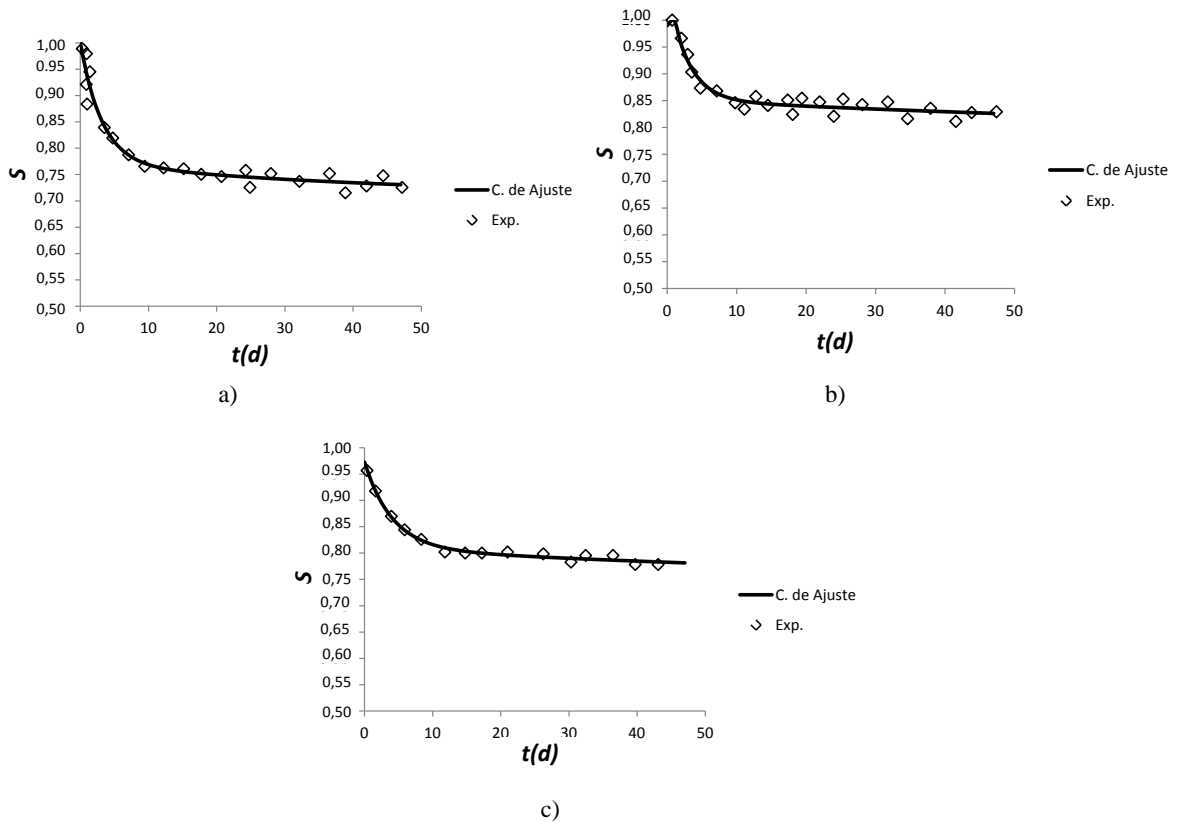


Figura F.3- Ajuste de curvas de P_c em Pastas; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030

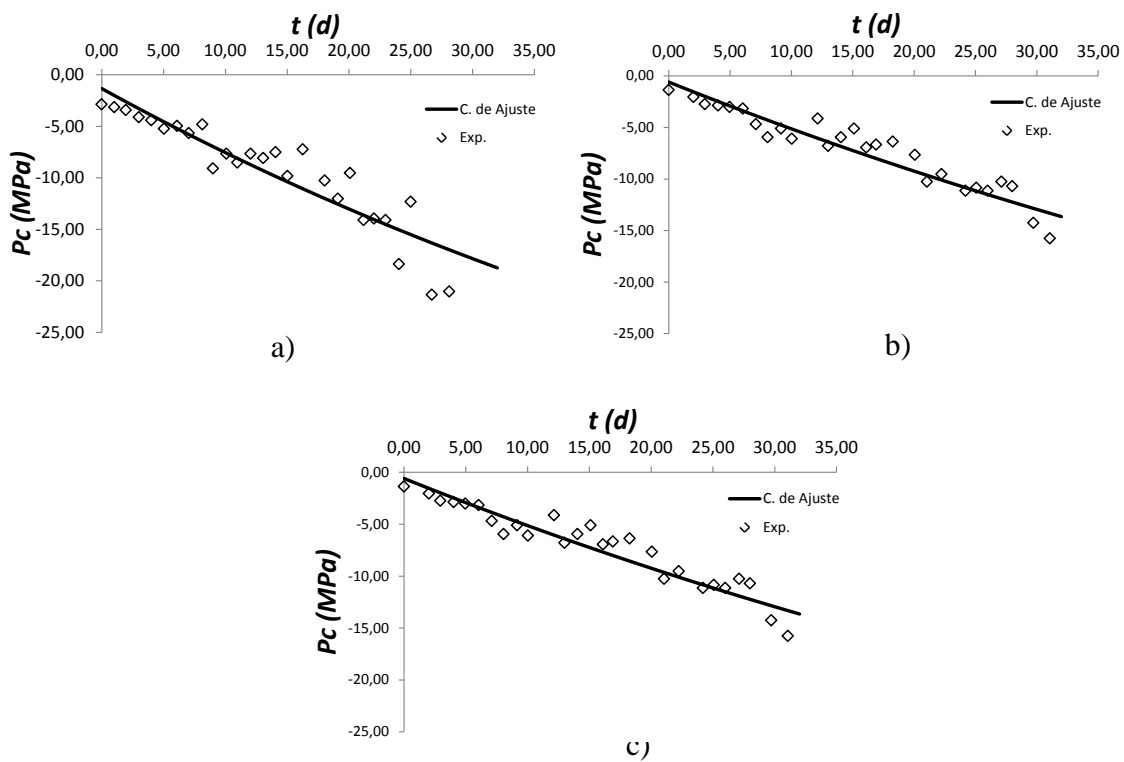


Figura F.4- Ajuste de curvas de P_c em Concretos; a) REF030; b) REF035 e c) SAP030

