

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA RETRAÇÃO E DA FLUÊNCIA E  
SEUS MECANISMOS DE ATUAÇÃO A BAIXAS IDADES EM  
CONCRETOS ESTRUTURAIS**

*GIANA SOUSA SENA RODRIGUES*

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA RETRAÇÃO E DA FLUÊNCIA E  
SEUS MECANISMOS DE ATUAÇÃO A BAIXAS IDADES EM  
CONCRETOS ESTRUTURAIS.

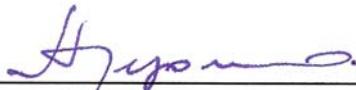
GIANA SOUSA SENA RODRIGUES

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

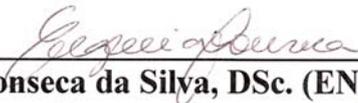
APROVADA POR:



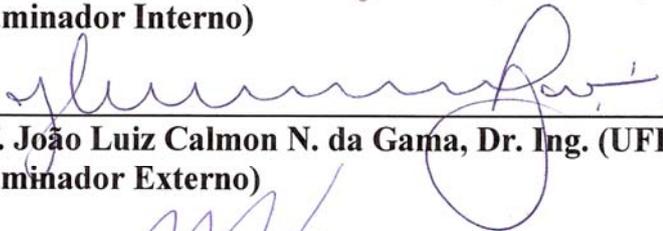
Prof. Elton Bauer, DSc. (ENC-UnB)  
(Orientador)



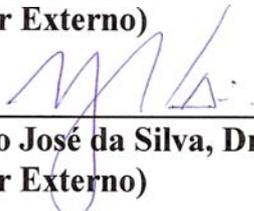
Prof. Antônio Alberto Nepomuceno, Dr. Ing. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)



Prof. Eugênia Fonseca da Silva, DSc. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)



Prof. João Luiz Calmon N. da Gama, Dr. Ing. (UFES)  
(Examinador Externo)



Prof. Turíbio José da Silva, Dr. Ing. (UFU)  
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 11 DE AGOSTO DE 2010.

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

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA RETRAÇÃO E DA  
FLUÊNCIA E SEUS MECANISMOS DE ATUAÇÃO A BAIXAS  
IDADES EM CONCRETOS ESTRUTURAIS**

**GIANA SOUSA SENA RODRIGUES**

**ORIENTADOR: ELTON BAUER**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.TD – 005 A/10  
BRASÍLIA/DF: 11 AGOSTO – 2010**

## FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, GIANA SOUSA SENA

Contribuição ao Estudo da Retração e da Fluência e seus Mecanismos de Atuação a Baixas Idades em Concretos Estruturais [Distrito Federal] 2010. xxv, 222p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2010). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Retração

3. Deformações

I. ENC/FT/UnB

2. Fluência

4. Concretos comerciais

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, G. S. S. (2010). Contribuição ao Estudo da Retração e da Fluência e seus Mecanismos de Atuação a Baixas Idades em Concretos Estruturais. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação: E.TD – 005 A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 222p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Giana Sousa Sena Rodrigues.

TÍTULO: Contribuição ao Estudo da Retração e da Fluência e seus Mecanismos de Atuação a Baixas Idades em Concretos Estruturais.

GRAU: Doutor

ANO: 2010

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.

---

Giana Sousa Sena Rodrigues  
 Rua C-154 Qd. 325 Lt. 06, Jardim América.  
 74.275-140 Goiânia – GO – Brasil.  
 e-mail: [gianasena@uol.com.br](mailto:gianasena@uol.com.br)

## AGRADECIMENTOS

Somente quem vivenciou um curso de doutorado consegue abstrair a intensidade desta experiência. Neste momento de estafa física, mental e espiritual, FINALMENTE tive a coragem de iniciar estes agradecimentos. Difícil e desejada etapa, pois se chega o momento de iniciar esta fase do texto, é porque a linha de chegada se aproxima.

Primeiramente, tomo a liberdade de tomar emprestado (de mim mesma) o agradecimento que fiz, há quase sete anos, no penúltimo parágrafo dos agradecimentos de minha dissertação de mestrado... “A Deus, meu Pai e amigo, meu pedido de desculpas pelos momentos de desesperança. Obrigada pela vida, pela minha família e por mais esta vitória.”

Ao Thiago, meu companheiro de vida, meu amigo, meu marido... Obrigada pela companhia, por vezes silenciosa, pela sua enorme paciência, pelo seu amor.

À minha pequena grande família, perdão pela ausência... Pai, obrigada pelo incentivo e por tantas outras coisas que eu nunca conseguirei retribuir. Mãe, obrigada pela vida, pela força e por me sustentar no prumo quando a tormenta se aproxima. Rogério, obrigada por ser alguém a quem eu posso recorrer, sempre.

Ao Professor Dr. Elton Bauer, orientador desta tese. Obrigada por acreditar que eu seria capaz. Obrigada por ter me cedido sua bússola e indicado o caminho. Acima de tudo, obrigada por ter me emprestado seu tempo tão precioso.

Obrigada aos amigos que me apoiaram e incentivaram, especialmente nestes últimos meses de estudo incessante. Alessandra, Taís, Márcia, Newton, Patrícia, Letícia, obrigada por terem me atendido quando precisei... Obrigada pelo conforto...

À Agência Goiana de Transportes e Obras (AGETOP), nas pessoas do Diretor de Obras Cíveis, Dr. Luiz Antônio de Paula e dos Gerentes Eng<sup>o</sup>s Ademir Meireles e Natanael de Faria Júnior, obrigada pelo incentivo. A vocês, minha gratidão eterna.

Neste trabalho pude contar com o apoio de pessoas ou empresas (ou ambos) que ajudaram a financiar os gastos desta pesquisa e sem os quais este trabalho talvez não alcançasse seus objetivos. Ao Laboratório Carlos Campos, em especial ao Carlos Campos e ao Denilson, à concreteira Concrecon, e ao Centro Tecnológico em Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., nas pessoas dos Eng<sup>os</sup> Rubens Machado Bittencourt, Maurice Antoine Traboulsi, Moacir Alexandre S. de Andrade e Flávio Lima. Reconhecimento sincero ao Sr. Zito, pela preciosa ajuda na execução dos ensaios e ao Eng<sup>o</sup> Alexandre Castro, por continuar sendo uma das raras pessoas que não se importam em compartilhar conhecimento. Agradeço ainda ao CNPq pela bolsa de estudos usufruída no período inicial do curso.

Obrigada à amiga Renata Bassi Bittencourt e à querida Da. Enery pela ajuda, quando tudo parecia perdido. Sem o apoio e a luta de vocês, provavelmente eu não conseguiria finalizar o planejado. Gratidão eterna pelo carinho e pela força.

Ao Prof. Enio Pazini, por ter me ensinado a pensar a engenharia como uma ciência.

Presto ainda a devida homenagem aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB, pela compreensão e pelo compartilhamento de saberes, vivências, experiências. Obrigada especialmente aos professores Nepomuceno, Brito e Eugênia. Aos colegas do curso que tive a oportunidade de conhecer e me tornar amiga, em especial à Fernanda e à Polyana, meu carinho sincero. Estima e gratidão sincera à Eva, secretária do curso, pelo apoio nas questões administrativas e pelo estímulo.

Enfim, àqueles que me amam e torcem pela minha felicidade e pelo meu sucesso, aos companheiros de estrada que, por acaso, descuidei de mencionar ou simplesmente àqueles que me destinaram um sorriso ou um abraço numa manhã qualquer destes cinco anos que se passaram, um particular, sincero e intenso obrigada.

*Giana*

*A Deus, pela vitória.  
À minha família, pelo amor, pelo incentivo,  
por serem um porto seguro para onde sempre posso regressar.*

"Traça a reta e a curva, a quebrada e a sinuosa  
Tudo é preciso. De tudo viverás.

Cuida com exatidão da perpendicular  
e das paralelas perfeitas. Com apurado rigor.  
Sem esquadro, sem nível, sem fio de prumo,  
traçarás perspectivas, projetarás estruturas.  
Número, ritmo, distância, dimensão.  
Tens os teus olhos, o teu pulso, a tua memória.

Construirás os labirintos impermanentes  
que sucessivamente habitarás.

Todos os dias estarás refazendo o teu desenho.  
Não te fatigues logo. Tens trabalho para toda a vida.  
E nem para o teu sepulcro terás a medida certa.

*Somos sempre um pouco menos do que pensávamos.  
Raramente, um pouco mais."*

## RESUMO

### CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA RETRAÇÃO E DA FLUÊNCIA E SEUS MECANISMOS DE ATUAÇÃO A BAIXAS IDADES EM CONCRETOS ESTRUTURAIS

**Autora: Giana Sousa Sena Rodrigues**

**Orientador: Elton Bauer**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (UnB)**

**Brasília, agosto de 2010.**

O presente trabalho teve como objetivo estudar o desenvolvimento da retração e da fluência em concretos comerciais com resistências características de 20, 35 e 50 MPa. Foram realizados ensaios de determinação da retração e da fluência em corpos-de-prova selados e não selados aplicando a variação de parâmetros influentes no desenvolvimento das deformações. A partir dos resultados obtidos, verificou-se a diferenciação de regimes específicos para as velocidades de desenvolvimento da retração e para a variação relativa de massa de água nas baixas idades do concreto. Foram estimados índices para diferenciação do desenvolvimento das variáveis e estes índices foram utilizados para explicar o comportamento dos concretos ao longo do tempo. Pelos resultados apurados, verificou-se que as condições de exposição do material e o tempo decorrido entre a mistura e a exposição dos corpos-de-prova aos gradientes de umidade exerceram influência significativa, alterando a magnitude das deformações totais, com ou sem aplicação de carregamento. Em relação à retração determinada nos prismas selados, o concreto com resistência característica de 50 MPa apresentou os maiores valores de deformação, tanto intermediários quanto finais. Nos prismas não selados, a partir de 20 dias de idade, o concreto com resistência característica de 20 MPa apresentou maiores valores de retração. Ademais, verificou-se que o comportamento da fluência específica foi inverso ao comportamento da resistência, uma vez que os concretos de menores resistências apresentaram maiores valores de fluência específica. A variação na idade de aplicação de carregamento aos concretos estudados demonstrou que o menor potencial de fluência foi desenvolvido para aplicação de carregamento aos 28 dias. Os corpos-de-prova não selados desenvolveram maior potencial de fluência específica que os corpos-de-prova não selados, para todas as misturas e idades de aplicação de carregamento.

**Palavras chave:** Retração; Fluência; Deformações; Concretos comerciais.

## ABSTRACT

### CONTRIBUTION TO THE STUDY OF SHRINKAGE AND CREEP AND THEIR LOW AGES PERFORMING MECHANISMS IN STRUCTURAL CONCRETES

**Author: Giana Sousa Sena Rodrigues**

**Supervisor: Elton Bauer**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, August of 2010**

This work aimed to study the development of shrinkage and creep in commercial concretes with resistance varying about 20, 35 and 50 MPa. Determination tests of shrinkage and creep in sealed and not sealed specimens were carried out by applying a variation of parameters that influence the deformation development. From the results, the differentiation of specific regimes for the shrinkage development speeds and for the relative variation of water mass in lower ages of the concrete was verified. Rates for the differentiation of variable development were estimated and those rates were used to explain the material behaviour along the age. The obtained results enabled to verify that the conditions of material exposition and the period of time processed between the mixture and the exposition of the specimens to moisture gradients exerted significant influence, by altering values of total deformations, with or without load application. In relation to the creep determined for sealed prisms, the concrete with characteristic resistance of 50 MPa presented the highest deformation values, both intermediate and final. For unsealed prisms, from the age of 20 days, the concrete with characteristic resistance of 20 MPa presents higher values of creep. From the results, the differentiation of specific regimes for the shrinkage development speeds and for the relative variation of water mass in lower ages of the concrete was verified. Rates for the differentiation of variable development were estimated and those rates were used to explain the material behaviour along the age. Besides, it was verified that the specific shrinkage behavior was the inverse of the resistance behavior, once lower resistance concretes presented higher values of specific creep. Independently of specimens covering conditions, the results indicated that creep represented a significant part of deformation under constant loading development.

**Keywords:** Shrinkage; Creep; Deformations; Commercial concretes.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xxi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	1
<b>1.1.1 Pesquisas anteriores sobre a retração e a fluência .....</b>	<b>3</b>
1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA E OBJETIVOS.....	5
<b>1.2.1 Objetivos gerais .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>6</b>
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	7
<b>2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO .....</b>	<b>8</b>
2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO <i>PORTLAND</i> .....	8
<b>2.1.1 Reações de hidratação do cimento <i>Portland</i>.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.2 Mecanismos de hidratação do cimento <i>Portland</i> .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.3 Pega do cimento .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.4 Determinação da transição suspensão-sólido através do método de propagação da velocidade ultra-sônica.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.5 Estrutura da pasta de cimento <i>Portland</i>.....</b>	<b>19</b>
2.1.5.1 O C-S-H.....	19
2.1.5.2 Porosidade .....	21
2.1.5.3 A água .....	22
2.2 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES NA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO <i>PORTLAND</i> .....	25
<b>2.2.1 Água .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2 Adições minerais .....</b>	<b>26</b>

<b>2.2.3 Aditivos .....</b>	<b>26</b>
2.2.3.1 Aditivos plastificantes e superplastificantes .....	26
2.2.3.2 Aditivos redutores e aditivos compensadores de retração .....	28
<b>2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A HIDRATAÇÃO DO CIMENTO .....</b>	<b>29</b>
<b>3 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO .....</b>	<b>32</b>
3.1 RETRAÇÃO .....	32
<b>3.1.1 Contração <i>Le Chatelier</i> e retração autógena .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.2 Retração por secagem .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.3 Mecanismos teóricos para o desenvolvimento da retração autógena e da retração por secagem .....</b>	<b>37</b>
3.1.3.1 Teoria da variação da pressão capilar .....	37
3.1.3.2 Teoria da variação da energia de superfície .....	38
3.1.3.3 Teoria da variação da pressão de disjunção ou pressão de desligamento .....	39
<b>3.1.4 Comentários sobre os mecanismos teóricos para desenvolvimento da retração autógena e da retração por secagem .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.5 Fatores influentes sobre a retração autógena e sobre a retração por secagem .....</b>	<b>43</b>
3.1.5.1 Relação água/cimento .....	43
3.1.5.2 Adições minerais .....	45
3.1.5.3 Aditivos .....	46
3.1.5.4 Teor e natureza dos agregados .....	48
3.1.5.5 Condições ambientais e fatores diversos .....	49
3.2 DEFORMAÇÕES NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO DEVIDAS À AÇÃO DE CARREGAMENTOS .....	51
<b>3.2.1 Deformações incidentes a baixas idades nas estruturas de concreto .....</b>	<b>52</b>
3.2.1.1 Concreto armado .....	52
3.2.1.2 Concreto protendido .....	53
<b>3.2.2 Conceitos relacionados às deformações incidentes sobre os materiais .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.3 Módulo de elasticidade do concreto .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.4 Fluência .....</b>	<b>56</b>
3.2.4.1 Relação entre a fluência e a retração .....	60
3.2.4.2 Mecanismos teóricos para o desenvolvimento da fluência .....	62
<b>3.2.5 Fatores influentes sobre a fluência do concreto .....</b>	<b>64</b>
3.2.5.1 Idade e grau de hidratação .....	64
3.2.5.2 Tipo de cimento e tipo de concreto .....	65
3.2.5.3 Condições ambientais .....	66

3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO .....	68
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>71</b>
4.1 DEFINIÇÕES METODOLÓGICAS E VARIÁVEIS ADOTADAS .....	71
4.2 COMPOSIÇÃO DOS CONCRETOS .....	73
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	74
<b>4.3.1 Cimento .....</b>	<b>74</b>
<b>4.3.2 Sílica ativa .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3.3 Agregado miúdo .....</b>	<b>76</b>
<b>4.3.4 Agregado graúdo .....</b>	<b>79</b>
<b>4.3.5 Aditivo Plastificante .....</b>	<b>81</b>
<b>4.3.6 Água .....</b>	<b>82</b>
4.4 PROCEDIMENTOS DE MISTURA E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO FRESCO .....	82
4.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	82
<b>4.5.1 Determinação do patamar de percolação através da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico .....</b>	<b>82</b>
<b>4.5.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio .....</b>	<b>84</b>
<b>4.5.3 Absorção de água .....</b>	<b>86</b>
<b>4.5.4 Determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto .....</b>	<b>86</b>
<b>4.5.5 Determinação das variações unidimensionais livres no concreto .....</b>	<b>87</b>
4.5.5.1 Retração endógena e retração total .....	87
<i>a. Determinação das variações de comprimento antes da desforma .....</i>	<i>90</i>
<i>b. Determinação das variações de comprimento após a desforma .....</i>	<i>91</i>
4.5.5.2 Retração por secagem .....	94
4.5.5.3 Fatores intervenientes .....	96
4.5.5.4 Determinação da variação relativa de massa de água .....	96
4.5.5.5 Variações dimensionais durante manutenção de carregamento .....	97
<i>a. Fases de carregamento e descarregamento dos corpos de prova .....</i>	<i>98</i>
<b>5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CONCRETOS .....	101
<b>5.1.1 Análise dos parâmetros de mistura .....</b>	<b>101</b>
<b>5.1.2 Patamar de percolação .....</b>	<b>103</b>

<b>5.1.3 Determinação da absorção de água .....</b>	<b>104</b>
<b>5.1.4 Estrutura de poros do concreto por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio .....</b>	<b>105</b>
5.1.4.1 Comparação entre as estruturas de poros dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> .....	105
5.1.4.2 Comparação entre as estruturas de poros do concreto C <sub>2</sub> nas idades de 3 e 28 dias ..	108
<b>5.1.5 Propriedades mecânicas .....</b>	<b>110</b>
5.1.5.1 Resistência à compressão .....	110
5.1.5.2 Módulo de elasticidade.....	113
<b>5.1.6 Caracterização da retração por secagem conforme prescrições da ASTM C 157. 117</b>	
5.1.6.1 Resultados das retrações autógenas e térmicas durante o período de cura submersa. 118	
5.1.6.2 Variação relativa de massa de água <i>versus</i> idade .....	119
5.1.6.3 Resultados médios de retração por secagem .....	120
<b>5.2 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO .....</b>	<b>123</b>
<b>5.2.1 Retração endógena .....</b>	<b>123</b>
5.2.1.1 Variação relativa de massa de água <i>versus</i> idade .....	123
5.2.1.2 Resultados médios de retração endógena .....	124
<b>5.2.2 Retração total.....</b>	<b>126</b>
5.2.2.1 Variação relativa de massa de água <i>versus</i> idade .....	126
5.2.2.2 Resultados médios de retração total .....	126
<b>5.2.3 Diferenciação de regimes para o desenvolvimento da retração e para a variação relativa de massa de água .....</b>	<b>128</b>
5.2.3.1 Retração endógena e retração total.....	128
<b>5.2.4 Variação relativa de massa de água .....</b>	<b>134</b>
<b>5.2.5 Retração <i>versus</i> variação relativa de massa de água.....</b>	<b>137</b>
<b>5.2.6 Comparação dos resultados com a literatura .....</b>	<b>139</b>
<b>5.3 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS COM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO.....</b>	<b>140</b>
<b>5.3.1 Evolução do potencial de fluência específica.....</b>	<b>141</b>
5.3.1.1 Análise dos concretos .....	142
5.3.1.2 Análise das idades de aplicação de carregamento .....	143
5.3.1.3 Análise das condições de revestimento dos corpos-de-prova.....	144
5.3.1.4 Tempo de manutenção do carregamento .....	145
<b>5.4 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS DEVIDO AO DESENVOLVIMENTO DA FLUÊNCIA E DA RETRAÇÃO.....</b>	<b>145</b>
<b>5.4.1 Desenvolvimento da retração e da fluência para os concretos em estudo.....</b>	<b>151</b>
<b>5.4.2 Análise dos resultados de retração e potencial de fluência em relação à modelagem proposta pelo CEB.....</b>	<b>152</b>

5.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA .....	154
<b>5.5.1 Análise estatística dos resultados de retração endógena, retração total e retração por secagem .....</b>	<b>154</b>
5.5.1.1 Análise estatística dos resultados de variação relativa de massa de água .....	155
5.5.1.2 Comparação múltipla de médias de resultados de retração .....	156
<b>5.5.2 Análise estatística dos resultados do potencial de fluência específica.....</b>	<b>158</b>
5.5.2.1 Comparação múltipla de médias do potencial de fluência específica .....	159
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>162</b>
6.1 SOBRE OS OBJETIVOS PROPOSTOS .....	162
6.2 SOBRE OS RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO.....	162
<b>6.2.1 Considerações sobre a retração endógena.....</b>	<b>163</b>
<b>6.2.2 Considerações sobre a retração total .....</b>	<b>164</b>
6.2.1.1 Variação relativa de massa de água .....	164
6.2.1.2 Desenvolvimento da retração total .....	164
<b>6.2.3 Considerações sobre a retração por secagem.....</b>	<b>165</b>
6.3 SOBRE OS RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS COM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO.....	166
6.4 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	167
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>169</b>
<b>APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PREPARAÇÃO DOS MOLDES, MOLDAGEM E REVESTIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES SOB MANUTENÇÃO DE CARREGAMENTO .....</b>	<b>179</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO .....</b>	<b>183</b>
<b>APÊNDICE C – REGRESSÕES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO .....</b>	<b>197</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA APLICADA AOS RESULTADOS DE DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO .....</b>	<b>205</b>

**APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA - INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS SOBRE AS MÉDIAS DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO ..... 208**

**APÊNDICE F – DESCRIÇÃO DA MODELAGEM APLICADA NA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ..... 218**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da taxa de calor determinada para uma pasta de cimento, durante a hidratação (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).....	11
Figura 2.2 – Compostos hidratados associados aos estágios de hidratação (LOCHER <i>et al.</i> , 1976, <i>apud</i> ESPING, 2007).....	13
Figura 2.3 – Representação esquemática da teoria da percolação (adaptado de ACKER, 1988, <i>apud</i> BOIVIN, 2001).....	16
Figura 2.4 – Representação esquemática do modelo microestrutural por Feldman e Sereda (adaptado de BAROGHEL-BOUNY, 1994). ....	20
Figura 2.5 – Movimentação das camadas de C-S-H em resposta à variação severa de umidade na microestrutura do material (adaptado de BAROGHEL-BOUNY, 1994). ....	20
Figura 2.6 – Vista esquemática do estado da água no sistema de poros de uma pasta de cimento (VAN BREUGEL, 1991, <i>apud</i> LURA, 2003).....	25
Figura 2.7 – Representação esquemática da floculação (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).....	27
Figura 2.8 – Ilustração do mecanismo de repulsão eletrostática para a cadeia de aditivos de base melamina, naftaleno e lignossulfonato (adaptado de COLLEPARDI <i>et al.</i> , 1999).....	27
Figura 3.1 – Variação do volume absoluto e do volume aparente do concreto durante as reações de hidratação do cimento (adaptado de HUA <i>et al.</i> , 1995).....	34
Figura 3.2 – Desenvolvimento da retração química e da deformação por retração autóloga para pasta de cimento de relação água/cimento igual a 0,35 (adaptado de BOIVIN, 2001)....	35
Figura 3.3 – Ilustração do desenvolvimento de menisco e movimentação de um líquido em um tubo capilar (adaptado de MORTIMER, 2008).....	38
Figura 3.4 – Mecanismo da pressão de disjunção para (a) material seco e (b) material com água adsorvida (adaptado de KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006). ....	39
Figura 3.5 – Correlação entre a retração potencial e o tempo de secagem para concretos de diferentes relações água/cimento (PIETRA <i>et al.</i> , 2003). ....	44
Figura 3.6 – Representação da retração em função do teor de cimento, de água e da relação água/cimento para concretos submetidos a cura úmida durante 28 dias e expostos a secagem durante 450 dias (CARLSON e READING, 1988).....	45
Figura 3.7 – Curvas de retração autóloga ao longo do tempo para concretos de alta resistência (IGARASHI <i>et al.</i> , 2000). ....	46
Figura 3.8 – Exemplo da influência de aditivos redutores e aditivos compensadores de retração por secagem na retração autóloga do concreto (TAZAWA e MYIAZAWA, 1997)...	47
Figura 3.9 – Efeito do teor de aditivo redutor de retração na secagem de argamassas (MELO NETO <i>et al.</i> , 2007). ....	48
Figura 3.10 – Relação entre a fração volumétrica de agregado e a retração do concreto (PICKETT, 1956, <i>apud</i> NUNES e FIGUEIREDO, 2007). ....	49
Figura 3.11 – Relações entre a perda de água e a retração por secagem (adaptado de MINDESS e YOUNG, 1981). ....	50

Figura 3.12 – Modelos reológicos idealizados de comportamento perfeito (adaptado de CUNHA, 2000).....	54
Figura 3.13 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação de um concreto convencional sob compressão uniaxial até a ruptura (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).....	56
Figura 3.14 – Gráfico típico do processo de carregamento e descarregamento na fluência (adaptado da NBR 8224, 1983).....	57
Figura 3.15 – Representação da deformação de fluência: (a) corpo-de-prova descarregado, (b) deformação elástica; (c) deformação de fluência e (c) fluência permanente após descarregamento (adaptado de WEISS, 1999).....	58
Figura 3.16 – Deformações dependentes do tempo no concreto sob manutenção do carregamento (adaptado de LEE <i>et al.</i> , 2006).....	60
Figura 3.17 – Esquema das parcelas de contribuição para o desenvolvimento de deformação sob manutenção de carregamento, nos sistemas selado e não selado (adaptado de LEE <i>et al.</i> , 2006).....	61
Figura 3.18 – Relações entre as deformações totais, carregamento aplicado e idade de aplicação do carregamento para o ensaio de fluência básica (LEE <i>et al.</i> , 2006).....	62
Figura 3.19 – Influência da relação superfície/volume na relação entre a fluência e a deformação elástica para concreto selado e para concreto não selado mantido em umidade relativa de 60% (NEVILLE e BROOKS, 1997).....	67
Figura 3.20 – Influência da temperatura na fluência de corpos-de-prova de concreto não selados, em relação à fluência a 20°C; corpos-de-prova curados por um ano e submetidos às temperaturas de ensaio 15 dias após o carregamento (MARÉCHAL, 1969).....	67
Figura 4.1 – Resumo das variáveis aplicadas ao programa experimental, objetivos de cada análise, idades, método e quantidade de determinações, para os concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> . .....	72
Figura 4.2 – Esquema dos ensaios de porosimetria realizados no concretos C <sub>2</sub> , para avaliação da distribuição de poros nas idades de 3 e 28 dias. ....	73
Figura 4.3 – Distribuição granulométrica da areia artificial.....	77
Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da areia natural – areia lavada de leito de rio.....	78
Figura 4.5 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 4,75/12,5. ....	80
Figura 4.6 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 9,5/25. ....	81
Figura 4.7 – Esquema do ensaio de determinação do patamar de percolação através da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico.....	83
Figura 4.8 – Procedimento para determinação do patamar de percolação através da velocidade de propagação da onda ultra-sônica: (a) preparação do molde metálico; (b) vista dos transdutores acoplados ao corpo-de-prova; (c) realização de leituras; (d) vista do aparelho utilizado para realização do ensaio.....	84
Figura 4.9 – Preparação das amostras do ensaio de porosimetria: (a) vista da serra de precisão refrigerada com álcool; (b) vista do “palito” após corte; (c) dessecador com sílica-gel.....	85

Figura 4.10 – Procedimentos de preparação de molde metálico com fixação do pino metálico de referência para medidas (a); vista do aparato montado (b) e moldagem do corpo-de-prova (c).....	89
Figura 4.11 – Procedimentos de preparação dos corpos-de-prova com o envolvimento do conjunto com filme plástico, imediatamente após a moldagem.....	89
Figura 4.12 – Esquema do aparato para determinação da variação relativa de comprimento anteriormente à desmoldagem (adaptado de SILVA, 2007-a).....	90
Figura 4.13 – Realização de medidas de retração total (a) e retração endógena (b) e (c) anteriormente à desmoldagem dos prismas.....	90
Figura 4.14 – Revestimento dos corpos-de-prova destinados às medidas de retração endógena.....	92
Figura 4.15 – Esquema do aparato para determinação da variação relativa de comprimento após a desmoldagem, adaptado da ASTM C 490 (ASTM, 2009) e de Silva (2007).....	92
Figura 4.16 – Determinação da variação relativa de comprimento após a desmoldagem: (a) barra metálica utilizada para aferição da base de medida; (b) determinação da retração endógena em corpo-de-prova selado; (c) determinação da retração total em corpo-de-prova não selado.....	93
Figura 4.17 – Aparato para aplicação e manutenção de carregamento ao longo do tempo: (a) posicionamento do conjunto no pórtico; (b) vista ampla do sistema; (c) ponte de leitura de deformação.....	99
Figura 5.1 – Curvas de determinação do patamar de percolação pelo método da velocidade de pulso ultra-sônico para concretos em estudo C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , respectivamente.....	104
Figura 5.2 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , com início da paralisação das reações de hidratação com 1 dia de idade – volume intrudido acumulado <i>versus</i> diâmetro dos poros.....	106
Figura 5.3 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , com início da paralisação das reações de hidratação com 1 dia de idade – distribuição do volume de intrusão <i>versus</i> diâmetro dos poros.....	106
Figura 5.4 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos C <sub>2</sub> com início da paralisação das reações de hidratação aos 3 e 28 dias de idade – volume intrudido acumulado <i>versus</i> diâmetro dos poros.....	109
Figura 5.5 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos C <sub>2</sub> com início da paralisação das reações de hidratação aos 3 e 28 dias de idade – distribuição do volume de intrusão <i>versus</i> diâmetro dos poros.....	109
Figura 5.6 – Desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> .....	112
Figura 5.7 – Variação da relação $f_c/f_{c28}$ para os concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , até 28 dias.....	113
Figura 5.8 – Desenvolvimento do módulo de elasticidade dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> .....	115
Figura 5.9 – Variação da relação $f_c/E_c$ para os concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , aos 3, 7 e 28 dias.....	117
Figura 5.10 – Resultados médios de retração por secagem determinada a partir de 28 dias de cura submersa, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, não selados, para T = 21°C ± 2°C.....	122

Figura 5.11 – Resultados médios de retração endógena determinada a partir do patamar de percolação (usando ultra-som) até a idade de 80 dias, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, para $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .	128
Figura 5.12 – Resultados médios de retração total determinada a partir do patamar de percolação (usando ultra-som) até a idade de 80 dias, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, não selados, para $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .	129
Figura 5.13 – Diferenciação de regimes para os resultados de desenvolvimento de retração endógena, sendo regime R1 do patamar de percolação até 1 dia, regime R2 de 1 a 20 dias e regime R3 de 20 dias até o final das leituras.	131
Figura 5.14 – Diferenciação de regimes para os resultados de desenvolvimento de retração total, sendo regime R1 do patamar de percolação até 1 dia, regime R2 de 1 a 20 dias e regime R3 de 20 dias até o final das leituras.	131
Figura 5.15 – Diferenciação de regimes para os resultados de variação relativa de massa de água durante o ensaio de retração total, sendo regime R1 do patamar de percolação até 35 dias de idade e regime R2 de 35 dias até o final das leituras.	134
Figura 5.16 – Diferenciação de regimes para os resultados de variação de massa de água durante o ensaio de retração por secagem, sendo regime R1 até os 20 dias de secagem e regime R2 a partir de 20 dias e até o final das leituras.	135
Figura 5.17 – Relação entre a retração total e a variação relativa de massa de água, para as composições $C_1$ , $C_2$ e $C_3$ .	138
Figura 5.18 – Relação entre a retração por secagem e a variação relativa de massa de água, para as composições $C_1$ , $C_2$ e $C_3$ .	138
Figura 5.19 – Resultados de deformação específica devida à retração endógena <i>versus</i> a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova selados <i>versus</i> o tempo de carregamento, para o concreto $C_1$ .	146
Figura 5.20 – Resultados de deformação específica devida à retração endógena <i>versus</i> a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova selados <i>versus</i> o tempo de carregamento, para o concreto $C_2$ .	146
Figura 5.21 – Resultados de deformação específica devida à retração endógena <i>versus</i> a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova selados <i>versus</i> o tempo de carregamento, para o concreto $C_3$ .	147
Figura 5.22 – Resultados de deformação específica devida à retração total <i>versus</i> a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova não selados <i>versus</i> o tempo de carregamento, para o concreto $C_1$ .	148
Figura 5.23 – Resultados de deformação específica devida à retração total <i>versus</i> a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova não selados <i>versus</i> o tempo de carregamento, para o concreto $C_2$ .	149
Figura 5.24 – Resultados de deformação específica devida à retração total <i>versus</i> a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova não selados <i>versus</i> o tempo de carregamento, para o concreto $C_3$ .	149

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos tipos de água na pasta de cimento segundo diversos pesquisadores (OLIVEIRA, 2000) .....	23
Tabela 3.1 – Mecanismos de retração segundo vários autores (KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006).....	41
Tabela 4.1 – Consumo de materiais, em kg/m <sup>3</sup> e parâmetros de mistura dos concretos. ....	74
Tabela 4.2 – Caracterização física, química e mecânica do cimento CP V ARI utilizado na pesquisa (Laboratório de Ensaios da Cimento Tocantins S/A). ....	75
Tabela 4.3 – Caracterização físico-química da sílica ativa utilizada na pesquisa (Laboratório de Caracterização de Materiais da Cia de Ferro-Ligas da Bahia – Ferbasa).....	76
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo – areia artificial..	77
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo – areia natural. ...	78
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 4,75/12,5. ....	79
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 9,5/25. ....	80
Tabela 4.8 – Características do aditivo plastificante Basf Mastermix 390 RB. ....	81
Tabela 4.9 – Valores de tensão aplicados durante os ensaios de determinação do potencial de fluência. ....	99
Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de caracterização do concreto fresco. ....	101
Tabela 5.2 – Parâmetros das misturas adotadas.....	102
Tabela 5.3 – Resultados do tempo obtido para estabelecimento do patamar de percolação. .	104
Tabela 5.4 – Resultados de absorção de água por imersão (ABNT, 2005). ....	105
Tabela 5.5 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , para início da paralisação da hidratação a 1 dia de idade.....	107
Tabela 5.6 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio do concreto C <sub>2</sub> , para início da paralisação da hidratação a 3 e 28 dias de idade.....	109
Tabela 5.7 – Resultados individuais e médios de resistência à compressão dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , de acordo com as idades de ensaio. ....	111
Tabela 5.8 – Resistências relativas à idade de 28 dias para os concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> . ....	113
Tabela 5.9 – Resultados individuais e médios de módulo de elasticidade dos concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> , de acordo com as idades de ensaio. ....	114
Tabela 5.10 – Resultados médios de deformação específica devida às retrações autógenas e térmicas acumuladas durante o período de cura submersa.....	118
Tabela 5.11 – Resultados da variação de massa de água em relação à massa de água evaporável imediatamente após a retirada dos corpos-de-prova da cura submersa e após o final das leituras de retração por secagem (60 dias).....	120
Tabela 5.12 – Resultados médios de deformação específica devida à retração por secagem	

(x10 <sup>-6</sup> ) para os concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> .....	121
Tabela 5.13 – Resultados máximos da variação de massa de água após 80 dias de leituras de retração endógena.....	124
Tabela 5.14 – Resultados médios de deformação específica devida à retração endógena (x10 <sup>-6</sup> ) em diversas idades para os concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> . ....	124
Tabela 5.15 – Resultados máximos da variação de massa de água após 70 dias de secagem. ....	126
Tabela 5.16 – Resultados médios de deformação específica devida à retração total (x10 <sup>-6</sup> ) em diversas idades para os concretos C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> . ....	127
Tabela 5.17 – Velocidade de desenvolvimento da retração endógena e da retração total ao longo da idade, para os regimes R1, R2 e R3.....	132
Tabela 5.18 – Índices aplicados à análise de variação relativa de massa de água durante os ensaios de retração total e retração por secagem, para os regimes R1 e R2.....	135
Tabela 5.19 – Valores médios do potencial de fluência específica média para o concreto C <sub>1</sub> , após 7 e 28 dias de aplicação de carregamento. ....	141
Tabela 5.20 – Resumo dos comportamentos evidenciados pela pesquisa.....	151
Tabela 5.21 - Resultados de retração endógena e total em relação à modelagem proposta por Gilbert (1998). ....	152
Tabela 5.22 - Resultados de potencial de fluência em relação à modelagem proposta pelo CEB (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990), após 35 dias de carregamento. ....	153
Tabela 5.23 – Grupos de valores de retração definidos pela comparação múltipla de médias através do teste de Duncan. ....	156
Tabela 5.24 – Grupos de valores de potencial de fluência específica definidos pela comparação múltipla de médias através do teste de Duncan.....	159

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

a/c	Água/cimento
a/(c+sa)	Água/cimento + sílica ativa
AE	Aditivo expensor
AFt e AFm	Termos empregados para designar produtos de hidratação estruturalmente similares à etringita e ao monossulfoaluminato de cálcio hidratado
ANOVA	Análise de variância
ARI	Alta resistência inicial
ARR	Aditivo redutor de retração
ASTM	American Society for Testing and Materials
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub>	Concretos estudados nesta pesquisa, com resistências da ordem de 20 MPa, 35 MPa e 50 MPa
C60, C70, C80	Concretos de classes correspondentes às resistências à compressão de 60 MPa, 70 MPa e 80 MPa
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato de cálcio
Ca	Cálcio
Ca <sup>2+</sup>	Íon cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
Car	Carregamento
CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O	Sulfato de cálcio hemi-hidratado
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	Sulfato de cálcio di-hidratado
CH	Hidróxido de cálcio
CP II-E 32	Cimento <i>Portland</i> composto com escória de alto-forno classe 32
CP V ARI	Cimento <i>Portland</i> tipo V de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
E <sub>c</sub>	Módulo de elasticidade do concreto
f <sub>c</sub>	Resistência do concreto à compressão
f <sub>c28</sub>	Resistência do concreto à compressão aos 28 dias
f <sub>ck</sub>	Resistência característica do concreto à compressão
F	Parâmetro de Fischer
F <sub>calc</sub>	Parâmetro de Fischer calculado
F <sub>tab</sub>	Parâmetro de Fischer tabelado
G	Comprimento de referência para o cálculo da deformação unidimensional livre
h	Altura da coluna do líquido
K <sup>+</sup>	Íon potássio
L	Distância inicial entre as extremidades externas dos pinos metálicos
L <sub>0a</sub> , L <sub>0b</sub>	Leituras iniciais dos extensômetros horizontais, no patamar de percolação
L <sub>0c</sub>	Leitura inicial do comparador digital acoplado à base de medida, após a desforma
L <sub>ia</sub> , L <sub>ib</sub>	Leituras dos extensômetros horizontais, no tempo i
L <sub>ic</sub>	Leitura do comparador digital, no tempo i

$m_i$	Massa inicial da amostra
$m_j$	Massa da amostra, nas datas correspondentes às leituras de variação de comprimento, ao longo do tempo
$m_f$	Massa final da amostra, após a retirada da água evaporável
$\text{Na}^+$	Íon sódio
NBR	Norma brasileira
NM	Norma Mercosul
$\text{OH}^-$	Íon hidroxila
PECC	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
pH	Potencial hidrogeniônico
$P_d$	Pressão de disjunção
$P_g$	Pressão da fase gasosa úmida (ar seco + vapor d'água)
$P_L$	Pressão do líquido
$r$	Raio do tubo cilíndrico onde existe menisco
$r^2$	Coefficiente de determinação
R	Raio de curvatura do menisco
R1, R2 e R3	Regimes de desenvolvimento da retração e da variação relativa de massa de água ao longo da idade
Si	Sílica
$\text{SO}_3$	Trióxido de enxofre
$\text{SO}_4$	Sulfato
$\text{SO}_4^{2-}$	Íon sulfato
SRA	Aditivo redutor de retração
$t$	Tempo
T	Temperatura
$t_i - t_j$	Tempo transcorrido entre as deformações $\varepsilon_i$ e $\varepsilon_j$ , respectivamente
UnB	Universidade de Brasília
UR	Umidade relativa
$V_a$	Varição relativa de massa de água
$V_{ret}$	Velocidade de retração
$V_{retR1}, V_{retR2}, V_{retR3}$	Velocidade de retração nos regimes R1, R2 e R3
$\alpha$	Nível de significância
$\nu_1$ e $\nu_2$	Graus de liberdade do efeito avaliado e do resíduo, respectivamente
$\varepsilon$	Deformação específica
$\varepsilon_0$	Deformação específica elástica
$\varepsilon_{end}$	Deformação específica devida à retração endógena
$\varepsilon_i$	Deformação específica devida à retração no tempo $i$
$\varepsilon_j$	Deformação específica devida à retração no tempo $j$ , imediatamente anterior ao tempo $i$
$\varepsilon_{sec}$	Deformação específica devida à retração por secagem
$\varepsilon_{sec\_alt}$	Deformação específica devida à retração por secagem pelo método alternativo
$\varepsilon_{tot}$	Deformação específica devida à retração total
$\varepsilon(t)$	Deformação específica ao longo do ensaio de fluência
$\varepsilon(t')$	Deformação específica máxima no tempo de carregamento $t'$
$\theta$	Ângulo de contato entre a parede do tubo e a tangente à superfície do líquido
$\sigma$	Tensão

$\sigma_0$	Tensão constante referente ao carregamento aplicado durante o ensaio de fluência
$\Delta_{\text{Elástica}}$	Deformação elástica
$\Delta_{\text{Fluência}}$	Deformação devida à fluência
$\Delta_{\text{Recuperação da Fluência}}$	Deformação de recuperação da fluência

## 1 INTRODUÇÃO

A presente tese está inserida na linha de pesquisa “Sistemas Construtivos e Desempenho de Materiais e Componentes”, do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/UnB), abordando o desenvolvimento das deformações devidas à retração e à fluência nas baixas idades de concretos estruturais.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Embora o desenvolvimento de deformações seja uma característica intrínseca do concreto, o aumento excessivo destas deformações nos elementos estruturais tem sido motivo de preocupação. Esta conjuntura deve-se, em parte, ao desenvolvimento tecnológico deste material e dos métodos de cálculo de forma que, atualmente, os edifícios são projetados com elevado número de pavimentos, os elementos estruturais são cada vez mais esbeltos e a concepção arquitetônica tende a privilegiar grandes vãos, menor quantidade de pilares e lajes em espessuras reduzidas (SALVADOR, 2007). Além disso, os processos construtivos vêm se modificando gradualmente, visando a racionalização dos canteiros, a redução dos custos e a maior velocidade de entrega das obras. Nessa esteira, a aplicação do concreto usinado se firmou ao longo dos anos, como uma prática capaz de garantir maior dinamismo à etapa de execução da estrutura de concreto.

Além disso, especificamente na execução da estrutura de concreto armado, alcançar maior velocidade nos serviços por vezes significa menosprezar a verificação e a adaptação do material estrutural aos ciclos de execução, adotando práticas como a retirada antecipada do escoramento, o início da montagem de fôrmas e concretagem dos pavimentos posteriores, além da antecipação da execução das alvenarias. Estas práticas submetem as estruturas à ação precoce do carregamento, sem que haja tempo para que se desenvolvam a resistência e a capacidade de deformação do material.

Cabe salientar que, durante as etapas construtivas (e, portanto, a baixas idades) a composição das ações às quais a estrutura está submetida é bem diferente daquela prevista na concepção estrutural. A aceleração dos ciclos de execução faz com que pavimentos recém concretados sejam temporariamente suportados pelos pavimentos inferiores através do conjunto de fôrmas e escoras, fazendo parte de um sistema de sustentação estrutural composto por vários

pavimentos conectados entre si através de ligações rotuladas. Desta forma, as ações de construção se distribuem entre os pavimentos ligados por escoras, e cada um absorve uma parcela de carga de acordo com sua rigidez, tendo em vista que cada pavimento possui idade diferente e, conseqüentemente, propriedades mecânicas diferentes (SALVADOR, 2007). Desta forma, em alguma etapa da construção, a estrutura poderá apresentar razão entre o esforço resistente e esforço solicitante inferior àquela considerada no projeto, ocasionando o desenvolvimento de deformações excessivas e fissuras (FREITAS, 2004).

Com o objetivo de minorar as conseqüências dos carregamentos precoces sobre as estruturas de concreto, por vezes a solução encontrada é aumentar a resistência dos concretos (usados ou não) nas idades iniciais, seja pelo uso de cimento de alta resistência inicial, seja pela adoção de maiores valores para a resistência característica. Neste processo, os altos consumos de cimento aliados à cura deficiente e à exposição do concreto à ação da secagem (pela retirada antecipada das fôrmas) podem majorar as deformações devidas à retração, culminando pelo desenvolvimento de fissuras ao longo dos elementos estruturais, principalmente para maiores relações superfície/volume. Entre as hipóteses assumidas e muitas vezes não verificadas que também influenciam diretamente as deformações das estruturas estão: o módulo de elasticidade considerado no dimensionamento e não verificado em obra, aumento da fluência devido à velocidade de execução e carregamento precoce da estrutura, além da diminuição da rigidez devido à microfissuração em serviço (VIEIRA, 2008).

Ademais, no que se refere ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos aplicados nas estruturas, vale considerar que as características e propriedades do material passaram por um processo de racionalização e que os métodos de dosagem estão sendo gradualmente modificados. Especificamente para os concretos usinados, os métodos de dosagem estão sujeitos a alta variabilidade e aos ajustes realizados diretamente no caminhão-betoneira para minorar os efeitos da perda de abatimento. Desta forma, estima-se que a consideração isolada dos valores de resistência à compressão para o controle tecnológico do concreto já não sejam suficientes para prever o comportamento da estrutura, tornando-se relevante, também, o estudo do módulo de elasticidade e da fluência (MEHTA & MONTEIRO, 2006).

Entre os vários fenômenos que se produzem a baixas idades do concreto, pode-se destacar como mais importantes: a hidratação do cimento, as deformações autógena, plástica e por

secagem, os efeitos térmicos e químicos, a fluência e a fissuração. Cabe salientar que estes fenômenos interagem entre si, não devendo ser analisados isoladamente, a menos que se considerem hipóteses simplificadoras bem fundamentadas (AURICH, 2009).

As conseqüências da retração e da fluência para as estruturas de concreto se baseiam nos efeitos das deformações dependentes do tempo. A retração é um fenômeno relacionado ao consumo de água pela autodessecação ou pela perda de água do concreto para o meio ambiente, que acaba resultando em encurtamentos que se manifestam ao longo do tempo. A fluência, que ocorre no concreto submetido a ações de longa duração, também é um fenômeno que se manifesta ao longo do tempo, produzindo deformações elásticas e plásticas progressivas nas regiões solicitadas. Especificamente em relação à protensão, a ocorrência concomitante ou isolada da retração e da fluência pode ocasionar o encurtamento do concreto na região da armadura protendida. Em conseqüência, os efeitos destas deformações fazem com que o valor inicialmente instalado da força de protensão sofra redução progressiva até se estabilizar. Obviamente, as perdas de protensão acumuladas ao longo do tempo podem ocasionar a redução da capacidade portante da estrutura de concreto protendido, a necessidade de re-protensão e, em casos extremos, a ruína da peça (VELASCO, 2008).

Desta forma, as deformações dependentes do tempo, em especial as retrações autógena e por secagem e a fluência, representam influência significativa sobre o comportamento do concreto nas baixas idades, uma vez que seu desenvolvimento pode ocasionar reflexos negativos não só com relação ao comportamento mecânico da estrutura, como também contribuir para a redução da durabilidade do material, devido à formação de fissuras.

### **1.1.1 Pesquisas anteriores sobre a retração e a fluência**

O fenômeno da retração constitui um problema sério cuja origem carece de um entendimento mais profundo, embora de modo geral não represente prejuízo estrutural ao concreto. Segundo Kovler & Zhutovsky (2006), apesar dos avanços obtidos, o fenômeno da retração está longe de ser totalmente compreendido. Desta forma, em virtude da complexidade do tema, vários pesquisadores têm realizado estudos com enfoque especial para o entendimento dos fenômenos da retração. Nesta esteira, cumpre destacar estudos recentes abordando aspectos como a compreensão do fenômeno e sua modelagem (WEISS, 1999; LURA, 2003), a eficiência dos aditivos redutores e compensadores de retração para caracterização de pastas e

argamassas de cimento (MELO NETO, 2002) e de concretos de alto desempenho (SILVA, 2007-a), bem como a realização de ensaios de retração com vistas à caracterização de concretos reforçados com fibras de aço (NUNES, 2006), concretos produzidos com o uso de agregados reciclados (CABRAL, 2007) e concretos auto-adensáveis (ESPING, 2007; FERRAZ, 2009), análise da influência dos agregados no desenvolvimento da retração plástica (ANDRADE, 2008), dentre outros.

Outro fenômeno de natureza complexa e cujos mecanismos teóricos freqüentemente reportam ao desenvolvimento simultâneo da retração diz respeito à fluência. Sabe-se que as características microestruturais da pasta de cimento a baixas idades representam importante papel no processo de fluência, dificultando o estudo deste fenômeno, particularmente na ocorrência de secagem durante as medidas. Tamtsia *et al.*, (2004) observaram que as medidas de deformação por fluência não variam linearmente com a relação tensão-resistência devido ao prosseguimento das reações de hidratação após o carregamento. Além disso, adicionalmente pode ocorrer ainda indução da hidratação pela ação do carregamento, o que sugere a ocorrência de alterações microestruturais significativas, provavelmente afetando as moléculas de C-S-H (TAMTSIA *et al.*, 2004).

As pesquisas desenvolvidas no Brasil para avaliação do comportamento do concreto à fluência contam com análises e modelagens numéricas (CAMPOS FILHO, 1982; FONTANIVE, 1982), análise da interferência da retração e da fluência nos métodos de reforço estrutural (REIS, 2003; TAKEUTI, 2003), análise da redistribuição dos esforços em vigas protendidas (SILVA, 2003), desenvolvimento de algoritmo genético para previsão do comportamento térmico e mecânico do concreto jovem (SILVOSO, 2003), proposição de metodologia computacional para análise de estruturas sob efeito do tempo (SANTOS, 2006), simulação do carregamento precoce de estruturas através da avaliação de deformações em vigas de concreto armado (SALVADOR, 2007), análise de funções de fluência referentes a diversos intervalos de carregamento (LIMA, 2007), determinação do comportamento à fluência de elementos de concreto submetidos à reação álcali-agregado (SILVA, 2007-b), caracterização mecânica de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras (VELASCO, 2008), caracterização do comportamento viscoelástico de compósito de matriz de resina epoxídica com reforço de fibra de carbono (FARINA, 2009), desenvolvimento de algoritmo para predição do risco de fissuração (AURICH, 2009), dentre outras.

Cabe salientar que a fissuração do concreto a baixas idades, seja pelo desenvolvimento excessivo de deformações por fluência ou pelo fenômeno da retração, pode não influenciar a segurança estrutural imediatamente, mas afeta a durabilidade a longo-prazo da estrutura por facilitar o ingresso de agentes deletérios para a parte interna do material. Além disso, a durabilidade das estruturas de concreto e materiais cimentícios é altamente influenciada pelos estágios iniciais de hidratação. Assim, estima-se que o melhor conhecimento acerca das variações dimensionais do concreto durante o processo de hidratação do cimento e nas baixas idades do concreto possa contribuir para o entendimento dos fenômenos da retração e da fluência e seus mecanismos de atuação.

## 1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA E OBJETIVOS

Conforme citado no item anterior, vários autores vêm desenvolvendo pesquisas enfocando os fenômenos da retração e da fluência do concreto, tanto a baixas idades, como durante o decorrer da vida útil do material. Em ambos os casos, grande parte dos estudos objetiva estabelecer formulações e modelagens matemáticas ou caracterizar certos tipos especiais de concretos, com base no comportamento do material frente às deformações incidentes devido às propriedades intrínsecas do material ou como resposta à ação dos carregamentos. Ainda assim, resta uma lacuna referente ao enfoque comportamental dos concretos usinados, que representam uma significativa parcela no volume de concreto aplicado cotidianamente nas obras em concreto armado ou protendido.

Desta forma, a originalidade do tema desenvolvido pela presente pesquisa reside no enfoque deste estudo, que pretende analisar as alterações volumétricas de concretos comerciais nas baixas idades devidas aos fenômenos de retração e da fluência. As resistências características à compressão dos concretos inseridos no estudo foram escolhidas de forma a possibilitar a análise de características/propriedades representativas dos concretos estruturais mais adotados para execução de obras em concreto armado e protendido, com vistas ao entendimento das propriedades mecânicas e microestruturais deste material.

### 1.2.1 Objetivos gerais

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de concretos comerciais nas baixas idades, frente ao desenvolvimento de deformações devidas à retração e à fluência, em

sistemas selados e não selados, visando contribuir tanto para o melhor entendimento destes fenômenos e seus mecanismos de atuação, como correlacionar os comportamentos detectados às práticas construtivas, a fim de minimizar os efeitos das deformações ao longo do tempo. Cabe salientar que o termo '*baixas idades*' referencia o início das medidas realizadas, a saber, a partir da determinação experimental da transição suspensão-sólido para os concretos em estudo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

A fim de alcançar os objetivos gerais propostos no estudo, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a evolução das deformações devidas à retração nas baixas idades, em corpos-de-prova selados e não selados, mensurando as deformações intermediárias e totais, visando a diferenciação do comportamento de acordo com as condições de revestimento dos corpos-de-prova;
- Mensurar as deformações devidas à retração por secagem conforme prescrições da ASTM C 157 (ASTM, 2004), após 28 dias de cura submersa;
- Relacionar as deformações nos corpos-de-prova sujeitos à secagem à variação relativa de massa de água sofrida pelos corpos-de-prova durante o período de leituras;
- Estipular índices para o desenvolvimento da retração e da variação relativa de massa de água e verificar a existência de regimes de desenvolvimento dos fenômenos ao longo do tempo;
- Mensurar as deformações específicas sob manutenção de carregamento devidas à ocorrência da retração e da fluência e avaliar o desenvolvimento simultâneo dos fenômenos ao longo do tempo, com vistas à análise comportamental dos concretos em estudo;
- Correlacionar as deformações totais desenvolvidas com e sem aplicação de carregamento, visando avaliar a diferenciação no desenvolvimento destas deformações comparativamente a cada tipo de concreto estudado.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido, segundo assuntos específicos, em seis capítulos, iniciando-se pela revisão bibliográfica, passando ao programa experimental desenvolvido, apresentação e discussão dos resultados e considerações finais. No Capítulo 1 desenvolveu-se uma breve introdução do tema, justificando sua relevância, definição da originalidade do tema e delimitação dos objetivos gerais e específicos da pesquisa e seu conteúdo. Nos Capítulos 2 e 3 apresenta-se a revisão bibliográfica relevante para melhor entendimento do tema, citando aspectos relativos à hidratação do cimento e formação dos compostos hidratados, características gerais da pasta hidratada, deformações e mecanismos de retração, fluência e fatores influentes. No Capítulo 4 encontram-se detalhados os procedimentos e ensaios adotados na metodologia experimental, além da caracterização dos materiais utilizados nas misturas de concreto. No Capítulo 5 apresentam-se a caracterização físico-mecânica dos concretos estudados, além dos resultados apurados durante os ensaios de determinação da retração e da fluência. Além disso, neste mesmo Capítulo, realizou-se a análise dos resultados, com as devidas avaliações e explicações acerca dos fenômenos em estudo, juntamente com a análise de variância destes resultados. Finalmente, no Capítulo 6 encontram-se expostas as principais conclusões obtidas pela pesquisa, além de sugestões para pesquisas futuras.

Dados e tabelas adicionais encontram-se dispostos nos apêndices, a fim de subsidiar eventuais conferências e a visualização de quaisquer informações necessárias ao entendimento e confiabilidade da presente pesquisa.

## 2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O concreto (armado ou protendido) é um material estrutural, obtido pela inserção de armaduras de aço em uma matriz de concreto, capaz de receber e transmitir esforços oriundos do seu próprio peso, dos demais componentes da edificação e das cargas de utilização. Seu comportamento é fundamentalmente influenciado por fatores como as características intrínsecas das reações químicas de hidratação do cimento, condições do meio ambiente no qual as estruturas encontram-se inseridas e idade de aplicação de carregamento, dentre outros. Além disso, o tempo necessário para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto varia de acordo com os materiais utilizados, especialmente o tipo, classe e consumo de cimento, de forma que os ganhos de resistência podem continuar até em idades avançadas. De modo geral, algumas etapas construtivas ocorrem durante as reações químicas iniciais de hidratação do cimento e enrijecimento do concreto, de forma que o material encontra-se submetido a níveis de tensão que variam de acordo com as práticas de execução adotadas. Assim, durante o processo construtivo, o desenvolvimento das propriedades mecânicas do material e a aplicação e distribuição de esforços se sobrepõem. Neste contexto, faz-se necessário um entendimento das reações químicas de hidratação e da sua influência sobre o desenvolvimento das deformações a baixas idades do concreto.

### 2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO *PORTLAND*

Quando cimento *Portland* e água são misturados, as partículas de cimento tornam-se dispersas na água. Esta suspensão altera-se do estado semi-fluido para o estado plástico ou rígido, com o aumento da quantidade de cimento na mistura. Os espaços preenchidos por água entre as partículas de cimento na pasta fresca podem ser considerados como um sistema capilar irregular e interconectado. A quantidade de água na mistura afeta decisivamente não somente a plasticidade ou consistência, mas também praticamente todas as propriedades importantes da pasta de cimento fresca ou endurecida. A principal razão para esse aspecto é que, com menor quantidade de água, existe maior concentração de partículas de cimento na pasta fresca compactada, com melhores condições de obtenção de uma estrutura interna mais refinada (POPOVICS, 1982; TAYLOR, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2006).

### 2.1.1 Reações de hidratação do cimento *Portland*

A hidratação do cimento *Portland* abrange um conjunto de reações interdependentes com cinéticas diferentes, ao curso das quais as partículas de cimento anidro vão sendo progressivamente dissolvidas dando origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Ao entrar em contato com a água, os *silicatos* se dissolvem precipitando os primeiros hidratos. Assim, a hidratação dos silicatos é aquela que exerce maior influência sobre as principais características do material, sendo que os silicatos tricálcicos se dissolvem mais rapidamente que os dicálcicos. A hidratação dos *aluminatos*, dada pela reação da água e do  $C_3A$  seria quase instantânea se não fosse retardada pela adição de sulfato de cálcio, e o produto obtido na reação é o trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou etringita (fase AFt), que se cristaliza sob a forma de agulhas em volta dos grãos de cimento anidro. Em caso de excesso de  $C_3A$  em relação ao sulfato de cálcio, o trissulfoaluminato de cálcio hidratado reage com o  $C_3A$  para formar monossulfoaluminatos de cálcio hidratado (fase AFm). A fase AFm se cristaliza sob a forma de plaquetas hexagonais, disseminadas nas fibras de C-S-H. A hidratação dos *ferro-aluminatos*, em presença de gipsita, dá origem à formação de fases similares às obtidas na hidratação do  $C_3A$ , as quais se distinguem pela substituição parcial do alumínio pelo ferro com composições químicas variáveis, mas estruturas similares às da etringita e do monossulfoaluminato (TAYLOR, 1997).

### 2.1.2 Mecanismos de hidratação do cimento *Portland*

O termo hidratação denota a reação entre uma dada espécie química com a água, convertendo-se em hidrato, pela introdução de água em sua molécula. Especificamente em relação à química do cimento, o termo refere-se ao conjunto de mudanças processadas quando o cimento anidro ou uma de suas fases constituintes mistura-se com a água. Assim, durante a reação de hidratação do cimento, os hidratos estabelecem ligações entre os grãos de clínquer em dissolução e a porosidade é progressivamente reduzida. Em outras palavras, na presença de água, os silicatos e aluminatos presentes na composição do cimento formam produtos de hidratação que, com o tempo, irão conferir propriedades mecânicas à pasta de cimento endurecida (ODLER, 1998).

Diferentes modelos foram propostos para explicar os mecanismos segundo os quais se processam as reações de hidratação do cimento. De modo geral, o mecanismo mais relevante

e confirmado experimentalmente foi proposto por *Le Chatelier*, em 1887. Segundo este mecanismo, a hidratação do cimento ocorre, durante as primeiras horas de reação, pela dissolução gradual das fases anidras do clínquer e da gipsita, supersaturação da solução e precipitação dos hidratos sobre as partículas (BAROGHEL-BOUNY, 1994). Neste período, a taxa de reação se mantém crescente, representando o período de aceleração do calor de hidratação. Com o desenvolvimento da hidratação, o cimento anidro é gradativamente recoberto pela precipitação específica do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que forma uma fina camada sobre as partículas, restringindo a dissolução das fases anidras (SINGH, BHATTACHARJEE e SHUKLA, 1995; TAYLOR, 1997; KADRI e DUVAL, 2002; QUARCIONI, 2008).

Um segundo mecanismo, denominado topoquímico, atua após a consolidação da pasta. Nesse ponto, a água se difunde pela camada de hidratos inicialmente precipitada, atingindo a fração residual anidra do cimento, dando prosseguimento à hidratação. A transição do mecanismo de hidratação por dissolução/precipitação para o topoquímico ocorre no período de desaceleração das reações, evidenciado na curva do calor de hidratação. A redução na taxa de solubilização dos anidros diminui a concentração de íons e, conseqüentemente, a precipitação de compostos hidráulicos. O recobrimento total do cimento anidro representa o início da hidratação topoquímica (KADRI e DUVAL, 2002).

As reações químicas instantâneas ocorrem primeiramente entre o aluminato tricálcico e a água. A elevada solubilidade de alguns componentes do clínquer dá origem a um rápido aumento na concentração de aluminatos, sulfatos e álcalis (sódio, potássio e cálcio) na fase líquida. Nesta fase, as partículas de cimento ficam revestidas por produtos de hidratação em forma de gel, culminando pelo enrijecimento gradual da pasta de cimento. Embora a reação de hidratação se inicie no contato entre os grãos de cimento e a água, existe um período de dormência, imediatamente anterior ao enrijecimento, durante o qual a pasta permanece plástica. O período de dormência se finaliza quando a camada de gel depositada sobre as partículas de cimento é destruída ou se torna mais permeável à difusão iônica. O período de dormência normalmente dura entre 40 a 120 minutos, em temperatura controlada, dependendo das características do cimento. No entanto, temperaturas mais baixas ou aditivos retardadores de pega podem prolongar esse período em mais de duas horas, enquanto altas temperaturas ou aditivos aceleradores podem reduzi-lo a minutos. Vale salientar que medidas de consistência são usualmente realizadas após a conclusão do processo de mistura e assim, na maior parte

das vezes, durante o período dormente (POPOVICS, 1982).

A hidratação do cimento *Portland* pode ser subdividida em cinco fases, a saber, estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV); estágio final ou período de reação lenta (V). Na Figura 2.1 ilustra-se a associação da evolução de liberação de calor de hidratação de uma pasta de cimento *Portland* de acordo com o tempo de hidratação, evidenciando a termodinâmica das reações químicas desencadeadas no processo.

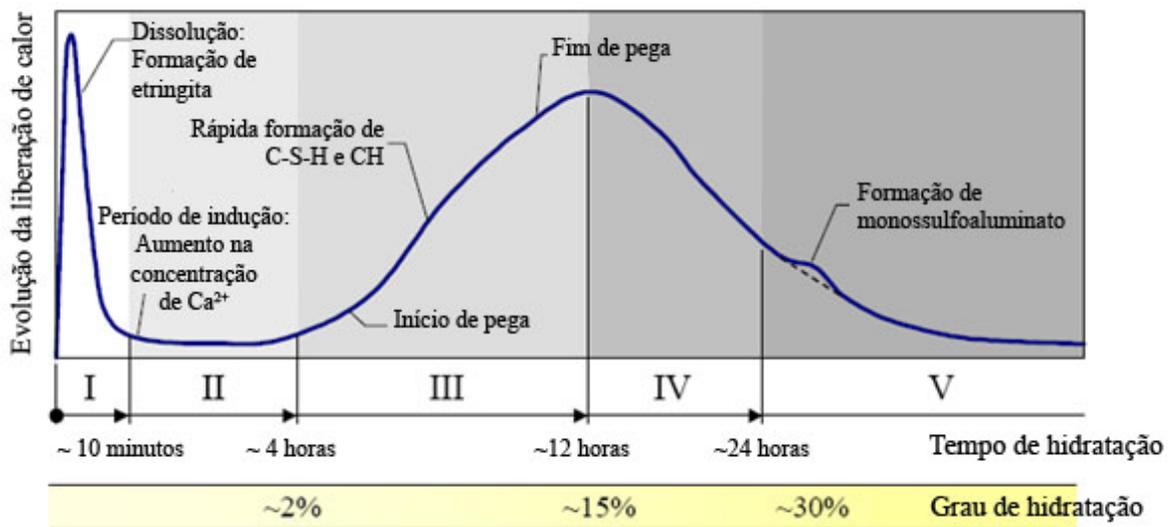


Figura 2.1 – Evolução da taxa de calor determinada para uma pasta de cimento, durante a hidratação (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).

a. *Fase I - Estágio inicial ou de pré-indução:* o pico inicial é atribuído a uma combinação exotérmica de molhagem das partículas e de reações iniciais de dissolução de sulfatos alcalinos e liberação de íons  $K^+$ ,  $Na^+$  e  $SO_4^{2-}$ , dissolução do sulfato de cálcio até a saturação e liberação de íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4$ . A hidratação do sulfato de cálcio hemi-hidratado ( $CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$ ) para di-hidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) também contribui para a ocorrência do primeiro pico de liberação de calor (QUARCIONI, 2008).

Assim, ao contato da água, os grãos de cimento começam imediatamente a reagir, iniciando-se rapidamente a dissolução inicial. Neste primeiro período, as fases  $C_3A$  e  $C_3S$  são as mais reativas. A partir dos primeiros minutos de reação, a dissolução das fases anidras mais reativas,  $C_3S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ , origina uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que reveste a superfície dos grãos anidros do clínquer. Os íons liberados com a dissolução do  $C_3A$  e do  $C_4AF$  reagem com os íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  dando origem a um gel amorfo (rico em

aluminatos) sobre a superfície dos grãos do clínquer e de bastões ou pequenas e espessas agulhas de etringita (BOIVIN, 2001; QUARCIONI, 2008).

*b. Fase II - Período de indução ou dormente:* uma camada de gel se deposita sobre o cimento anidro, formando uma espécie de barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. Este gel amorfo e coloidal é originado a partir da precipitação inicial da etringita, e em menor escala, de C-S-H rico em sílica e alumínio, com presença de íons cálcio e sulfato (KADRI e DUVAL, 2002). A elevação rápida do pH e o teor de cálcio e de alcalinos da água retarda a dissolução dos constituintes. Desta forma, as reações rápidas dos primeiros minutos são seguidas por um período de fraca reatividade, que se traduz pela inércia térmica do sistema (BOIVIN, 2001).

*c. Fase III - Período de aceleração:* Nesta fase predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, com conseqüente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de C-S-H. Os principais produtos formados são C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$ , com declínio gradual da concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  na solução. Este período se finaliza com o aparecimento do segundo pico na curva, conforme ilustrado na Figura 2.1. Este pico sinaliza o início da desaceleração no desenvolvimento de calor do sistema. O fenômeno da pega se dá no decorrer do período de aceleração, quando os silicatos, especialmente a alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ), passam a se hidratar rapidamente até atingir a taxa máxima de hidratação, que corresponde ao máximo de calor liberado. A taxa de hidratação neste período é controlada pela formação do C-S-H (QUARCIONI, 2008).

*d. Fase IV - Período de desaceleração:* Esta fase começa com diminuição gradual da taxa da evolução do calor, devido à redução gradual na concentração de íons em solução, em decorrência da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras (KADRI e DUVAL, 2002). Após o período aproximado de 24h, prosseguem as reações lentas que dão origem também ao C-S-H e ao  $\text{Ca(OH)}_2$ . O mecanismo da reação passa a ser controlado por difusão iônica ou por reação topoquímica. Alguns tipos de cimentos com concentrações de  $\text{C}_3\text{A}$  maiores que 12% exibem um sobressalto característico na curva de calor de hidratação, aproximadamente 16 horas após o início da reação, associado a uma nova formação de etringita (ESPING, 2007).

*e. Fase V - Estágio final:* Nesta fase, ocorre a formação de placas hexagonais delgadas

de monossulfoaluminato de cálcio a partir de reação do trissulfoaluminato de cálcio com o  $C_3A$  e o  $C_4AF$ , por indisponibilidade de sulfato de cálcio no sistema. Os espaços ocupados inicialmente pelo excesso de água da mistura são gradualmente preenchidos pelos produtos de hidratação em desenvolvimento, com densificação da pasta. A partir desse momento, as reações de hidratação prosseguem por mecanismo topoquímico (TAYLOR, 1997).

Na Figura 2.2 encontra-se um esquema dos compostos hidratados associados ao tempo e aos estágios de hidratação.

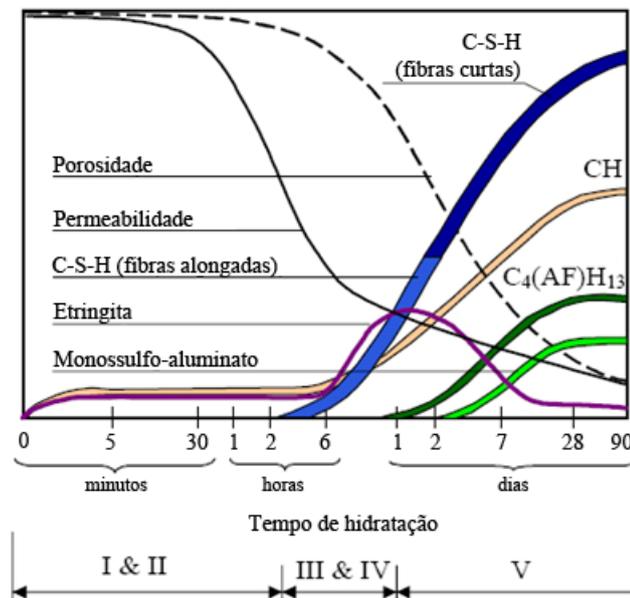


Figura 2.2 – Compostos hidratados associados aos estágios de hidratação (LOCHER *et al.*, 1976, *apud* ESPING, 2007).

### 2.1.3 Pega do cimento

A pega do cimento constitui o primeiro passo na transformação gradual da pasta de cimento ou do concreto fresco de consistência fluida em consistência sólida. A pega é geralmente medida pela resistência à penetração, através da agulha de *Vicat* para pastas ou argamassas de cimento, ou através da agulha de Proctor, para o concreto. Na fase inicial da pega, o concreto não deve ser manuseado ou moldado e, na fase final, começa a se desenvolver sua resistência. Os níveis de penetração correspondentes às fases iniciais e finais da pega são completamente arbitrários e os ensaios não fornecem nenhum conhecimento fundamental sobre os processos químicos e microestruturais relacionados (STRUBLE e LEI, 1995).

Vale salientar que é importante entender tanto as mudanças químicas (hidratação) como as

mudanças físicas (microestruturais) associadas à pega. Para o cimento comum, a pega é geralmente atribuída à formação de C-S-H (STRUBLE e LEI, 1995). No entanto, não há nenhuma evidência experimental que indique a conexão entre a pega e as reações de hidratação, em parte porque o conceito pertinente à pega permanece como um parâmetro essencialmente empírico (SILVOSO, 2003).

Segundo Gomá (1979) o fenômeno da pega estaria relacionado tanto à alta velocidade como à forma como se processam as reações de hidratação das fases  $C_3A$  e  $C_4AF$ . Segundo o autor, a hidratação destes compostos consumiria quantidade significativa de água, promovendo uma ação desidratante no sistema e nos produtos de hidratação já formados, reduzindo a plasticidade da mistura. A seguir, um entrelaçamento das fases cristalinas insolúveis impediria a difusão da água através do sistema, aumentando a viscosidade da suspensão até que as fases hidratadas estivessem de tal modo conectadas que mantivessem certa quantidade de água aprisionada na trama formada pelos produtos de hidratação. Este processo garantiria a estanqueidade quase total do sistema, garantindo que praticamente toda a matriz em hidratação conservasse a mesma relação água/cimento da mistura inicial. A partir deste ponto, as reações de hidratação prosseguiriam até o enrijecimento completo do material. Mehta e Monteiro (2006) também atribuem o enrijecimento da pasta e conseqüente pega à perda gradual e/ou indisponibilidade da água livre da mistura devido (i) às reações de hidratação, (ii) à adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade (como o C-S-H e a etringita) e (iii) à evaporação.

Analisando a evolução da hidratação do ponto de vista da formação da estrutura da pasta de cimento através do enrijecimento da mistura, a cinética da reação pode ser subdividida em quatro períodos, definidos conforme se segue:

a. *Ante-pega ou fase de suspensão:* As partículas de cimento *Portland* apresentam grande número de cargas positivas e negativas sobre sua superfície, tendendo a flocular quando colocadas em presença de um líquido polar como a água. A formação de flocos estáveis na pasta de cimento gera dois comportamentos: de um lado, impede a dispersão uniforme das partículas dentro da mistura e, por outro lado, aprisiona certa quantidade de água no interior dos flocos. Assim, na fase de ante-pega, ou seja, imediatamente após a mistura, o concreto se mostra como uma suspensão de grãos diversos (fase granular) num líquido visco-plástico (pasta de cimento) que evolui até formar um esqueleto rígido. A partir da mistura, o primeiro

fenômeno é a floculação. Cabe ressaltar que esta água aprisionada nos flocos não está mais disponível para lubrificar a mistura, razão pela qual para obter um concreto trabalhável deve-se adicionar muito mais água do que aquela necessária para hidratar os grãos de cimento (SILVOSO, 2003).

Nesse período, para pastas e concretos de elevada relação água/cimento, pode-se observar o fenômeno da segregação, definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, produzindo assim uma distribuição não-uniforme destes constituintes em um dado volume. Pode ocorrer ainda a exsudação, forma de segregação que se processa quando uma parte da água contida na pasta de cimento se separa desta sob o efeito da sedimentação dos grãos de cimento e dos finos da fase granular. A exsudação tem por resultado, no caso do concreto, o acúmulo de uma película de água clara na superfície do concreto (BOIVIN, 2001).

Durante a ante-pega inicia-se ainda uma variação dimensional denominada como contração *Le Chatelier*, que culmina na diminuição do volume absoluto total da mistura em relação ao volume dos constituintes. Assim, o volume de hidratos formado é inferior à soma dos volumes iniciais de cimento anidro e de água. Após a pega, a contração é nitidamente inferior àquela observada antes da pega, porque o esqueleto formado se opõe à contração por conta de sua crescente rigidez mecânica (SILVOSO, 2003).

*b. Fase de coagulação:* Esta fase sucede o estado de suspensão e compreende uma etapa importante no mecanismo de pega da pasta de cimento. Este processo de coagulação, mecanicamente reversível, conduz à agregação muito rápida dos grãos sob a ação de forças de superfície, como as forças de *Van der Waals*, de forças eletrostáticas, de forças de solvatação e de interações químicas (SILVOSO, 2003).

*c. Pega:* Nesta etapa, a camada nanocristalina de C-S-H recém-formada e que circundava os grãos ainda anidros de cimento se rompe, dando lugar à precipitação de cal hidratada e de um C-S-H fibroso secundário. Esta camada de hidratos crescendo na periferia dos grãos isolados rompe a conexão da fase líquida por aglomeração destes grãos até que se forma uma primeira rede de partículas conectadas. Acker (1988) *apud* Boivin (2001) descreve o processo pela teoria da percolação: o estabelecimento de uma ligação mecânica entre dois grãos que inicialmente se apresentam de maneira aleatória e isolada no volume constitui um acontecimento elementar. A seguir, ocorre a formação de amas (conjuntos contínuos de grãos

ligados mecanicamente). Finalmente, o primeiro caminho contínuo de grãos mecanicamente conectados ligando uma face do volume à face oposta constitui o limiar (ou patamar) de percolação, ilustrado esquematicamente na Figura 2.3. Teoricamente, neste exato momento, o material deixa de ser um líquido e passa a ser um sólido.

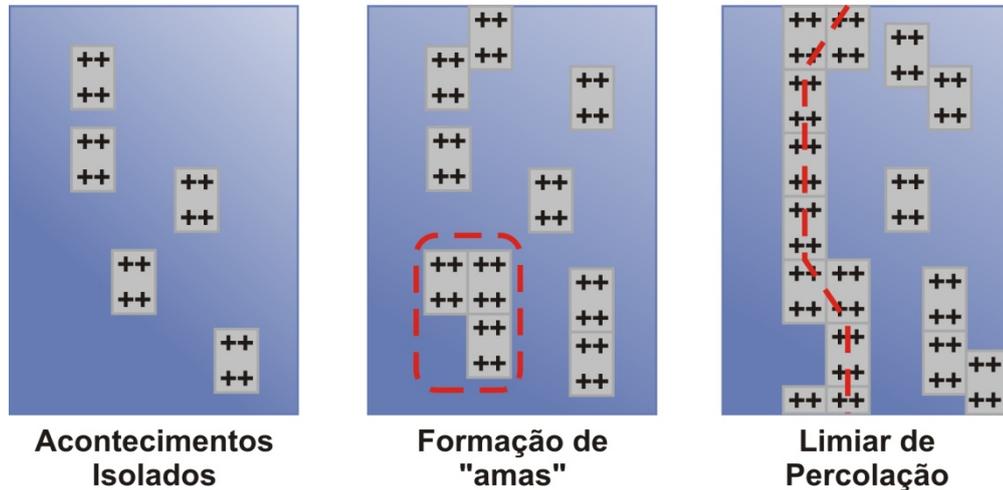


Figura 2.3 – Representação esquemática da teoria da percolação (adaptado de ACKER, 1988, *apud* BOIVIN, 2001).

Assim sendo, a pega da pasta de cimento representa uma etapa importante sob o ponto de vista mecânico porque, neste momento, desenvolve-se determinada rigidez ao material, conferindo propriedades mecânicas até então inexistentes à pasta de cimento ou ao concreto. A partir desta etapa, os fenômenos de retração que dizem respeito a um esqueleto sólido devem ser considerados, pois existe a possibilidade de fissuração do material. Finalmente, cabe salientar que tanto a estrutura do esqueleto rígido (rede porosa) no momento da pega, como o tempo da pega da pasta de cimento são bastante influenciados por fatores como período da ante-pega, relação água/cimento, temperatura, natureza e finura do cimento e presença de aditivos minerais e químicos (SILVOSO, 2003).

*d. Pós-pega ou fase de endurecimento:* Na pós-pega, as reações de hidratação prosseguem segundo uma cinética desacelerada. Os grãos de cimento anidro se hidratam de maneira concêntrica sobre sua superfície e, neste caso, o C-S-H hidratado forma uma camada periférica crescente. Em seguida, a interligação dos hidratos torna lenta a reação de hidratação, dificultando e retardando os fenômenos de movimentação de água na direção do cimento anidro. Os novos hidratos se formam no núcleo dos grãos num espaço mais restrito, tornando essa camada de hidratos mais densa. Neste estágio, a difusão de íons, e então, a

micro-difusão de água através das camadas de hidratos pode ser considerada como o mecanismo dominante regulando a hidratação. Sob o ponto de vista mecânico, a continuidade das reações de hidratação ao longo do período denominado como pós- pega tem duas conseqüências principais: (i) o desenvolvimento da fase sólida, que se traduz pela redução da porosidade da pasta e (ii) a diminuição do teor de água, ocasionando a redução da fase líquida no espaço dos poros, dando início ao fenômeno da autodessecação (BOIVIN, 2001).

Seja pela perda ou indisponibilidade de água na mistura, seja pela precipitação dos hidratos e formação do patamar de percolação, cabe salientar a pega como o período mais importante para a evolução das propriedades mecânicas do concreto através do desenvolvimento do esqueleto da pasta de cimento endurecida, como resultado do prosseguimento da hidratação do cimento e/ou dos aditivos minerais. Para este estudo em especial, a teoria do patamar de percolação é adotada como responsável pelo desenvolvimento e estabelecimento da pega do cimento.

#### **2.1.4 Determinação da transição suspensão-sólido através do método de propagação da velocidade ultra-sônica**

A determinação precisa do patamar de percolação é de suma importância para compreender o comportamento do concreto nas idades iniciais, especialmente quando o objetivo é determinar experimentalmente as variações de volume e calibrar os modelos numéricos, considerando as tensões e a relaxação, desde o início físico dessas propriedades (WEISS, 2002). Embora os termos pega e endurecimento sejam significativos e úteis para a tecnologia do concreto, cientificamente os termos não fornecem uma definição precisa da idade na qual as tensões podem ser transferidas aos elementos de concreto. Assim, a determinação precisa desse tempo é de suma importância tanto para a área experimental como para a área numérica (POPOVICS, 1982).

Estudos realizados por Aïtcin (1998) indicam que a determinação experimental da retração autógena deve iniciar-se no '*tempo zero*', sob pena da subestimativa dos resultados. No entanto, não existe um método estabelecido para a determinação de  $t_0$  e a falta de padronização para determinação do patamar de percolação dificulta e prejudica a comparação direta entre diferentes materiais cimentícios e entre os modelos teóricos e os resultados disponíveis na literatura técnica (SILVA, 2007-a).

Dentre os métodos usados para estimar a pega dos materiais cimentícios, podem-se citar os métodos de penetração mecânica, conforme especificado pela NM 65 (ABNT, 2002) e pela ASTM C 403 (ASTM, 2008), o método de evolução da taxa de temperatura (devido à liberação do calor de hidratação), métodos baseados em emissão acústica, adsorção de microondas, técnicas de determinação da condutividade e resistividade elétrica, além do método de propagação de ondas ultra-sônicas. Este último método será utilizado no presente trabalho com o objetivo de avaliar a transição suspensão-sólido para os concretos em estudo.

O ensaio de avaliação do patamar de percolação através da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas foi proposto por Silva (2007), utilizando prescrições da NM 58 (ABNT, 1996), incluindo modificações, dentro do projeto P&D, desenvolvido em parceria com o Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S/A. O ensaio utiliza um aparelho medidor do tempo de propagação do pulso ultra-sônico de frequência compatível às dimensões do corpo-de-prova em ensaio. Segundo as normas NBR 8802 (ABNT, 1994) e NM 58 (ABNT, 1996), devido à heterogeneidade do concreto, é essencial que a distância longitudinal a ser percorrida pela onda ultra-sônica, correspondente ao comprimento do corpo-de-prova, seja a maior possível e que seja assegurada a dimensão mínima lateral, para propiciar o acoplamento dos transdutores às faces transversais do corpo-de-prova.

O ensaio se inicia anteriormente ao processo de moldagem, com a escolha do molde que possibilite o acesso direto dos transdutores ao material em ensaio. O acoplamento dos transdutores transmissor e receptor nos furos é realizado anteriormente à moldagem, proporcionando um arranjo com transmissão direta do pulso elétrico em onda de choque. Em seguida, realiza-se a moldagem do concreto no corpo-de-prova, assegurando que os transdutores não percam o contato com o concreto durante o adensamento. Após a moldagem, a superfície do concreto deve ser recoberta para impedir a perda de umidade pelo material. Seguem-se leituras periódicas do tempo de propagação da onda longitudinal, de forma que o intervalo entre as leituras iniciais é maior, passando para intervalos menores, à medida que o tempo de propagação começa a diminuir. Após realizar o cálculo da velocidade de propagação das ondas, traça-se a curva velocidade de propagação *versus* idade do concreto, sendo assumida, para o patamar de percolação, a idade do concreto na qual ocorreu um aumento brusco na velocidade de propagação da onda ultra-sônica (SILVA, 2007-a).

### 2.1.5 Estrutura da pasta de cimento *Portland*

No estado endurecido, a pasta de cimento *Portland* é composta pelos produtos de hidratação sólidos e pelos espaços que permitem a entrada e a saída de água. Os produtos de hidratação formados dentro da pasta de cimento ocorrem como massas densas com certa porosidade característica. O composto presente em maior proporção é uma substância densa comumente denominada como gel de cimento, principalmente por ser composta por partículas sólidas com alta superfície específica, como nos géis coloidais. Do ponto de vista químico, o gel de cimento consiste principalmente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) de várias composições (HANSEN, *s.d.*). Assim, a estrutura da pasta de cimento é composta pela fase sólida do material (estrutura nanocristalina de hidratos, essencialmente constituída por C-S-H), pelos espaços vazios (porosidade total incluindo a porosidade do C-S-H) e pela água.

#### 2.1.5.1 O C-S-H

A denominação C-S-H (*Calcium Silicate Hydrates*) faz referência a uma família de fases sólidas, de estrutura cristalina imprecisa e composição química extremamente variada, formando uma estrutura nanocristalina amorfa, com estrutura constituída por duas a três folhas muito finas com espessura média de 3 nm e espaçadas de 1,7 nm (SILVOSO, 2003).

Diversos modelos da unidade microestrutural de C-S-H são citados pelos pesquisadores visando reproduzir e explicar seu comportamento, incluindo suas interações com a água, e correlacioná-las com as manifestações mecânicas macroscópicas da pasta de cimento hidratada. Para a análise à qual se dispõe o presente trabalho, vale ressaltar o modelo de Feldman e Sereda, ilustrado na Figura 2.4. Segundo este modelo, o C-S-H estaria estruturado em camadas provenientes de um arranjo irregular de filetes cristalizados que criam espaços interfoliares na medida em que se aproximam. Dessa forma, tais espaços não possuem dimensões nem volume total fixo. Dentro do quadro deste modelo, os filetes são capazes de um movimento relativo reversível e também são possíveis movimentos de entrada e saída de água nos espaços interfoliares, constituindo a água adsorvida e/ou interlamelar (BAROGHELBOUNY, 1994; SILVOSO, 2003).

Desta forma, a movimentação das camadas de C-S-H e a entrada e saída de água nos espaços interfoliares poderia explicar o comportamento mecânico da pasta de cimento endurecida, em

particular no que diz respeito ao desenvolvimento dos fenômenos de retração e fluência. Na Figura 2.5, ilustra-se o modelo simplificado de Feldman (1969) *apud* Baroghel-Bouny (1994), que permite visualizar, esquematicamente, a movimentação das camadas de C-S-H em resposta à variação severa de umidade na microestrutura do material.

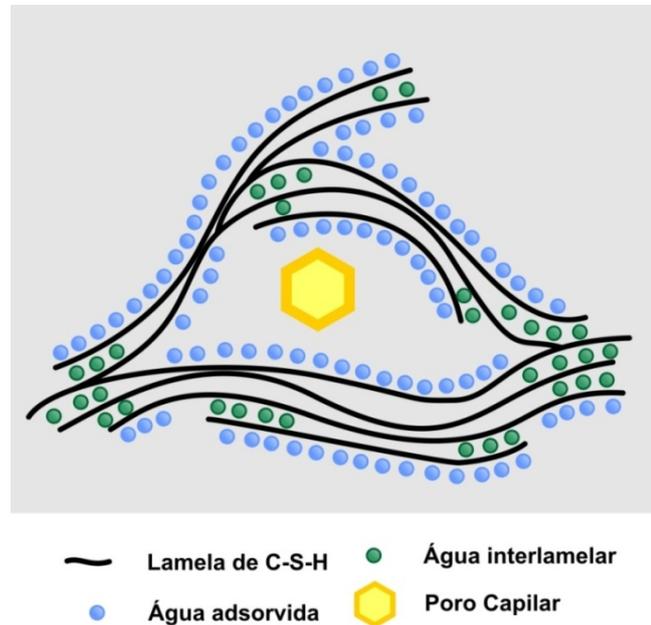


Figura 2.4 – Representação esquemática do modelo microestrutural por Feldman e Sereda (adaptado de BAROGHEL-BOUNY, 1994).

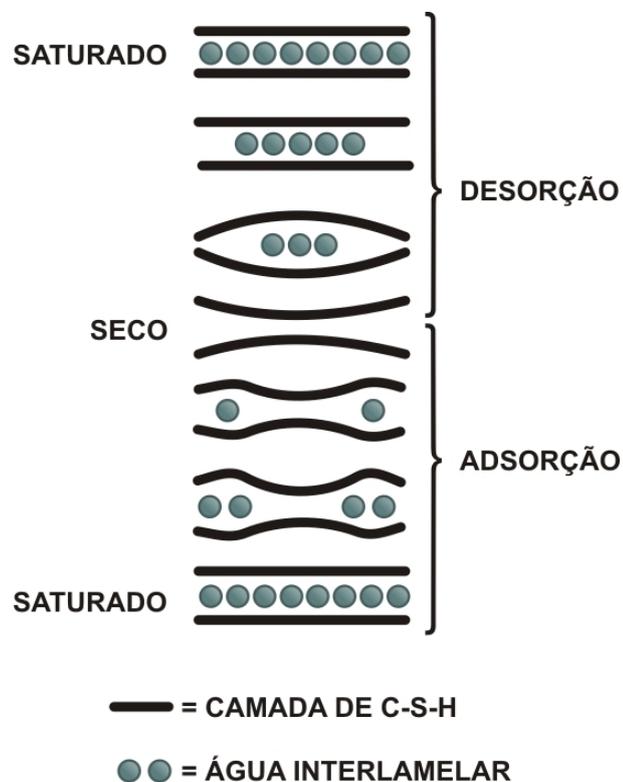


Figura 2.5 – Movimentação das camadas de C-S-H em resposta à variação severa de umidade na microestrutura do material (adaptado de BAROGHEL-BOUNY, 1994).

### 2.1.5.2 Porosidade

Para análise das deformações incidentes no concreto, deve-se considerar que a matriz cimentícia apresenta porosidade característica e que esses poros podem ficar mais ou menos cheios de água, dependendo da relação água/cimento da mistura e do ambiente no qual o material encontra-se inserido. Além disso, a remoção da água existente nesses poros pode ocasionar retração ou alterar o desenvolvimento das deformações por fluência. A intensidade com que essas deformações irão se processar devido à saída de água dependem, principalmente, da forma como a água está ligada à estrutura da pasta.

Dentre as várias classificações propostas para caracterizar o tamanho dos poros presentes na microestrutura de pastas de cimento e concretos, foi considerada, nesta pesquisa, aquela proposta por Baroghel-Bouny (1994). A classificação proposta pela autora foi baseada nos resultados de uma pesquisa envolvendo diferentes técnicas experimentais, objetivando estabelecer uma descrição completa acerca da porosidade e da superfície específica da microestrutura do concreto. Assim, foram relacionados desde os poros relativos ao gel de C-S-H até a escala dos macro-poros, resultando em três modos porosos, conforme se segue:

*a. Primeiro modo poroso:* relativo aos poros correspondentes ao espaço situado inicialmente entre as partículas de cimento, com raios da ordem de 100 nm, denominados popularmente como poros capilares. Com o avanço da hidratação, esse modo poroso dá lugar a um segundo modo poroso correspondente a vazios menores, uma vez que o desenvolvimento dos hidratos vai preenchendo progressivamente os espaços inicialmente ocupados pela água. A velocidade da transição de primeiro a segundo modo poroso depende da relação água/cimento da pasta. Para elevada relação água/cimento, o primeiro modo poroso pode estar presente após meses de hidratação, ao passo que, para relações mais baixas, o primeiro modo pode desaparecer nos primeiros dias de reação. Cabe salientar que, para relações água/cimento menores que 0,38, toda a água é consumida durante as reações de hidratação, e o espaço preenchido pela água dá lugar aos produtos de hidratação. Desta forma, nas idades avançadas, a presença do primeiro modo poroso somente se verifica para relações água/cimento acima de 0,38 (VOCKA *et al.*, 2000);

*b. Segundo modo poroso:* corresponde a raios de poros da ordem de 10 a 20 nm, compreendendo a rede porosa residual após a formação dos hidratos externos. Considerando a

teoria da percolação, o segundo modo poroso representa os vazios situados entre as amas dos hidratos. A porosidade relativa a esse modo poroso aumenta com a hidratação à medida que os C-S-H formados preenchem os espaços inter-grãos iniciais;

*c. Terceiro modo poroso:* corresponde a raios de poros da ordem de 2 a 5 nm, sendo característico dos poros de C-S-H (inter-partículas ou inter-lamelar). Vale ressaltar que o terceiro modo poroso independe da dosagem da pasta de cimento, bem como do avanço da hidratação, constituindo uma porosidade intrínseca do C-S-H. Esses poros são considerados permanentemente saturados por água durante a hidratação, de forma que a água é forçosamente adsorvida nestes poros ficando indisponível para a hidratação. À medida que a hidratação avança, a quantidade de cimento anidro e a porosidade capilar diminuem, ao mesmo tempo em que tanto a fração de volume como a porosidade dos hidratos aumenta.

Em virtude do preenchimento progressivo dos poros pelos produtos de hidratação, a rede porosa, inicialmente conectada, torna-se descontínua, exceto para os materiais com elevada relação água/cimento. Para fins comparativos, Boivin (2001) ressalta a diferença dimensional de dois tipos de poros: no extremo superior, a porosidade associada às falhas do material (bolhas de ar etc.), cujo tamanho característico pode variar de micrômetros a milímetros. No extremo inferior pode-se citar a porosidade do gel de C-S-H (terceiro modo-poroso), cujo pico se situa a alguns nanômetros.

#### 2.1.5.3 A água

Silva (2007-a) afirma que, embora os tipos de água que coexistem nas matrizes sólidas de cimento sejam objeto de numerosas classificações, a distinção entre as classes não é bem definida, sendo, algumas vezes, puramente fictícia. Segundo Mehta e Monteiro (2006), a classificação da água em diversos níveis é baseada no grau de dificuldade da sua remoção da pasta. Tendo em vista que a perda de água de uma pasta saturada se dá de forma contínua com a diminuição da umidade relativa, a linha divisória entre os diferentes estados da água não seria rígida. No entanto, a classificação proposta por diversos autores é coerente e útil para a compreensão de certas propriedades da pasta de cimento endurecida.

Oliveira (2000) cita que o primeiro trabalho sobre as formas de presença da água nas pastas de cimento foi publicado por Powers e Brownyard, em 1947, baseado em dados experimentais

obtidos por meio de técnicas de adsorção e dessorção de vapor de água. De acordo com este modelo, na pasta de cimento endurecida e saturada, a água pode estar presente em três categorias: (i) água não evaporável (ligada quimicamente aos produtos hidratados, de forma que sua eventual remoção ocasionaria a decomposição desses produtos); (ii) água de gel (adsorvida fisicamente à superfície das moléculas de C-S-H, ocupando poros de gel com diâmetro entre 2 e 4 nm) e (iii) água capilar (água livre que não está sob tensão e ocupa espaços vazios não ocupados pelos produtos hidratados da pasta endurecida). Segundo esta classificação, as águas de gel e capilar seriam passíveis de sair da microestrutura do material, constituindo a água evaporável.

Na Tabela 2.1, apresenta-se um resumo da classificação dos tipos de água presentes na pasta de cimento, de acordo com diversos pesquisadores.

Tabela 2.1 – Classificação dos tipos de água na pasta de cimento segundo diversos pesquisadores (OLIVEIRA, 2000)

Fonte	Diâmetro dos poros nos quais a água está presente na pasta de cimento (nm)		
	Capilar	Interlamelar	Intralamelar
Powers e Brownyard (1947)	-	2 a 4	-
Feldman e Sereda (1968)	-	0,5 a 2,5	-
Baroghel-Bouny (1994)	-	1,8	<1
Mehta e Monteiro (1994)	>5	1 a 4	-

Segundo Baroghel-Bouny (1994), os poros presentes na pasta de cimento endurecida podem encontrar-se parcial ou completamente preenchidos por água. Este estado hídrico depende essencialmente do grau de hidratação do material, da umidade relativa da rede porosa e a da dimensão dos poros considerados. Cabe salientar que, independente da classificação proposta, somente a água quimicamente ligada não é passível de sair da microestrutura do material, sem ocasionar a decomposição dos produtos de hidratação. Desta feita, os demais tipos de água podem ser denominados como água evaporável. Neste trabalho, optou-se por adotar descritivamente a classificação proposta por Baroghel-Bouny (1994) para a rede porosa do material e para a água.

a. *Água quimicamente ligada*: esta denominação diz respeito à água que foi consumida durante as reações de hidratação do cimento e encontra-se combinada com outros

componentes nos hidratos, não sendo considerada parte da fase líquida do material. Assim, a remoção da água quimicamente ligada gera a decomposição dos produtos de hidratação. Distinguem-se: (i) água de hidroxila: são as hidroxilas  $\text{OH}^-$  que fazem parte da estrutura dos hidratos, ligadas quimicamente aos átomos Si e Ca; (ii) água molecular: como exemplo, pode-se citar a água de cristalização (REGOURD, 1985 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994).

*b. Água adsorvida:* É constituída pelas primeiras camadas de moléculas de água submetidas ao campo das forças elétricas superficiais das partículas de C-S-H. Dependendo da intensidade dessas ligações, denomina-se água fisissorvida ou quimissorvida. A fisissorção diz respeito às ligações por forças inter-moleculares de atração correspondendo a energias relativamente fracas, da ordem de uma dezena de kJ/mol. A água fisissorvida intervém na molhagem (umedecimento) do cimento e forma, por simples condensação, um filme relativamente uniforme sobre toda a superfície do sólido que ocupa. Assim, a estrutura eletrônica da molécula da água varia muito pouco neste processo. A quimissorção diz respeito a uma transferência de elétrons, num processo que envolve energia de algumas centenas de kJ/mol. A água quimissorvida é adsorvida em lugares privilegiados, pelo estabelecimento de uma ligação química real com as moléculas de adsorvente, favorecendo a estabilização das folhas. Como esta ligação implica a transferência de elétrons, a reatividade da água adsorvida é fortemente modificada (SILVOSO, 2003). Segundo o modelo apresentado por Baroghel-Bouny (1994), dentro da estrutura do C-S-H, a água pode ocupar poros interlamelares com dimensões da ordem de 1,8 nm, como também pode ocupar poros intralamelares com dimensões inferiores a 1 nm.

Cabe salientar que alguns mecanismos teóricos atribuem o desenvolvimento da fluência à movimentação da água adsorvida entre camadas ou lamelas de C-S-H, de forma que esta água interpretaria papel fundamental no comportamento do concreto frente às deformações sob manutenção de carregamento. Estes mecanismos teóricos serão definidos apropriadamente nos itens 3.1.3 e 3.2.4.2.

*c. Água capilar:* A água capilar é constituída pela fase condensada preenchendo (por condensação capilar) o volume poroso ao lado da camada adsorvida e separada da fase gasosa pelos meniscos. A movimentação da água capilar, quando bem ligada ao sólido por forças de tensão superficial, pode conduzir a deformações de retração ou expansão da matriz.

d. *Água livre*: Esta água escapa às forças superficiais das partículas sólidas. Ocorrendo em relativo excesso àquela necessária à hidratação, a água livre ocupa os poros capilares, em particular os macro-poros, sendo a primeira a migrar quando da exsudação e, sobretudo, da secagem, quando as trocas higrométricas são permitidas com o meio ambiente (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

Na Figura 2.6 ilustra-se esquematicamente o estado da água no sistema de poros da pasta de cimento.

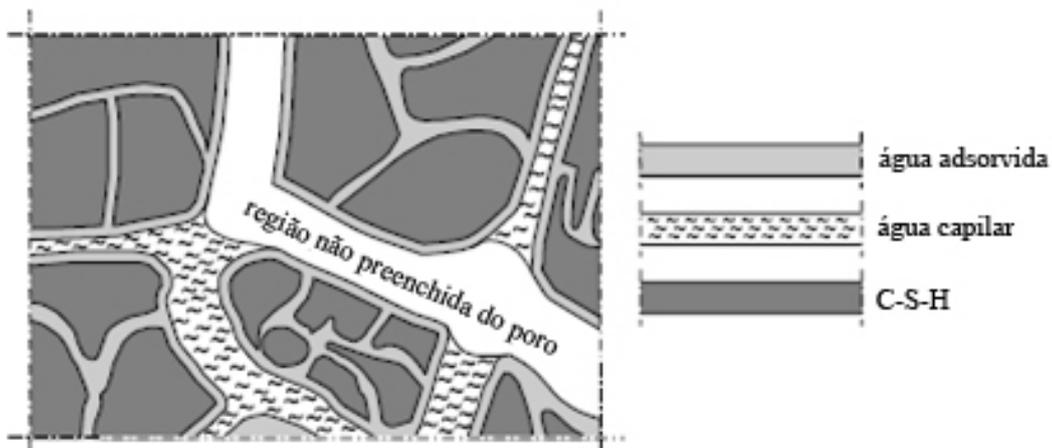


Figura 2.6 – Vista esquemática do estado da água no sistema de poros de uma pasta de cimento (VAN BREUGEL, 1991, *apud* LURA, 2003)

## 2.2 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES NA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO *PORTLAND*

Neste item será realizada uma breve exposição da influência de alguns materiais na hidratação do cimento *Portland*. O enfoque principal estará relacionado aos materiais utilizados no programa experimental da presente pesquisa, embora outros materiais correntemente utilizados para produção de concreto também exerçam influência nas reações de hidratação do cimento. A influência destes materiais no desenvolvimento das deformações por retração e fluência será abordado de forma mais aprofundada no Capítulo 3.

### 2.2.1 Água

Em pastas de cimento com maior relação água/sólidos, prevalece um maior distanciamento entre as partículas anidras, o que retarda o tempo de pega pelo efeito físico de dispersão. Esse fenômeno baseia-se, principalmente, no espaçamento volumétrico das partículas devido à

concentração diferenciada de sólidos nas pastas (HOPPE FILHO, 2008).

### **2.2.2 Adições minerais**

O uso de adições minerais, em adição ou substituição ao cimento *Portland*, altera a cinética de hidratação e a evolução da microestrutura do material, repercutindo diretamente nas propriedades intrínsecas de durabilidade do concreto no estado endurecido, frente aos mais variados agentes agressivos a que estará exposto o concreto durante sua vida em serviço. A presença de adições nas idades iniciais da hidratação do cimento produz dois efeitos determinados pelo calor liberado: (i) desaglomeração das partículas de cimento e (ii) constituição de pontos de nucleação para a precipitação do C-S-H. De forma geral, quaisquer dos efeitos provoca aceleração nas reações de hidratação do cimento (MOSTAFÁ e BROWN, 2005).

Traetteberg (1978) *apud* Taylor (1997) mostrou que a sílica ativa usada como adição ao cimento tem considerável atividade pozolânica, principalmente no período de 7 a 14 dias após a mistura. Estudos de Huang e Feldman (1985) e Hause *et al.* (1987) *apud* Taylor (1997) indicam que a reação pozolânica pode ser detectada após algumas horas do início da hidratação do cimento e que a reação inicial da alita é acelerada. Huang e Feldman (1985) *apud* Taylor (1997) estudaram as reações de hidratação em pastas com 10% e 30% de substituição em relação ao cimento e relações água/cimento de 0,25 e 0,45. Neste estudo verificou-se, já no primeiro dia, a redução do teor de hidróxido de cálcio, de forma que, para substituição de 30%, o teor de hidróxido de cálcio chegou a zero, após 14 dias de reação, em resposta à reação pozolânica.

### **2.2.3 Aditivos**

#### **2.2.3.1 Aditivos plastificantes e superplastificantes**

Quando uma pequena quantidade de água é adicionada ao cimento, não se obtém um sistema bem disperso, vez que a água apresenta tensão superficial elevada (molécula polar) e os grãos de cimento tendem a se aglomerar ou flocular pela existência de forças de atração entre as partículas cristalinas finamente moídas (carregadas positiva ou negativamente), conforme mostrado no esquema da Figura 2.7. Assim, certa quantidade de água fica aprisionada entre os

grãos de cimento, reduzindo a disponibilidade de água e a lubrificação da mistura. Este fenômeno aumenta a viscosidade do sistema e reduz a área específica nas partículas de cimento disponível para prosseguimento das reações de hidratação pelo mecanismo dissolução-precipitação (HARTMANN e HELENE, 2003).

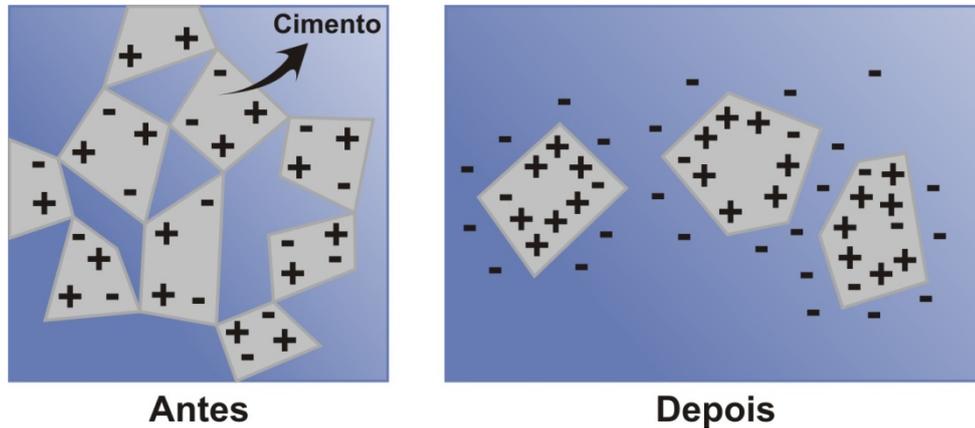


Figura 2.7 – Representação esquemática da flocculação (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Os produtos de base melamina, naftaleno ou lignossulfonato (aditivos superplastificantes ou plastificantes) atuam no sistema principalmente por repulsão eletrostática. O efeito desse mecanismo é o aumento da fluidez e a conseqüente redução da demanda de água de amassamento (AÏTCIN, 1998). A ilustração do mecanismo de repulsão eletrostática para a cadeia de aditivos de base melamina, naftaleno e lignossulfonato, adaptado de Collepardi *et al.* (1999), encontra-se ilustrado na Figura 2.8.

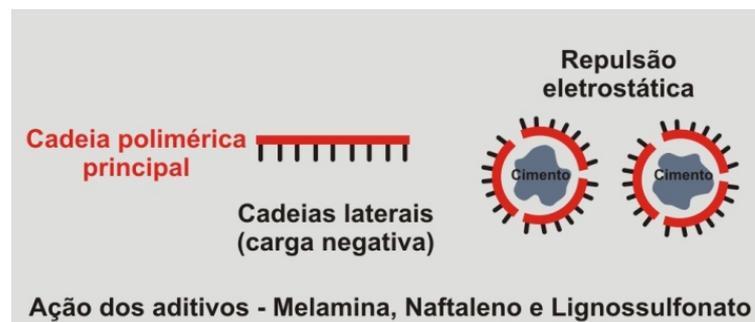


Figura 2.8 – Ilustração do mecanismo de repulsão eletrostática para a cadeia de aditivos de base melamina, naftaleno e lignossulfonato (adaptado de COLLEPARDI *et al.*, 1999).

No caso dos aditivos de base melamina, naftaleno e lignossulfonato, os grupos ionizados das moléculas adsorvidas de plastificante (ou superplastificante) são altamente carregados negativamente e a repulsão entre as partículas de cimento supera as forças de atração de *Van*

*der Waals*, resultando em um sistema disperso. Esse mecanismo ocasiona um retardo na hidratação do cimento. Independentemente do efeito, aos 28 dias os produtos de hidratação do  $C_3S$  são essencialmente os mesmos de um sistema de controle (sem uso de plastificante). Os produtos de reação  $C_3A$ -gesso podem ser modificados morfológicamente, contendo mais formas cúbicas que formas hexagonais (POPOVICS, 1982).

Segundo Melo (2000), as interações do cimento com os aditivos são dependentes da temperatura ambiente, da finura e da composição do cimento, especialmente em relação aos teores de  $C_3A$ ,  $SO_3$  e álcalis, que controlam a formação da etringita. A reação entre o sulfato de cálcio e a fase  $C_3A$  do cimento *Portland*, que conduz a produtos em forma de agulhas (AFt), é retardada e os produtos da reação são menores, com partículas de formato cúbico. Geralmente, observa-se também que o superplastificante retarda a conversão da etringita (AFt) em monossulfoaluminato (AFm). Ainda segundo esse autor, para o cimento tipo ARI com baixo teor de  $C_3A$ , pode-se visualizar uma adsorção excessiva de superplastificante no sistema em processo de hidratação, quando utilizado em altos teores. Este comportamento pode estar relacionado à redução da resistência à compressão, visto que a excessiva adsorção de aditivo retarda a hidratação do  $C_2S$  e do  $C_3S$ .

#### 2.2.3.2 Aditivos redutores e aditivos compensadores de retração

Embora não seja objeto da presente pesquisa o uso ou a aplicação dos aditivos redutores ou compensadores de retração, cabe, pelo tema em foco, traçar uma breve revisão sobre sua ação na hidratação do cimento estabelecendo que: os *aditivos compensadores de retração* atuam gerando uma expansão que produz, como efeito secundário, a compensação da retração, enquanto que os *aditivos redutores de retração* agem reduzindo, diretamente, a retração.

Dentre a grande maioria dos *aditivos compensadores de retração* comercialmente disponíveis, os dois tipos principais são à base de sulfoaluminato de cálcio e à base de cal virgem. Os aditivos à base de sulfoaluminatos de cálcio são os mais usados, pois os aditivos à base de cal virgem são de difícil controle em razão da sua quase imediata reação quando em contato com a água (MORIOKA *et al.*, 2003). A hidratação dos aditivos compensadores de hidratação, com base de sulfoaluminato, inicia-se quando o óxido de cálcio reage rapidamente com a água formando hidróxido de cálcio. Em seguida, o sulfoaluminato de cálcio anidro reage com a água e com hidróxido de cálcio formando cristais com morfologia de placas hexagonais,

compostos basicamente por monossulfoaluminato e aluminato de cálcio hidratado (MELO NETO *et al.*, 2007). Subseqüentemente, ocorre a reação topoquímica do sulfato de cálcio na superfície dos grãos já hidratados e a formação dos cristais aciculares de etringita, e a conseqüente expansão. Segundo Konik *et al.* (2007), o momento da expansão relativa à formação da etringita deve ocorrer entre 24 horas e 72 horas após a mistura com a água.

Segundo He *et al.* (2006), a maior parte dos *aditivos redutores de retração* são líquidos orgânicos com base em derivados do glicol. Trata-se de um aditivo químico não-iônico capaz de reduzir a tensão superficial da água. Desta forma, a redução da tensão superficial provoca uma diminuição na pressão capilar, com conseqüente redução na retração por secagem e na retração autógena (SILVA, 2007-a). Para Rixom e Mailvaganam (1999) *apud* Silva (2007-a), o aditivo redutor de retração atua reduzindo a tensão superficial da água nos poros entre 2,5 nm e 50 nm, uma vez que, nos poros maiores que 50 nm as forças de tração na água são muito pequenas para causar retração apreciável e nos poros menores que 2,5 nm não se forma menisco. Cabe salientar que os aditivos redutores apresentam alguns efeitos negativos, uma vez que a redução da tensão superficial implica a alteração de algumas propriedades da mistura cimentícia. O retardo do início da pega e a redução da resistência à compressão são os efeitos mais divulgados e comprovados, tendo como possível explicação o fato da redução da tensão superficial reduzir também a força de atração entre as partículas na fase de floculação do aglomerante, afetando as propriedades citadas (BROOKS *et al.*, 2000). Além disso, a eficácia do aditivo redutor de retração pode diminuir com o tempo, pois os produtos de hidratação do cimento absorvem as moléculas do redutor de tensão superficial (BENTZ *et al.*, 2001). No entanto, a eficácia destes aditivos é considerável justamente nas idades iniciais, quando o material cimentício apresenta baixa resistência à tração e maior possibilidade de fissuração pela ocorrência de fissuração.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O estudo da hidratação do cimento e suas conseqüências para as características microestruturais do concreto são fundamentais para delinear as propriedades do material frente ao objeto de estudo desta pesquisa. Isso porque os mecanismos teóricos para o desenvolvimento da retração e da fluência se baseiam tanto nos modelos microestruturais da estrutura dos sólidos da pasta hidratada (C-S-H), como nas características da rede porosa e da água presente a nível microestrutural.

De modo geral, a hidratação do cimento *Portland* abrange um conjunto de reações interdependentes com cinéticas diferentes, ao curso das quais as partículas de cimento anidro vão sendo progressivamente dissolvidas dando origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Inicialmente, as reações se processam com a dissolução gradual das fases anidras, supersaturação da solução e precipitação dos hidratos sobre as partículas. Neste processo, o cimento anidro é gradativamente recoberto pela precipitação específica do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que forma uma fina camada sobre as partículas, restringindo a dissolução das fases anidras. O recobrimento total do cimento representa o início da hidratação topoquímica, segundo o qual a água se difunde pela camada de hidratos inicialmente precipitada, atingindo a fração residual anidra do cimento, dando prosseguimento à hidratação. Assim, durante as primeiras horas após a mistura, o concreto varia de um estado e comportamento próprios de suspensão para um comportamento de sólido, passando a apresentar retração, propriedades mecânicas e viscoelásticas.

Desta forma, as idades iniciais representam o período mais importante para a evolução das propriedades mecânicas do concreto através do desenvolvimento do esqueleto da pasta endurecida, como resultado do prosseguimento da hidratação do cimento. Além da evolução das propriedades mecânicas, durante este período, inicia-se a restrição à movimentação volumétrica do material e os fenômenos de retração (especialmente autógena e por secagem) que dizem respeito a um esqueleto sólido passam a ser considerados, pois existe a possibilidade de fissuração. Cabe salientar que a adoção de um momento específico a partir do qual o material adquire um comportamento sólido capaz de restringir a movimentação (estabelecimento do patamar de percolação) constitui um parâmetro primordial para mensuração das deformações nas idades iniciais do concreto, uma vez que, a partir deste momento, estas deformações se desenvolvem de forma bastante acelerada.

Quanto à microestrutura do material, sabe-se que a pasta de cimento *Portland* endurecida é composta pelos produtos de hidratação sólidos e pelos espaços que permitem a entrada e a saída de água. Conseqüentemente, para análise das deformações incidentes no concreto, deve-se considerar que, a nível microestrutural, a matriz cimentícia apresenta porosidade característica e que esses poros podem ficar mais ou menos cheios de água, dependendo da relação água/cimento da mistura e do ambiente no qual o material encontra-se inserido. Nesta esteira, os mecanismos teóricos de desenvolvimento da retração e da fluência incluem a movimentação da água na rede porosa do material e entre as camadas de C-S-H para explicar

o comportamento mecânico da pasta de cimento endurecida. Assim, a remoção da água existente nesses poros, pela secagem ou pela autodessecação (processos a serem definidos no Capítulo 3), pode ocasionar retração ou alterar o desenvolvimento das deformações por fluência. Cabe ressaltar que a intensidade com que as deformações irão se processar devido à saída de água do material depende, principalmente, da forma como a água está ligada à estrutura da pasta.

Finalmente, evidencia-se que as definições retro-mencionadas acerca da porosidade da pasta, dos tipos de água existentes na microestrutura do material e da estrutura do C-S-H são freqüentemente citadas para o estabelecimento de hipóteses referentes aos comportamentos observados pelos resultados dos ensaios. Isso porque os mecanismos de atuação e desenvolvimento da retração e da fluência se baseiam em fenômenos como o desenvolvimento de meniscos pela diferença de tensão superficial na interface líquido-gás dos poros, na interligação e diâmetro dos poros, no desenvolvimento da pressão capilar, movimentação de água na estrutura do C-S-H, condições de saída de água, dentre outros. Desta forma, uma revisão da literatura referente à hidratação do cimento importa por fornecer subsídios para a posterior análise dos resultados obtidos durante o programa experimental.

### **3 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO**

Desde o início dos processos de mistura, lançamento, adensamento, cura e endurecimento do concreto, podem ocorrer variações volumétricas no material, como resposta às reações químicas de hidratação da pasta de cimento. As variações dimensionais podem ser ocasionadas ainda pela variação de temperatura, pela absorção ou perda de umidade com o meio externo, como consequência das reações álcali-agregado, pela ação de agentes deletérios tais como os íons sulfato ou como resultado da aplicação de carga. Neste último caso, deve-se ressaltar que o desenvolvimento tecnológico dos materiais e dos métodos de cálculo e a necessidade de minimizar custos alteraram os padrões construtivos e arquitetônicos, possibilitando a edificação de estruturas cada vez mais esbeltas, a adoção de vãos maiores e o uso de seções transversais dos elementos estruturais cada vez menores. Tais estruturas são visivelmente mais sensíveis ao desenvolvimento de deformações e à fissuração.

O fenômeno da fissuração ocorre quando as deformações provenientes dos esforços de tração, aos quais o concreto encontra-se submetido, excedem sua capacidade de deformação. Esta capacidade varia, entre outros fatores, com a idade do concreto e a velocidade de desenvolvimento da deformação. O desenvolvimento de deformações constitui um comportamento inerente ao concreto e não representa motivo de preocupação desde que a abertura, número e comprimento das fissuras originadas não afetem a capacidade portante e a durabilidade da estrutura. Assim, firma-se a importância da análise das estruturas de concreto com relação ao desenvolvimento de deformações.

#### **3.1 RETRAÇÃO**

O efeito físico da retração está associado a uma contração volumétrica da pasta de cimento, decorrente de fenômenos de diferentes naturezas (autógena, química, por carbonatação), mas principalmente pela perda de água devido à secagem ou à autodessecação. Nesta esteira, cabe salientar que em virtude do caráter exotérmico das reações de hidratação do cimento, a associação entre a liberação de calor e suas condições de dissipação, pode resultar em grande aumento na temperatura do concreto após o lançamento. Subseqüentemente, o resfriamento à temperatura ambiente pode gerar fissuras no concreto que não tenha resistência à tração suficiente para resistir aos esforços decorrentes da contração térmica (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Além disso, a retração pode ocorrer em diferentes fases do

endurecimento do compósito e ser impedida de ocorrer livremente, conforme a restrição imposta pela construção ao elemento de concreto. Em suma, a retração total do concreto é resultado de vários tipos de retração que podem ocorrer simultaneamente, durante a vida útil da estrutura.

Pretende-se, neste item, realizar uma revisão das retrações autógena e por secagem, incluindo os fenômenos referentes às reações químicas de hidratação do cimento, bem como a perda de água pela secagem e pela autodessecação, com vistas ao melhor entendimento dos fenômenos em estudo e ao embasamento das análises dos resultados obtidos na pesquisa.

### **3.1.1 Contração *Le Chatelier* e retração autógena**

Denomina-se contração *Le Chatelier* ao fenômeno físico-químico decorrente do balanço volumétrico das reações de hidratação, que ocorre pelo fato da soma dos volumes molares iniciais de água e do componente anidro ser maior que o volume molar dos hidratos formados (POWERS, 1958; MEHTA e MONTEIRO, 2006; CÁNOVAS, 1996). Como anteriormente ao patamar de percolação, o material se comporta como um fluido, não se opõe às variações de volume impostas pela hidratação e não ocorre fissuração em razão desta contração (SILVA, 2007-a).

Segundo Acker (1988) *apud* Baroghel-Bouny (1994) e Boivin (2001), o volume aparente de uma pasta de cimento é definido por sua aparência externa (soma dos volumes dos seus diferentes componentes quer sejam sólidos, líquidos ou gasosos), enquanto que o volume absoluto é definido como a soma dos volumes das fases sólidas e líquidas. Assim, a redução de volume absoluto constitui uma simples contração plástica (Contração *Le Chatelier*), cujos efeitos sobre o volume aparente dependem, principalmente, da porosidade e da rigidez do material.

Por seu turno, a retração autógena é a contração volumétrica da pasta de cimento causada pela redução da água livre nos poros (tanto pela sua migração para participar das reações de hidratação, bem como pela sua adsorção na superfície dos cristais recém-formados de C-S-H), sem perda de água para o ambiente externo, sob temperatura constante e desconsiderando as deformações de origem térmica (BALTHAR, 2004). Deste modo, a retração autógena seria a *redução do volume aparente* do material, pelo prosseguimento da hidratação e

desenvolvimento da autodessecação.

Pela análise da Figura 3.1, pode-se avaliar esquematicamente as variações de volume absoluto (contração *Le Chatelier*) e as variações de volume aparente (retração autógena) provenientes do balanço volumétrico das reações de hidratação. Durante o período de suspensão (fases 1 e 2 da Figura 3.1), as partículas sólidas encontram-se isoladas numa fase líquida conexas, de forma que o material não impõe resistência às variações de volume impostas pela hidratação. Durante este período, as variações de volume aparente e de volume absoluto são semelhantes. Este período pode ser bem curto, especialmente para pastas com baixas relações água/cimento (BOIVIN, 2001).

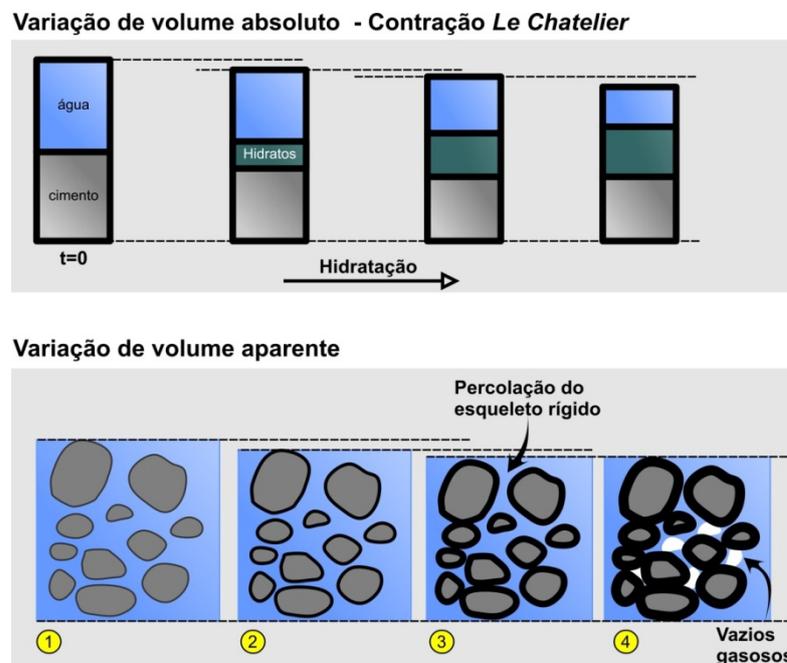


Figura 3.1 – Variação do volume absoluto e do volume aparente do concreto durante as reações de hidratação do cimento (adaptado de HUA *et al.*, 1995).

Durante a fase 3, a rigidez do material cresce gradualmente com o prosseguimento da hidratação, de forma que as variações de volume são dificultadas paulatinamente pelo esqueleto mineral em desenvolvimento. Entre as fases 3 e 4, ocorre a transição de comportamento líquido para comportamento sólido (patamar de percolação). Durante a fase de endurecimento, correspondente à fase 4, o esqueleto mineral difunde-se por todo o volume (percolação em três dimensões) e a redução de volume devido à hidratação, torna-se incompatível com as deformações mecânicas admissíveis pelo esqueleto mineral. Ocorre o aparecimento de um volume gasoso na porosidade dos capilares da pasta (inicialmente

saturada em água) e o teor de água diminui. O fenômeno de redução da umidade interna pelo efeito da hidratação do cimento anidro é denominado autodessecação (BOIVIN, 2001).

Para o estudo da retração, as reações ocorridas durante a pega e a conseqüente formação do patamar de percolação marcam uma diferenciação entre as deformações ocasionadas pela contração *Le Chatelier* (retração química) e pela retração autógena. Anteriormente à formação do patamar de percolação, variações de volume absoluto (contração *Le Chatelier*) e variações de volume aparente (retração autógena) são da mesma ordem de grandeza, apresentando curvas praticamente sobrepostas durante a fase inicial do gráfico mostrado na Figura 3.2. A partir deste ponto, a transição suspensão-sólido é visualizada graficamente através da alteração da inclinação da curva entre os parâmetros, o que ocorre aproximadamente após 3 horas de desenvolvimento da reação de hidratação (BOIVIN, 2001).

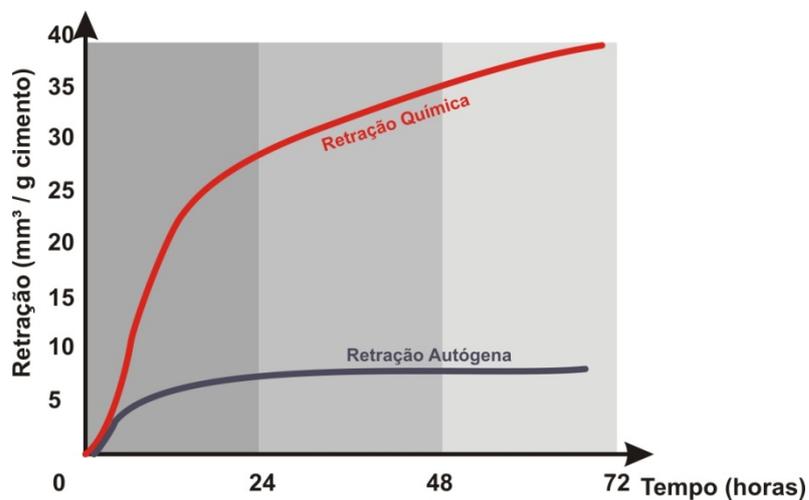


Figura 3.2 – Desenvolvimento da retração química e da deformação por retração autógena para pasta de cimento de relação água/cimento igual a 0,35 (adaptado de BOIVIN, 2001).

Depois de atingido o patamar de percolação, a taxa de retração autógena decresce e torna-se menor que a retração química (BOIVIN, 2001). No entanto, embora a partir deste ponto a magnitude da retração autógena seja inferior à magnitude da retração química, o efeito no volume de concreto se dá preponderantemente pela retração autógena. Isso porque, no caso da retração química, a redução de volume não implica a diminuição de volume aparente do concreto da mesma ordem de grandeza, visto que a estrutura da pasta endurecida contém certa quantidade de vazios.

Nesta esteira, Silva (2007-a) sugeriu que as deformações volumétricas químicas devidas à

reação de hidratação do cimento tivessem sua classificação relacionada ao estado físico do material: suspensão ou sólido. Assim, enquanto o material tivesse comportamento próprio de suspensão ocorreria a deformação volumétrica designada como contração *Le Chatelier* (sem ocasionar fissuração) e, quando sólido, ocorreria a retração autógena (ocasionada pela autodessecação). Esta classificação será adotada pela presente pesquisa para análise e avaliação dos fenômenos em estudo.

### 3.1.2 Retração por secagem

Segundo Bisschop (2002), a retração por secagem pode ser definida como uma deformação dependente do tempo devida à perda de água em condições de temperatura e umidade relativa constantes. Assim, a diferenciação principal entre a retração autógena e a retração por secagem reside no fato de que, no primeiro fenômeno, a perda de água se deve à autodessecação e, na retração por secagem, a perda de água se processa pelo desenvolvimento de um gradiente de umidade entre o volume interno e o ambiente no qual o elemento de concreto encontra-se inserido.

Cánovas (1996) e Mehta e Monteiro (2006) afirmam que a mudança de volume experimentada pelo concreto pela perda de água livre, presente nos vazios maiores da pasta, não causa variação de volume. Com a continuidade da secagem, inicia-se a perda da água retida nos poros capilares e, em seguida, da água adsorvida, retida nas proximidades dos componentes sólidos da pasta, originando a retração irreversível, considerada a principal causa da retração por secagem. Em condições de secagem mais severas (umidade relativa da ordem de 11%), a água interlamelar também pode ser removida, causando retração entre as camadas de C-S-H.

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a parcela de irreversibilidade da retração por secagem deve-se ao desenvolvimento de ligações químicas dentro da estrutura do C-S-H em consequência da secagem. Bentur (1979) *apud* Bastos e Cincotto (2000), afirmou que o comportamento da pasta frente à secagem depende de seu grau de hidratação, visto que as mudanças na estrutura do C-S-H são as maiores responsáveis pela irreversibilidade da retração em pastas bem hidratadas, enquanto que nas primeiras idades, mudanças na porosidade exercem maior influência. Powers (1968) *apud* Bastos e Cincotto (2000) verificou que a irreversibilidade da retração por secagem é menor em meios mais porosos, onde o

número das ligações químicas dentro da estrutura de C-S-H também é menor. No caso da parcela reversível da retração, os autores retro-mencionados são unânimes em afirmar sua independência da variação da porosidade.

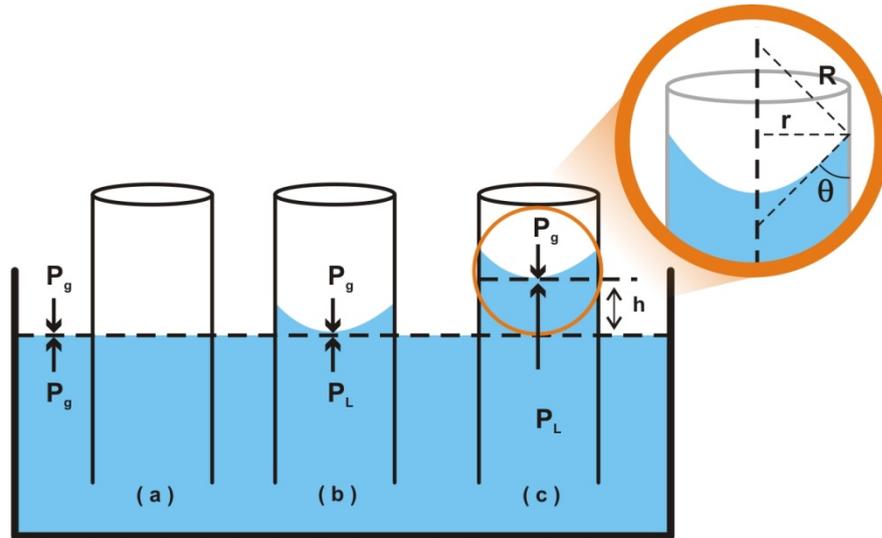
### **3.1.3 Mecanismos teóricos para o desenvolvimento da retração autógena e da retração por secagem**

Segundo Silva (2007-a), os mecanismos que ocasionam o desenvolvimento da retração autógena e da retração por secagem ainda são pouco entendidos. Embora exista concordância no meio científico sobre a existência de relação entre estes tipos de retração e a variação de umidade relativa nos poros da pasta de cimento endurecida, o desenvolvimento das forças motrizes destes fenômenos ainda não se encontra completamente elucidado, sendo provável a ocorrência isolada ou concomitante dos mecanismos teóricos definidos a seguir (VAN BREUGEL, 2001).

#### **3.1.3.1 Teoria da variação da pressão capilar**

A teoria da variação da pressão capilar se baseia no fenômeno da capilaridade, que consiste na tendência de movimentação dos líquidos presentes no interior de tubos capilares. Na interface líquido-gás, o líquido tende a reduzir sua área superficial a fim de garantir o menor contato possível com a fase gasosa, ocasionando a formação de um menisco, conforme mostrado na Figura 3.3. Após a formação do menisco, o ângulo de contato (medido entre a parede do tubo e a tangente à superfície do líquido) difere de zero, reduzindo-se a atração entre o líquido e a parede do tubo. Assim, se a pressão no líquido ( $P_L$ ) for maior que a pressão exercida pela fase gasosa ( $P_g$ ), estabelece-se um mecanismo físico que ocasiona a movimentação do líquido ao longo do tubo (ATKINS, 2002; MORTIMER, 2008). O gradiente de pressão desenvolvido é designado por pressão ou depressão capilar, e depende da tensão superficial líquido-gás, do raio de curvatura do menisco formado e do ângulo de contato (SANTOS *et al.*, 2007).

Assim, quando o processo descrito se desenvolve na rede porosa da pasta de cimento ou do concreto, a pressão capilar induz a aproximação das paredes dos poros. Conseqüentemente, a depressão do líquido deve ser globalmente equilibrada pela retração do sólido.



$P_L$  – pressão do líquido;  
 $P_g$  – pressão da fase gasosa úmida (ar seco + vapor d'água);  
 $h$  – altura da coluna do líquido;  
 $r$  – raio do tubo cilíndrico onde existe menisco;  
 $R$  – raio de curvatura do menisco;  
 $\theta$  – ângulo de contato entre a parede do tubo e a tangente à superfície do líquido.

Figura 3.3 – Ilustração do desenvolvimento de menisco e movimentação de um líquido em um tubo capilar (adaptado de MORTIMER, 2008).

Cabe salientar que a intensidade das pressões capilares aumenta com o avanço da hidratação. A primeira explicação para esse comportamento é que a autodessecação progride dentro do material atingindo poros cada vez mais estreitos. Em segundo lugar, paralelamente ao fenômeno de saída de água, o tamanho e a distribuição dos poros capilares diminui à medida que a hidratação avança, pela formação dos hidratos que vão preenchendo os vazios, provocando depressões capilares mais fortes (BOIVIN, 2001).

### 3.1.3.2 Teoria da variação da energia de superfície

A teoria da variação da energia de superfície se baseia na diferenciação entre moléculas da superfície e do interior de um líquido. As moléculas do interior estão submetidas a forças atrativas que são aproximadamente iguais em todas as direções, enquanto as moléculas da superfície líquido-gás apresentam forças atrativas somente do lado do líquido. Assim, quando uma molécula está exposta na superfície, seu estado energético é desfavorável, razão pela qual os líquidos tendem a ajustar sua forma visando expor uma superfície mínima. Desta forma, a tendência das moléculas é deixar a superfície e migrar para o interior do líquido, ocasionando uma contração espontânea da superfície (ATKINS, 2002; LURA, 2003; POWERS, 1968, *apud* SILVA, 2007-a).

De acordo com a teoria da variação da energia de superfície, a retração ou a expansão da pasta de cimento seria resultado da variação desta energia, de forma que a adsorção de átomos ou moléculas na superfície sólida ocasionaria redução da energia (e conseqüente expansão) e a desorção provocaria um aumento na energia de superfície, provocando uma compressão no sólido (SILVA, 2007-a).

### 3.1.3.3 Teoria da variação da pressão de disjunção ou pressão de desligamento

O mecanismo da variação da pressão de disjunção envolve a interação entre duas superfícies sólidas (lamelas de C-S-H), muito próximas entre si, na presença de moléculas de água adsorvida. Numa dada temperatura, a espessura da camada de água adsorvida depende da umidade relativa, de forma que, na microestrutura de um material completamente seco não haveria água adsorvida entre as lamelas, conforme mostrado na Figura 3.4.

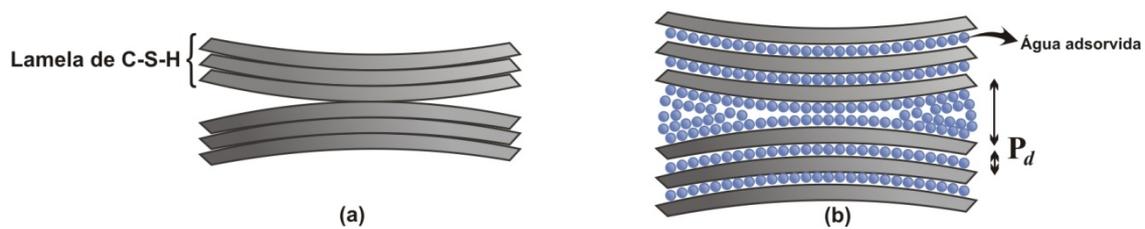


Figura 3.4 – Mecanismo da pressão de disjunção para (a) material seco e (b) material com água adsorvida (adaptado de KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006).

Com o aumento da umidade relativa, a adsorção de água tende a separar as duas superfícies sólidas e aumentar a espessura da camada de água adsorvida (Figura 3.4 – b). Assim, a adsorção de água entre as camadas de C-S-H gera uma pressão de disjunção (ou desligamento), resultante da orientação das moléculas de água no filme de água adsorvida. À medida que aumenta a espessura da camada de água adsorvida, a pressão de desligamento aumenta. Quando a pressão de desligamento está em equilíbrio com as forças de atração de *Van der Waals* (que tendem a atrair as partículas de C-S-H entre si), as lamelas de C-S-H se mantêm afastadas. Com a perda de água, o filme de água adsorvida vai diminuindo de espessura gradativamente e a pressão de desligamento também diminui. À medida que as lamelas de C-S-H são atraídas entre si pelas forças de *Van der Waals*, ocorre a contração volumétrica da estrutura (NUNES e FIGUEIREDO, 2007).

### **3.1.4 Comentários sobre os mecanismos teóricos para desenvolvimento da retração autógena e da retração por secagem**

A autodessecação e a secagem são as ações desencadeantes da retração autógena e da retração por secagem, respectivamente. Isso porque tanto a autodessecação como a secagem ocasionam uma redução da umidade relativa interna do material. Assim, a diferença principal entre os dois fenômenos reside na origem desta redução. Na autodessecação, ocorre o consumo de água pelas reações químicas de hidratação enquanto na secagem, ocorre a perda da água dos poros, devido a um gradiente entre a umidade relativa interna do material e a umidade relativa do ambiente externo (SILVA, 2007-a). Segundo Hua *et al.* (1995), o mecanismo de autodessecação, responsável pela retração autógena, pode ser considerado idêntico ao mecanismo que gera a retração por secagem, dentro dos domínios de umidade relativa correspondentes.

Tamtsia e Beaudoin (2000), afirmam que materiais de base cimentícia são extremamente hidrófilos, devido à alta superfície específica do material aglomerante. Conseqüentemente, tanto concretos como pastas de cimento apresentam um comportamento bastante sensível às condições de umidade relativa do ambiente. Assim, por um lado a tensão superficial nas interfaces sólido-líquido e a saída e/ou consumo de água conduzem ao desenvolvimento de gradientes de pressão nos poros capilares, ocasionando a contração do material. De outro lado, as pressões de disjunção geram a repulsão entre as moléculas de água adsorvida impedindo que as camadas do sólido se aproximem. Segundo os autores, estes dois mecanismos seriam os responsáveis pelas micro-pressões que aumentam através do esqueleto sólido e estão na origem das deformações de retração observadas macroscopicamente pela secagem ou pela autodessecação e a preponderância do primeiro (ocasionando retração) ou do segundo (ocasionando expansão) dependeria sobremaneira da variação no grau de saturação do material.

Ademais, o processo de secagem dos corpos-de-prova e das estruturas de concreto é um fenômeno muito lento, que ocorre de modo heterogêneo. Desta forma, a progressão da secagem da superfície para a parte interna do material refletiria na distribuição heterogênea das deformações de retração. Na superfície do concreto, onde o conteúdo de água decresce rapidamente, existe maior tendência de contração que no volume interno do material. Esta diferenciação conduz ao desenvolvimento de um estado de tensão auto-equilibrado: tensões

de tração na superfície e de compressão no interior do volume, resultando na microfissuração superficial, uma vez que as tensões induzidas de tração comumente excedem a resistência à tração do concreto (TAMTSIA *et al.*, 2004).

No que diz respeito ao comportamento dos concretos convencionais, Jensen (1995) afirma que a umidade relativa em sistemas cimentícios normalmente não atinge valores inferiores a 75%, de forma que o mecanismo da variação da energia de superfície não afetaria o comportamento de grande parte dos concretos convencionais frente à retração autógena. O mecanismo da variação da tensão de superfície de partículas coloidais seria relevante para umidades relativas baixas e a pressão de disjunção seria praticamente constante, quando a umidade relativa variasse no intervalo entre 80% e 100% (FERRARIA, 1986, *apud* HUA *et al.*, 1995). Ainda em relação à teoria da variação da pressão de disjunção, segundo Lura (2003), este mecanismo somente ocorreria em regiões de adsorção impedida, ou seja, quando as distâncias entre as superfícies sólidas fossem menores que duas vezes a espessura da camada de água adsorvida (aproximadamente 0,6 nm).

Kovler e Zhutovsky (2006) realizaram discussão a respeito dos mecanismos teóricos para desenvolvimento da retração, concluindo que, segundo vários pesquisadores, o mecanismo da variação da pressão capilar é mais influente quando a água dos poros se torna contínua, enquanto que o mecanismo da variação da pressão de disjunção é influente para baixo grau de saturação do sistema. Nesta esteira, as opiniões de vários autores sobre a influência de cada mecanismo encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Mecanismos de retração segundo vários autores (KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006).

Autor	Umidade relativa (%)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Kovler e Zhutovsky	Variações na pressão de disjunção Acréscimo nos efeitos capilares											
Powers	Variações na energia de superfície								Variação da pressão capilar			
Feldman e Sereda	Movimento da água interlamelar						Variação da pressão capilar e na energia de superfície					
Wittmann	Variações na energia de superfície						Variações na pressão de disjunção					

Através da análise dos dados constantes da Tabela 3.1, verifica-se a unanimidade entre os pesquisadores no sentido de que a ativação dos mecanismos de retração por secagem envolve

diretamente a umidade ambiental que, por sua vez, influencia a umidade interna da pasta de cimento. Ademais, a maior parte dos pesquisadores citados atribui as alterações volumétricas em umidades acima de 40% ao mecanismo de variação de pressão capilar, enquanto os demais mecanismos exerceriam maior influência abaixo de 40% de umidade relativa.

Cabe salientar que o estudo dos mecanismos desencadeantes da retração depende do estado de ligação da água-superfície sólida, dentro do material. Pesquisas realizadas por Baron (1982) *apud* Boivin (2001) mencionam os três tipos de água passíveis de sair e gerar retração por secagem, a saber, (i) água capilar, (ii) água adsorvida (externa) e (iii) água adsorvida interlamelar; e os respectivos mecanismos correspondentes à saída de cada uma delas, como sendo: (i) variação da depressão capilar; (ii) variação da energia de superfície de partículas coloidais e (iii) variação da pressão de disjunção.

Segundo Baroghel-Bouny (1994), diante do pouco conhecimento que se dispõe sobre as forças coloidais (mecanismo de pressão de disjunção) e sobre a energia de superfície dos sólidos (mecanismo da variação da tensão de superfície), não há ainda um modelo teórico, embasando esses dois mecanismos, que permita chegar a valores quantitativos de retração. Desta forma, seria predominante a incidência do mecanismo da variação da depressão capilar, uma vez que seu desenvolvimento pode, inclusive, ser explicado pelas leis de *Laplace* e de *Kelvin*, que descrevem o equilíbrio higrométrico entre o líquido e o vapor d'água e o equilíbrio mecânico de um menisco submetido a diferentes pressões.

Nesta esteira, cabe reiterar que, provavelmente, dois ou mais dos mecanismos definidos anteriormente atuem concomitantemente para o desenvolvimento das deformações. No entanto, no presente trabalho, a variação da pressão capilar será adotada como o mais adequada para explicar o fenômeno, uma vez que seu desenvolvimento se baseia tanto nas características da microestrutura da pasta de cimento como no estabelecimento físico da diferença de tensão superficial e conseqüente desenvolvimento dos meniscos, incluindo a possibilidade de modelagem teórica do fenômeno.

Considerando ainda que o objeto de estudo desta pesquisa se situa nas baixas idades do material, cabe salientar que, teoricamente, a intensidade da depressão capilar aumenta com o avanço da hidratação. Primeiro porque a autodessecação progride dentro do material atingindo os poros cada vez mais esbeltos. Segundo porque, paralelamente ao fenômeno de

saída de água dos poros, a porosidade do material se refina, sob o efeito da hidratação.

Ademais, como as condições de umidade relativa durante a realização dos ensaios normalizados geralmente se situam em patamares superiores a 50%, estima-se que, durante os ensaios, a rede de poros dos concretos em estudo esteja preenchida, total ou parcialmente. Neste caso, a ocorrência da autodessecação e/ou secagem contribuiria para um aumento das pressões capilares, e este mecanismo explicaria de forma convincente o desenvolvimento da retração autógena e da retração por secagem durante as baixas idades do concreto.

### **3.1.5 Fatores influentes sobre a retração autógena e sobre a retração por secagem**

#### **3.1.5.1 Relação água/cimento**

De modo geral, os mesmos fatores que influenciam a evolução da resistência do concreto também influenciam a evolução da retração autógena. Assim, quanto menor a relação água/cimento, maior a retração autógena, uma vez que o refinamento da estrutura dos poros capilares contribui para o incremento das pressões capilares que se desenvolvem durante a movimentação da água nos poros do concreto (MELO NETO, 2008).

Com relação à retração por secagem, o comportamento é contrário. Neste caso, com o aumento da relação água/cimento tem-se uma redução da resistência e do módulo de elasticidade da pasta, em função do desenvolvimento de maior número de poros capilares. Em função do aumento do número de poros, ocorre também um aumento da quantidade de água que se movimenta na rede de capilares, contribuindo para o aumento das pressões capilares (NUNES e FIGUEIREDO, 2007). Além disso, analisando sob a ótica da aproximação das camadas de C-S-H através de forças hidrostáticas, uma pasta com maior relação água/cimento apresenta maior espaço médio entre os compostos hidratados. Assim, durante o desenvolvimento da retração, maior distância será percorrida pelas partículas durante sua aproximação e, portanto, maior será a contração volumétrica (MELO NETO, 2008).

Em estudo para avaliar as propriedades retração e fluência em concretos de elevada resistência produzidos com o mesmo tipo de cimento e 6% de sílica ativa, Kalintzis e Kuperman (2005) concluíram que a influência da relação água/cimento é maior na retração autógena, sendo o aumento da retração inversamente proporcional à relação água/cimento dos

concretos estudados. Por outro lado, no mesmo estudo, os autores não conseguiram correlacionar satisfatoriamente os resultados de retração por secagem e relação água/cimento. Resultados experimentais obtidos por Pietra *et al.* (2003), através de pesquisa realizada com concretos elaborados com cimento CP II-E 32, também indicaram que a influência da relação água/cimento não se apresenta claramente na retração potencial (autógena + secagem), conforme ilustrado na Figura 3.5. Estes resultados permitem inferir, dada a maior influência da relação água/cimento na retração autógena, que a retração potencial será maior para menores valores de relação água/cimento, sobretudo em concretos com baixa relação a/c e para cimentos contendo maiores proporções de adições minerais.

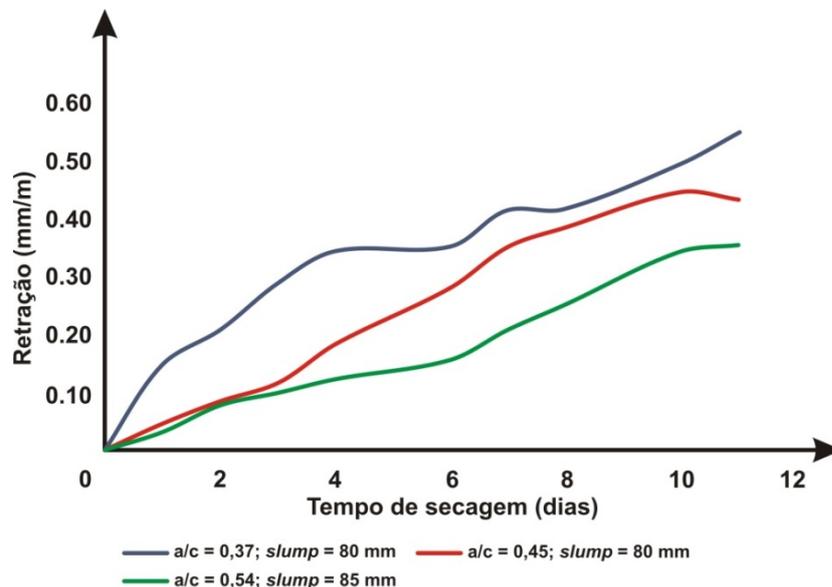


Figura 3.5 – Correlação entre a retração potencial e o tempo de secagem para concretos de diferentes relações água/cimento (PIETRA *et al.*, 2003).

De acordo com Carlson & Reading (1988), conforme ilustrado na Figura 3.6, para relação água/cimento constante, a retração total aumenta com o teor de cimento da mistura, uma vez, neste caso, um maior volume de pasta de cimento estaria sujeita à retração. No entanto, para uma dada quantidade de água na mistura, a retração não é alterada pelo aumento do teor de cimento, podendo, inclusive, resultar menor pela redução da relação água/cimento. Neste caso, o concreto desenvolveria menor retração pela sua maior capacidade de resistir à retração.

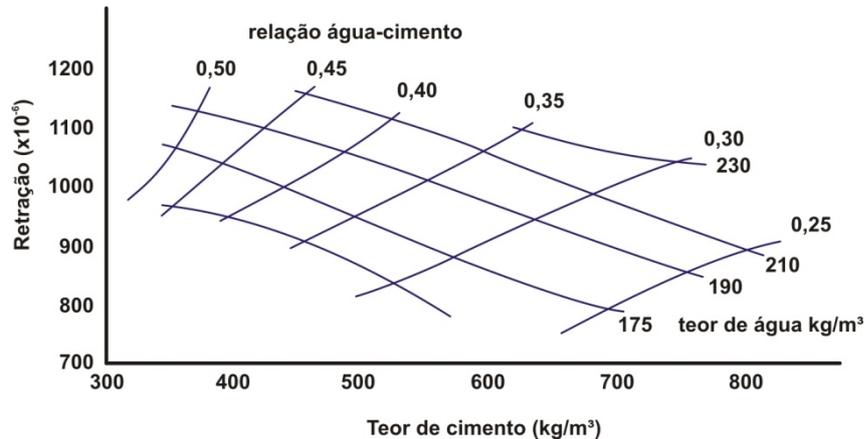


Figura 3.6 – Representação da retração em função do teor de cimento, de água e da relação água/cimento para concretos submetidos a cura úmida durante 28 dias e expostos a secagem durante 450 dias (CARLSON e READING, 1988)

### 3.1.5.2 Adições minerais

Estando o fenômeno da retração (autógena ou por secagem) diretamente relacionado à perda da água presente nos capilares, concretos produzidos com o uso de adições provavelmente apresentarão maior retração, uma vez que as pressões capilares são notadamente maiores em poros de menor raio. Entretanto, deve-se considerar ainda que o uso de adições minerais proporciona, nas idades avançadas, a melhoria das condições de resistência e rigidez da pasta de cimento, além de reduzir a quantidade de água perdida (em função da menor permeabilidade). Estes fatores podem, em alguns casos, compensar os efeitos do aumento da retração pelo refinamento dos poros (ESPING, 2007).

Rozière *et al.* (2007) estudaram a influência da variação do volume de pasta, quantidade de água e do uso de adições minerais nas propriedades de fissuração e retração de concretos auto-adensáveis. Os autores concluíram que a variação da quantidade de adição mineral não afetou significativamente a resistência à compressão, mas resultou em redução da retração. Através da análise da Figura 3.7, apresentada por Igarashi *et al.* (2000), pode-se visualizar que concretos com adição de sílica ativa apresentaram maiores valores de retração autógena, para os dois valores de relação água/cimento adotados, provavelmente devido ao refinamento da rede porosa do material, e conseqüentemente, do desenvolvimento de maiores pressões capilares, em comparação aos concretos referência.

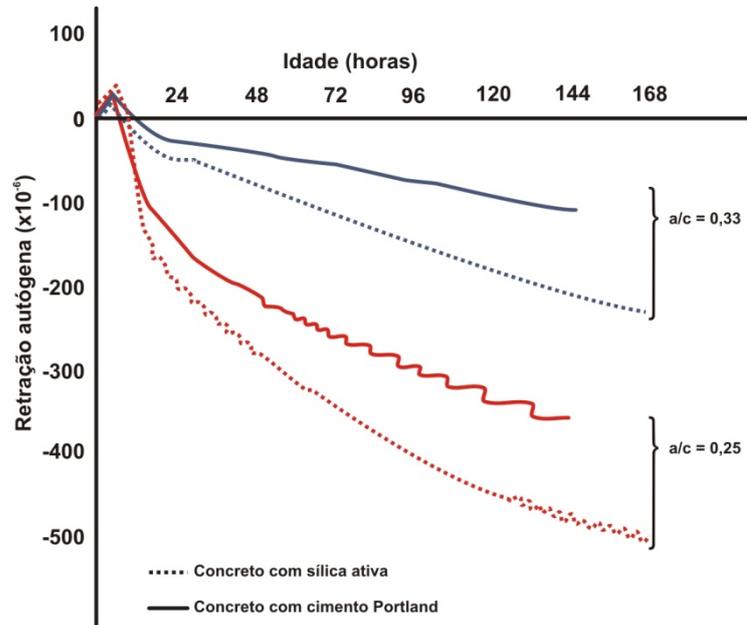


Figura 3.7 – Curvas de retração autóloga ao longo do tempo para concretos de alta resistência (IGARASHI *et al.*, 2000).

Zhang *et al.* (2003) realizaram pesquisa com concretos de alto desempenho com substituição parcial de cimento *Portland* Tipo I por sílica ativa em teores de 5% e 10% em massa e relações água/aglomerante de 0,26, 0,30 e 0,35, obtendo valores de resistência à compressão aos 28 dias entre 63,7 e 96,6 MPa. Os resultados indicaram que a substituição de sílica ativa nas misturas ocasionou aumento na retração autóloga para todas as misturas estudadas. O concreto com 10% de sílica ativa e relação água/material cimentício igual a 0,30 apresentou um aumento na retração autóloga aos 98 dias de  $180 \times 10^{-6}$  para  $274 \times 10^{-6}$ .

### 3.1.5.3 Aditivos

Segundo Rixom e Mailvanagam (1999), de modo geral, o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes não altera o comportamento do concreto frente ao desenvolvimento da retração ou da fluência. No entanto, a afirmação dos autores inclui dados de deformação a longo prazo, persistindo a necessidade de estudos enfocando a influência destes aditivos nas deformações desenvolvidas nas baixas idades do concreto, inclusive para ações combinadas.

Ademais, o uso de aditivos compensadores ou redutores de retração pode reduzir a retração total em comparação aos concretos convencionais, embora a retração autóloga se desenvolva inclusive em concretos moldados com uso de tais aditivos. A ação destes aditivos depende tanto do tipo como da concentração incluída na mistura, afetando tanto a tensão superficial da

água dos poros capilares como os mecanismos de pressão capilar que conduzem à retração. A comparação dos efeitos dos aditivos redutores e dos aditivos compensadores de retração pode ser visualizada na Figura 3.8.

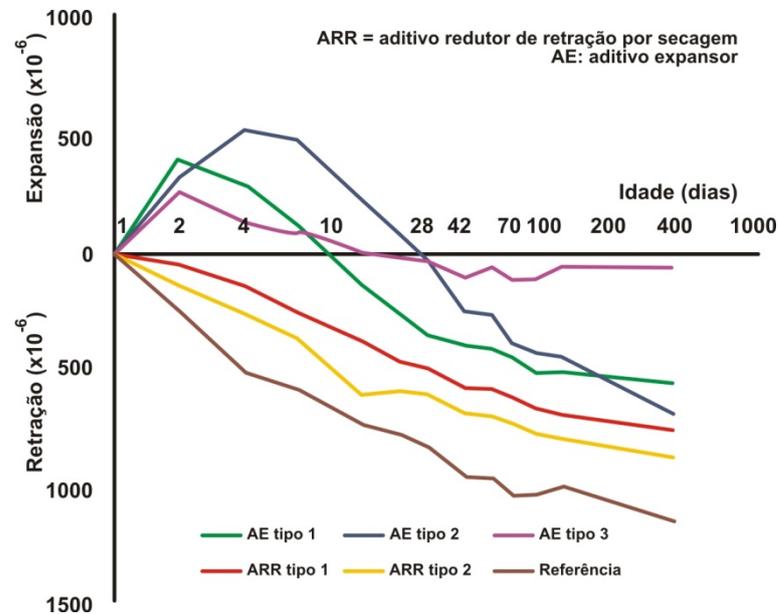


Figura 3.8 – Exemplo da influência de aditivos redutores e aditivos compensadores de retração por secagem na retração autógena do concreto (TAZAWA e MYIAZAWA, 1997).

Silva (2007-a) realizou estudo abrangendo as retrações autógena e por secagem em concretos de alto desempenho, dosados com e sem aditivo redutor de retração. A retração autógena unidimensional livre foi determinada em corpos-de-prova prismáticos, selados, com dimensões de 75 mm x 75 mm x 285 mm, em concretos de classes C80 e C60, contendo 0%, 1% e 2% de aditivo redutor de retração (base glicol). De acordo com os resultados, observou-se que a aplicação do aditivo redutor de retração no teor de 2% reduziu a retração autógena cerca de 50% com 1 e 3 dias de idade, da ordem de 40% aos 7 e 28 dias, cerca de 35% aos 90 dias e 30% aos 120 dias, para os concretos pesquisados.

Com relação à retração por secagem, a pesquisa de Silva (2007-a) demonstrou, conforme sugerido pela bibliografia pertinente, que a presença do aditivo redutor de retração diminui a tensão superficial da água, reduzindo a pressão (ou depressão) capilar e, por conseqüência, reduzindo a retração. Nos concretos C80, o incremento da dosagem de aditivo aumentou a taxa de redução da retração por secagem, ou seja, o teor de 2% foi mais eficiente que 1%. Já nos concretos C60, a porcentagem do aditivo redutor de retração (1% ou 2%) adicionado foi indiferente, pois a redução na retração por secagem foi muito próxima. A autora ressaltou

semelhança nos comportamentos de redução da retração pelo aumento no teor de aditivo, tanto para retração autógena como para retração por secagem. Este aspecto indicaria que o mecanismo de saída de água, quer para o ambiente quer para formar os produtos de hidratação, atuaria de forma semelhante, conforme sugerido na revisão bibliográfica da pesquisadora (SILVA, 2007-a).

Melo Neto *et al.*, (2007) realizaram pesquisa para analisar o comportamento de uma argamassa de relação água/cimento igual a 0,48 e traço 1:2 (cimento:areia), alterando o teor de aditivo redutor de retração, de 0% a 2%. Conforme pode ser visualizado na Figura 3.9, para 1 dia de idade, a correlação observada não foi satisfatória, indicando que, nesta idade, a redução na deformação por retração independe do teor de aditivo utilizado. A partir deste ponto, a utilização do aditivo redutor de retração amenizou significativamente o desenvolvimento da retração por secagem. O aumento do teor de aditivo incorreu em redução proporcional da retração por secagem, alcançando uma redução de até 42% com a utilização de 2% de aditivo.

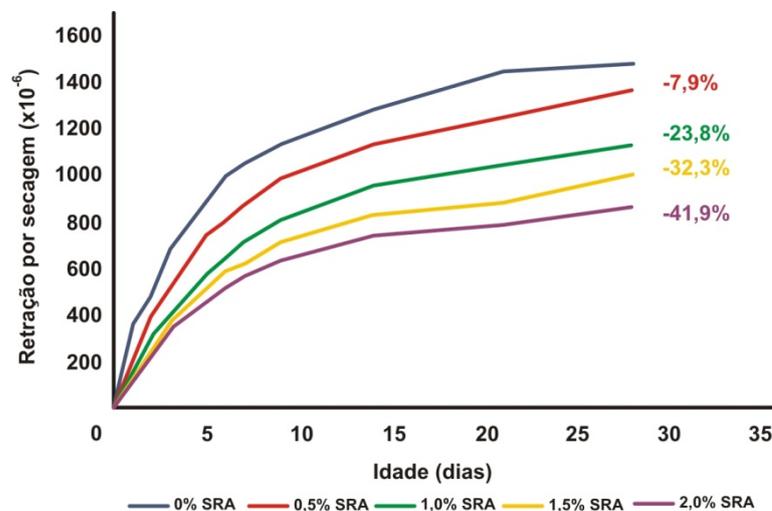


Figura 3.9 – Efeito do teor de aditivo redutor de retração na secagem de argamassas (MELO NETO *et al.*, 2007).

#### 3.1.5.4 Teor e natureza dos agregados

No concreto, a fase agregado influencia significativamente a variação volumétrica pela movimentação interna de água, uma vez que sua presença promove restrições contra a deformação da pasta. Este comportamento deve-se à estabilidade volumétrica do agregado sob diferenciais de umidade. Assim, quanto maior a fração volumétrica de agregado no

concreto, menor é a retração por secagem, conforme ilustrado na Figura 3.10. Além disso, concretos dosados com uso de agregados com baixo módulo de elasticidade apresentam retração mais elevada, de forma que a substituição de um agregado com alto módulo de deformação por um agregado com baixo módulo pode provocar um aumento da retração por secagem de até 2,5 vezes (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

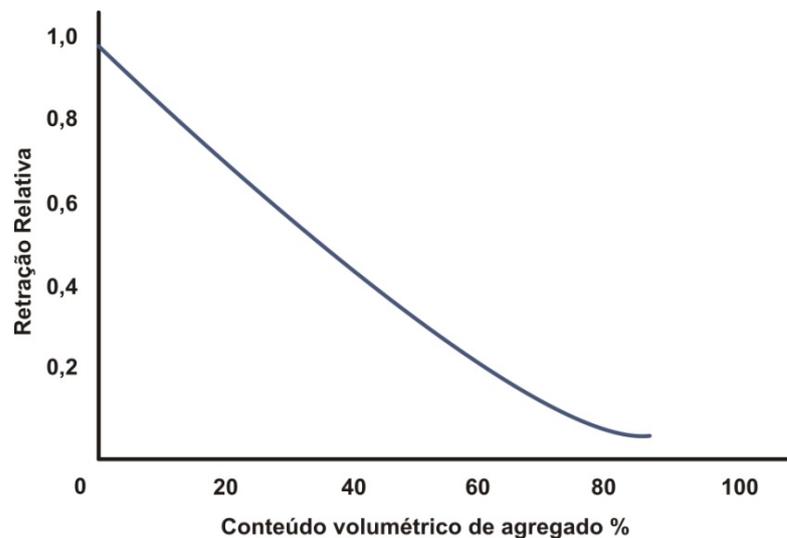


Figura 3.10 – Relação entre a fração volumétrica de agregado e a retração do concreto (PICKETT, 1956, *apud* NUNES e FIGUEIREDO, 2007).

Ademais, outras características do agregado como granulometria, dimensão máxima característica, forma e textura apresentam influência indireta sobre a retração do concreto. Esta influência ocorre através do efeito destas características na demanda de água na mistura, a qual também apresenta influência na retração. Zhutovsky *et al.* (2003) estudaram o efeito da substituição de pequena fração de agregado convencional por agregado leve (areia porosa saturada) em diferentes frações de dimensão característica. Durante as leituras de deformação, constatou-se inicialmente certa expansão, seguida pelo desenvolvimento de retração. O uso da areia porosa saturada de diferentes dimensões ocasionou redução na deformação por retração, sendo a redução mais notada para grãos maiores. O autor atribuiu tal comportamento a diferenças na estrutura de poros das diferentes dimensões características das frações de areia.

### 3.1.5.5 Condições ambientais e fatores diversos

As condições ambientais constituem fator relevante para o desenvolvimento de deformações devidas à retração por secagem. Isso porque a difusão da água adsorvida em pequenos poros

primeiramente para grandes capilares e, em seguida, para a atmosfera é um processo que depende do tempo e normalmente acontece durante longos períodos. Por outro lado, um aumento da umidade atmosférica conduz à redução da taxa de transferência do fluxo de umidade das regiões mais internas para a superfície do concreto, fazendo com que os índices de retração por secagem sejam menores. Este comportamento deve-se ao menor diferencial de umidade entre o concreto e o ambiente externo (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Na Figura 3.11 ilustra-se as relações entre a perda de água (em massa) e a retração por secagem. Através da figura, observa-se que a retração por secagem pode ser dividida em 5 domínios, dependentes dos valores de umidade relativa e da temperatura do ambiente onde o elemento de concreto encontra-se inserido, conforme segue:

- a. *Domínios 1 e 2:* ocorre perda da água retida nos vazios capilares;
- b. *Domínio 3:* ocorre perda da água adsorvida fisicamente aos cristais de C-S-H;
- c. *Domínio 4:* ocorre perda de água interlamelar da estrutura do C-S-H;
- d. *Domínio 5:* ocorre perda de água quimicamente combinada com decomposição dos produtos de hidratação.

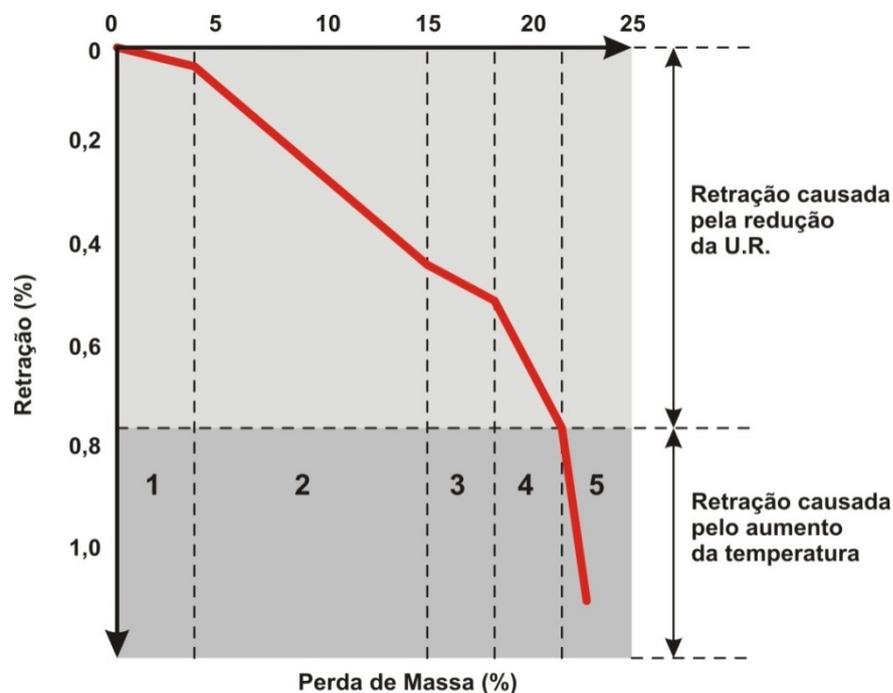


Figura 3.11 – Relações entre a perda de água e a retração por secagem (adaptado de MINDESS e YOUNG, 1981).

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a umidade relativa do ambiente que circunda o concreto

exerce influência significativa sobre a retração, de forma que o concreto desenvolveria certa “expansão”, quando conservado em água. Essa “expansão” seria cerca de seis vezes menor que a retração ao ar com umidade relativa de 70% ou oito vezes menor que a retração ao ar com umidade relativa de 50%.

Finalmente, cabe salientar que os diferentes mecanismos discutidos para desenvolvimento da deformação devida à retração dependem grandemente do grau de saturação da pasta de cimento. Assim, mudanças na umidade relativa do ambiente no qual as estruturas encontram-se inseridas repercutem diretamente na umidade interna do material, alterando o equilíbrio e causando evaporação ou condensação, dependendo do aumento ou redução da umidade relativa.

### 3.2 DEFORMAÇÕES NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO DEVIDAS À AÇÃO DE CARREGAMENTOS

O tempo necessário para desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto varia conforme as características e dosagem dos materiais utilizados na mistura, principalmente no que diz respeito ao tipo e teor de cimento. No entanto, mesmo para cimentos de alta resistência inicial, as etapas construtivas ocorrem durante o processo de endurecimento do concreto, de forma que o material encontra-se submetido a níveis de tensão que variam de acordo com as práticas de execução adotadas. Desta forma, quando os elementos estruturais são solicitados pela ação de algum carregamento ou pela retirada ou movimentação da estrutura provisória que os apóia, inicia-se um processo de deformação que pode desenvolver-se ao longo da vida útil da estrutura. Além disso, sob tensão permanente, o concreto sofre modificações intrínsecas em sua estrutura interna, dentre as quais interessa citar o desenvolvimento da resistência à compressão, a microfissuração interna e as deformações por fluência e por retração (SALVADOR, 2007). Neste contexto, especificamente no que diz respeito às baixas idades do concreto, importa entender tanto as deformações decorrentes do processo de hidratação, como as deformações decorrentes da ação de cargas incidentes durante as baixas idades, uma vez que, neste período, o endurecimento do concreto e a aplicação dos esforços se sobrepõem.

### **3.2.1 Deformações incidentes a baixas idades nas estruturas de concreto**

#### **3.2.1.1 Concreto armado**

De modo geral, a análise estrutural de um edifício é realizada considerando que a distribuição dos esforços se processa sobre uma estrutura finalizada, de forma que, obtidos os valores dos esforços solicitantes, o dimensionamento das seções é realizado considerando o estado limite último, através da análise global da estrutura, majorando as ações e minorando as resistências dos materiais envolvidos. Esta hipótese é válida para as ações horizontais devidas ao vento e para as ações verticais quando a estrutura está completamente construída. Porém, para ações como o peso próprio, que são impostas gradualmente, em diversas etapas da construção, as análises globais não são muito precisas, devendo-se considerar, convenientemente, a seqüência de construção do edifício. Assim, um edifício em construção compõe um sistema estrutural em constante modificação. O decorrer do tempo e das etapas construtivas altera sistematicamente as características de resistência e deformabilidade do concreto, de forma mais acentuada nas idades iniciais (PRADO e CORRÊA, 2002).

Com a racionalização da construção civil, os processos construtivos vêm se modificando, de forma que, a fim de garantir competitividade, as empresas primam por alcançar maior velocidade de entrega da obra, menosprezando a necessidade de verificação e adaptação do material estrutural aos ciclos de execução. Um exemplo desta conjuntura é a retirada antecipada do escoramento, submetendo a estrutura a um carregamento precoce, sem que haja tempo para que ocorram as reações químicas necessárias para o processo de hidratação do cimento e desenvolvimento da resistência à compressão e capacidade de deformação. Desta forma, cada pavimento recém concretado é suportado por outro, que por sua vez, ainda não desenvolveu resistência suficiente para suportar as cargas adicionais. Ademais, a execução antecipada das alvenarias constitui mais uma etapa que acrescenta efeitos indesejáveis na estrutura como um todo, pois a cada etapa construtiva realizada, nova parcela de esforços é absorvida pelos elementos estruturais, curados ou não. Sem resistência suficiente e escoramento permanente que possa suportar as cargas adicionais, podem ocorrer deformações (imediatas ou por fluência) não previstas em projeto. Tais deformações podem culminar pelo desenvolvimento de flechas acentuadas e de fissuras em função dos esforços prematuros (VIEIRA, 2008).

### 3.2.1.2 Concreto protendido

As deformações decorrentes da retração e da fluência do concreto causam uma perda progressiva da força de protensão, fazendo com que o valor inicialmente instalado dessa força sofra uma diminuição progressiva até se estabilizar, num tempo infinito. Na prática, a maior parte dessas perdas ocorre num intervalo de tempo de 2 a 3 anos (HANAI, 2005). Assim, a perda de protensão é uma consequência do alívio das tensões ocasionado pelo desenvolvimento de deformações de retração e de fluência, podendo ocorrer de forma especialmente prejudicial nas baixas idades do concreto, devido à menor capacidade de resistência à deformação do concreto neste período.

### 3.2.2 Conceitos relacionados às deformações incidentes sobre os materiais

Pela Lei de *Hooke*, dentro do limite elástico, quando se aplica uma carga de compressão a determinado material, ocorre uma deformação proporcional à tensão aplicada. O quociente entre a tensão aplicada ( $\sigma$ ) e a deformação elástica resultante ( $\epsilon$ ) é denominado módulo de elasticidade. Assim sendo, o módulo de elasticidade representa uma medida da resistência à deformação elástica do material, permitindo, portanto, a análise da sua rigidez. Materiais com baixo módulo de elasticidade se deformam muito elasticamente quando sujeitos a solicitações mecânicas, sendo indicados para estruturas projetadas para sofrerem apenas deformações transitórias. No entanto, na maioria das aplicações estruturais não se deseja a ocorrência de deflexões, ou seja, os materiais devem apresentar alto módulo de elasticidade (MONTIJA e FIGUEIREDO, 2008).

O termo '*elasticidade*' diz respeito à capacidade dos materiais de retornarem à sua forma e volume originais após remoção das solicitações atuantes. Evidentemente, essa propriedade é dependente da composição estrutural dos materiais a nível atômico, uma vez que a recuperação física ocorre pela tentativa do material de retornar à sua conformação de equilíbrio elétrico e de menor dissipação de energia. Ao ultrapassar o nível de resistência das forças interatômicas, surgem movimentações atômicas irreversíveis mesmo existindo capacidade de rearranjo por novas ligações químicas e nova conformação para o material. Reologicamente, esta é a manifestação do fenômeno da '*plasticidade*'. No caso de não haver condições de assumir uma nova forma sem a interrupção completa de ligações, ocorre uma fratura na microestrutura do material, e o limite de conservação da integridade deste material

é denominado como resistência à compressão ou à tração (MONTIJA e FIGUEIREDO, 2008).

Finalmente, a '*viscosidade*' é a deformação crescente sob solicitação constante ao longo do tempo, fundamentalmente ligada à movimentação causada pelo cisalhamento (quebra) de ligações fracas de superfície entre arranjos interatômicos (e não intra-arranjos como no caso da '*plasticidade*'). Desta forma, a '*viscosidade*' é um fenômeno irreversível que pode ocorrer conjuntamente com a '*elasticidade*' e a '*plasticidade*', sendo altamente dependente de fenômenos externos ao material, como os fatores ambientais umidade e temperatura (MONTIJA e FIGUEIREDO, 2008).

Cabe ressaltar que a conceituação contida neste item, referente às denominações '*elasticidade*', '*plasticidade*' e '*viscosidade*' teve como consideração básica o comportamento de materiais ditos perfeitos. Na engenharia, de forma geral, a maior parte dos materiais disponíveis são estruturalmente imperfeitos, com falhas de formação importantes para o desempenho das propriedades, além de características próprias de anisotropia e heterogeneidade. Na Figura 3.12 destacam-se os gráficos que representam modelos reológicos idealizados para as definições citadas.

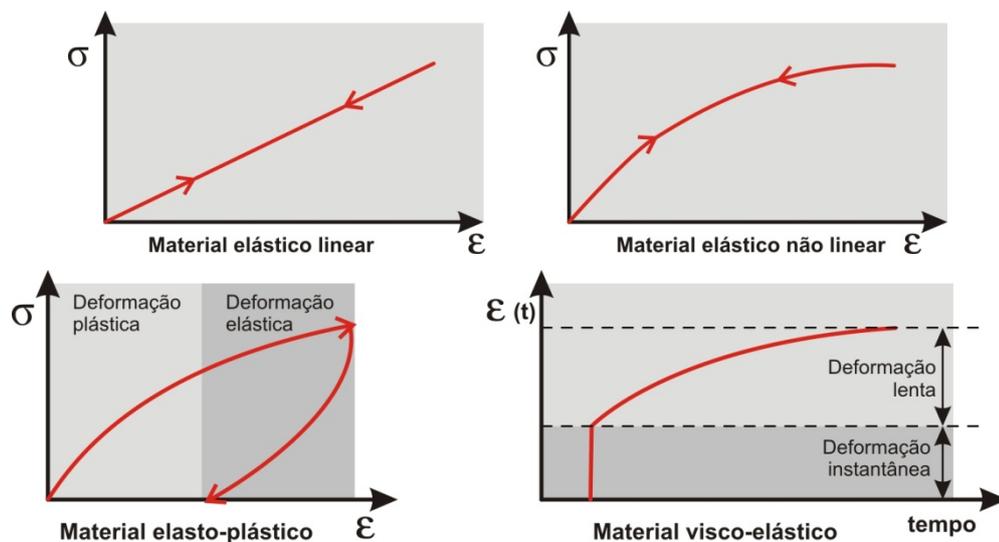


Figura 3.12 – Modelos reológicos idealizados de comportamento perfeito (adaptado de CUNHA, 2000).

Segundo Shah e Winter (1988), no caso específico do concreto, as deformações elásticas iniciais são seguidas de deformações viscoelásticas (parcialmente reversíveis) ou plásticas

(não reversíveis). Essa diferenciação deve-se aos fenômenos de fluência e relaxação. No caso da fluência, ocorre o aumento da deformação ao longo do tempo, sob carga mantida constante, enquanto que na relaxação, ocorre a redução da tensão ao longo do tempo, quando a deformação é mantida constante.

### 3.2.3 Módulo de elasticidade do concreto

O concreto de cimento *Portland* constitui-se de uma mistura de materiais cujas ligações químicas são características dos materiais cerâmicos, mas que se comporta globalmente como um compósito. Assim, embora quando submetidos a tensões, tanto a pasta de cimento como o agregado demonstrem relações tensão-deformação bastante próximas da linearidade, para o concreto tem-se a curvatura da relação tensão-deformação mesmo para pequenos incrementos de carga. A resposta de deformabilidade do concreto é, então, considerada dependente da rigidez individual das fases, de sua distribuição quantitativa e da forma como estas interagem, configurando uma característica de natureza contributiva e interativa (ANDRADE *et al.*, 1997; CUNHA, 2000).

Segundo Alexander e Milne (1995), Andrade *et al.* (1997), Pituba (2003) e Mehta e Monteiro (2006), a existência de uma fase estável (agregados) e de uma fase evolutiva do ponto de vista constitutivo (a pasta sofre retração e expansão na fase de cura, quando a resistência ainda é baixa) conduz à formação de uma zona de pequena resistência ao redor dos agregados graúdos (zona de transição). Nessa região acentuam-se deficiências de aderência e vazios associados tanto à direção da moldagem como à exsudação da água do concreto, originando a curvatura observada no gráfico da relação tensão-deformação do concreto. Na Figura 3.13 ilustram-se um diagrama típico tensão-deformação de um concreto convencional, além dos quatro estágios do comportamento do material em relação à microfissuração desenvolvida.

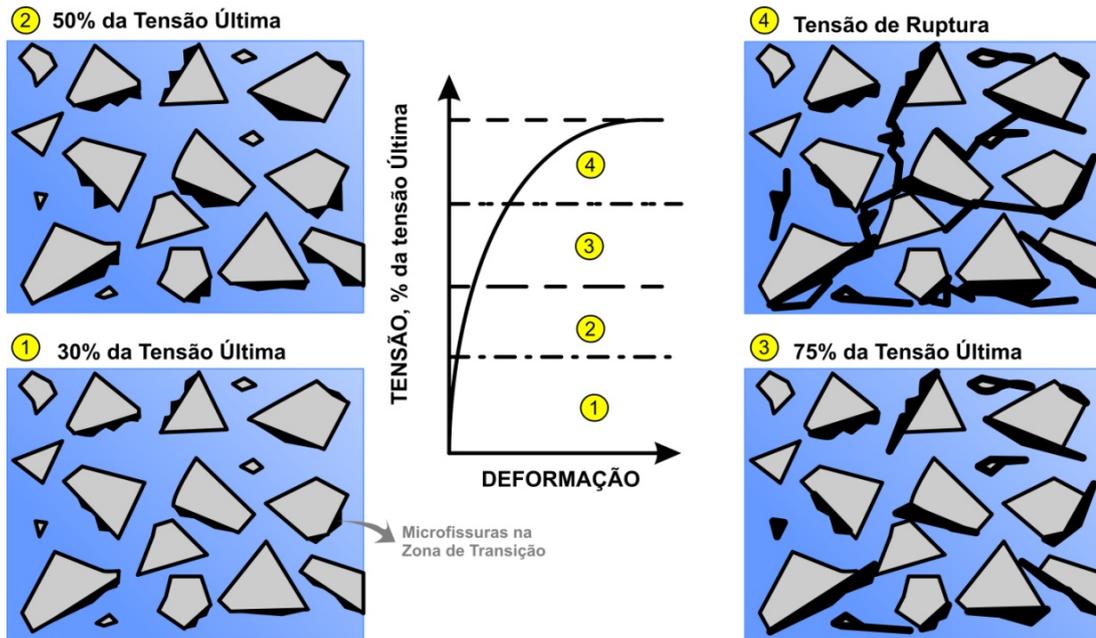


Figura 3.13 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação de um concreto convencional sob compressão uniaxial até a ruptura (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Conforme mostrado na Figura 3.13, além do limite considerado elástico, na medida em que a tensão aumenta, as microfissuras na zona de transição começam a progredir, produzindo deformações permanentes que se sobrepõem às elásticas, fazendo com que a curva tensão-deformação desvie de uma reta. Este desvio é menos acentuado até a formação de microfissuras na matriz. Em estágios mais avançados, fissuras macroscópicas, resultantes da presença, formação e propagação de microfissuras, também passam a colaborar nos mecanismos de deformação irreversível e de ruptura, caracterizando um ramo descendente do diagrama tensão-deformação. Acima de 75% da carga última, com o aumento da tensão, desenvolvem-se deformações muito grandes, indicando que o sistema de fissuras está se tornando contínuo devido à rápida propagação de fissuras tanto na matriz como na zona de transição (GONÇALVES, 2003; MEHTA e MONTEIRO, 2006).

### 3.2.4 Fluência

Um material apresenta deformação por fluência se, sob tensão constante, esta deformação aumenta no decorrer do tempo. Segundo o conceito de fluência, além da relação proporcional entre tensão e deformação, conceituada pela Lei de *Hooke*, adicionalmente desenvolve-se uma deformação cuja magnitude depende, principalmente, do tempo durante o qual a tensão aplicada permanece incidindo sobre o material, de forma que a relação tensão-deformação

torna-se função do tempo de aplicação do carregamento.

Em ambientes onde a saturação de umidade do ambiente é mantida e em constância de temperatura, a deformação que se desenvolve ao longo do tempo em uma peça de concreto submetida à tensão constante, é chamada de *fluência básica*. Este fenômeno isolado geralmente ocorre em estruturas de grande porte, em que a grande espessura da peça torna difícil a perda de água para o ambiente. Contudo, freqüentemente, o concreto está exposto a ambientes com umidade relativa inferior a 100% e, neste caso é possível distinguir além da deformação elástica instantânea, da fluência básica e da retração por secagem, uma deformação adicional denominada de *fluência por secagem*, definida pela relação entre o aumento da deformação de fluência sobre a fluência básica, devida à secagem (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Finalmente, cabe definir os termos *fluência específica* como a deformação de fluência por unidade de tensão aplicada e *coeficiente de fluência*, definido como a relação entre a deformação por fluência e a deformação elástica.

Na Figura 3.14 ilustra-se um gráfico típico do comportamento de carregamento e descarregamento na fluência.

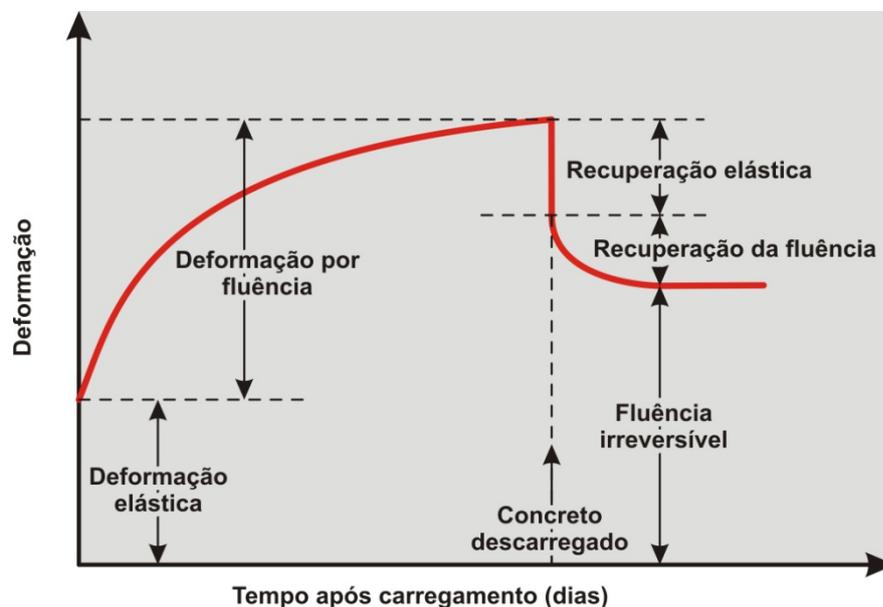


Figura 3.14 – Gráfico típico do processo de carregamento e descarregamento na fluência (adaptado da NBR 8224, 1983).

A explicação para a obtenção do gráfico típico do diagrama de fluência pode ser realizada analisando o processo de carregamento e descarregamento de um corpo-de-prova, conforme ilustrado na Figura 3.15. Inicialmente, esse corpo-de-prova encontra-se descarregado (a) e, em

seguida, ocorre a aplicação do carregamento (b), ocasionando o desenvolvimento de uma deformação elástica inicial ( $\Delta_{\text{Elástica}}$ ). Após certo tempo de manutenção de carregamento, essa deformação aumenta (c), o que pode ser atribuído à deformação de fluência ( $\Delta_{\text{Fluência}}$ ). Se o corpo-de-prova é descarregado (d), a deformação elástica e uma parte da deformação de fluência ( $\Delta_{\text{Recuperação da fluência}}$ ) serão revertidas, enquanto persiste uma parte de deformação irreversível, devida à fluência permanente (WEISS, 1999).

Cabe salientar que, em condições normais de carregamento, a deformação instantânea registrada depende da velocidade da aplicação da carga e inclui, portanto, não apenas a deformação elástica, mas também uma parte da fluência. Desta forma, é difícil distinguir precisamente a deformação elástica imediata e a fluência inicial, mas essa distinção não tem importância prática, pois é a deformação total devida à aplicação da carga que interessa para avaliação do efeito do fenômeno (TAMTSIA e BEAUDOIN, 2000).

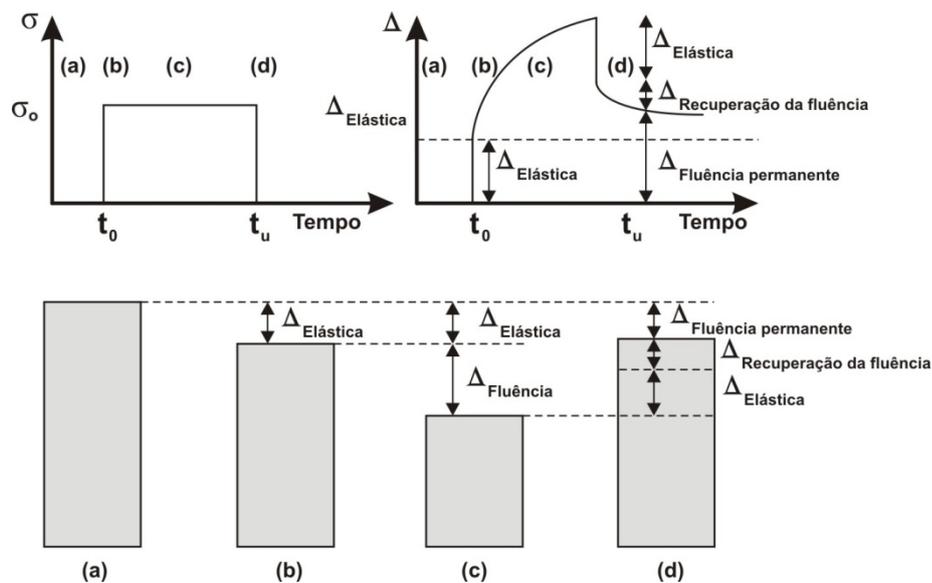


Figura 3.15 – Representação da deformação de fluência: (a) corpo-de-prova descarregado, (b) deformação elástica; (c) deformação de fluência e (c) fluência permanente após descarregamento (adaptado de WEISS, 1999).

Ademais, como o módulo de elasticidade do concreto aumenta com a idade, a deformação elástica decresce progressivamente e, a rigor, a fluência deveria ser tomada como a deformação que excede a deformação elástica no decorrer do ensaio. No entanto, muitas vezes, o módulo de elasticidade não é determinado durante todas as idades consideradas no ensaio, sendo adotada a simplificação de que a fluência corresponde ao acréscimo de deformação para além da deformação elástica inicial. Esta definição, embora seja uma

simplificação teórica, não introduz erros sérios, uma vez que a ordem de grandeza da deformação elástica instantânea é significativamente menor que a ordem de grandeza final da deformação por fluência (LEE *et al.*, 2006).

O conhecimento da fluência do concreto tem extrema importância na avaliação estrutural, uma vez que seu desenvolvimento ocasiona efeitos distintos sobre as demais deformações do material. Tais efeitos dependem de vários fatores, inclusive do tipo de esforço incidente sobre o elemento estrutural. Por exemplo, quando os pilares são solicitados com excentricidade em relação ao eixo da peça, o desenvolvimento de fluência ocasiona aumento diferenciado de deformação, conduzindo à flambagem. Em estruturas sujeitas à retração não uniforme, por variações térmicas ou movimentação das fundações, a fluência exerce função benéfica, aliviando as concentrações de tensões ocasionadas pela deformação diferencial, reduzindo a tendência à fissuração. No caso do concreto-massa, a fluência exerce funções contraditórias. Para este tipo especial de concreto, sujeito a ciclos de aquecimento e resfriamento, o calor liberado durante o processo de hidratação do cimento induz uma tensão de compressão na massa de concreto restringida. Neste momento, o módulo de elasticidade e as tensões são pequenos, e, conseqüentemente, a fluência é alta, aliviando as tensões de compressão devidas às deformações impostas. Com o início do resfriamento, surgem tensões de tração e, com o avanço na idade, a fluência é reduzida. Neste momento, a combinação destes dois fatores pode ocasionar a fissuração do concreto. No caso do concreto protendido, a grande consequência da fluência reside na perda de protensão em decorrência do alívio das tensões (VELASCO, 2008).

Apesar de certa dualidade nos efeitos da fluência sobre as estruturas de concreto, o interesse no desenvolvimento do fenômeno reside nas deflexões ou deformações de elementos estruturais e na perda de protensão em peças protendidas. Isso porque o aumento das deformações em elementos estruturais pode ocasionar problemas de utilização, principalmente em edifícios altos e pontes muito longas (FERRAZ, 2009).

Segundo Kalintzis (2000), as deformações dependentes do tempo não afetam a resistência dos elementos estruturais, uma vez que a ruptura do concreto é determinada pelo desenvolvimento de deformações muito acentuadas durante o processo de ruína, independentemente do histórico das deformações. Contudo, ao longo do tempo, as deformações dependentes do tempo podem comprometer o desempenho dos elementos estruturais ou, ainda, seu somatório

pode se aproximar da deformação limite sobre a qual a ruptura ocorre.

### 3.2.4.1 Relação entre a fluência e a retração

A retração autógena sofrida pelo concreto e definida no Item 3.1.1, é comumente adotada como parte da deformação por fluência. Através da análise da Figura 3.16, que ilustra esquematicamente a relação entre as deformações por fluência básica e as deformações autógenas, verifica-se que as deformações devidas à fluência básica real podem ser obtidas subtraindo os valores de deformação autógena da deformação por fluência básica. Lee *et al.* (2006) cita que, para baixos valores de relação água/cimento, a fluência básica obtida através dos ensaios em corpos-de-prova revestidos são imprecisas, devido ao intenso desenvolvimento de deformações autógenas nas idades iniciais destes concretos, dificultando o estabelecimento da relação entre os dois fenômenos.

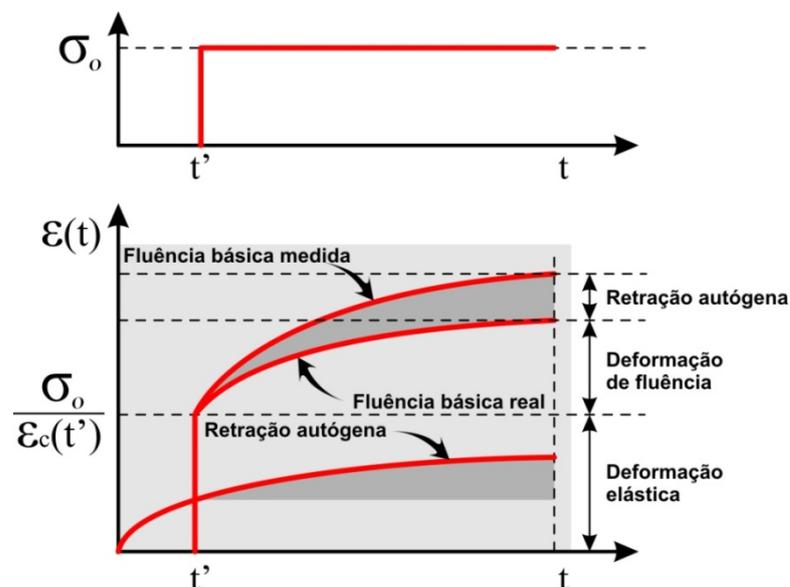


Figura 3.16 – Deformações dependentes do tempo no concreto sob manutenção do carregamento (adaptado de LEE *et al.*, 2006).

Além disso, considerando que, enquanto carregado, tanto a hidratação do cimento como os processos de autodessecação e secagem do concreto podem ocorrer concomitantemente (a depender das condições de revestimento dos corpos-de-prova), admite-se que as retrações incidentes e a fluência sejam aditivas. Assim, a fluência pode ser calculada como a diferença entre a deformação total após manutenção do carregamento e a retração de um corpo-de-prova similar, conservado nas mesmas condições, durante igual período de tempo. Esse cálculo constitui outra simplificação, cabendo salientar que a retração e a fluência não são fenômenos

independentes aos quais pode ser aplicado o princípio da superposição e, na realidade, a retração pode influenciar a deformação por fluência, aumentando seu valor final. No entanto, no caso de estruturas reais, a fluência e a retração são simultâneas e, do ponto de vista prático, pode se tornar conveniente adotar o tratamento conjunto das duas (NEVILLE e BROOKS, 1994).

Tamtsia *et al.* (2004) consideram que, no sistema selado, durante a manutenção de carregamento, seriam desenvolvidas a fluência básica real (excluída a retração autógena) e a retração autógena. No sistema não selado, seriam desenvolvidas a fluência básica (incluída a parcela de retração devida à autodessecação), a retração por secagem e a fluência por secagem. Ademais, o desenvolvimento simultâneo dos fenômenos sob manutenção do carregamento poderia induzir um acréscimo nas deformações, pela indução da hidratação, ocasionando uma parcela denominada como “*deformação adicional induzida*”, conforme mostrado no esquema da Figura 3.17.

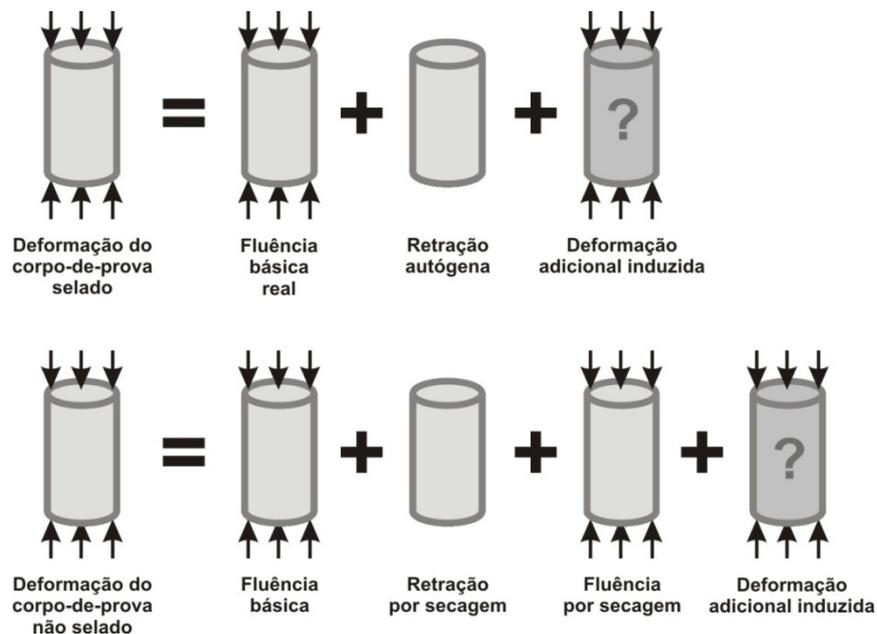


Figura 3.17 – Esquema das parcelas de contribuição para o desenvolvimento de deformação sob manutenção de carregamento, nos sistemas selado e não selado (adaptado de LEE *et al.*, 2006).

Lee *et al.* (2006) investigaram experimental e teoricamente a necessidade de separar a retração autógena do modelo de fluência básica, como o objetivo de sugerir uma metodologia para esta separação. Para satisfazer este objetivo, uma série de ensaios de retração autógena e de fluência básica foram realizados em concretos de relações água/cimento de 0,3 a 0,6. Na

Figura 3.18 ilustram-se as relações obtidas entre as deformações totais, incluindo ou excluindo a retração autógena, o carregamento aplicado e a idade de aplicação do carregamento.

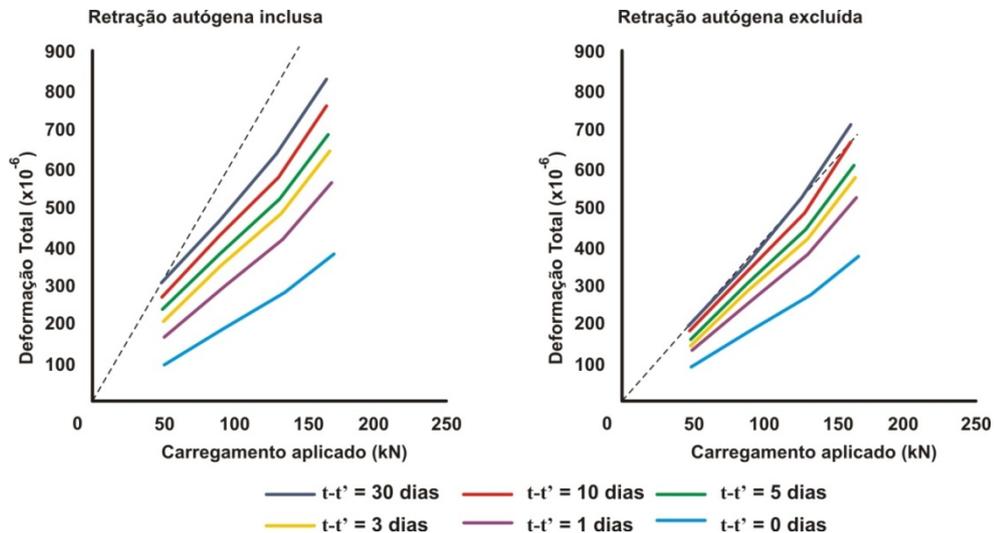


Figura 3.18 – Relações entre as deformações totais, carregamento aplicado e idade de aplicação do carregamento para o ensaio de fluência básica (LEE *et al.*, 2006).

Segundo Lee *et al.* (2006), os resultados indicaram que a deformação de fluência com inclusão da retração autógena não foi diretamente proporcional à tensão aplicada, enquanto a deformação de fluência sem a retração autógena resultou proporcional à tensão aplicada. De acordo com os autores, os resultados denotariam certa independência no desenvolvimento da retração autógena, em relação à aplicação de carregamento.

#### 3.2.4.2 Mecanismos teóricos para o desenvolvimento da fluência

Vários mecanismos têm sido invocados para contabilizar e explicar o fenômeno da fluência da pasta de cimento e do concreto. Tais mecanismos incluem microfissuração devida às tensões de retração, recristalização dos produtos de hidratação sob manutenção de carregamento e ocorrência de escorregamento entre a pasta e os agregados. Cabe salientar que, independente do mecanismo em questão, as teorias indicam a existência de uma explícita contribuição da movimentação de água e/ou da alteração microestrutural do C-S-H devido à aplicação externa de carregamento. Esse processo pode ainda ser corroborado pela ocorrência de secagem, que pode catalisar o processo, aumentando os valores finais de deformação.

De acordo com o mecanismo da movimentação de água, o desenvolvimento da fluência

básica estaria relacionado ao transporte e saída de água através do material. No entanto, esta hipótese contrasta com o fato de que a fluência ocorre inclusive em corpos-de-prova imersos em água ou selados, com inibição da perda de água. Além disso, mesmo em condições severas de umidade, e após alcançar a secagem profunda do material, constata-se a continuidade do desenvolvimento de deformações por fluência. Desta forma, a teoria da movimentação de água, embora estabeleça, a nível microestrutural, uma explicação coerente para a fluência, apresenta limitações relativas à saída de água do material durante a ocorrência do fenômeno (KALINTZIS e KUPERMAN, 2001; MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Segundo o mecanismo da água inter-lamelar, a fluência da pasta de cimento seria uma manifestação da cristalização gradual ou do envelhecimento das lamelas pobremente cristalizadas de C-S-H, devido à aplicação de carregamento e/ou pela ação da secagem. Desta feita, denota-se que a alteração microestrutural do C-S-H poderia tomar lugar em alguns pontos do volume do concreto (regiões ocupadas pelo C-S-H pobremente cristalizado). No entanto, o fenômeno da fluência se desenvolve em todos os tipos de pasta de cimento ou concreto, em maior ou menor proporção. Assim, presume-se que mesmo compostos hidratados bem cristalizados desempenhem uma parcela de influência no processo (FELDMAN e SEREDA, 1968, *apud* TAMTSIA e BEAUDOIN, 2000). Ademais, tanto esta teoria, como a teoria da ativação térmica (baseada na premissa de que as deformações dependentes do tempo são resultado de processos ativados termicamente) consideram que a água interpreta papel meramente secundário, não sendo decisiva para as deformações finais. Considerando a diferenciação explícita no desenvolvimento da fluência em corpos-de-prova sujeitos à secagem, em relação a corpos-de-prova selados, presume-se que a água não interprete papel meramente secundário, influenciando sobremaneira o desenvolvimento das deformações por fluência (WHITTMANN, 1982).

Neste aspecto, a teoria do escorregamento entre camadas de C-S-H sugere que a difusão da água adsorvida constitui o mecanismo preponderante da fluência, contribuindo tanto para o desenvolvimento da retração por secagem como para o desenvolvimento da fluência (ISHAI, 1968 *apud* TAMTSIA e BEAUDOIN, 2000).

Finalmente, cabe reiterar que, a exemplo da retração, provavelmente, dois ou mais destes mecanismos atuem concomitantemente para o desenvolvimento das deformações. Neste trabalho, para estabelecimento de hipóteses comportamentais acerca dos resultados do

programa experimental, será adotada a atuação simultânea dos mecanismos da movimentação de água e do escorregamento entre moléculas de C-S-H. Desta feita, o desenvolvimento da fluência se daria tanto pela movimentação da água, como pelo escorregamento entre lamelas de C-S-H através dos filmes rígidos de água adsorvida, em locais de impedimento ou maior dificuldade à movimentação de água.

### **3.2.5 Fatores influentes sobre a fluência do concreto**

#### **3.2.5.1 Idade e grau de hidratação**

Ross (1959) *apud* Tamtsia e Beaudoin (2000) afirmou que as propriedades do concreto são profundamente afetadas não somente pela idade, mas também pela temperatura durante o período de cura, de forma que a variável tempo isoladamente não constitui parâmetro significativo para comparação das propriedades de fluência. Além disso, baseado nos resultados de ensaios realizados, o autor concluiu que a fluência seria mais sensível a alterações na maturidade que a alterações na resistência ou no módulo de elasticidade do concreto, constituindo desta forma uma função do enrijecimento do material.

De Schutter e Taerwe (2000) realizaram pesquisa a fim de estudar o comportamento de fluência básica nas idades iniciais do concreto. Ensaios foram realizados com aplicação de carregamento nas idades de 12 horas a 14 dias, com dois níveis diferentes de tensão (20% e 40% da resistência à compressão na idade de carregamento). A deformação por fluência foi obtida subtraindo as deformações de retração medidas nos corpos-de-prova deixados descarregados das deformações totais dependentes do tempo (fluência básica + retração básica) medidas nos corpos-de-prova selados. Os autores concluíram que a evolução da fluência básica está diretamente relacionada à evolução do grau de hidratação, de forma que o tempo de carregamento não representa o parâmetro mais influente.

Cabe salientar que as deformações por fluência são afetadas tanto pelo decorrer da idade do material como pela idade de aplicação e manutenção do carregamento permanente. De acordo com Andrade *et al.* (1997), a fluência do concreto jovem pode atingir o dobro do valor do concreto carregado em idades mais avançadas. Assim, quanto mais cedo o concreto for solicitado, maior será a fluência total em decorrência de sua menor maturidade.

### 3.2.5.2 Tipo de cimento e tipo de concreto

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), o tipo de cimento afeta indiretamente o valor da fluência, por afetar a resistência do concreto enquanto carregado. Desta forma, cimentos de maior finura podem aumentar a fluência nas primeiras idades, uma vez que o ganho de resistência não acompanha o ganho de rigidez. No entanto, em idades avançadas a fluência dos concretos dosados com o uso deste tipo de cimento é menor. Para Mehta e Monteiro (2006), para um dado concreto, a fluência é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à resistência na idade do carregamento. Além disso, a fluência aumenta linearmente com o crescimento da relação tensão-resistência e com o aumento do tempo sob carregamento.

De Larrand *et al.* (1994) realizaram ensaios de fluência à compressão em concretos de alto desempenho classe C70, carregados aos 28 dias. Após um ano de carregamento, os resultados indicaram deformações de fluência específica de aproximadamente 10% a 25% dos valores reportados para concretos convencionais, mostrando uma notável redução na fluência para concretos de alto desempenho. Considerando que a fluência no concreto convencional e no concreto de alto desempenho é influenciada pelos mesmos parâmetros e de maneiras similares, a menor fluência observada no concreto de alto desempenho foi atribuída tanto à menor relação água/aglomerante como ao uso de sílica ativa. Além disso, outra razão para a diferença entre a fluência do concreto convencional e do concreto de alto desempenho poderia ser atribuída à menor fluência por secagem observada no concreto de alto desempenho (BUIL e ACKER, 1985).

Lopez *et al.* (2007) analisaram o desenvolvimento de deformações nos concretos convencional e de alta resistência devido à fluência e à retração através de ensaios convencionais e da análise de imagens digitais, com o objetivo de alcançar o melhor entendimento das relações entre as microestruturas destes concretos e as respectivas deformações elásticas e dependentes do tempo. A partir dos mapas de deformação gerados os autores concluíram que, tanto para o concreto convencional como para o concreto de alto desempenho, a deformação elástica foi heterogeneamente distribuída na pasta de cimento e agregados. Uma vez que a heterogeneidade foi concentrada nas frações ricas em pasta, o aumento da heterogeneidade ao longo do tempo sugeriu que a fluência e a retração são fenômenos primariamente concernentes à pasta, em ambos os tipos de concreto. Ademais, a

espessura da zona de transição foi duas vezes maior no concreto convencional, sugerindo a deformação diferencial na zona de transição é significativamente mais importante em descrever a fluência e o comportamento de retração no concreto convencional que no concreto de alto desempenho.

### 3.2.5.3 Condições ambientais

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), a umidade do ar é um dos principais fatores externos que influenciam a fluência. Isso porque, por definição, a fluência total é o somatório da fluência básica e da fluência por secagem, sendo esta última sensivelmente afetada pela existência de gradiente entre a umidade do ambiente e a umidade interna do material. Geralmente, para um mesmo concreto, quanto menor a umidade relativa, maior será a deformação de fluência. Além disso, a influência da umidade relativa é menor, ou praticamente ausente, no caso de corpos-de-prova que tenham sido submetidos à secagem anteriormente à aplicação de carregamento, de forma que o equilíbrio higroscópico com o ambiente externo tenha sido estabelecido durante manutenção da carga, ocasionando uma redução na fluência (TAMTSIA *et al.*, 2004).

Neville e Brooks (1997) citam que a influência da umidade relativa na fluência e na retração ocorre de formas semelhantes, e ambas as deformações são também dependentes das dimensões do elemento de concreto. Isso porque quando a secagem ocorre sob umidade relativa constante, a fluência é menor em corpos-de-prova de maiores dimensões. O efeito das dimensões do elemento de concreto pode ser visualizado em termos da relação volume/superfície do elemento de concreto, conforme mostrado na Figura 3.19. Assim, se nenhuma secagem ocorre, como no caso do concreto massa, a fluência é menor, independente das dimensões do material, uma vez que o efeito adicional de secagem na fluência pode ser praticamente desprezado.

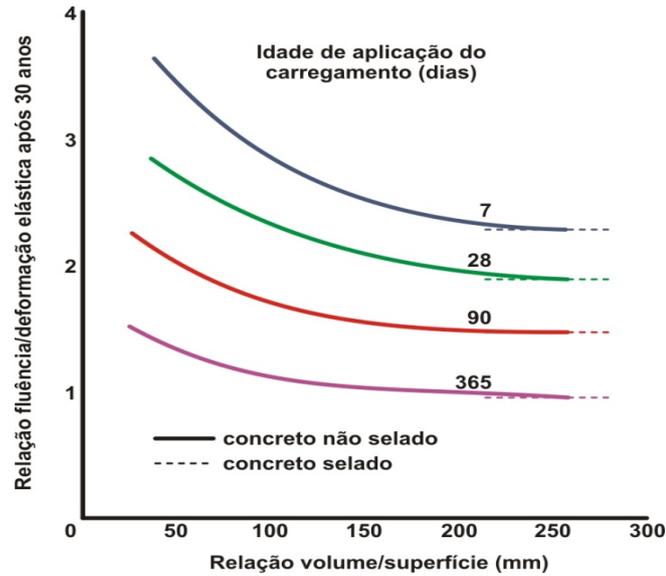


Figura 3.19 – Influência da relação superfície/volume na relação entre a fluência e a deformação elástica para concreto selado e para concreto não selado mantido em umidade relativa de 60% (NEVILLE e BROOKS, 1997).

Ademais, a influência da temperatura na fluência tem se tornado de grande interesse por causa do uso do concreto em estruturas de usinas nucleares, embora esta influência também seja significativa em outros tipos de estruturas, como em pontes. Nesta esteira, se o concreto saturado é aquecido e carregado ao mesmo tempo, a fluência resulta maior que quando o concreto é aquecido durante o período de cura, anteriormente à aplicação de carga, conforme mostrado na Figura 3.20. Esse comportamento se deve ao fato de que, quando o concreto é curado a altas temperaturas, obtêm-se maior resistência do que quando o concreto é curado nas temperaturas normais antes de aquecimento e carga (ØSTERGAARD *et al.*, 2001).

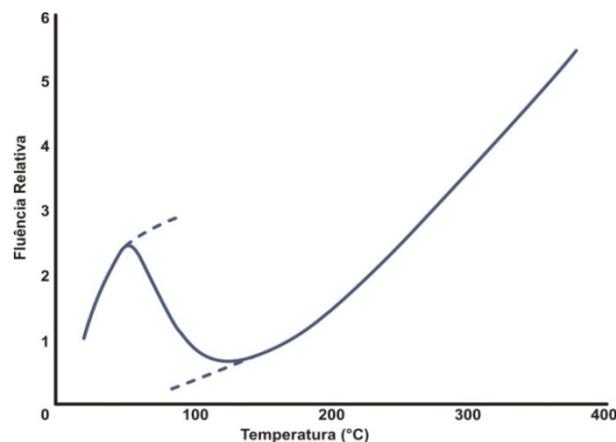


Figura 3.20 – Influência da temperatura na fluência de corpos-de-prova de concreto não selados, em relação à fluência a 20°C; corpos-de-prova curados por um ano e submetidos às temperaturas de ensaio 15 dias após o carregamento (MARÉCHAL, 1969).

Ademais, se um concreto não selado é submetido a altas temperaturas ao mesmo tempo em

que, ou anteriormente à aplicação de carga, ocorre um rápido aumento da fluência enquanto a temperatura aumenta para cerca de 50°C. A seguir, percebe-se uma redução na fluência a cerca de 120°C, seguida por outro aumento próximo a 400°C. O aumento inicial da fluência se deve à rápida expulsão das águas capilar e adsorvida. Finalmente, após a remoção de toda a água, a fluência é sensivelmente reduzida e se torna igual à fluência obtida pela manutenção de carregamento em concretos previamente secos (NEVILLE e BROOKS 1997).

### 3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO

Via de regra, o concreto apresenta comportamentos distintos e particulares relativos aos fenômenos de variação volumétrica, se comparado aos demais materiais estruturais. Essa distinção deve-se tanto à natureza compósita do material como ao processo de hidratação do seu aglomerante principal e às características peculiares de sua microestrutura (incluindo produtos de hidratação, rede porosa e os diversos estados da água). De modo geral, o desenvolvimento de deformações, com ou sem aplicação de carregamento, e a acomodação destas deformações não foram ainda completamente elucidados e as teorias pertinentes ao tema apresentam restrições devido à complexidade do material em estudo. No entanto, pode-se considerar que a deformabilidade do concreto é diretamente dependente da rigidez individual das fases que compõem sua microestrutura, e da forma como estas interagem, configurando uma característica de natureza contributiva e interativa (ANDRADE *et al.*, 1997; CUNHA, 2000).

O efeito físico da retração está associado a uma contração volumétrica da pasta de cimento, decorrente de fenômenos de diferentes naturezas, mas principalmente pela perda de água por evaporação, sem aplicação externa de carregamento. Além disso, a retração pode ocorrer em diferentes fases do endurecimento do compósito e ser impedida de ocorrer livremente, conforme a restrição imposta pela construção ao elemento de concreto (NUNES e FIGUEIREDO, 2007).

De fato, a retração total do concreto é o resultado de vários tipos de retração que podem ocorrer simultaneamente, durante a vida útil da estrutura. Em especial no que diz respeito aos dois tipos de retração abordados neste estudo, considera-se que a autodessecação e a secagem são as ações desencadeantes da retração autógena e da retração por secagem, respectivamente.

Isso porque tanto a autodessecação como a secagem ocasionam uma redução da umidade relativa interna do material, seja pelo consumo de água pelas reações químicas de hidratação, seja pela perda da água dos poros, devido à diferença existente entre a umidade relativa interna do material e a umidade relativa do ambiente externo (SILVA, 2007-a).

Ademais, além da autodessecação e da secagem, um elemento de concreto mantido sob ação de carregamento apresenta ainda um aumento da deformação ao longo do tempo, pela manutenção da carga. Assim, subtraindo-se da deformação total os valores devidos à retração (autógena, térmica e por secagem), a deformação específica restante será devida ao fenômeno da fluência. Segundo o conceito de fluência, além da relação proporcional entre tensão e deformação, conceituada pela Lei de *Hooke*, adicionalmente desenvolve-se uma deformação cuja magnitude deve-se, principalmente, ao tempo durante o qual a tensão aplicada permanece incidindo sobre o material, de forma que a relação tensão-deformação torna-se função do tempo de aplicação do carregamento.

Os mecanismos teóricos de desenvolvimento da retração e da fluência propostos por Feldman e Sereda (1968), Powers (1968), Ruetz (1968), Ishai (1968) e Wittmann (1982), citados por Tamtsia e Beaudoin (2000), consideram estes fenômenos como deformações dependentes do tempo incluindo, de forma sistemática, a influência da microestrutura do material, seja pela movimentação de água através da sua rede porosa, seja pelo escorregamento e modificação estrutural do C-S-H. Assim, existe certo consenso de que dois ou mais mecanismos atuem simultaneamente, redundando nos comportamentos registrados através das pesquisas. No caso da retração, a variação da pressão capilar seria o mais adequado para explicar o fenômeno, uma vez que seu desenvolvimento se baseia tanto nas características da microestrutura do concreto como no estabelecimento físico da diferença de tensão superficial e conseqüente desenvolvimento dos meniscos, incluindo a possibilidade de modelagem teórica do fenômeno. Por outro lado, o desenvolvimento da fluência se daria tanto pela movimentação da água, como pelo escorregamento entre lamelas de C-S-H através dos filmes rígidos de água adsorvida, em locais de impedimento ou maior dificuldade à movimentação de água, conforme mencionado por Ishai (1968) *apud* Tamtsia & Beaudoin (2000).

Independente do mecanismo considerado, importa ressaltar que toda e qualquer característica relacionada ao estabelecimento da microestrutura do material (relação água/cimento, adições minerais, uso de aditivos e práticas executivas) bem como o estabelecimento de um gradiente

de umidade através da autodessecação e/ou da secagem influenciam sobremaneira os fenômenos. Especificamente em relação à fluência, a idade de aplicação do carregamento e a indução da hidratação pela manutenção da carga ocasionam alterações significativas nos valores totais de deformação.

Em relação às deformações devidas à aplicação de carregamento, um edifício em construção compõe um sistema estrutural em constante modificação. O decorrer do tempo e das etapas construtivas altera sistematicamente as características de resistência e deformabilidade do concreto, de forma mais acentuada nas idades iniciais. Ademais, além da redução na duração dos ciclos de execução de pavimentos de concreto, escoras, reescoras e lajes de concreto são muitas vezes solicitadas com carregamentos de construção além daqueles previstos em projeto. Sabe-se que as práticas construtivas adotadas atualmente primam pela maior velocidade dos processos, de forma que, frequentemente, o enrijecimento do concreto e a aplicação dos esforços se sobrepõem. No caso do concreto protendido, a grande consequência da retração e da fluência reside na perda de protensão em decorrência do alívio das tensões e, uma vez que as tensões de protensão são aplicadas nas baixas idades do concreto, a influência destes fenômenos se torna mais imperativa.

Do ponto de vista prático, a importância do estudo das deformações incidentes nas baixas idades do concreto firma-se pelo entendimento comportamental de um material estrutural constantemente negligenciado em detrimento do tempo necessário para desenvolvimento de suas propriedades mecânicas.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 DEFINIÇÕES METODOLÓGICAS E VARIÁVEIS ADOTADAS

A metodologia apresentada neste Capítulo foi traçada considerando os objetivos propostos e as características dos concretos em estudo. Visando analisar o desenvolvimento das deformações devidas à retração e à fluência em concretos comerciais e considerando as resistências à compressão mais comumente utilizadas nas obras de médio e grande porte da região de Goiânia e Brasília, foram escolhidos os valores de resistência característica aos 28 dias de 20, 35 e 50 MPa, para os concretos doravante denominados como C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente.

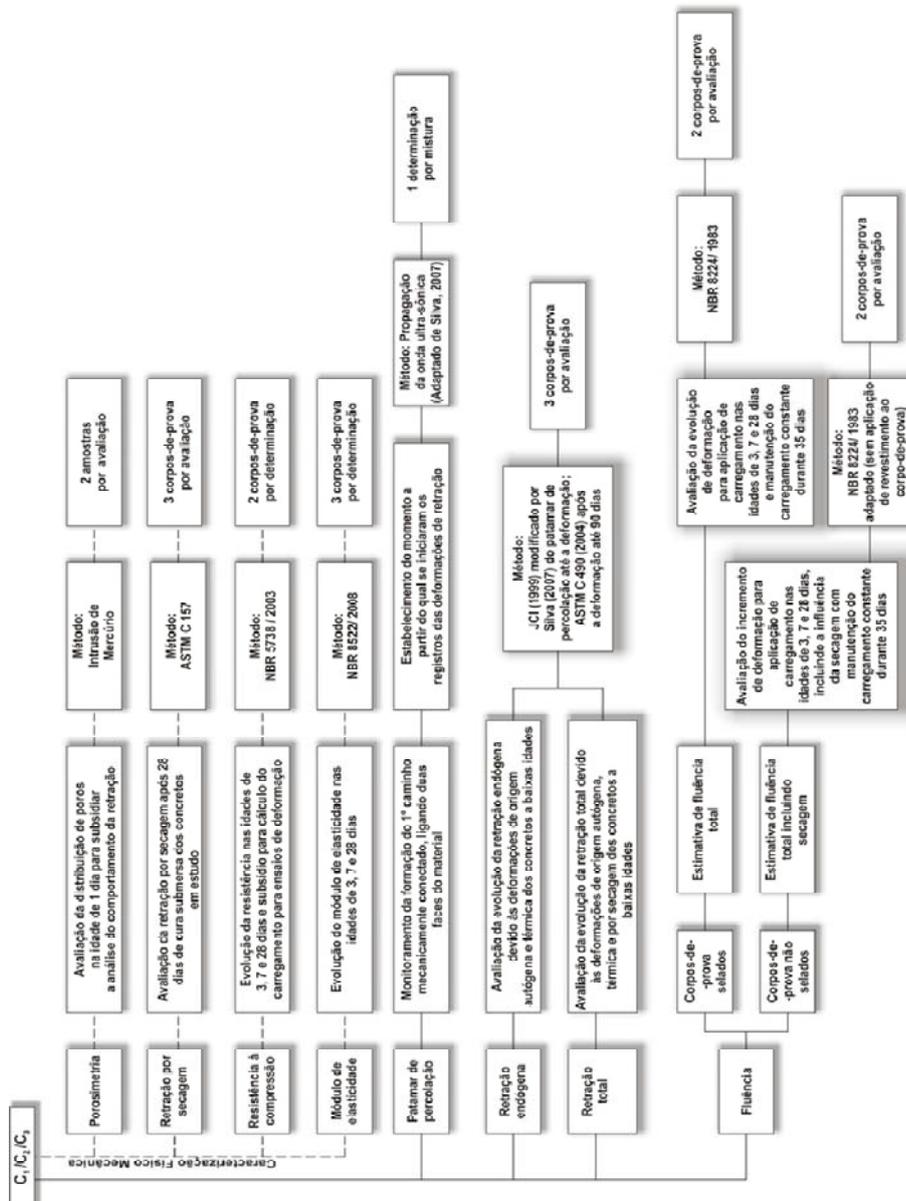
A escolha da aplicação destas variáveis ao estudo proposto se justifica por vários aspectos. Primeiramente, o estudo de concretos comerciais se justifica pela necessidade de verificar o comportamento destes concretos frente ao desenvolvimento da retração e da fluência a baixas idades. Ademais, sabendo que a microestrutura do material (porosidade da pasta e da zona de transição, densidade dos produtos de hidratação e quantidade de água presente) influencia sobremaneira sua deformabilidade, a variação da relação água/aglomerante e dos parâmetros de mistura, em função das resistências à compressão escolhidas, possibilitou a análise de microestruturas com características distintas.

Especialmente em relação às deformações devidas à manutenção de carregamento ao longo do tempo, foram escolhidas algumas variáveis adicionais presumidamente capazes de infundir alterações nas medidas, possibilitando discutir de forma mais ampla o comportamento dos concretos estudados, a saber: (i) variação das idades de aplicação de carregamento (3, 7 ou 28 dias); e (ii) variação nas condições de revestimento dos corpos-de-prova durante a manutenção do carregamento (selados conforme prescrições da NBR 8224 (ABNT, 1983) ou em condições de total exposição ao ambiente de laboratório).

A escolha das idades de carregamento foi realizada com base nas idades comumente utilizadas para retirada de escoramento, prosseguimento da montagem de fôrmas e concretagem de pavimentos superiores da edificação e com base nas idades comumente adotadas para aplicação de protensão. Além disso, foi adotada a idade de 28 dias, a ser utilizada também como parâmetro de referência. No que diz respeito às condições de revestimento dos corpos-

de-prova, a realização de medidas de deformação com e sem selagem permitiu verificar a influência da secagem durante a manutenção do carregamento, possibilitando inferir as diferenças comportamentais entre o material ensaiado de acordo com as prescrições da NBR 8224 (ABNT, 1983) e o material inserido em uma estrutura real, sujeito aos gradientes de umidade existentes.

Nos fluxogramas constantes das Figuras 4.1 e 4.2 apresentam-se, esquematicamente, os ensaios aplicados ao programa experimental.



Nota: *retração endógena*: inclui os efeitos das retrações autóloga e térmica; *Retração total*: inclui os efeitos das retrações autóloga, térmica e por secagem; *retração por secagem*: determinada conforme prescrições da ASTM C 157 (ASTM, 2004).

Figura 4.1 – Resumo das variáveis aplicadas ao programa experimental, objetivos de cada análise, idades, método e quantidade de determinações, para os concretos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ .

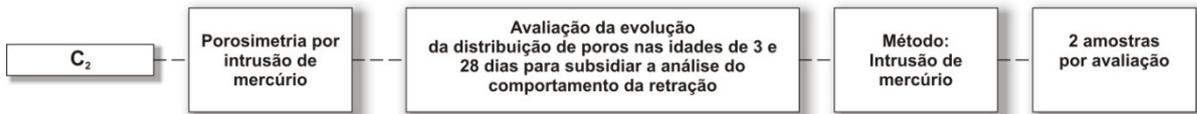


Figura 4.2 – Esquema dos ensaios de porosimetria realizados no concretos C<sub>2</sub>, para avaliação da distribuição de poros nas idades de 3 e 28 dias.

Cabe salientar que, no intuito de cumprir com os objetivos delimitados para a pesquisa, os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> foram produzidos através da adoção dos traços utilizados por uma indústria especializada na produção comercial de concreto. Ademais, foram utilizados nas misturas somente materiais provenientes das mesmas marcas e fornecedores daqueles utilizados nas misturas de concretos produzidos comercialmente pela concreteira.

#### 4.2 COMPOSIÇÃO DOS CONCRETOS

Partindo dos traços adotados, foi realizado o ajuste da quantidade de água de cada composição individual. Esse procedimento foi necessário considerando que: (i) os traços fornecidos não incluíam a umidade presente nos agregados. Desta forma, foi necessário realizar a determinação da umidade superficial presente no agregado miúdo e, posteriormente, descontar esta umidade da quantidade de água total, a fim de obter os traços corrigidos; e (ii) um concreto bombeável deve apresentar abatimento entre 8 e 16 cm, dependendo do tipo das bombas, do diâmetro dos segmentos de tubos, da dimensão máxima característica do agregado gráudo, entre outros parâmetros. Assim, os valores escolhidos para o abatimento tronco de cone das misturas de concreto se situaram no intervalo de 10 cm ± 2 cm, uma vez que essa faixa de variação representa valores de abatimento comumente solicitados para bombeamento de concreto comerciais.

Na Tabela 4.1 encontram-se as informações relativas ao consumo de materiais para cada concreto, incluindo a quantidade de água corrigida, após a realização dos ajustes. A apresentação e análise dos parâmetros de mistura, em relação às características de cada concreto, serão discutidas apropriadamente no Capítulo 5.

Tabela 4.1 – Consumo de materiais, em kg/m<sup>3</sup> e parâmetros de mistura dos concretos.

Materiais	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
Traço em massa	1:3,67:3,76	1:1,52:2,45	1:1,35:2,26
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	255	420	455
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )			30
Agregado Miúdo - Areia natural (kg/m <sup>3</sup> )	469	286	275
Agregado Miúdo - Areia artificial (kg/m <sup>3</sup> )	469	355	340
Agregado Graúdo - Brita 4,75/12,5 (kg/m <sup>3</sup> )	-	205	205
Agregado Graúdo - Brita 9,5/25 (kg/m <sup>3</sup> )	960	825	825
Água – traço corrigido (kg/m <sup>3</sup> )	178,9	184,8	212,4
Aditivo Plastificante (l/m <sup>3</sup> )	1,8	3,8	4,0

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.3.1 Cimento

O aglomerante hidráulico utilizado nesta pesquisa foi o cimento *Portland* CP V ARI, produzido pela fábrica da Cimento Tocantins localizada no Distrito Federal. O material foi proveniente de lote fornecido exclusivamente para empresas concreteiras. As características físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado encontram-se relatadas na Tabela 4.2. Verifica-se, pela análise dos dados expostos na Tabela 4.2, que os valores obtidos na caracterização do cimento estão de acordo com as normas relativas ao cimento *Portland* de alta resistência inicial.

Tabela 4.2 – Caracterização física, química e mecânica do cimento CP V ARI utilizado na pesquisa (Laboratório de Ensaios da Cimento Tocantins S/A).

Ensaio físico	Unidade	Resultados	Especificações de norma
Resíduo na peneira # 200 (0,074 mm)	(%)	0,3	≤ 6,0
Resíduo na peneira # 325 (0,045 mm)	(%)	1,9	
Superfície específica ( <i>Blaine</i> )	(cm <sup>2</sup> /g)	507	≥ 300
Expansibilidade ( <i>Le Chatelier</i> )	(mm)	0,0	≤ 5,0
Tempo de início de pega	(min)	140,0	≥ 60
Tempo de fim de pega	(min)	210,0	
Massa específica	(g/cm <sup>3</sup> )	3,12	

Ensaio químico	Unidade	Resultados	Especificações de norma
Sílica – SiO <sub>2</sub>	(%)	19,24	
Alumina – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	4,49	
Ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	3,24	
Cálcio – CaO	(%)	60,31	
Magnésia – MgO	(%)	3,91	≤ 6,5
Enxofre – SO <sub>3</sub>	(%)	3,02	≤ 3,5
Sódio – Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	0,24	
Potássio – K <sub>2</sub> O	(%)	1,21	
Resíduo insolúvel – R.I.	(%)	0,87	≤ 1,0
Perda ao fogo – P. P. C.	(%)	2,97	≤ 4,5

Ensaio mecânico	Unidade	Resultados	Especificações de norma
Resistência à compressão			
1 dia	(MPa)	25,0	≥ 14,0
3 dias	(MPa)	34,1	≥ 24,0
7 dias	(MPa)	36,5	≥ 34,0
28 dias	(MPa)	43,0	

Nota: Itens especificados pela NBR 5733 (ABNT, 1991).

#### 4.3.2 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada como material aglomerante suplementar foi produzida pela Companhia de Ferro-Ligas da Bahia – Ferbasa. Na Tabela 4.3 apresentam-se os resultados de caracterização física e química da sílica ativa utilizada na fabricação dos concretos.

Tabela 4.3 – Caracterização físico-química da sílica ativa utilizada na pesquisa (Laboratório de Caracterização de Materiais da Cia de Ferro-Ligas da Bahia – Ferbasa).

Caracterização física	Unidade	Resultados	Especificações de norma
Aspecto		Pó	
Cor		Branco	
Massa específica	(g/cm <sup>3</sup> )	2,23	
Conteúdo de cloro	(%)	Isento	

Caracterização química	Unidade	Resultados	Especificações de norma
Sílica – SiO <sub>2</sub>	(%)	94,2	≥ 85,0
Teor de carbono	(%)	0,67	≤ 2,5
Teor de umidade	(%)	0,41	≤ 1,0
Perda ao fogo	(%)	1,70	≤ 4,0

Nota: Itens especificados pela NBR 13956 (ABNT, 1997).

Pela análise dos dados expostos na Tabela 4.3, os valores obtidos na caracterização da sílica ativa estão de acordo com a NBR 13956 (ABNT, 1997), que especifica seu uso em concretos, argamassas e pastas de cimento *Portland*.

#### 4.3.3 Agregado miúdo

Os agregados miúdos utilizados na pesquisa consistiram em uma areia artificial e uma areia natural, tendo sido aplicada a variação na natureza dos agregados miúdos em virtude desta prática ser adotada pela empresa concreteira cujos traços foram reproduzidos nesta pesquisa. Os agregados miúdos foram caracterizados pelos ensaios de composição granulométrica, massa específica, massa unitária, absorção de água, teor de argila em torrões e impurezas orgânicas. Ambos os tipos de agregado miúdo (natural e artificial) apresentaram distribuição granulométrica satisfatória, composta por frações atendendo aos limites da zona utilizável da NBR 7211 (ABNT, 2009), cabendo salientar que o agregado artificial utilizado foi do tipo granulito. Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos utilizados na pesquisa encontram-se nas Tabelas 4.4 e 4.5. Nas Figuras 4.3 e 4.4 encontram-se as respectivas curvas de distribuição granulométrica referentes às médias obtidas nos ensaios das areias artificial e natural, bem como as curvas referentes aos limites superiores e inferiores de porcentagem retida acumulada, para cada peneira específica.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo – areia artificial.

Composição granulométrica do agregado miúdo			Método: NM 248 (ABNT, 2001)
Material: areia artificial (tipo granulito)		Data: setembro / 2009	
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida média (g)	Porcentagem simples retida média	Porcentagem retida média acumulada
9,5 (# 3/8")	0,0	0,0	0,0
4,8 (# 4)	0,0	0,0	0,0
2,4 (# 8)	152,2	15,2	15,2
1,2 (# 16)	213,3	21,3	36,5
0,6 (# 30)	183,9	18,4	54,9
0,3 (# 50)	147,8	14,7	69,6
0,15 (# 100)	137,7	14,0	83,6
Fundo	165,1	16,4	100,0
Total	1.000,00	100,00	100,0

CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA - NM 248 (ABNT, 2001)	Zona Utilizável
MÓDULO DE FINURA - NM 248 (ABNT, 2001)	2,60
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) - NM 248 (ABNT, 2001)	4,80
MASSA UNITÁRIA (kg/dm <sup>3</sup> ) – NM 45 (ABNT, 2006)	1,59
MASSA ESPECÍFICA (kg/dm <sup>3</sup> ) – NM 52 (ABNT, 2009)	2,78
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) – NM 30 (ABNT, 2000)	2,37
TEOR DE ARGILA EM TORRÕES (%) – NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,0
TEOR DE IMPUREZAS ORGÂNICAS (ppm) – NM 49 (ABNT, 2001)	Inferior a 300

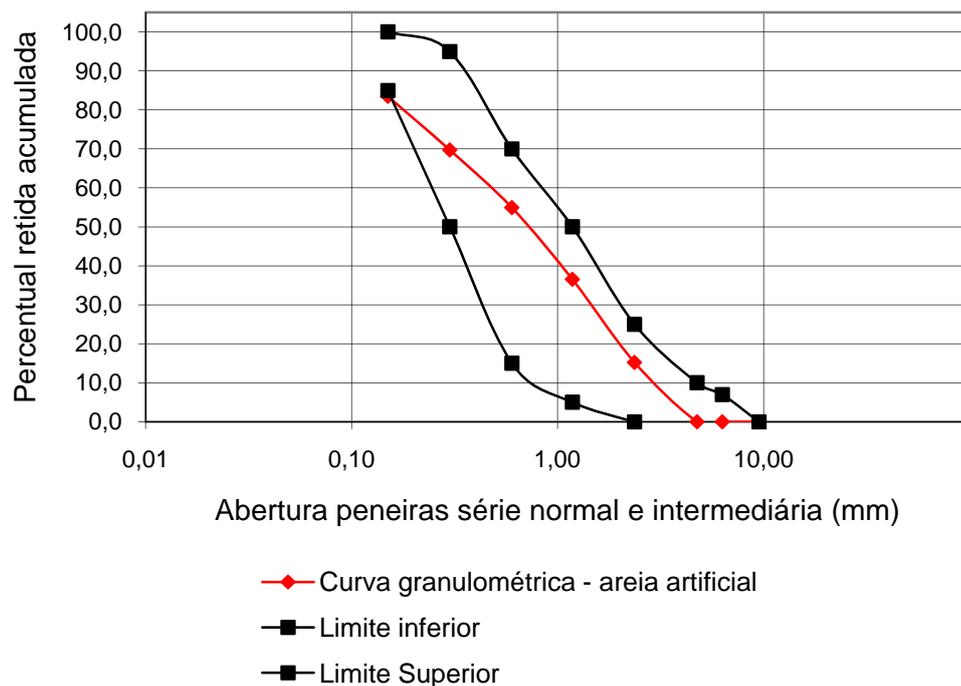


Figura 4.3 – Distribuição granulométrica da areia artificial.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo – areia natural.

Composição granulométrica do agregado miúdo			Método: NM 248 (ABNT, 2001)
Material: areia natural		Data: setembro / 2009	
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida média (g)	Porcentagem simples retida média	Porcentagem retida média acumulada
9,5 (# 3/8")	0,0	0,0	0,0
4,8 (# 4)	0,0	0,0	0,0
2,4 (# 8)	12,0	1,2	1,2
1,2 (# 16)	31,1	3,1	4,3
0,6 (# 30)	139,4	13,9	18,2
0,3 (# 50)	557,8	55,8	74,0
0,15 (# 100)	235,2	23,5	97,5
Fundo	24,5	2,5	100,0
Total	1.000,00	100,00	100,0

CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA - NM 248 (ABNT, 2001)	Zona Utilizável
MÓDULO DE FINURA - NM 248 (ABNT, 2001)	1,95
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) - NM 248 (ABNT, 2001)	1,2
MASSA UNITÁRIA (kg/dm <sup>3</sup> ) - NM 45 (ABNT, 2006)	1,39
MASSA ESPECÍFICA (kg/dm <sup>3</sup> ) - NM 52 (ABNT, 2009)	2,62
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) - NM 30 (ABNT, 2000)	1,92
TEOR DE ARGILA EM TORRÕES (%) - NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,35
TEOR DE IMPUREZAS ORGÂNICAS (ppm) - NM 49 (ABNT, 2001)	Inferior a 300

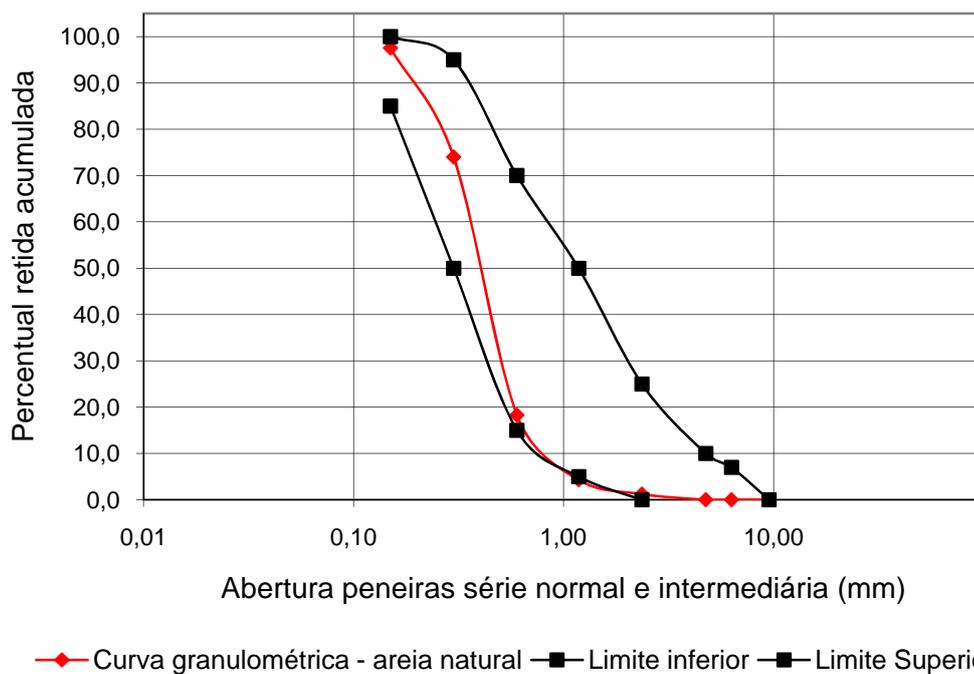


Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da areia natural – areia lavada de leito de rio.

#### 4.3.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa foi uma rocha britada (micaxisto) de duas dimensões características distintas, procedente da pedreira Ciplan, localizada em Guapó, Goiás. O agregado graúdo foi caracterizado pelos ensaios de composição granulométrica, massa unitária, massa específica, absorção de água, teor de argila em torrões e teor de materiais pulverulentos. A distribuição granulométrica das duas graduações de agregado graúdo atendeu a praticamente todos os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009), sendo a única inadequação visualizada pelo fato da porcentagem retida acumulada pela brita 9,5/25 na peneira # 19,0 ser inferior ao respectivo intervalo de norma. Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos utilizados na pesquisa encontram-se nas Tabelas 4.6 e 4.7. Nas Figuras 4.5 e 4.6 encontram-se as curvas de distribuição granulométrica referentes às médias obtidas nos ensaios das duas graduações de agregado graúdo, bem como as respectivas curvas referentes aos limites superiores e inferiores de porcentagem retida acumulada, para as dimensões de referência.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 4,75/12,5.

Composição granulométrica do agregado graúdo			Método: NM 248 (ABNT,
Material: brita 4,75/12,5		Data: setembro / 2009	
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida média (g)	Porcentagem simples retida média	Porcentagem retida média acumulada
19 (# ¾")	0,0	0,0	0,0
12,5 (# ½")	0,0	0,0	0,0
9,5 (# 3/8")	988,8	9,9	9,9
6,3 (# 1/4")	4110,0	41,1	51,0
4,8 (# 4)	2641,2	26,4	77,4
2,4 (# 8)	1869,9	18,7	96,1
1,2 (# 16)	230,3	2,3	98,4
0,6 (# 30)	89,7	0,9	99,3
0,3 (# 50)	0,0	0,0	99,3
0,15 (# 100)	70,1	0,7	100,0
Fundo	0,0	0,0	100,0
Total	10.000,00	100,00	100,0
MÓDULO DE FINURA - NM 248 (ABNT, 2001)			5,80
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) - NM 248			12,5
MASSA UNITÁRIA (kg/dm <sup>3</sup> ) – NM 45 (ABNT, 2006)			1,44
MASSA ESPECÍFICA (kg/dm <sup>3</sup> ) – NM 53 (ABNT, 2009)			2,64
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) – NM 30 (ABNT, 2000)			0,92
TEOR DE ARGILA EM TORRÕES (%) – NBR 7218 (ABNT,			0,28
MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA # 200 POR LAVAGEM (%) – NM 46 (ABNT, 2001)			0,66

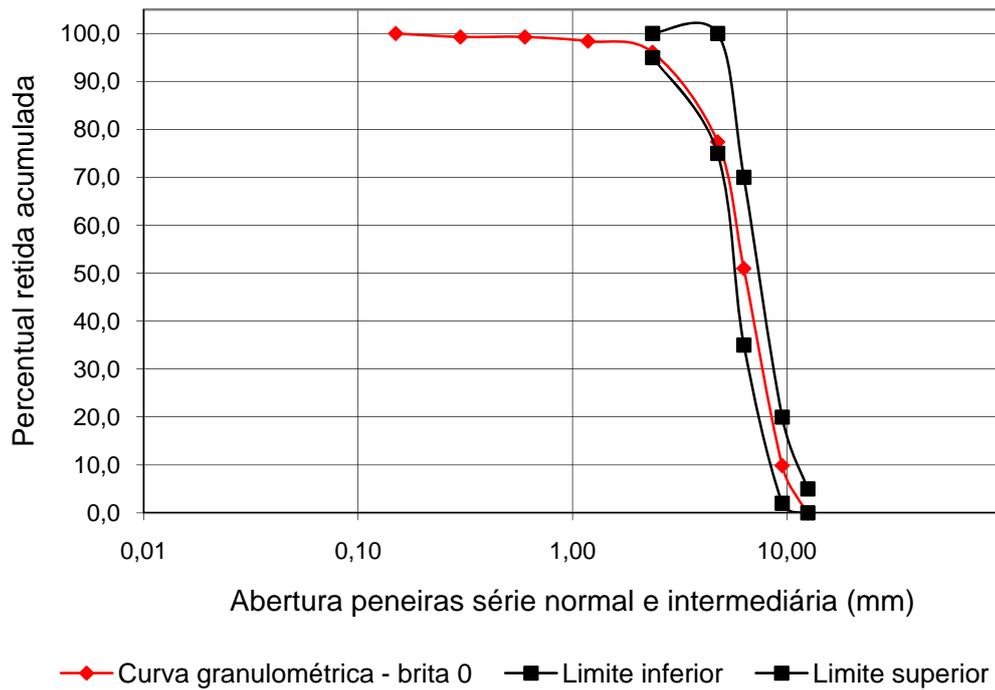


Figura 4.5 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 4,75/12,5.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 9,5/25.

Composição granulométrica do agregado graúdo		Método: NM 248 (ABNT, 2001)	
Material: brita 9,5/25		Data: setembro / 2009	
Abertura das peneiras (mm)	Massa retida média (g)	Porcentagem simples retida média	Porcentagem retida média acumulada
19 (# ¾")	0,0	0,0	0,0
12,5 (# ½")	6650,0	66,5	66,5
9,5 (# 3/8")	2809,9	28,1	94,5
6,3 (# 1/4")	540,1	5,4	100,0
4,8 (# 4)	0,0	0,0	100,0
2,4 (# 8)	0,0	0,0	100,0
1,2 (# 16)	0,0	0,0	100,0
0,6 (# 30)	0,0	0,0	100,0
0,3 (# 50)	0,0	0,0	100,0
0,15 (# 100)	0,0	0,0	100,0
Fundo	0,0	0,0	100,0
Total	10.000,00	100,00	100,0

MÓDULO DE FINURA - NM 248 (ABNT, 2001)	6,95
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) - NM 248 (ABNT, 2001)	19,0
MASSA UNITÁRIA (kg/dm³) – NM 45 (ABNT, 2006)	1,49
MASSA ESPECÍFICA (kg/dm³) – NM 53 (ABNT, 2009)	2,63
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) – NM 30 (ABNT, 2000)	0,85
TEOR DE ARGILA EM TORRÕES (%) – NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,29
MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA # 200 POR LAVAGEM (%) – NM 46 (ABNT, 2001)	0,50

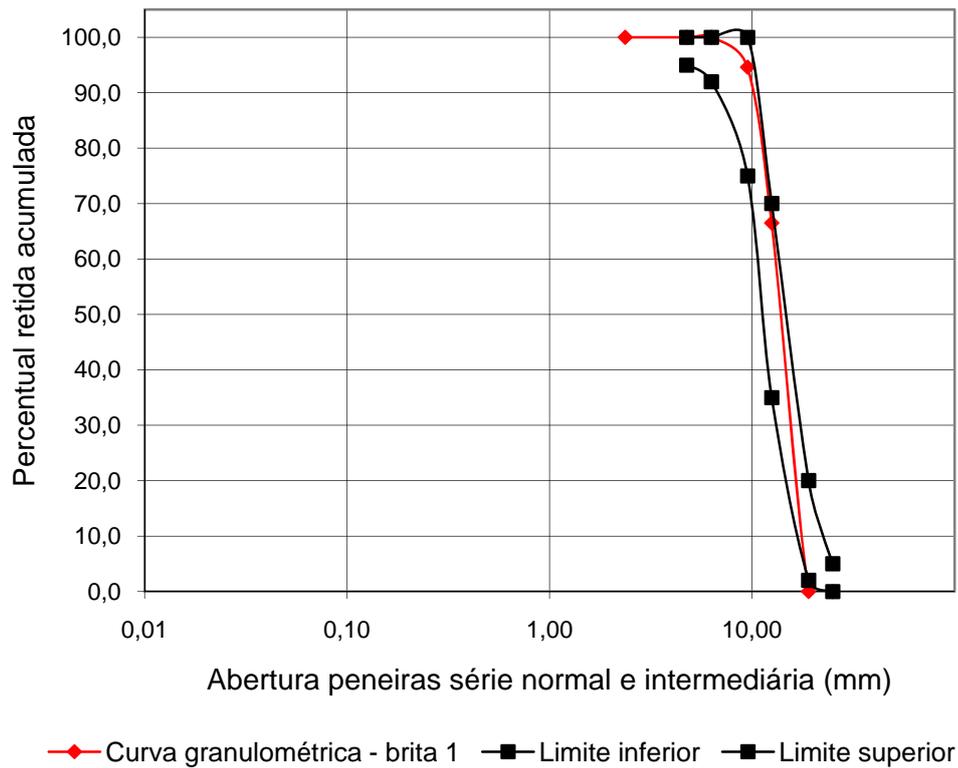


Figura 4.6 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo – brita correspondente à zona granulométrica (d/D) 9,5/25.

#### 4.3.5 Aditivo Plastificante

Em todas as composições de concreto, utilizou-se o aditivo Basf Mastermix 390 RB (aditivo plastificante retardador de pega), comercialmente disponível em solução aquosa. Este aditivo apresenta base química em cadeia de lignossulfonato e foi adicionado às misturas na mesma proporção daquela utilizada na produção comercial dos traços de concreto. Cabe salientar que este aditivo atua unicamente pelo mecanismo da repulsão eletrostática, aumentando a carga negativa da superfície das partículas de cimento, dispersando-as por repulsão elétrica. Os ensaios para caracterização do aditivo plastificante encontram-se apresentados na Tabela 4.8, e foram fornecidos pelo fabricante do aditivo.

Tabela 4.8 – Características do aditivo plastificante Basf Mastermix 390 RB.

Propriedades	Valor do lote
Base química	Lignossulfonato
Cor	Preta
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,18 ± 0,04
pH	7 ± 2
Teor de sólidos (%)	39 ± 4
Cloretos (%)	Isento

### 4.3.6 Água

A água utilizada nos concretos foi proveniente da rede pública de abastecimento.

## 4.4 PROCEDIMENTOS DE MISTURA E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO FRESCO

A mistura dos concretos foi realizada em betoneira basculante de eixo inclinado, com capacidade nominal para 480 litros. A seqüência de colocação dos materiais constituintes na betoneira foi realizada de modo a minimizar a perda de abatimento e o tempo de mistura foi adotado para maximizar a eficiência de mistura do equipamento. Ao fim do processo, os concretos produzidos apresentavam-se homogêneos, de forma que as partículas dos agregados foram satisfatoriamente revestidas com pasta de cimento. A mistura dos concretos foi realizada numa sala com temperaturas registradas de  $T = 26^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Imediatamente após o processo de mistura dos concretos, foram realizados os ensaios para caracterização do concreto fresco. A consistência dos concretos produzidos foi determinada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme prescrições da NM 67 (ABNT, 1996). O ensaio de determinação do teor de ar foi realizado conforme especificado pela NM 47 (ABNT, 2002). Os resultados destes ensaios serão apresentados no Capítulo 5.

## 4.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 4.5.1 Determinação do patamar de percolação através da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico

O ensaio para determinação do patamar de percolação foi realizado conforme proposto por Silva (2007), utilizando prescrições da NM 58 (ABNT, 1996), incluindo modificações, dentro do projeto P&D, desenvolvido em parceria com o Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S/A. NBR 8802 (ABNT, 1994), com o uso de um aparelho medidor do tempo de propagação de pulso ultra-sônico portátil, com visor digital, marca *Proceq*, com 2 transdutores de 54 kHz de frequência. Nesta pesquisa foram utilizados corpos-de-prova prismáticos com dimensão longitudinal de 300 mm e dimensão transversal de 150 mm. Estas dimensões de corpo-de-prova foram adotadas por Silva (2007-a) e estão de acordo com as

prescrições da NDT 1 (RILEM, 1972) e da NM 58 (ABNT, 1996).

Os procedimentos de ensaio se iniciaram pelo acoplamento dos transdutores previamente aferidos em furos de 50 mm de diâmetro executados nas faces transversais opostas do molde retangular, conforme mostrado na Figura 4.7. Desta forma, os transdutores foram instalados de forma a facear a fôrma internamente, proporcionando um arranjo de transmissão direta. Cabe salientar a necessidade de aplicação de uma camada fina de gel de silicone nas faces dos transdutores, anteriormente à montagem do aparato, a fim de garantir um contato contínuo entre as superfícies dos transdutores e o concreto.

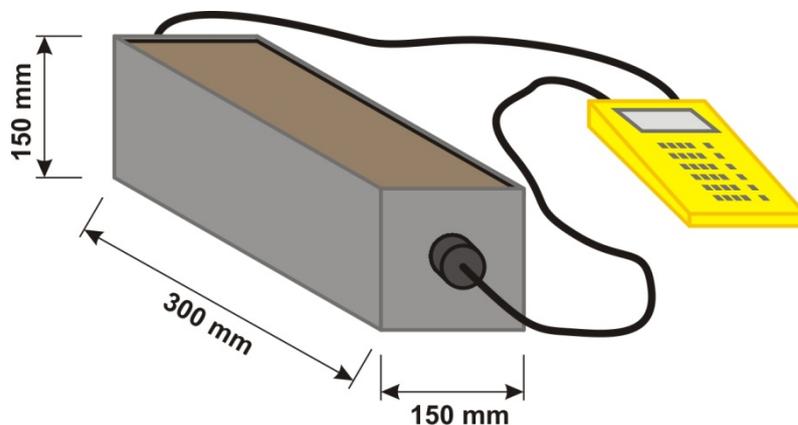


Figura 4.7 – Esquema do ensaio de determinação do patamar de percolação através da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico.

Após a mistura dos concretos, foi realizada a moldagem do corpo-de-prova prismático, seguindo-se o adensamento manual com uso da haste do cone de *Abrams*, conforme constante da NM 67 (ABNT, 1996), em três camadas de 30 golpes cada. Nesta etapa, procedeu-se o adensamento manual na intenção de resguardar a montagem inicial do aparato, de forma que os transdutores não perdessem o contato com o concreto durante o adensamento. Após a moldagem, o conjunto foi coberto com várias camadas de filme plástico, para impedir a saída de umidade do concreto.

Após a moldagem do corpo-de-prova, iniciaram-se as leituras periódicas do tempo de propagação da onda longitudinal. Inicialmente, as leituras foram realizadas de hora em hora. Adiante, à medida que o tempo de propagação de onda iniciou certo aumento, os intervalos entre leituras foram reduzidos, sendo realizados de 10 em 10 minutos. Finalmente, o patamar de percolação foi assumido como o tempo decorrido entre a mistura do cimento e da água e o

momento no qual ocorreu um aumento brusco na velocidade de propagação da onda ultra-sônica. Os procedimentos adotados para a realização do ensaio e o aparelho utilizado para medida da velocidade ultra-sônica podem ser visualizados na Figura 4.8. Uma vez que o patamar de percolação é dependente da temperatura do sistema cimentício, os ensaios foram realizados numa sala com temperaturas registradas no intervalo de  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

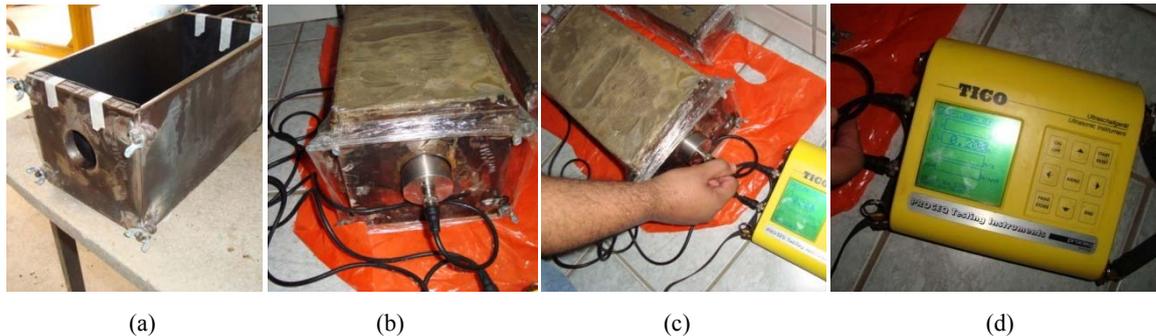


Figura 4.8 – Procedimento para determinação do patamar de percolação através da velocidade de propagação da onda ultra-sônica: (a) preparação do molde metálico; (b) vista dos transdutores acoplados ao corpo-de-prova; (c) realização de leituras; (d) vista do aparelho utilizado para realização do ensaio.

#### 4.5.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A distribuição e tamanho dos poros para as amostras desta pesquisa foram obtidos através do método de intrusão por mercúrio, utilizando o equipamento *Poromaster 33* (*Mercury Porosimeter/Quantachrome Corporation*) do Laboratório de Materiais de Construção Civil e Cerâmica da Unisinos, no Rio Grande do Sul. Para o cálculo do diâmetro dos poros, assumiu-se que os poros têm formato cilíndrico, tensão superficial do mercúrio igual a  $0,480 \text{ N/mm}^2$ , densidade do mercúrio igual a  $13,54 \text{ g/cm}^3$ , e ângulo de contato entre o mercúrio e o sólido igual a  $140^{\circ}$ .

Neste pesquisa, foram utilizadas duas amostras retiradas de corpos-de-prova de concreto, incluindo os agregados graúdos porventura presentes, para cada determinação prevista no planejamento experimental. Para obtenção das amostras, inicialmente foram moldados corpos-de-prova prismáticos de concreto nas dimensões de  $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$ . Nas datas especificadas, foi realizado o corte das amostras em cubos com arestas de aproximadamente  $1,5 \text{ cm}$ . Logo após o corte, estes cubos foram mergulhados em álcool P.A. (pró-análise) durante 12 horas e, após saturação, os cubos foram submetidos à temperatura de

60°C, em estufa, durante o tempo necessário para atingir constância de massa, na intenção de paralisar o processo de hidratação do concreto. Esse patamar de temperatura foi adotado a fim de minimizar o desenvolvimento de fissuras na microestrutura do material, em consequência de secagem em temperaturas mais elevadas. Devido às pequenas dimensões dos cubos de concreto, o prazo necessário para atingir a constância de massa foi sempre inferior a 36 horas. Após o período em estufa, os cubos de concreto foram mantidos em um dessecador na presença de sílica-gel (agente desumidificador).

As amostras foram enviadas ao Laboratório de Materiais de Construção Civil e Cerâmica da Unisinos, onde se seguiram outros procedimentos de preparação. Nestes procedimentos, foi realizado corte dos cubos com uso de uma serra de precisão refrigerada com álcool, mostrada na Figura 4.9 (a), para que os corpos-de-prova atingissem dimensão suficiente para caberem em um recipiente cilíndrico com 30 mm de altura e 10 mm de diâmetro. Em geral, utiliza-se três ou quatro pequenos "palitos" com cerca de 3 mm de espessura para uma determinação, conforme mostrado na Figura 4.9 (b). Finalmente, após o corte final, as amostras foram novamente secas em estufa e mantidas em dessecador na presença de sílica-gel, conforme mostrado na Figura 4.9 (c).

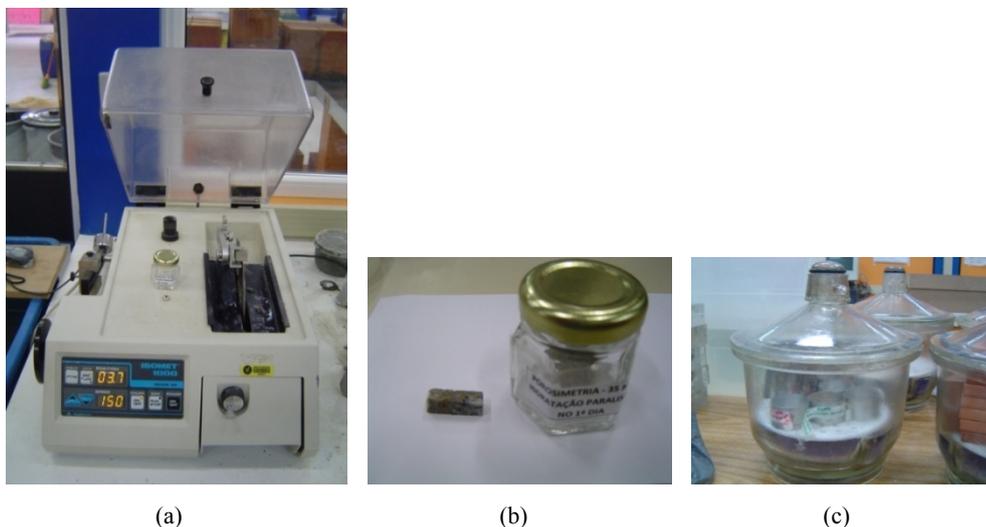


Figura 4.9 – Preparação das amostras do ensaio de porosimetria: (a) vista da serra de precisão refrigerada com álcool; (b) vista do “palito” após corte; (c) dessecador com sílica-gel.

A partir dos dados experimentais de porosimetria de mercúrio, foram determinados alguns parâmetros importantes na caracterização de meios porosos tais como: distribuição de tamanhos de poros, volume total de poros, área superficial total e diâmetro médio dos poros, conforme será discutido oportunamente no Capítulo 5.

#### **4.5.3 Absorção de água**

A absorção de água pelo concreto é um fenômeno motivado por tensões capilares, que ocorre imediatamente após o contato superficial do líquido com o substrato. Nesta pesquisa, a absorção de água por imersão foi determinada após a saturação dos corpos-de-prova, seguida de secagem em estufa, até constância de massa, conforme prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2005). Os resultados dos ensaios realizados e a análise pertinente serão apresentados no Capítulo 5.

#### **4.5.4 Determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto**

A determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos estudados foi realizada nas idades de 3, 7 e 28 dias, sendo que para a resistência à compressão foram utilizados corpos-de-prova com dimensões de 100 mm x 200 mm e para o módulo de elasticidade foram utilizados corpos-de-prova de 150 mm x 300 mm.

Os procedimentos de moldagem e cura foram realizados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003). Os corpos-de-prova foram adensados com vibrador de imersão, em duas camadas, durante um minuto cada. Após a moldagem, vibração e alisamento dos topos, os corpos-de-prova foram colocados numa superfície nivelada e envolvidos por sacos plásticos fechados, a fim de minimizar a perda de água pela superfície exposta do concreto. Decorridas 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e imersos em água com cal até completarem três dias de idade, período ao fim do qual os corpos-de-prova foram mantidos em condições de exposição ao ambiente de laboratório ( $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ;  $\text{UR} = 50\% \pm 4\%$ ), até à idade de ensaio. Na data designada para realização do ensaio, os corpos-de-prova foram capeados com uma mistura à base de enxofre líquido, sendo destinados, primeiramente, à determinação da resistência à compressão e, em seguida, com base na tensão média de ruptura obtida, foram realizados os ensaios de determinação do módulo de elasticidade. Para resistência à compressão foram previstos 2 corpos-de-prova por idade, para cada concreto fabricado, enquanto que para o módulo de elasticidade foram moldados 3 corpos-de-prova por idade de ensaio.

Os corpos-de-prova destinados à determinação da resistência à compressão foram rompidos em prensa hidráulica de carga contínua, conforme NM ISO 7500-1 (ABNT, 2004). A

velocidade de carregamento foi de 0,5 MPa/s, dentro do intervalo especificado pela NBR 5739 (ABNT, 2007). Para determinação da resistência à compressão de cada um dos traços em estudo, foi realizado o cálculo da média entre os resultados dos dois corpos-de-prova ensaiados, bem como do desvio-padrão da média em relação a cada amostra. Esses valores médios foram adotados para determinar a carga a ser aplicada nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade e da aplicação de carregamento dos ensaios de deformação sob manutenção de carga.

Para determinação do módulo de elasticidade, tanto a velocidade da máquina como o tempo de ensaio foram os mesmos adotados para o ensaio de determinação da resistência à compressão, registrando-se simultaneamente as cargas e as deformações lidas através do mostrador digital de um comparador mecânico do tipo compressômetro-expansômetro. O módulo de elasticidade foi determinado e calculado conforme prescrito pela Metodologia A da NBR 8522 (ABNT, 2008), sendo equivalente ao módulo de deformação secante entre  $\sigma_a$  (0,5 MPa) e 30% da tensão de ruptura.

#### **4.5.5 Determinação das variações unidimensionais livres no concreto**

Neste item apresentam-se as metodologias de ensaio adotadas para determinação das variações unidimensionais livres no concreto com ou sem aplicação externa de carregamento. Neste contexto estão inseridas as retrações e a fluência. Cabe salientar que, embora cada um dos fenômenos tenha uma conceituação particular, durante os ensaios pode ocorrer seu desenvolvimento simultâneo, de forma que o objetivo desta pesquisa se distingue pela mensuração do efeito total dos fenômenos (com ou sem aplicação de carregamento) e pela análise comportamental obtida pela avaliação dos resultados.

##### **4.5.5.1 Retração endógena e retração total**

Nesta pesquisa, foi realizada a mensuração da retração total incidente no sistema selado e no sistema não-selado. No primeiro caso, a retração obtida nas leituras foi denominada *retração endógena* e inclui os efeitos das retrações autógena e térmica. No caso do sistema não-selado, a retração obtida foi denominada *retração total* e inclui os efeitos das retrações autógena, térmica e por secagem.

Quanto à retração térmica, cabe ressaltar que Silva (2007) realizou sua determinação em prismas de dimensões idênticas às utilizadas nesta pesquisa, para concretos com consumo de cimento de  $450 \text{ kg/m}^3$  e relação água/aglomerante igual a 0,3, obtendo resultados da ordem de  $4 \times 10^{-6}$ , sendo considerada desprezível. Assim, pelas condições aplicadas aos ensaios para leitura da retração no programa experimental (corpos-de-prova de pequenas dimensões e temperaturas registradas da sala de ensaio dentro das condições isotérmicas estipuladas) considerou-se que mesmo os concretos de menor relação água/cimento estudados pela pesquisa desenvolveram baixos gradientes de temperatura. Desta forma, para análise comportamental, estima-se que a maior parcela de deformação endógena registrada se deveu à retração autógena, enquanto que nos corpos-de-prova não selados, tanto a retração autógena, gerada pelo mecanismo da autodessecação, como a retração por secagem devem ter contribuído para as deformações desenvolvidas.

O ensaio para determinação das retrações endógena e total foi realizado em corpos-de-prova prismáticos de dimensões iguais a  $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$ . Para cada uma das composições de concreto, foram moldados três corpos-de-prova prismáticos provenientes de uma mesma betonada, para determinação da retração endógena e outros três corpos-de-prova para determinação da retração total. Os concretos foram produzidos numa sala com temperaturas registradas no intervalo de  $26^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

Os procedimentos de preparação dos moldes metálicos e moldagem dos corpos-de-prova para realização das leituras de retração endógena e total seguiram os seguintes procedimentos:

- primeiramente, os moldes metálicos tiveram suas laterais e fundo forradas com poliestireno (de espessura igual a 3 mm), com o propósito de não restringir as variações volumétricas durante o período no qual as leituras foram realizadas sem a desforma dos prismas;
- nesta etapa, os pinos metálicos que possibilitam a leitura das variações unidirecionais foram fixados nos orifícios presentes nas laterais dos moldes metálicos, conforme mostrado na Figura 4.10 (a) e (b);
- a seguir, mediu-se a distância interna entre os pinos metálicos através de um paquímetro digital, e esta leitura foi anotada como referência para o cálculo das deformações.

A moldagem foi realizada em duas camadas, conforme mostrado na Figura 4.10 (c), com adensamento em mesa vibratória durante 30 segundos.

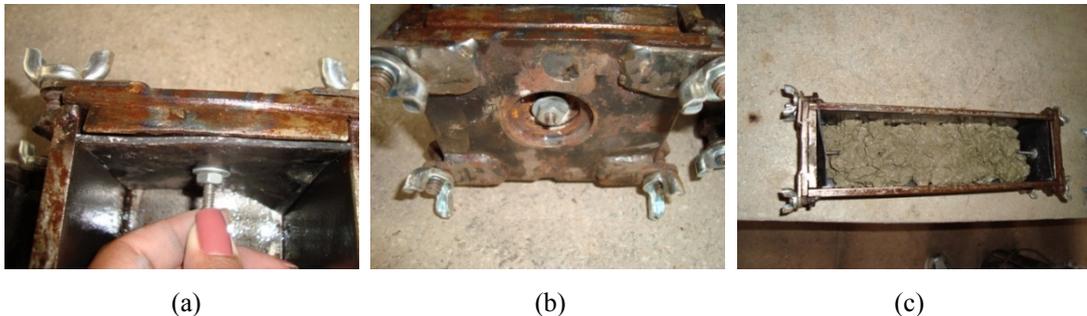


Figura 4.10 – Procedimentos de preparação de molde metálico com fixação do pino metálico de referência para medidas (a); vista do aparato montado (b) e moldagem do corpo-de-prova (c).

Concluído o preenchimento dos moldes, realizou-se dois procedimentos diferenciados:

- para medidas de retração endógena, procedeu-se o envolvimento do conjunto com várias camadas de filme plástico, nas duas direções, com a finalidade de impedir a perda de água para o meio externo e resguardar a selagem do sistema, conforme mostrado na Figura 4.11;
- para medidas de retração total, não foi realizado qualquer revestimento do conjunto.



Figura 4.11 – Procedimentos de preparação dos corpos-de-prova com o envolvimento do conjunto com filme plástico, imediatamente após a moldagem.

Ademais, realizou-se a determinação da massa dos conjuntos destinados às medidas de retração endógena e total, numa balança digital, com capacidade para 20,0kg e precisão de 0,1g, a fim de subsidiar o cálculo da variação de massa durante o período no qual as medidas de retração se realizaram sem a desforma dos corpos-de-prova.

*a. Determinação das variações de comprimento antes da desforma*

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram levados para uma sala de ensaio (com temperaturas registradas no intervalo de  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , e umidade relativa de  $50\% \pm 4\%$ ), e colocados sobre uma placa metálica, apoiada em suportes de borracha, para evitar que vibrações alterassem as leituras dos comparadores acoplados.

A determinação das variações de comprimento antes da desforma foram realizadas conforme metodologia do Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete (JCI, 1998), com modificações propostas por Silva (2007). No instante correspondente ao tempo de pega, caracterizado pela determinação do patamar de percolação pelo método da velocidade da onda ultra-sônica, foram retiradas as porcas externas que servem como guia e fixação dos pinos metálicos. A seguir, foram posicionados relógios comparadores fixados em bases magnéticas nos pinos dispostos nas duas laterais dos moldes, conforme mostrado no esquema da Figura 4.12 e nas fotografias expostas na Figura 4.13. Os moldes permaneceram nesta posição durante aproximadamente 16 dias, procedendo-se a realização de leituras das respectivas variações de comprimento.

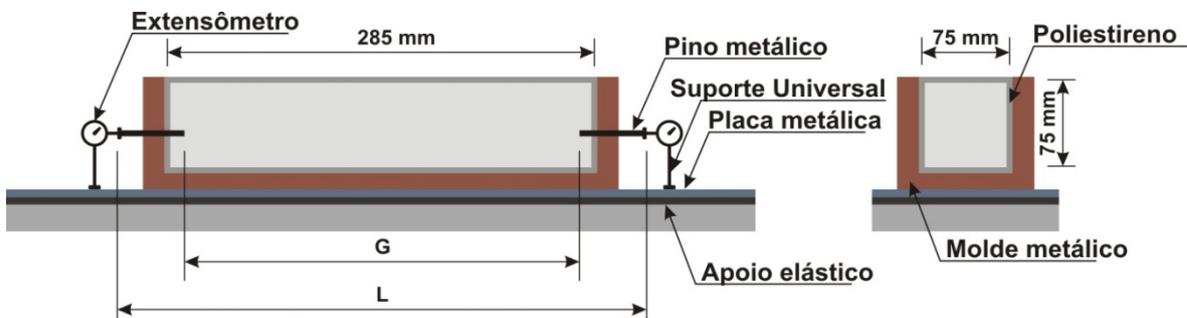


Figura 4.12 – Esquema do aparato para determinação da variação relativa de comprimento anteriormente à desmoldagem (adaptado de SILVA, 2007-a).

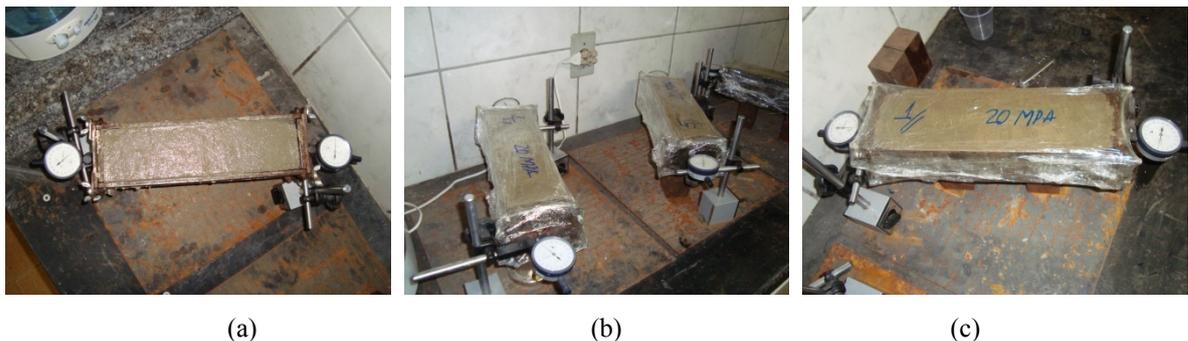


Figura 4.13 – Realização de medidas de retração total (a) e retração endógena (b) e (c) anteriormente à desmoldagem dos prismas.

A medida das deformações devidas à retração endógena (corpos-de-prova selados) e à retração total (corpos-de-prova não selados) foi calculada de acordo com a Equação 4.1, baseada na leitura inicial, nas leituras sucessivas e na medida da distância entre os pinos, denominada leitura de referência.

Vale salientar, conforme mostrado no esquema da Figura 4.12, que “L” é a distância inicial entre as extremidades externas dos pinos metálicos e “G” é a distância inicial entre as extremidades internas dos pinos metálicos, antes da moldagem, constituindo um comprimento de referência para o cálculo da deformação unidimensional livre. Desta forma, o resultado da operação “L-G” é o comprimento indeformável não considerado no cálculo da deformação.

$$\varepsilon = \frac{(L_{ia}-L_{0a})+(L_{ib}-L_{0b})}{G} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

$\varepsilon$  é a deformação específica unidirecional, antes da desforma, devida à retração endógena para corpos-de-prova selados ou devida à retração total para corpos-de-prova não selados;

$L_{0a}$ ,  $L_{0b}$  são as leituras iniciais dos extensômetros horizontais, no patamar de percolação, nas laterais opostas dos moldes metálicos, denominadas como  $a$  e  $b$ ;

$L_{ia}$ ,  $L_{ib}$  são as leituras dos extensômetros horizontais, no tempo  $i$ , nas laterais opostas dos prismas de concreto, denominadas como  $a$  e  $b$ ;

$G$  é o comprimento de referência para cálculo da deformação unidirecional, conforme mostrado na Figura 4.12.

#### *b. Determinação das variações de comprimento após a desforma*

Anteriormente à desmoldagem, os conjuntos (corpo-de-prova + molde metálico) foram pesados e foi realizada a comparação entre esta massa e aquelas registradas imediatamente após a moldagem dos corpos-de-prova, para verificação da variação relativa de massa de água. Após a desmoldagem, os corpos-de-prova destinados às medidas de retração endógena foram envolvidos, primeiramente com papel filme e, em seguida, com papel alumínio adesivo (Fita 3 M aderente), conforme mostrado na Figura 4.14. Nos corpos-de-prova destinados às medidas de retração total, não foi aplicado qualquer revestimento aos corpos-de-prova.



Figura 4.14 – Revestimento dos corpos-de-prova destinados às medidas de retração endógena.

Concluída a desmoldagem (após a selagem dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de retração endógena), os prismas de concreto foram submetidos a nova determinação da massa, numa balança digital, com capacidade para 5,0 kg e precisão de 0,01g. A partir deste ponto, os corpos-de-prova foram pesados regularmente, a fim de se averiguar a variação de massa. A exemplo do procedimento adotado antes da desforma, os prismas de concreto foram mantidos numa sala de ensaios com temperaturas registradas no intervalo entre  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50\% \pm 4\%$ .

Iniciaram-se os procedimentos de leitura do comprimento dos corpos-de-prova conforme prescrições da ASTM C 490 (ASTM, 2009), medindo-se manualmente a variação de comprimento dos prismas, numa base metálica dotada de um comparador digital com precisão de milésimo de milímetro, colocando os prismas na posição vertical, conforme mostrado no esquema da Figura 4.15 e nas fotografias da Figura 4.16.

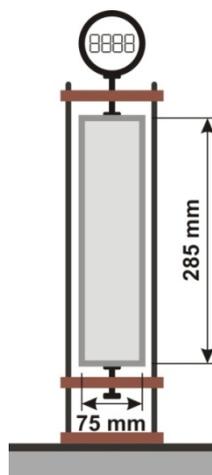


Figura 4.15 – Esquema do aparato para determinação da variação relativa de comprimento após a desmoldagem, adaptado da ASTM C 490 (ASTM, 2009) e de Silva (2007).



(a)

(b)

(c)

Figura 4.16 – Determinação da variação relativa de comprimento após a desmoldagem: (a) barra metálica utilizada para aferição da base de medida; (b) determinação da retração endógena em corpo-de-prova selado; (c) determinação da retração total em corpo-de-prova não selado.

Nesta etapa, o cálculo das deformações específicas foi realizado segundo a Equação 4.2.

$$\varepsilon = \frac{(L_{ic} - L_{0c})}{G} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

$\varepsilon$  é a deformação unidirecional, após a desforma, devida à retração endógena para corpos-de-prova selados ou devida à retração total para corpos-de-prova não selados;

$L_{0c}$  é a leitura inicial do comparador digital acoplado à base de medida, após a desforma;

$L_{ic}$  é a leitura do comparador digital, no tempo  $i$ ;

$G$  é o comprimento de referência para cálculo da deformação unidirecional, conforme mostrado na Figura 4.12.

Cabe salientar que, nesta fase, as leituras precisam de uma amostragem maior devido aos ajustes do encaixe do pino metálico na base de medida de deformação, o que não ocorre quando o corpo-de-prova está na posição horizontal. Desta forma, a leitura inicial (leitura referência) no extensômetro acoplado à base de medida ( $L_{0c}$ ), correspondeu à leitura média obtida numa amostragem de aproximadamente 10 leituras.

A seguir, cada ponto da curva de retração *versus* idade correspondeu ao valor que melhor representasse a tendência da curva, numa amostragem de 6 leituras por corpo-de-prova, em

cada idade. Esse procedimento foi baseado na metodologia desenvolvida por Silva (2007-a), uma vez que para determinação da variação de comprimento dos corpos-de-prova na posição vertical, um ou outro ponto da curva podem se afastar substancialmente da tendência. Segundo Silva (2007-a), a frequência de realização das leituras deve ser grande o suficiente para garantir maior precisão da análise do comportamento da função de retração ao longo do tempo. Assim, após as determinações de massa e comprimento iniciais, procedeu-se às determinações periódicas da variação de comprimento, até aproximadamente 80 dias de idade.

#### 4.5.5.2 Retração por secagem

O ensaio de retração por secagem objetiva verificar as deformações desenvolvidas no concreto pela remoção da água presente na microestrutura do concreto para o meio externo, pela exposição do concreto à umidade e temperatura do ambiente de laboratório. O ensaio é normalizado pela ASTM C 157 (ASTM, 2004), tendo sido realizado em três amostras prismáticas de dimensões 75 mm x 75 mm x 285 mm para cada concreto em estudo, moldadas conforme descrito no Item 4.4.5.1 e preparadas conforme os procedimentos descritos a seguir:

- após a moldagem dos corpos-de-prova, seguiu-se o envolvimento do conjunto com várias camadas de filme plástico, nas duas direções, com a finalidade de impedir a perda de água para o meio externo e resguardar a selagem do sistema;
- os corpos-de-prova permaneceram em ambiente com temperaturas registradas no intervalo entre  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50\% \pm 4\%$  durante 24 horas após a mistura;
- após este período, procedeu-se a retirada do filme plástico, desmoldagem e imersão dos prismas em água saturada com cal. Passados 30 minutos, os prismas foram retirados da imersão, enxutos com um pano úmido, procedendo-se à leitura de referência no relógio comparador constante do esquema da Figura 4.15, para obtenção da leitura correspondente à deformação zero;
- em seguida, os prismas foram novamente imersos em água saturada de cal, permanecendo submersos durante 28 dias;

- decorrido o período especificado, executou-se nova leitura no relógio comparador, com a finalidade de apurar a variação de comprimento devida à soma das retrações autógena e térmica acumuladas durante o período de cura.
- após esta leitura, os corpos-de-prova foram armazenados ao ar, em sala de ensaios com temperaturas registradas no intervalo de  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidades relativas no intervalo de  $50\% \pm 2\%$ , com possibilidade de secagem nas 6 faces do prisma.
- para cada corpo-de-prova foram realizadas leituras no relógio comparador até a idade aproximada de 80 dias. O cálculo da retração foi realizado segundo a Equação 4.2.

Cabe salientar que, conforme prescrito pela ASTM C 157 (ASTM, 2004), neste ensaio o início da secagem dos corpos-de-prova se inicia após 28 dias, de forma que a retração obtida se deve tanto à secagem como ao prosseguimento da retração autógena. No entanto, estima-se que a contribuição da retração autógena seja desprezível, uma vez que grande parte das reações químicas de hidratação do cimento já se desenvolveram durante o período de cura submersa. Segundo Silva (2007-a) essa hipótese simplificadora é fundamentada no fato da retração autógena apresentar maior intensidade nas primeiras idades, diminuindo sua magnitude com o transcorrer do tempo. Assim, para fins de simplificação será utilizado o termo “retração por secagem” para designar os resultados apurados neste ensaio, embora exista a contribuição, ainda que mínima, da retração autógena.

Finalmente, cabe citar que o ensaio realizado não considera a influência das deformações de origem autógena e térmica ocorridas nas primeiras 24 horas, uma vez que a determinação das variações de comprimento somente se inicia após essa idade. Segundo Aïtcin (1998), se a deformação térmica pode ser desprezada em virtude do pequeno volume dos corpos-de-prova e das condições isotérmicas da sala de ensaio, estima-se que a retração autógena nesse período apresenta magnitude bastante expressiva.

Ademais, para um mesmo concreto, são diferentes os resultados de retração de um ensaio cuja secagem se iniciou no patamar de percolação, de outro cuja secagem se iniciou aos 28 dias. Desta forma, o ensaio de determinação da retração por secagem prescrito pela ASTM C 157 (ASTM, 2004) importa pela caracterização do concreto submetido a uma situação de cura ideal e, posteriormente, sujeito à incidência da secagem, permitindo a comparação dos

resultados entre outras pesquisas, pela normalização do procedimento.

#### 4.5.5.3 Fatores intervenientes

Durante a realização dos ensaios para determinação da retração endógena e da retração total, verificou-se a influência de alguns fatores intervenientes nas leituras do ensaio. Primeiramente, a ordem de grandeza envolvida é muito pequena e os relógios comparadores de deformação são bastante sensíveis, tanto a variações nos pinos inseridos nos corpos-de-prova como a vibrações na bancada de trabalho. Para tanto, a fixação dos relógios através de um suporte magnético e a colocação de apoios de borracha entre a bancada e a placa metálica garantem maior confiabilidade nos resultados.

A seguir, após a etapa de transição entre as leituras realizadas na horizontal (com o uso de relógios comparadores) para as leituras realizadas na vertical (através do acoplamento dos corpos-de-prova a uma base de medida), a realização de leituras na vertical demandava maior paciência na etapa de leitura, pela necessidade de retirar várias leituras através do giro do corpo-de-prova na base de medida, e realizar o cálculo da deformação através da média dos valores registrados.

O sistema de determinação da variação de comprimento do concreto realizada com os relógios na posição horizontal foi considerado mais estável do que aquele com as leituras feitas na posição vertical. Isso se deve ao fato do sistema de medição, na vertical, envolver o encaixe do pino do prisma ao aparelho comparador, cujo acoplamento não é perfeito, podendo conduzir a leituras diferentes a cada tentativa, além do problema do corte do pino mencionado. Para minimizar o efeito, foram realizadas no mínimo 6 leituras por corpo-de-prova, a cada determinação, adotando-se um valor, dentro do intervalo lido, que representasse a tendência da curva, conforme descrito por Silva (2007-a).

#### 4.5.5.4 Determinação da variação relativa de massa de água

A determinação da variação relativa de massa de água das amostras durante as leituras de retração foi realizada através da realização de pesagem simultânea às medidas de variação de comprimento. Exceto na etapa inicial, quando os corpos-de-prova destinados aos ensaios de retração endógena e total permaneceram nos moldes metálicos, realizou-se uma primeira

determinação da massa do conjunto e, anteriormente à desmoldagem, uma segunda determinação comparativa da massa do conjunto, para verificação da variação relativa de massa durante o período no qual as leituras de processaram sem a possibilidade de aferição diária da variação de massa de água.

Após a finalização das medidas de retração, os prismas de concreto foram submetidos à secagem em estufa durante 72 horas, na temperatura de 105°C, para retirada da água evaporável. Esse procedimento de secagem é comumente selecionado em função de sua rapidez e pela consideração de que, a 105°C, somente a água livre seria removida. No entanto, sabe-se que a desidratação (remoção da água não evaporável) dos produtos de hidratação do cimento se inicia a baixas temperaturas (GALLÉ, 2001).

O cálculo da variação relativa de massa de água foi realizado em relação à água evaporável do sistema, conforme mostrado na Equação 4.3. Nas Tabelas B-21 e B-22, constantes do Apêndice B, encontram-se os valores de perda de água durante as leituras de retração endógena e total, bem como os valores de água evaporável obtidos ao final dos ensaios. Sabe-se que a expressão adotada incorreu em certa porcentagem de erro, devido à água consumida no processo de hidratação do cimento (água química), que não deve ter sido retirada no processo de secagem. No entanto, a variação relativa de massa de água foi tomada em relação à quantidade de água evaporável para permitir uma melhor interpretação desta variação, sem considerar as demais fases e materiais presentes nos corpos-de-prova de concreto.

$$V_a = \frac{m_i - m_j}{m_i - m_f} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

$m_i$  é a massa inicial da amostra, antes do início da autodessecação ou da secagem;

$m_j$  é a massa da amostra, nas datas correspondentes às leituras de variação de comprimento, ao longo do tempo;

$m_f$  é a massa final da amostra, após a retirada da água evaporável.

#### 4.5.5.5 Variações dimensionais durante manutenção de carregamento

A determinação das variações dimensionais durante manutenção dos carregamentos de compressão foi realizada em quatro corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 150 mm x 300

mm, para cada composição de concreto em estudo e para cada idade de carregamento estipulada no programa experimental. Dentre os corpos-de-prova moldados, dois receberam revestimento, conforme prescrito pela NBR 8224 (ABNT, 1983), e os outros dois não foram revestidos, sendo expostos às condições de umidade e temperatura da sala de ensaios, durante a manutenção de carregamento.

Embora segundo prescrições da NBR 8224 (ABNT, 1983) fosse necessário moldar dois corpos-de-prova de controle, para medida da retração, esse procedimento não foi adotado pelo fato de que o objetivo da pesquisa se relacionou à determinação das deformações totais nos sistemas selado ou não selado, não interessando a separação das parcelas individuais devidas às diferentes naturezas de retração e/ou à separação das fluências básica e por secagem. Assim, para efeitos da análise dos valores de deformação apurados sob carregamento mantido constante nesta pesquisa, toda deformação registrada durante a aplicação e manutenção do carregamento ao longo do tempo, após descontar a parcela devida à deformação elástica imediata foi contabilizada como devida ao potencial de fluência.

As medidas de deformação foram obtidas utilizando-se extensômetros de resistência elétrica embutidos no interior da massa de concreto. Os procedimentos de preparação e desenvolvimento dos ensaios podem ser subdivididos em três etapas principais: (i) preparação e aplicação de concreto nos moldes; (ii) desmoldagem, revestimento (ou não) dos corpos de prova e aplicação de cura úmida pelo período de três dias; e (iii) aplicação de carregamento nas idades estabelecidas na metodologia experimental. Os procedimentos adotados nas três etapas encontram-se descritos no Apêndice A.

#### *a. Fases de carregamento e descarregamento dos corpos de prova*

Completado o período designado no programa experimental para aplicação de carregamento, os corpos-de-prova foram transferidos para o pórtico, para os ajustes necessários, conforme ilustrado na Figura 4.17 (a).

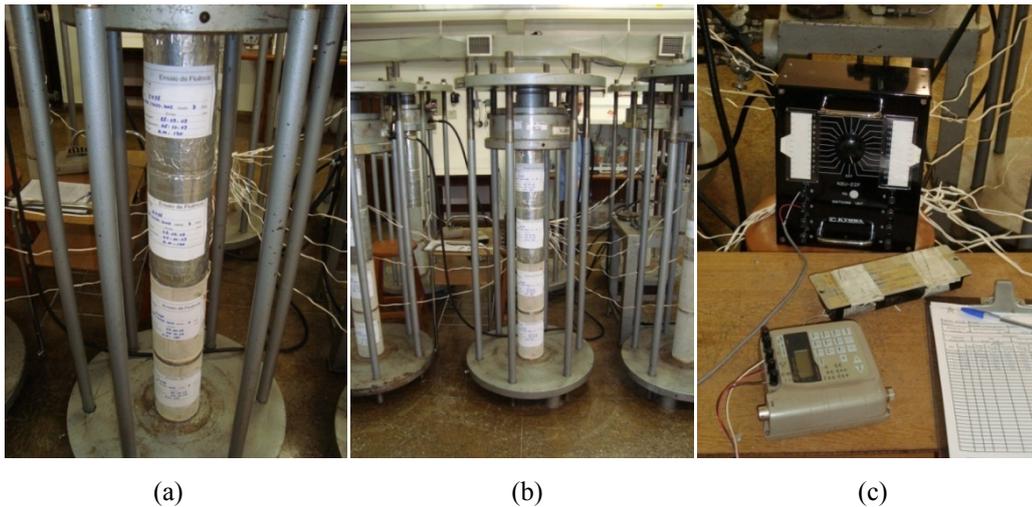


Figura 4.17 – Aparato para aplicação e manutenção de carregamento ao longo do tempo: (a) posicionamento do conjunto no pórtico; (b) vista ampla do sistema; (c) ponte de leitura de deformação.

Os corpos-de-prova foram alinhados e posicionados perpendicularmente ao sistema de carregamento, para minimizar a ocorrência de excentricidade na aplicação de carga. O adequado posicionamento do conjunto foi verificado com o auxílio de um nível colocado na placa superior do pórtico. O carregamento foi realizado utilizando-se uma bomba hidráulica manual conectada a uma linha de pressão, constituída por uma série de saídas de mangueiras. Cada mangueira está conectada a um atuador hidráulico, que impõe o carregamento ao conjunto. A pressão em cada pórtico é verificada constantemente por meio de um manômetro existente na saída do atuador. Uma visão mais ampla do sistema de manutenção de carregamento é mostrada na Figura 4.17 (b). Na Figura 4.17 (c) ilustra-se a conexão dos fios dos extensômetros à ponte de leitura de deformação.

Para aplicação e manutenção de carregamento aos corpos-de-prova, foram seguidas prescrições da NBR 8224 (ABNT, 1983), aplicando-se uma tensão da ordem de  $40\% \pm 2\%$  da tensão de ruptura dos concretos na idade do carregamento. Os valores de tensão aplicados encontram-se apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Valores de tensão aplicados durante os ensaios de determinação do potencial de fluência.

Concreto	Idade de Aplicação do Carregamento (dias)	Tensão Aplicada (MPa)
C <sub>1</sub>	3	5,40
	7	7,00
	28	9,50

Tabela 4.9 – Valores de tensão aplicados durante os ensaios de determinação do potencial de fluência. (Continuação).

Concreto	Idade de Aplicação do Carregamento (dias)	Tensão Aplicada (MPa)
C <sub>2</sub>	3	11,20
	7	14,60
	28	17,70
C <sub>3</sub>	3	11,35
	7	15,25
	28	23,45

Antes do carregamento definitivo foram realizados dois ciclos iniciais de carregamentos e descarregamentos nos corpos-de-prova, até atingir a carga estabelecida no ensaio. As leituras das deformações subsequentes foram realizadas: (i) 30 segundos após o carregamento (deformação imediata); (ii) 5, 10 e 30 minutos após o carregamento; (iii) 1, 2 e 5 horas após o carregamento e (iv) diariamente, até completar o período de ensaio.

Todos os passos mencionados anteriormente para realização dos ensaios foram aplicados tanto aos corpos-de-prova selados como aos corpos-de-prova não selados. Os ensaios foram finalizados após 30 dias de manutenção de carregamento. Ao final dos ensaios, foram plotados os gráficos de incremento de deformação específica ao longo do tempo de manutenção de carregamento, de forma a subsidiar a análise do potencial de fluência nas baixas idades para os concretos em estudo.

## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, inicialmente será apresentada a caracterização físico-mecânica dos concretos estudados. Esta caracterização foi realizada através da avaliação dos parâmetros individuais de mistura, ensaios de caracterização do concreto fresco, determinação do patamar de percolação, distribuição de poros, absorção e propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade). Em seguida, será realizada a apresentação dos resultados dos ensaios de determinação das deformações nas baixas idades dos concretos estudados, com e sem aplicação de carregamento, devido ao desenvolvimento da retração e da fluência, bem como a discussão dos comportamentos detectados e dos mecanismos de atuação referentes a cada fenômeno.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS CONCRETOS

#### 5.1.1 Análise dos parâmetros de mistura

Conforme citado anteriormente, os traços adotados nesta pesquisa são produzidos comercialmente por uma empresa especializada na produção de concreto. Assim, durante a metodologia experimental, foi realizado somente o ajuste da quantidade de água presente na mistura, visando: (i) proporcionar às misturas a consistência requerida às operações de bombeamento; e (ii) quantificar e descontar a água presente no agregado miúdo. Na Tabela 5.1 encontram-se os resultados dos ensaios de caracterização do concreto fresco, a saber, determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone e do teor de ar para as composições estudadas.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de caracterização do concreto fresco.

Concreto	Consistência pelo abatimento do tronco de cone (mm)	Teor de ar (%)
C <sub>1</sub>	105	2,2
C <sub>2</sub>	95	1,1
C <sub>3</sub>	100	1,3

Conforme mostrado na Tabela 5.1, os valores de abatimento se situaram dentro do intervalo estipulado pela pesquisa, de  $10 \pm 2$  cm. No que diz respeito ao teor de ar, os resultados variaram de 1,1% a 2,2%, e o conteúdo de ar apresentado pelas misturas não afetou

expressivamente os resultados de resistência à compressão, conforme poderá ser comprovado no Item 5.5.1.

Na Tabela 5.2 são mostrados os parâmetros de cada mistura de concreto, bem como os valores de relação água/cimento originais e corrigidos após a realização dos ajustes.

Tabela 5.2 – Parâmetros das misturas adotadas.

Parâmetros das misturas	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
Traço em massa	1:3,67:3,76	1:1,52:2,45	1:1,35:2,26
Relação a/c – Traço Corrigido	0,70	0,44	0,47
Relação a/(c+sa)	-	-	0,44
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	255	420	455
Teor de aditivo em massa (%)	0,85	0,90	0,82
Relação agregado/cimento (m)	7,43	3,97	3,62
Teor de Areia em relação a m (%)	49,30	38,30	37,30
Teor de Pasta Seca (%)	11,85	20,10	21,65
Teor de Argamassa Seca (%)	55,30	50,70	50,80
Relação Água/Materiais Secos – A (%)	8,30	8,90	9,50

A comparação entre os valores de relação água/cimento dos traços corrigidos demonstrou que, entre o concreto C<sub>1</sub> e as composições C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> houve grande diferença na relação água/cimento. Para C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, a análise da relação água/cimento resultou bastante próxima para as duas composições. Considerando a presença da sílica ativa na composição C<sub>3</sub>, a comparação entre a relação água/cimento de C<sub>2</sub> e a relação água/aglomerante de C<sub>3</sub> resultou em valores iguais para as duas composições. Desta forma, pela análise isolada dos valores apurados para as relações água/aglomerante após o ajuste da quantidade de água infere-se o desenvolvimento de microestruturas distintas nos concretos produzidos.

A comparação entre os consumos de cimento das composições demonstrou que o consumo de cimento/m<sup>3</sup> de concreto para a composição C<sub>1</sub> representou 61% e 56% do consumo/m<sup>3</sup> de concreto das composições C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente. Entre as composições C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, a diferença no consumo de cimento foi menor, da ordem de 7,7%. Desta forma, analisando somente este parâmetro, na composição C<sub>1</sub> existe menor quantidade de cimento ávido por reagir com a água, em comparação aos demais. A composição C<sub>3</sub> apresentou consumo de cimento suavemente superior ao consumo da composição C<sub>2</sub>, além da adição mineral. Presume-se que o uso da adição mineral, na proporção aproximada de 6,6% em relação à

massa de cimento, também ocasionou diferenças na microestrutura do material, em relação aos concretos obtidos sem o uso de adição mineral.

Em relação ao teor de argamassa das composições  $C_2$  e  $C_3$ , os traços de agregado miúdo e gráúdo entre uma e outra composição se compensaram de forma a atingir praticamente o mesmo teor de argamassa (da ordem de 50%). O concreto  $C_1$  apresentou teor de argamassa de 55,3%, ou seja, aproximadamente 10% superior ao teor dos concretos  $C_2$  e  $C_3$ . Neste caso, o teor de areia utilizado na composição  $C_1$  foi superior ao dos demais concretos, resultando no teor de argamassa citado. Nesta esteira, cabe salientar que, embora o concreto  $C_1$  apresentasse maior teor de argamassa, esta foi a mistura de mais difícil execução, demandando mais tempo nas operações de adensamento e acabamento dos corpos-de-prova. Estima-se que essa dificuldade de manuseio se deveu ao fato de que, no traço da composição  $C_1$ , não constava o agregado gráúdo de menor dimensão (brita 4,75/12,5). Assim, como este concreto recebeu somente uma dimensão de agregado gráúdo, o empacotamento foi prejudicado, não ocorrendo o preenchimento dos espaços pelos agregados de dimensão característica inferior, como aconteceu nas demais composições. Quanto ao teor de pasta seca, a composição  $C_3$  apresentou maior teor, enquanto que a mistura  $C_1$  apresentou o menor teor de pasta. Esta diferenciação pode ter contribuído para a maior dificuldade de manuseio desta última mistura. O concreto  $C_2$  apresentou comportamento intermediário às demais misturas.

### **5.1.2 Patamar de percolação**

A determinação experimental do patamar de percolação forneceu subsídio para estabelecer o momento a ser considerado como inicial para a determinação da retração nos prismas, referenciando o início das tensões induzidas pelas deformações, ou seja, o tempo a partir do qual o concreto desenvolveu uma estrutura rígida o suficiente para permitir a transferência de tensões de tração. Na Figura 5.1 apresentam-se as curvas de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico *versus* tempo decorrido desde o início da mistura (cimento e água), e na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados do ensaio para cada concreto em estudo.

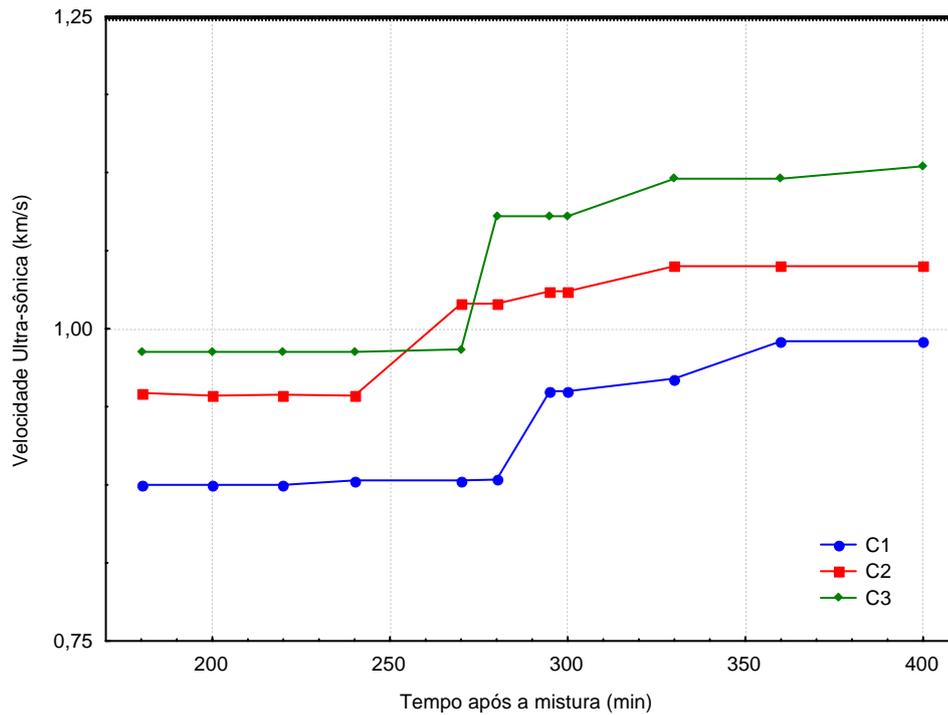


Figura 5.1 – Curvas de determinação do patamar de percolação pelo método da velocidade de pulso ultra-sônico para concretos em estudo C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente.

Tabela 5.3 – Resultados do tempo obtido para estabelecimento do patamar de percolação.

Concreto	Patamar de percolação (min)
C <sub>1</sub>	295
C <sub>2</sub>	270
C <sub>3</sub>	280

Nos concretos analisados, verificou-se que o menor tempo para alcançar o patamar de percolação foi obtido para o concreto C<sub>2</sub>, em detrimento do concreto C<sub>3</sub> (diferença de 10 minutos). No entanto, de forma geral, os resultados do ensaio foram próximos para os três concretos em estudo, denotando que as características do cimento foram mais influentes que outros parâmetros da mistura como o uso de sílica ativa (concreto C<sub>3</sub>), a alteração na relação água/cimento ou o consumo de cimento.

### 5.1.3 Determinação da absorção de água

Na Tabela 5.4 apresentam-se os resultados médios obtidos para absorção de água por imersão.

Tabela 5.4 – Resultados de absorção de água por imersão (ABNT, 2005).

Concreto	Absorção de água (%)
C <sub>1</sub>	6,7
C <sub>2</sub>	5,5
C <sub>3</sub>	5,1

Conforme evidenciado na Tabela 5.4, os resultados de absorção de água foram altos, para todas as composições estudadas. Para a composição C<sub>1</sub>, os resultados foram aproximadamente 22% e 31% superiores à absorção dos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>. Estes resultados provavelmente se deveram à maior relação água/cimento desta composição. Dentre as três composições, o concreto C<sub>3</sub> foi aquele que apresentou menor absorção. A comparação entre C<sub>3</sub> e C<sub>2</sub> denota variação de aproximadamente 7,8%. Considerando que as adições minerais no concreto reduzem sua porosidade (pelo refinamento dos poros), infere-se uma conseqüente redução da absorção capilar. Desta forma, a diferenciação nos valores de absorção para as composições C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, que apresentaram consumos de cimento e relação água/cimento próximas, pode estar associada ao uso de sílica ativa nesta última composição.

#### 5.1.4 Estrutura de poros do concreto por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Conforme descrito no Item 3.1, o desenvolvimento da retração está intimamente relacionado à evolução da distribuição de poros e do seu volume em sistemas cimentícios hidratados, o que ressalta a importância do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Nesta pesquisa, os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados com o intuito de avaliar a distribuição do tamanho dos poros dos concretos em estudo, com vistas à análise do desenvolvimento da retração.

##### 5.1.4.1 Comparação entre as estruturas de poros dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>

Os resultados dos ensaios comumente são apresentados de duas formas: (i) pelo volume de mercúrio acumulado *versus* diâmetro dos poros (quantidade total de mercúrio intrudido, por unidade de massa da amostra, a um determinado nível de pressão atingida durante o ensaio) representando a porosidade do material até o diâmetro de poro correspondente; e (ii) através do volume de mercúrio incremental *versus* diâmetro dos poros que indica, por meio do volume de mercúrio intrudido, a quantidade de poros de um determinado diâmetro. Nas

Figuras 5.2 e 5.3 encontram-se os resultados da evolução da porosidade acumulada e a distribuição de poros e na Tabela 5.5 apresentam-se as grandezas calculadas de acordo com os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , com 1 dia de idade. Dentre os parâmetros expostos na Tabela 5.5, cabe definir a grandeza *diâmetro crítico* como a menor dimensão de poro acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados de uma extremidade a outra da amostra, e o *diâmetro característico*, definido como o tamanho de poros onde se tem o valor máximo de volume intrudido.

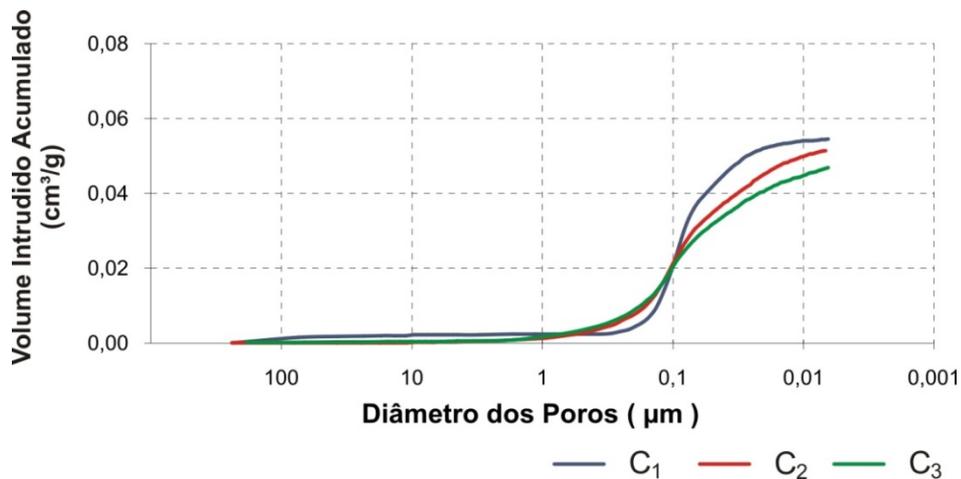


Figura 5.2 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , com início da paralisação das reações de hidratação com 1 dia de idade – volume intrudido acumulado *versus* diâmetro dos poros.

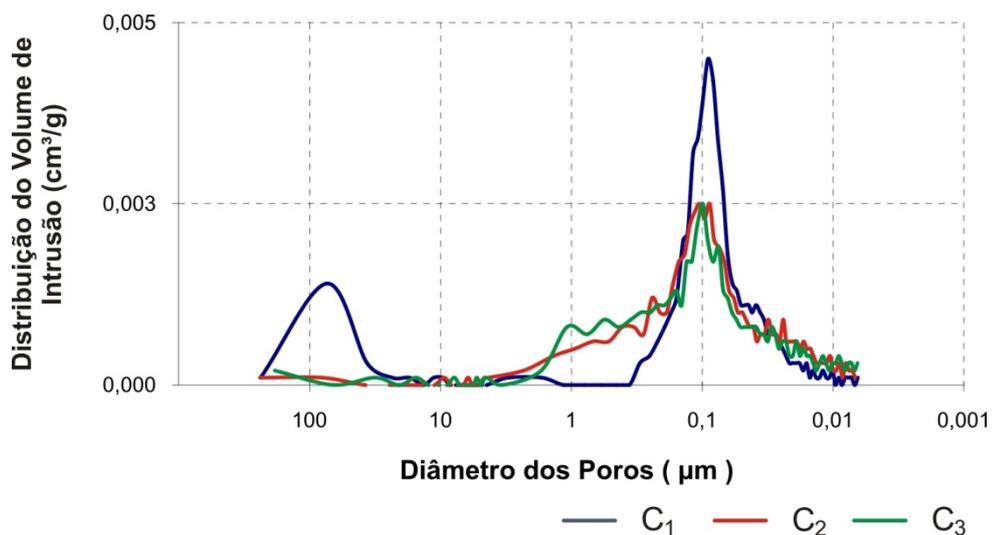


Figura 5.3 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , com início da paralisação das reações de hidratação com 1 dia de idade – distribuição do volume de intrusão *versus* diâmetro dos poros.

Tabela 5.5 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, para início da paralisação da hidratação a 1 dia de idade.

Grandezas	Composições		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
Diâmetro crítico (μm)	0,44	0,30	0,34
Diâmetro característico (μm)	0,094	0,094	0,10
Diâmetro médio (μm)	6,34	6,53	5,38
Área lateral de poros (cm <sup>2</sup> /g)	1,11	1,03	1,15
Volume intrudido (cm <sup>3</sup> /g)	0,054	0,051	0,047

A comparação dos resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, com 1 dia de idade possibilitou verificar os seguintes aspectos:

- o volume acumulado de poros de diâmetros superiores a 1 μm foi semelhante para os três concretos, embora C<sub>1</sub> tenha apresentado volume acumulado de poros nesta faixa ligeiramente superior aos demais;
- para diâmetros de poros entre 1 e 0,1 μm, o concreto C<sub>1</sub> apresentou volume acumulado ligeiramente inferior aos outros concretos, que continuaram com curvas praticamente sobrepostas. Esta região do gráfico pode estar associada às condições de realização do ensaio, uma vez que: (i) as pressões utilizadas durante o ensaio de porosimetria de mercúrio são de tal modo elevadas que a estrutura porosa pode ser danificada, principalmente nos casos em que a porosidade é muito grande ou se existir um número significativo de poros fechados; (ii) o resultado da investigação da estrutura pode ter incluído os reflexos do processo de secagem aplicado (tempo e temperatura de secagem), culminando pelo desenvolvimento de fissuras na microestrutura dos concretos e (iii) a análise de porosimetria foi realizada em amostras que continham a presença do agregado graúdo, o que pode ter representado uma variável interveniente nos resultados dos ensaios;
- abaixo do diâmetro de 0,1 μm, obteve-se maior volume de mercúrio acumulado para o concreto dosado com maior relação água/cimento. A redução de volume de poros de diâmetros inferiores a 0,1 μm do concreto C<sub>1</sub> para os concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> foi da ordem de 5,8% e 22,2%, respectivamente, a 1 dia de idade. Assim, na idade de 1 dia, maior relação água/aglomerante resultou em maior porosidade total, devido à diminuição da compacidade da matriz porosa e do maior distanciamento das partículas com o emprego de maior

quantidade de água. Além disso, no caso da composição  $C_1$ , o uso de agregado graúdo de uma única graduação pode ter ocasionado o desenvolvimento de maiores espessuras para a zona de transição deste concreto, além de maior porosidade interligada, em comparação aos demais concretos.

- para os concretos  $C_2$  e  $C_3$ , embora o volume de poros acumulados de diâmetros superiores a  $1\ \mu\text{m}$  tenha sido bastante semelhante, abaixo deste diâmetro as curvas obtidas se distanciaram, denotando redução no volume de mercúrio acumulado entre uma e outra curva de 15,5%. Assim, a distribuição de poros do concreto com adição de sílica ativa ( $C_3$ ) diferiu do comportamento do concreto obtido somente com o uso de cimento CP V ( $C_2$ ), indicando refinamento da porosidade, através da redução do volume de poros nesta faixa de diâmetros.

- pela análise da Figura 5.3, visualizam-se duas faixas de poros característicos para o concreto  $C_1$ , entre 437,5 e  $45\ \mu\text{m}$  e entre 0,59 e  $0,01\ \mu\text{m}$ . Tanto o concreto  $C_2$  como o concreto  $C_3$  apresentaram faixas de poros característicos praticamente coincidentes entre 6,62 e  $0,01\ \mu\text{m}$ .

- para os três concretos em estudo, a região do diâmetro característico se situou nas proximidades de  $0,1\ \mu\text{m}$ .

Os resultados apresentados na Tabela 5.5 corroboram a análise desenvolvida, uma vez que grandezas como o diâmetro crítico e o volume total intrudido foram maiores para a composição  $C_1$  e menores para as composições  $C_2$  e  $C_3$ . A distribuição do volume de intrusão, mostrada na Figura 5.3, demonstra que, embora o diâmetro característico do concreto  $C_1$  tenha sido próximo ao diâmetro característico das composições  $C_2$  e  $C_3$ , o volume intrudido máximo para o concreto  $C_1$  foi significativamente superior aos demais.

#### 5.1.4.2 Comparação entre as estruturas de poros do concreto $C_2$ nas idades de 3 e 28 dias

Nas Figuras 5.4 e 5.5 encontram-se os resultados da evolução da porosidade acumulada e a distribuição de poros e na Tabela 5.6 apresentam-se as grandezas calculadas de acordo com os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos para as idades de 3 e 28 dias do concreto  $C_2$ .

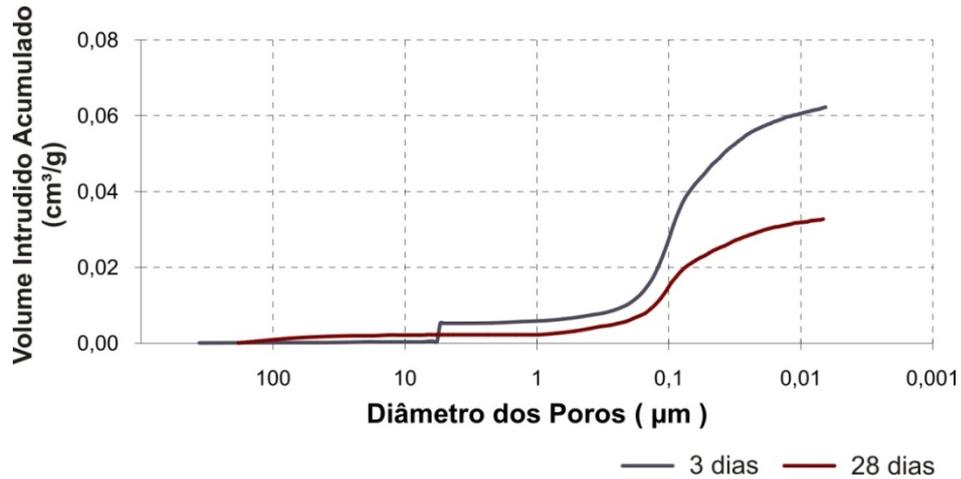


Figura 5.4 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos C<sub>2</sub> com início da paralisação das reações de hidratação aos 3 e 28 dias de idade – volume intrudido acumulado *versus* diâmetro dos poros.

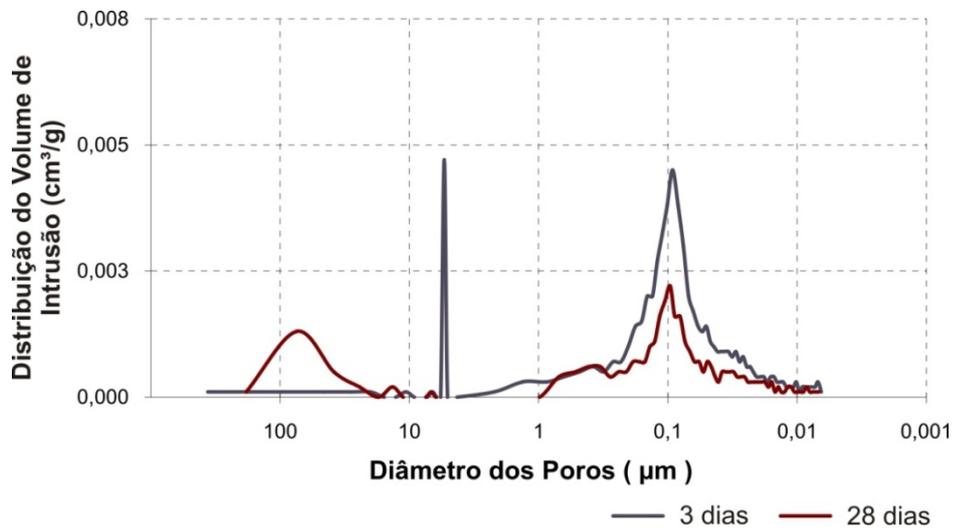


Figura 5.5 – Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras dos concretos C<sub>2</sub> com início da paralisação das reações de hidratação aos 3 e 28 dias de idade – distribuição do volume de intrusão *versus* diâmetro dos poros.

Tabela 5.6 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio do concreto C<sub>2</sub>, para início da paralisação da hidratação a 3 e 28 dias de idade.

Grandezas	C <sub>2</sub>	
	3 dias	28 dias
Diâmetro crítico (µm)	0,44	0,35
Diâmetro característico (µm)	0,01	0,01
Diâmetro médio (µm)	8,64	5,75
Área lateral de poros (cm <sup>2</sup> /g)	0,90	0,69
Volume intrudido (cm <sup>3</sup> /g)	0,06	0,03

As curvas delineadas para as idades de 3 e 28 dias indicam que houve redução significativa no volume acumulado de poros, denotando o refinamento generalizado da microestrutura do material. Assim, a curva correspondente ao volume intrudido acumulado *versus* diâmetro dos poros para o concreto C<sub>2</sub> na idade de 28 dias foi delineada, em quase todo o seu comprimento, em posição inferior à curva dos 3 dias. A redução de volume de poros de dimensões inferiores a 0,1 µm, dos 3 aos 28 dias, foi da ordem de 60%. As diferenças evidenciam que a porosidade relativa ao segundo modo poroso foi reduzida com a hidratação, uma vez que os C-S-H formados preencheram os espaços inter-grãos iniciais. Ademais, observa-se um aumento brusco (degrau) no volume intrudido relativo à amostra de 3 dias, na abscissa correspondente ao diâmetro de poros de 8,5 µm, mostrado na Figura 5.4. Esse comportamento deve estar associado ao desenvolvimento de uma fissura ou fratura, pelas pressões aplicadas às amostras durante o ensaio. Pela análise da Figura 5.5, visualizam-se duas faixas de poros característicos para o concreto C<sub>2</sub> aos 28 dias, entre 343,8 e 32,5 µm e entre 1 e 0,009 µm.

As grandezas mostradas na Tabela 5.6 expressam numericamente o desenvolvimento da microestrutura do concreto C<sub>2</sub> através das reações de hidratação do cimento. Neste processo, o volume total intrudido apresentou redução de 50% dos 3 aos 28 dias de idade. Conseqüentemente, o diâmetro médio dos poros foi reduzido em 33%, bem como a área total de poros e o diâmetro crítico, que apresentaram reduções de 23% e 20%, respectivamente. Com relação ao diâmetro característico, a curva de distribuição do volume intrudido do concreto C<sub>2</sub> aos 3 dias de idade, mostrada na Figura 5.5, apresentou dois picos distintos, sendo um na abscissa referente ao diâmetro de 7,56 µm, e outro na abscissa referente ao diâmetro de 0,09 µm. Embora o pico referente a 7,56 µm tenha atingido o volume máximo da curva, o valor de 0,9 µm foi adotado como diâmetro característico, uma vez que maior volume acumulado de mercúrio foi intrudido nas adjacências desta abscissa.

## **5.1.5 Propriedades mecânicas**

### **5.1.5.1 Resistência à compressão**

A resistência à compressão dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> foi determinada nas idades de 3, 7 e 28 dias, conforme metodologia descrita no Item 4.4.3. Na Tabela 5.7 foram transcritos os valores de resistência à compressão individual de cada corpo-de-prova ensaiado.

Tabela 5.7 – Resultados individuais e médios de resistência à compressão dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, de acordo com as idades de ensaio.

Concreto	Idade (dias)	Corpo-de-prova	Resistência à compressão (MPa)	Resistência média à compressão (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
C <sub>1</sub>	3	1	13,34	13,52	0,18
		2	13,69		
	7	1	17,30	17,60	0,26
		2	17,82		
	28	1	23,36	<b>23,78</b>	0,55
		2	24,22		
C <sub>2</sub>	3	1	27,68	28,10	0,45
		2	28,58		
	7	1	36,50	36,50	0,0
		2	36,50		
	28	1	43,72	<b>44,27</b>	0,55
		2	44,82		
C <sub>3</sub>	3	1	28,06	28,40	0,35
		2	28,77		
	7	1	37,87	38,10	0,17
		2	38,15		
	28	1	58,37	<b>58,65</b>	0,27
		2	58,91		

Os resultados expressos na Tabela 5.7 demonstram que as resistências apuradas para a idade de 28 dias atingiram os valores de 23,78 MPa para C<sub>1</sub>, 44,27 MPa para C<sub>2</sub> e 58,65 MPa para C<sub>3</sub>. Especificamente em relação ao concreto C<sub>2</sub>, salienta-se que, aos 7 dias de idade o concreto já havia atingido resistência característica de 28 dias. As resistências determinadas experimentalmente aos 28 dias ( $f_{c28}$ ) foram aproximadamente 18,9%, 26,5% e 17,3% maiores que os valores estipulados de resistência característica ( $f_{ck}$ ).

Quanto aos parâmetros de mistura e aos materiais utilizados, cabe salientar que o uso concomitante de agregados naturais e artificiais, bem como duas graduações diferentes de agregado graúdo (nos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>) pode ter contribuído para um melhor empacotamento dos materiais secos e para melhoria das condições de trabalhabilidade da mistura, mesmo com baixas relações água/cimento.

Na Figura 5.6, ilustra-se o desenvolvimento de resistência à compressão das misturas em estudo, para 3, 7 e 28 dias.

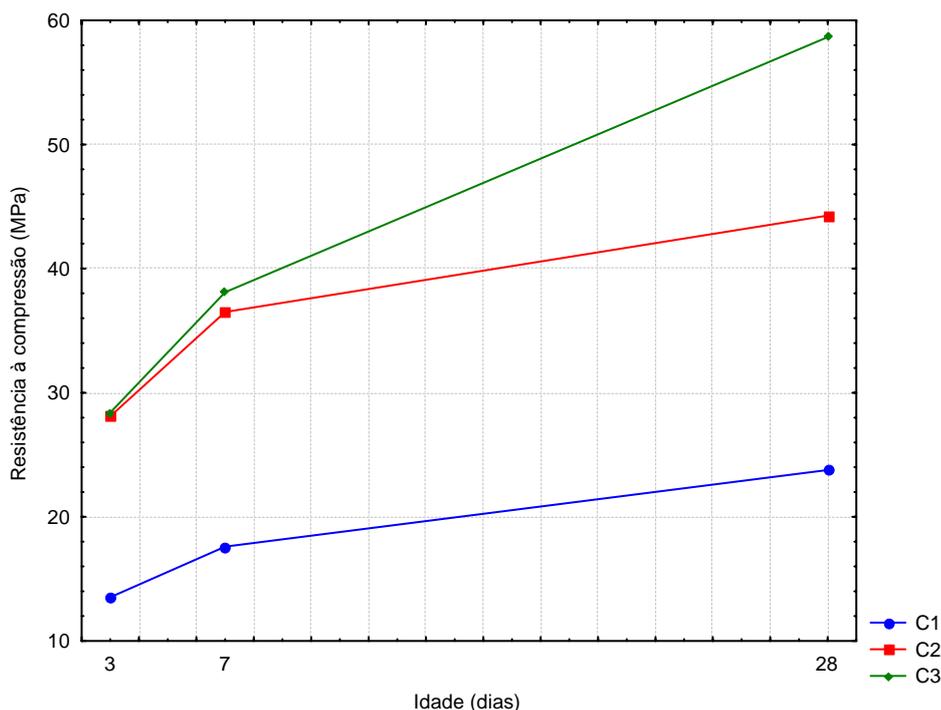


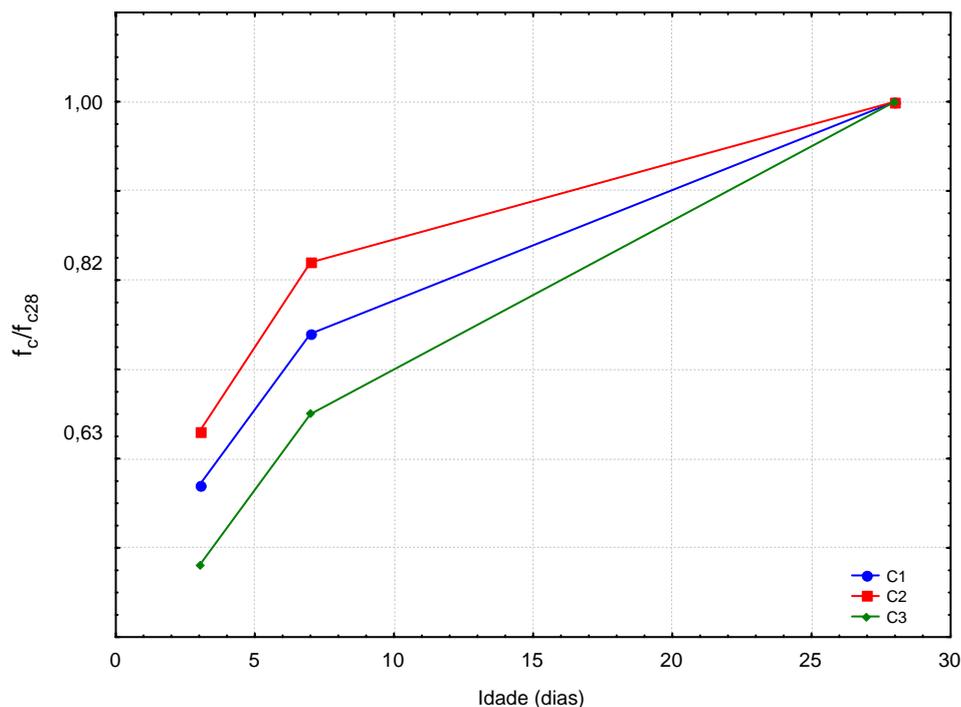
Figura 5.6 – Desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Os ganhos de resistência apurados para os concretos em estudo dos 3 aos 28 dias ficam evidenciados através da análise da Figura 5.6. Para o concreto C<sub>1</sub>, dos 3 aos 7 dias, o incremento de resistência foi de 30% e dos 7 aos 28 dias, o ganho de resistência foi de 35%. Nos mesmos períodos, para o concreto C<sub>2</sub>, os ganhos foram de 29,9% e 21,3%. Para o concreto obtido com uso de sílica ativa (C<sub>3</sub>), dos 3 aos 7 dias houve um acréscimo de resistência da ordem de 34,2%. Dos 7 aos 28 dias, o aumento foi da ordem de 53,9%. Esta análise permite avaliar que os maiores ganhos de resistência ocorreram para o concreto que continha sílica ativa na mistura. De forma geral, mesmo nos concretos onde não foi incluído qualquer teor de sílica, os valores de resistência foram incrementados significativamente, dos 3 aos 28 dias, comprovando que os parâmetros de mistura e os materiais utilizados, em particular a relação água/cimento e o consumo de cimento, evidenciados na Tabela 5.2, contribuíram sobremaneira para os valores de resistência alcançados.

A evolução da resistência à compressão, em função da resistência aos 28 dias, apresentou tendências semelhantes para os concretos estudados, sendo que o crescimento mais acentuado se deu dos 3 aos 7 dias, conforme mostrado na Tabela 5.8 e na Figura 5.7.

Tabela 5.8 – Resistências relativas à idade de 28 dias para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Idade (dias)	$f_c/f_{c28}$		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
3	0,57	0,63	0,48
7	0,74	0,82	0,65
28	1,00	1,00	1,00

Figura 5.7 – Variação da relação  $f_c/f_{c28}$  para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, até 28 dias.

Aos 3 e 7 dias de idade, o concreto C<sub>2</sub> já havia atingido, respectivamente, 63% e 82% da resistência aos 28 dias. A maior taxa de crescimento assinalada no período dos 7 aos 28 dias se deu para o concreto C<sub>3</sub>, provavelmente devido ao desenvolvimento das reações pozolânicas pela adição de sílica ativa.

#### 5.1.5.2 Módulo de elasticidade

Na Tabela 5.9 apresenta-se os valores individuais de módulo de elasticidade para cada corpo-de-prova ensaiado, a média determinada para cada idade e o desvio-padrão em relação à média calculada.

Tabela 5.9 – Resultados individuais e médios de módulo de elasticidade dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, de acordo com as idades de ensaio.

Concreto	Idade (dias)	Corpo-de-prova	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo médio de elasticidade (GPa)	Desvio-padrão (GPa)
C1	3	1	22,50	22,83	0,47
		2	22,50		
		3	23,50		
	7	1	24,80	25,43	0,89
		2	24,80		
		3	26,70		
	28	1	26,30	<b>26,80</b>	0,45
		2	26,70		
		3	27,40		
C2	3	1	29,30	29,30	0,0
		2	29,30		
		3	29,30		
	7	1	31,40	31,73	0,34
		2	32,20		
		3	31,60		
	28	1	31,50	<b>33,17</b>	1,39
		2	33,10		
		3	33,90		
C3	3	1	28,50	29,30	0,65
		2	29,30		
		3	30,10		
	7	1	31,90	32,13	0,33
		2	31,90		
		3	32,60		
	28	1	33,10	<b>33,63</b>	0,38
		2	33,90		
		3	33,90		

Para o concreto C<sub>1</sub>, dos 3 aos 7 dias, o incremento do módulo de elasticidade foi de 11,4% e dos 7 aos 28 dias, o ganho foi de 5,4%. Nos mesmos períodos, para o concreto C<sub>2</sub>, os ganhos foram de 8,3% e 4,5%. Para o concreto obtido com uso de sílica ativa (C<sub>3</sub>), dos 3 aos 7 dias houve um acréscimo no módulo de elasticidade da ordem de 9,6%. Dos 7 aos 28 dias, o aumento foi da ordem de 4,7%. Assim, tanto no período dos 3 aos 7, como dos 7 aos 28 dias, os maiores acréscimos percentuais ocorreram para o concreto C<sub>1</sub>. Embora os maiores ganhos tenham ocorrido para o concreto C<sub>1</sub>, a maior média de módulo de elasticidade foi alcançada

para o concreto C<sub>3</sub>. A composição C<sub>2</sub> apresentou comportamento intermediário aos demais concretos. Na Figura 5.8, ilustra-se o desenvolvimento do módulo de elasticidade das composições, para 3, 7 e 28 dias.

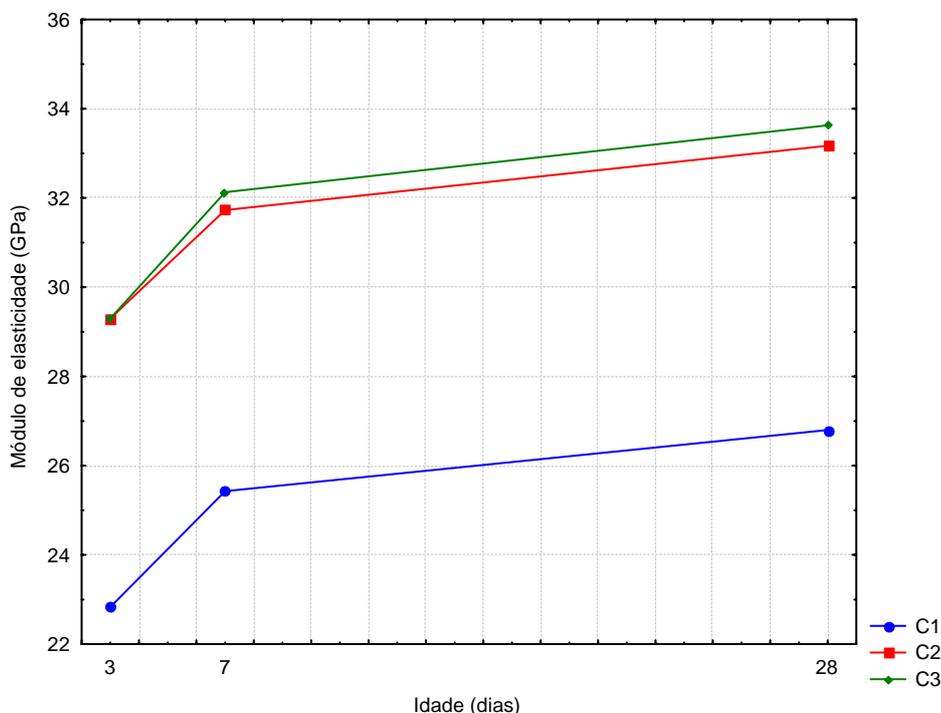


Figura 5.8 – Desenvolvimento do módulo de elasticidade dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Com base nos parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto percebe-se que as condições de ensaio, características do agregado gráudo utilizado (porosidade) e idade de realização dos ensaios não exerceram influência significativa nos resultados desta pesquisa, uma vez que estes parâmetros permaneceram inalterados ou variaram de forma semelhante para os concretos em estudo.

Sabe-se que o aumento da relação água/cimento ocasiona uma redução nos valores do módulo de elasticidade, uma vez que a porosidade da pasta aumenta para maiores relações água/cimento. Em tais situações, a maior quantidade de água disponível provoca um afastamento entre os grãos de cimento e ocorre um enfraquecimento progressivo da matriz, culminando pelo aumento da quantidade de cristais orientados de hidróxido de cálcio (CH) e etringita, tornando as ligações da estrutura pasta-agregado mais frágeis, com maior tendência à formação de micro fissuras (VIEIRA, 2008). Assim, a alta relação água/cimento adotada para C<sub>1</sub> provavelmente contribuiu para os menores valores de módulo de elasticidade, em

quaisquer das idades de ensaio, em comparação aos demais concretos estudados.

Dados de Weiss (1999) indicaram, para concretos com adição de sílica ativa, uma redução na taxa inicial de desenvolvimento do módulo de elasticidade, apesar de, aos 28 dias, os concretos apresentarem propriedades mecânicas similares ou maiores que as de referência. Esse comportamento foi demonstrado pelo fato dos resultados de módulo de elasticidade para C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, aos 3 dias de idade, terem sido iguais. A seguir, aos 7 e aos 28 dias, os valores apurados denotaram módulos de elasticidade próximos para uma e outra composições, com variação de aproximadamente 1,4%. Conclui-se, para o caso dos concretos em estudo, que o efeito de densificação da microestrutura proporcionado pela adição mineral não ocasionou incremento significativo nos resultados de módulo de elasticidade do concreto C<sub>3</sub>.

Finalmente, cabe salientar que a variação da relação água/cimento não exerceu a mesma influência sobre a resistência à compressão e sobre o módulo de elasticidade. Comparativamente, enquanto a redução da relação água/cimento de 0,70 (concreto C<sub>1</sub>) para 0,44 (concreto C<sub>2</sub>) ocasionou o acréscimo de 86% nos valores de resistência à compressão aos 28 dias, para o módulo de elasticidade essa influência foi de aproximadamente 23,8%.

Ademais, conforme mostrado na Figura 5.9, enquanto se obteve um crescimento significativo das resistências ao longo do tempo, os valores de módulo de elasticidade, embora tenham aumentado, não atingiram a mesma porcentagem de acréscimo.

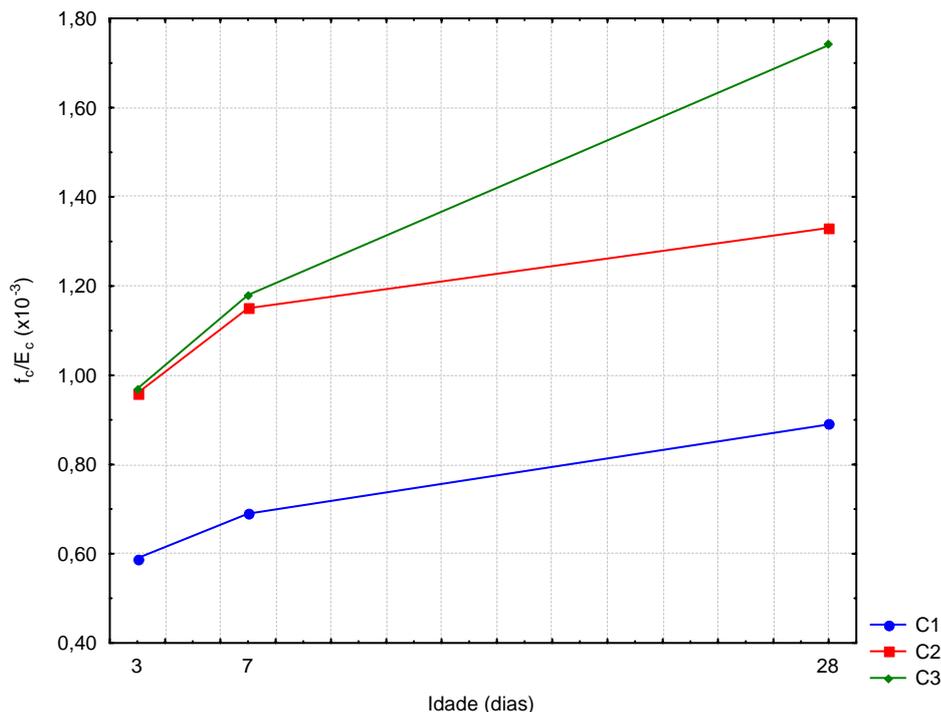


Figura 5.9 – Variação da relação  $f_c/E_c$  para os concretos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , aos 3, 7 e 28 dias.

A análise da Figura 5.9 permite avaliar a relação entre os valores de resistência à compressão e de módulo de elasticidade apurados nas idades de ensaio. Pode-se verificar que, aos 3 dias de idade, a relação entre as propriedades foi inferior a 1, para todas as composições. Comparativamente, pelos resultados da relação para as demais idades, os incrementos da resistência à compressão resultaram superiores ao desenvolvimento do módulo de elasticidade, de forma que a relação entre as duas propriedades aumentou ao longo do tempo. Dos 3 aos 28 dias, a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de  $C_1$  passou de 0,59 a 0,89. Para os concretos  $C_2$  e  $C_3$ , a relação entre a resistência e o módulo passou de 0,96 a 1,33 e de 0,97 a 1,74, respectivamente.

### 5.1.6 Caracterização da retração por secagem conforme prescrições da ASTM C 157

A retração unidimensional livre (variação de comprimento) foi determinada conforme metodologia descrita no Item 4.4.4.2 e normalizada pela ASTM C 157 (ASTM, 2004). Nesta pesquisa é usada a nomenclatura retração por secagem, embora seja salientado que há uma parcela embutida devida à autodessecação acumulada durante as leituras de retração por secagem.

### 5.1.6.1 Resultados das retrações autógenas e térmicas durante o período de cura submersa

Os resultados médios de retração determinados imediatamente após a retirada dos corpos-de-prova do período de 28 dias de cura submersa encontram-se na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Resultados médios de deformação específica devida às retrações autógenas e térmicas acumuladas durante o período de cura submersa.

Concreto	$\varepsilon$ ( $\times 10^{-6}$ )
C <sub>1</sub>	-9,6
C <sub>2</sub>	-18,03
C <sub>3</sub>	-21,33

A respeito dos valores apresentados na Tabela 5.10, cabe salientar a significativa diferença na sua magnitude, se comparada aos valores de deformação endógena desenvolvida no mesmo período e apresentados no Item 5.2.1.2 do presente texto. Conforme definido anteriormente, a retração endógena se deve à soma dos efeitos da retração autógena + térmica, justificando esta comparação. Desta forma, a retração endógena dos concretos aos 28 dias (registrada na Tabela 5.15) foi aproximadamente 8, 7,5 e 12 vezes maior que a deformação devida às retrações autógena + térmica após cura submersa, para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente. A variação significativa nos resultados de retração após cura submersa também foi apurada pela pesquisa de Silva (2007-a). Neste caso, a autora realizou ainda a repetição dos ensaios, para fins de verificação.

Parte da diferença supracitada provavelmente se deve ao fato de que, pela metodologia do ensaio de retração por secagem, foram desprezados os valores referentes à soma das retrações autógena + térmica acumuladas durante as primeiras 24 horas, ou seja, anteriormente à desmoldagem dos corpos-de-prova. Conforme mostrado na Tabela 5.14, os resultados médios de retração endógena até 1 dia de idade representaram uma parcela significativa do fenômeno.

Ademais, supõe-se que o transporte e a fixação de água através do concreto possibilitaram que o sistema de poros fosse parcialmente (ou totalmente) ocupado. Neste caso, o consumo da água disponível no sistema para hidratação do cimento anidro não ocasionaria a formação dos meniscos e, como resultado, o desenvolvimento de retração autógena seria reduzido. Assim, a autodessecação somente se processaria em regiões da microestrutura do material não alcançadas pela frente úmida (em virtude de restrições impostas pela interligação da rede

porosa). Além disso, parte da diferença entre os valores de retração por secagem e a retração endógena poderia estar associada à compensação da retração pela entrada de água na estrutura de poros dos concretos submetidos à cura submersa. No caso da retração térmica, devido tanto às pequenas dimensões dos corpos-de-prova como às melhores condições de dissipação do gradiente térmico, é provável que a magnitude desta retração também tenha sido reduzida, em relação às deformações térmicas dos corpos-de-prova selados.

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a umidade relativa do ambiente que circunda o concreto tem muita influência sobre a retração, de forma que o concreto desenvolveria certa “expansão” quando conservado em água. Considerando esta teoria para explicação do comportamento dos concretos conservados em cura submersa, verificou-se que as leituras de deformação ao final do período não foram de expansão, mas sim de retração. Neste caso, infere-se que as deformações de contração nos corpos-de-prova foram superiores às deformações desencadeadas pela entrada de água na rede porosa do material (expansão), resultando em deformações de retração, ao final do período.

Conforme comentado, estima-se que os aspectos explicitados e a interconexão entre suas influências individuais poderiam estar associados à eficiência da cura úmida em reduzir de forma substancial os efeitos da retração.

#### 5.1.6.2 Variação relativa de massa de água *versus* idade

Nos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, após 28 dias de cura submersa, os corpos-de-prova apresentaram um aumento expressivo de massa. A partir da leitura de ganho de massa (imediatamente após a retirada dos corpos-de-prova da cura submersa) e até o final das leituras efetivadas, ocorreu a perda de massa de água. O gráfico do comportamento da variação relativa de água através da idade, durante as medidas de retração por secagem encontra-se no Apêndice C (Figura C-3). Na Tabela 5.11 apresentam-se os resultados da variação de massa de água em relação à massa de água evaporável, durante o período de cura submersa e acumulada durante o período de leituras das deformações devidas à retração por secagem.

Tabela 5.11 – Resultados da variação de massa de água em relação à massa de água evaporável imediatamente após a retirada dos corpos-de-prova da cura submersa e após o final das leituras de retração por secagem (60 dias).

Concreto	Variação relativa de massa de água durante o período de cura submersa (%)	Variação relativa de massa de água após 60 dias de secagem (%)
C <sub>1</sub>	+13,4	-9,77
C <sub>2</sub>	+12,1	-3,30
C <sub>3</sub>	+11,4	-2,06

A variação relativa de massa de água permitiu identificar a tendência linear para a saída de água dos corpos-de-prova, independentemente do tipo de concreto analisado, uma vez que a saída de água somente se processou com o passar do tempo de exposição dos corpos-de-prova ao ambiente de laboratório (variação de massa de água *versus* idade).

Conforme mostrado no Apêndice B (Tabela B-21), pelos resultados de variação relativa de massa de água, verificou-se a saída mais acentuada de água durante os primeiros dias de secagem. Como os corpos-de-prova permaneceram em cura submersa durante 28 dias, o estabelecimento do equilíbrio da umidade interna com o ambiente de laboratório provavelmente ocasionou este comportamento. Esta tendência se suavizou até aproximadamente 20 dias de secagem e, a partir deste ponto, ocorreu outro comportamento de secagem, menos acentuado, até o final das medidas registradas, principalmente para o concreto C<sub>1</sub>. Para os concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, a variação relativa de massa de água foi bastante próxima, do início ao fim das medidas.

#### 5.1.6.3 Resultados médios de retração por secagem

Os valores de retração por secagem analisados neste item não incluem a retração devida às deformações autógena e térmica durante os primeiros 28 dias de idade dos concretos, uma vez que estas deformações foram descontadas, conforme prescrições da ASTM C 157 (ASTM, 2004). Na Tabela 5.12 apresentam-se os resultados médios de deformação específica devida à retração por secagem, após 28 dias de cura submersa.

Tabela 5.12 – Resultados médios de deformação específica devida à retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ) para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Tempo de secagem (dias)	$\varepsilon_{\text{sec}} (\times 10^{-6})$		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
1	-61,60	-34,05	-35,25
3	-78,99	-51,41	-43,96
8	-125,47	-107,84	-83,13
29	-235,87	-264,09	-209,36
53	-279,46	-290,13	-252,88

Os resultados de retração por secagem indicaram que o concreto C<sub>2</sub> apresentou, a partir de 29 dias de secagem, maiores valores de retração. No entanto, os valores apurados para retração após 53 dias de secagem foram bastante próximos para os três concretos (diferença máxima de 12,8%). Segundo vários autores (Melo Neto, 2002; Pietra *et al.*, 2003, Kalintzis e Kuperman, 2005; Esping, 2007), com o aumento da relação água/cimento, aumenta tanto o número de poros como a quantidade de água que se movimenta na rede de capilares, contribuindo para o aumento das pressões capilares. Presume-se que, pela metodologia deste ensaio específico, todos os concretos apresentavam, no início das leituras de retração, grande quantidade de água preenchendo a rede de capilares. Assim, pelos resultados apurados, a formação dos meniscos na região de transição água/ar e o desenvolvimento de maiores pressões capilares nos concretos de menor relação água/cimento podem ter contribuído para o comportamento detectado ao final das leituras. Em relação aos demais parâmetros de mistura verificou-se que:

- os resultados finais de retração por secagem não indicaram influência significativa da diferença entre os consumos de cimento, do traço dos agregados graúdos ou do teor de argamassa dos três concretos;
- a baixa influência da variação do consumo de cimento entre as composições nos resultados de retração pode estar associada ao fato de que a autodessecação não contribuiu de forma expressiva para os resultados;
- em relação ao traço dos agregados graúdos e ao teor de argamassa, verificou-se que a influência individual das fases que maximizam ou restringem o desenvolvimento da retração foi menos importante que a contribuição conjunta destas fases para o estabelecimento da

microestrutura do material.

- as características da microestrutura, em especial a rede porosa presumidamente formada em condições de cura submersa, e a quantidade de água presente nos corpos-de-prova provavelmente foram mais influentes no processo, ocasionando que, independentemente dos parâmetros de mistura, os três concretos estudados desenvolvessem, ao final das leituras, deformações por retração por secagem bastante próximas.

Na Figura 5.10 ilustram-se os resultados médios de retração por secagem dos prismas, em função do tempo de secagem, para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>. Na Tabela C-5, constante do Apêndice C, apresentam-se as equações de correlação logarítmica e linear para o desenvolvimento da retração por secagem, bem como os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) para as curvas.

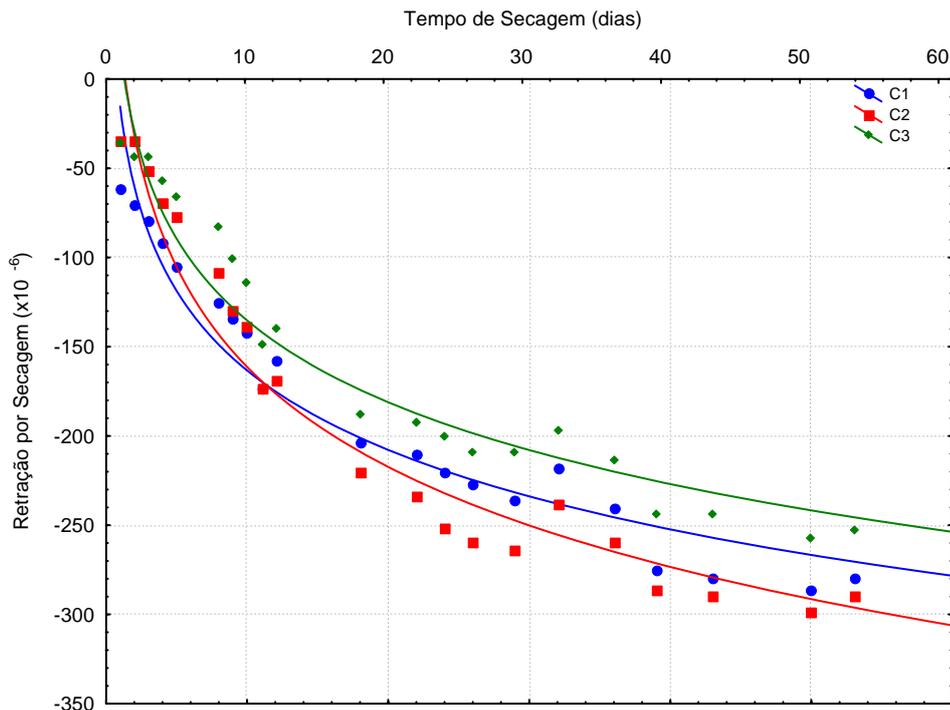


Figura 5.10 – Resultados médios de retração por secagem determinada a partir de 28 dias de cura submersa, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, não selados, para  $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

A partir da análise da Figura 5.10, verifica-se que o comportamento comumente visualizado para o desenvolvimento da retração (função logarítmica da idade) se verifica mais apropriadamente que as curvas logarítmicas inseridas nas análises da retração endógena e da retração total aplicada aos concretos durante a pesquisa, apresentadas nas Figuras 5.11 e 5.12.

Esta diferenciação provavelmente se deve ao fato de que, para avaliação da retração por secagem segundo o método proposto pela ASTM C 157 (ASTM, 2004), as medidas se realizam a partir dos 28 dias de idade, quando a microestrutura do material já se formou e o desenvolvimento da retração pode ser delineado a contento através de expressões logarítmicas.

Ademais, verificou-se que, até aproximadamente 20 dias de secagem, a retração se desenvolveu segundo um regime de velocidade mais acentuada. A partir deste ponto e até o final das leituras, os valores registrados indicaram outro regime de desenvolvimento.

## 5.2 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

O foco principal desta pesquisa foi avaliar e mensurar as retrações totais incidentes no sistema fechado (sem troca de umidade) e no sistema aberto (não selado). Assim, nesta pesquisa, toda a retração contabilizada no sistema selado será denominada como *retração endógena*, estando inclusa nesta definição a soma das deformações desenvolvidas em virtude das retrações autógena e térmica, a partir do patamar de percolação, para os concretos estudados. Além disso, as deformações registradas nos corpos-de-prova não selados, que contabilizam a soma dos efeitos ocasionados pelas retrações de natureza autógena, térmica e por secagem será designada como *retração total*. Essa abordagem fenomenológica também foi adotada por Aly e Sanjaian (2008) e os autores denominaram a retração total apurada nos ensaios com a denominação retração livre (*free shrinkage*). Todas as análises apresentadas, quer sejam de retração ou de variação relativa de massa de água, explicitam a média dos valores obtidos para três corpos-de-prova ensaiados, cujos valores individuais obtidos nos ensaios encontram-se no Apêndice B.

### 5.2.1 Retração endógena

#### 5.2.1.1 Variação relativa de massa de água *versus* idade

Na Tabela 5.13 apresentam-se os resultados da variação de massa de água em relação à massa de água evaporável, acumulada durante o período de leituras das deformações devidas à retração endógena. O gráfico do comportamento da variação relativa de água através da idade, durante as medidas de retração endógena encontram-se no Apêndice C (Figura C-1). Os

resultados detalhados das medidas de variação de massa de água encontram-se no Apêndice B (Tabela B-20).

Tabela 5.13 – Resultados máximos da variação de massa de água após 80 dias de leituras de retração endógena.

Concreto	Perda média de água (g)	Massa média de água evaporável (g)	Massa média dos corpos-de-prova de concreto (g)	Variação relativa de massa de água em relação à massa de água evaporável (%)	Variação relativa de massa de água em relação à massa total do corpo-de-prova (%)
C <sub>1</sub>	-0,44	188,20	3825,28	-0,23	-0,011
C <sub>2</sub>	-0,48	204,23	3970,66	-0,24	-0,012
C <sub>3</sub>	-0,49	202,61	3884,57	-0,24	-0,013

Segundo Illston e Pomeroy (1975) *apud* Velasco (2008), a selagem perfeita ocorre quando a perda de massa de água em relação à massa do corpo-de-prova atinge o valor máximo de 0,05%. Essa mesma variação relativa máxima é citada por Balthar (2004) e Silva (2007-a), para avaliação dos resultados, com vistas à avaliação da ocorrência de secagem durante as leituras de retração autógena. Assim, como a massa total do corpo-de-prova é superior à massa de água evaporável, a variação de massa de água em relação à massa dos corpos-de-prova foi ainda inferior aos valores apresentados. Desta forma, considera-se que no período de execução das leituras, os corpos-de-prova permaneceram selados, de modo que a retração por secagem foi desprezível.

#### 5.2.1.2 Resultados médios de retração endógena

Na Tabela 5.14 apresentam-se os resultados médios de retração endógena nas idades de 1, 3, 7, 28 e 60 dias para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Tabela 5.14 – Resultados médios de deformação específica devida à retração endógena ( $\times 10^{-6}$ ) em diversas idades para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Idade (dias)	$\varepsilon_{\text{end}} (\times 10^{-6})$		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
1	-20,37	-20,16	-75,45
3	-24,74	-25,94	-95,75
7	-37,85	-43,21	-137,87
28	-80,06	-136,79	-264,13
60	-106,26	-161,27	-348,29

Notadamente, os maiores valores de retração foram desenvolvidos pelo concreto C<sub>3</sub>. Em seguida, o maior desenvolvimento de retração endógena se deu para o concreto C<sub>2</sub> e, por último, para o concreto C<sub>1</sub>. Verificou-se que, a exemplo da retração autógena, a retração endógena aumentou ao longo do tempo. Considerando que o desenvolvimento da retração endógena se processou principalmente pela influência da retração autógena, esse crescimento está de acordo com Tazawa *et al.*, (1995), Tazawa e Miyazawa (1997), Van Breugel (2001), Aïtcin (1998) e Radocea (1998).

Tazawa e Miyazawa (1995), Silva (2007-a) e Velasco (2008) observaram que, com 1 dia de idade, a retração autógena desenvolvida representa, em média, cerca de 30% da retração autógena aos 28 dias. De acordo com os dados obtidos pela pesquisa, para o concreto C<sub>1</sub>, a porcentagem de retração com 1 dia de idade representou 25,44% da retração apurada aos 28 dias. Para os concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, com 1 dia de idade cerca de 14,74% e 28,56% das deformações apuradas aos 28 dias já haviam se desenvolvido.

A análise do comportamento do concreto C<sub>2</sub> indicou que, somente a partir dos 7 dias, houve aumento na taxa de crescimento da retração endógena, até atingir o valor de retração aos 28 dias. Esse comportamento vai de encontro ao esperado, uma vez que este concreto foi dosado com relação água/cimento e consumo de cimento semelhante ao concreto C<sub>3</sub>, devendo, supostamente, apresentar maior desenvolvimento de retração nos primeiros dias de hidratação do cimento. Além disso, conforme mostrado no Item 5.1.4, a comparação entre a estrutura de poros dos concretos na idade de 1 dia indicou que, naquela data, a distribuição de poros do concreto C<sub>2</sub> resultou em volume intrudido acumulado inferior ao C<sub>1</sub>, denotando que o desenvolvimento da retração endógena neste concreto seria intermediário ao desenvolvimento de retração dos demais concretos.

O comportamento apresentado pelo concreto C<sub>2</sub>, embora incomum, não repercutiu no desenvolvimento final da retração para este concreto, se comparado com valores de Kalintzis e Kuperman (2005). Os autores desenvolveram estudo para avaliar a retração em concretos produzidos com o cimento CP V e 6% de sílica ativa, obtendo retração autógena, aos 28 dias, de aproximadamente  $-70 \times 10^{-6}$  e  $-150 \times 10^{-6}$ , para concretos de relação água/cimento igual a 0,37 e 0,52, respectivamente. Desta feita, embora o concreto C<sub>2</sub> não apresente sílica na dosagem, encontra-se no patamar mediano entre as relações água/cimento estudadas pelas pesquisadoras, e com valor de retração endógena aos 28 dias compatível com os valores

apurados nesse estudo anterior.

## 5.2.2 Retração total

### 5.2.2.1 Variação relativa de massa de água *versus* idade

Na Tabela 5.15 apresentam-se os resultados da variação de massa de água em relação à massa de água evaporável, acumulada durante o período de leituras das deformações devidas à retração total. Cabe salientar que, durante o período no qual as leituras de deformação foram realizadas na horizontal, não foi possível registrar a variação de massa referente a cada leitura de deformação. Assim, o cálculo de variação relativa de massa de água realizado inclui a leitura acumulada deste período. O gráfico do comportamento da variação relativa de massa de água ao longo da idade, durante as medidas de retração total encontra-se no Apêndice C (Figura C-2). Os resultados detalhados das medidas de variação de massa de água encontram-se no Apêndice B (Tabela B-21).

Tabela 5.15 – Resultados máximos da variação de massa de água após 70 dias de secagem.

Concreto	Perda média de água (g)	Massa média de água evaporável (g)	Massa média dos corpos-de-prova de concreto (g)	Variação relativa de massa de água em relação à massa de água evaporável (%)	Variação relativa de massa de água em relação à massa total do corpo-de-prova (%)
C <sub>1</sub>	-29,96	189,23	3846,33	-15,83	-0,78
C <sub>2</sub>	-19,15	203,47	3955,50	-9,41	-0,48
C <sub>3</sub>	-12,18	201,73	3881,47	-6,04	-0,31

A análise da variação relativa de massa de água permitiu identificar a tendência linear para a saída de água dos corpos-de-prova, independentemente do tipo de concreto analisado. Assim, verificou-se a correlação entre as duas variáveis, uma vez que, obviamente, a saída de água somente se processa com o passar do tempo de exposição dos corpos-de-prova ao ambiente de laboratório (variação de massa de água *versus* idade). A análise da variação relativa de massa de água permitiu constatar que, durante os primeiros 35 dias de secagem, a saída de água se processou de forma suavemente mais acentuada que nos dias subseqüentes.

### 5.2.2.2 Resultados médios de retração total

Na Tabela 5.16, encontram-se detalhados os valores médios de retração total para os

concretos em estudo, em função da idade, desde o patamar de percolação até à idade de 80 dias.

Tabela 5.16 – Resultados médios de deformação específica devida à retração total ( $\times 10^{-6}$ ) em diversas idades para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Idade (dias)	$\epsilon_{tot} (\times 10^{-6})$		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
1	-33,41	-27,70	-28,99
3	-47,92	-46,65	-56,53
7	-84,15	-83,10	-102,89
28	-327,09	-257,82	-300,07
60	-482,01	-336,34	-365,25

A análise dos resultados de retração total expostos na Tabela 5.16 indicou que:

- a partir de 20 dias de idade, somando todos os efeitos, o concreto C<sub>1</sub> apresentou maiores valores de retração;
- ao final das leituras, o comportamento dos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> ficou bastante próximo, de forma que a retração total final entre os dois concretos diferiu aproximadamente 8,6%;
- para o concreto C<sub>1</sub>, até os 7 dias havia se desenvolvido aproximadamente 17% da retração total contabilizada aos 60 dias. Para os concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, essas porcentagens foram de aproximadamente 25% e 28%, respectivamente, da retração total contabilizada aos 60 dias;
- a alta relação água/cimento do concreto C<sub>1</sub> pode ter resultado em maior movimentação de água na rede porosa do material e, conseqüentemente, em maiores deformações por secagem ao final das medidas.
- a partir de 20 dias de idade, o maior consumo de cimento dos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> não influenciou significativamente os resultados, uma vez que as maiores deformações totais se deram para C<sub>1</sub>. Presume-se, através deste comportamento, que o desenvolvimento da autodessecação se processou de forma diferenciada entre corpos-de-prova selados e não selados uma vez que, na primeira situação, concretos dosados com maior consumo de cimento

desenvolveram maiores deformações por retração endógena ao longo do tempo.

### 5.2.3 Diferenciação de regimes para o desenvolvimento da retração e para a variação relativa de massa de água

#### 5.2.3.1 Retração endógena e retração total

Nas Figuras 5.11 e 5.12, ilustram-se as curvas de correlação logarítmica para as deformações médias devidas à retração endógena e total dos prismas, em função da idade, a partir do patamar de percolação (correspondente à idade igual a zero) até a idade de 80 dias, para os concretos estudados. No Apêndice C encontram-se tabelas (Tabelas C-1 e C-2) com as respectivas equações de correlação logarítmica e linear para o desenvolvimento da retração endógena e da retração total ao longo da idade, bem como os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) para as curvas.

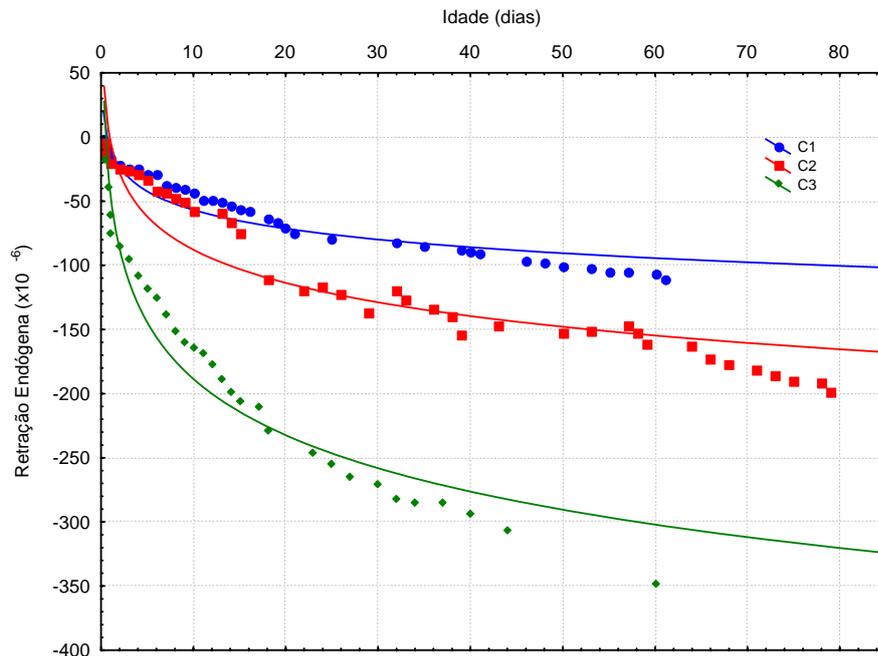


Figura 5.11 – Resultados médios de retração endógena determinada a partir do patamar de percolação (usando ultra-som) até a idade de 80 dias, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, para  $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

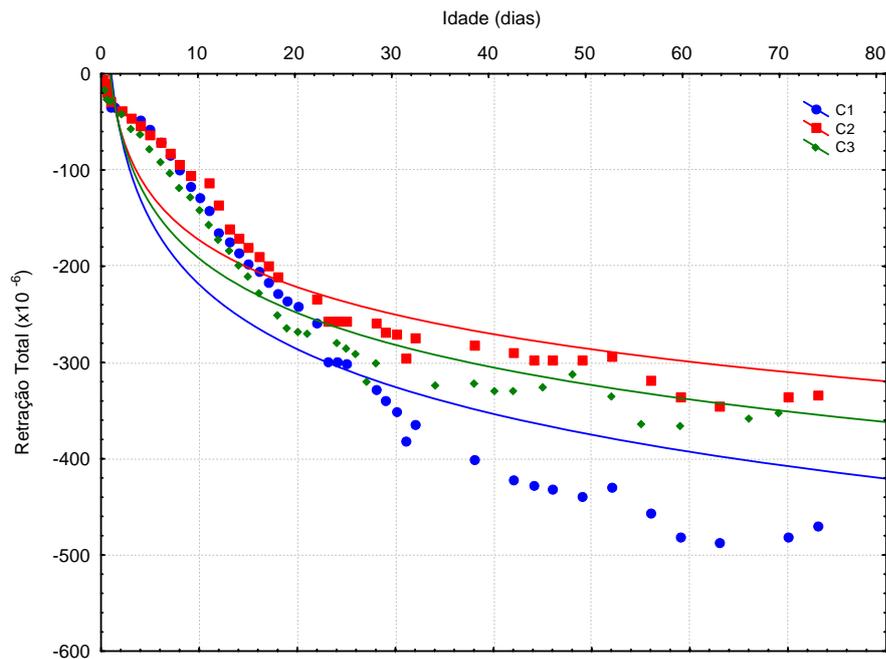


Figura 5.12 – Resultados médios de retração total determinada a partir do patamar de percolação (usando ultra-som) até a idade de 80 dias, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, não selados, para  $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

A partir da análise visual do gráfico, verifica-se que o comportamento comumente visualizado para o desenvolvimento da retração (função logarítmica da idade) não se verificou de forma satisfatória. A inadequação ocorreu, principalmente, na parte inicial do gráfico (até 20 dias de idade). Esta diferenciação provavelmente se deve ao fato de que o objeto da presente pesquisa se fixa na análise do fenômeno nas baixas idades do concreto, concentrando as leituras nos estágios onde as deformações se processam em grande velocidade. Assim, no período estudado, o desenvolvimento da retração endógena e da retração total não constituiu uma função logarítmica da idade.

De acordo com os dados registrados, observou-se que as retrações endógenas e totais aumentaram no decorrer do tempo, mas que o crescimento foi maior nos primeiros dias e menor à medida que o tempo avançou. A análise do gráfico e a constância de desenvolvimento do fenômeno indicaram a existência de três regimes no desenvolvimento da retração ao longo da idade, denominados como R1, R2 e R3.

A determinação da idade de início e fim de cada um destes regimes foi realizada, inicialmente, através da análise visual dos gráficos constantes das Figuras 5.11 e 5.12. A seguir, foi realizado o cálculo da velocidade de desenvolvimento da retração entre leituras

sucessivas e a tentativa de obter menores valores de desvio-padrão destas velocidades em relação à velocidade média de retração entre os intervalos de idade definidos para cada regime. Assim, os intervalos que resultaram em menores desvios em relação à média foram adotados como correspondentes às idades de início e fim de cada regime. O cálculo da velocidade de retração entre leituras sucessivas, em deformação específica/dia, foi realizado a partir da formulação expressa na Equação 5.1.

$$V_{ret} = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_j}{t_i - t_j} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

$V_{ret}$  é a velocidade de retração, entre leituras sucessivas;

$\varepsilon_i$  é a deformação específica devida à retração, no tempo  $i$ ;

$\varepsilon_j$  é a deformação específica devida à retração, no tempo  $j$  imediatamente anterior ao tempo  $i$ ;

$t_i - t_j$  é o tempo transcorrido entre as deformações  $\varepsilon_j$  e  $\varepsilon_i$ , respectivamente.

Após a verificação dos desvios-padrão e das velocidades médias, considerou-se que o regime R1 está compreendido no intervalo de 0 (correspondente ao patamar de percolação) a 1 dia, o regime R2 está compreendido entre 1 e 20 dias e o regime R3 está contido no intervalo entre 20 dias até o final das leituras realizadas. A partir desta constatação, foi realizada a linearização dos trechos do gráfico, obtendo-se diferentes inclinações de retas (coeficiente angular). Estas inclinações demonstram a intensidade com que a retração ocorreu nos respectivos trechos, de forma que a inclinação mais acentuada indica maior desenvolvimento de retração e, por sua vez, a menor inclinação denota a menor intensidade da retração. Estes comportamentos, com suas respectivas divisões por regimes, podem ser observados nas Figuras 5.13 e 5.14. No Apêndice C encontram-se tabelas (Tabelas C-3 e C-4) com as respectivas equações de correlação linear para o desenvolvimento da retração endógena e da retração total ao longo da idade, bem como os coeficientes de correlação e determinação para as curvas.

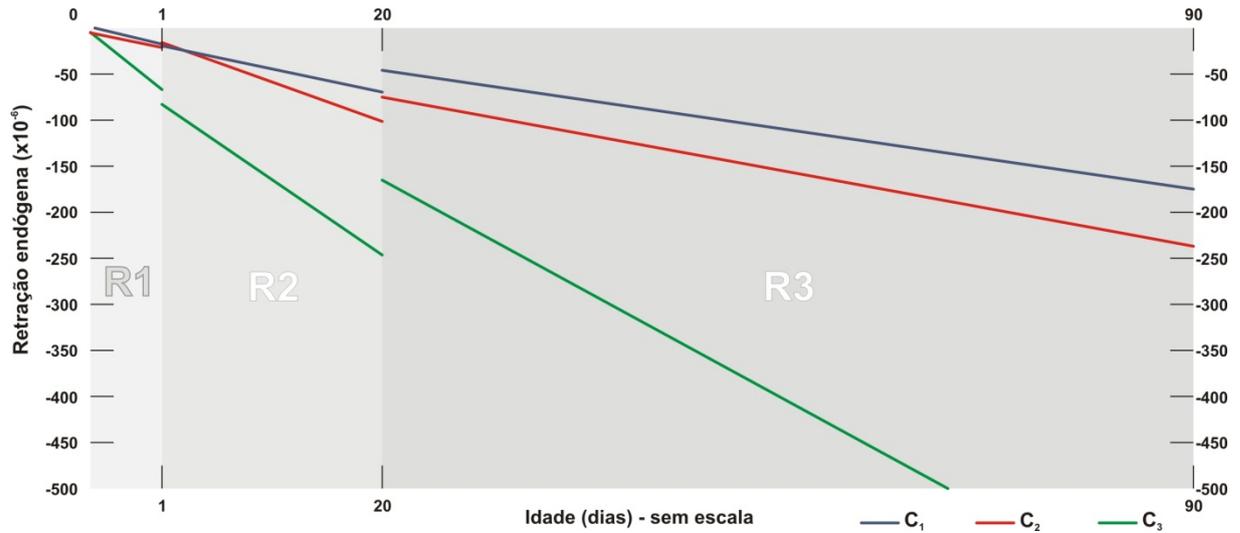


Figura 5.13 – Diferenciação de regimes para os resultados de desenvolvimento de retração endógena, sendo regime R1 do patamar de percolação até 1 dia, regime R2 de 1 a 20 dias e regime R3 de 20 dias até o final das leituras.

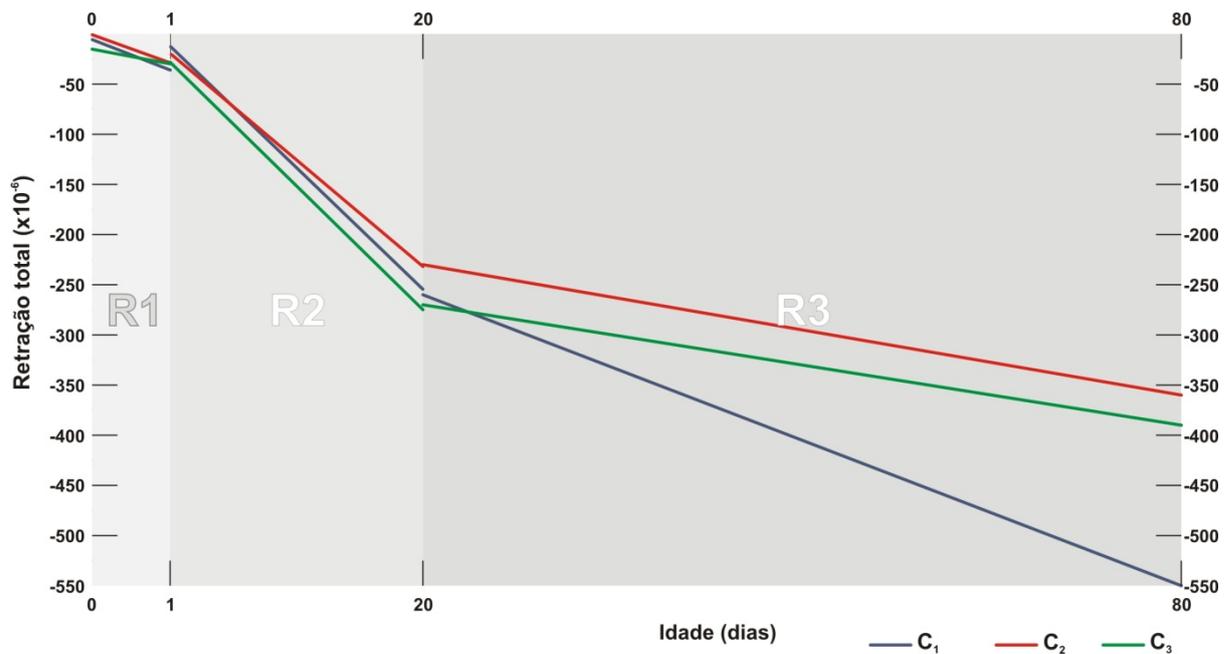


Figura 5.14 – Diferenciação de regimes para os resultados de desenvolvimento de retração total, sendo regime R1 do patamar de percolação até 1 dia, regime R2 de 1 a 20 dias e regime R3 de 20 dias até o final das leituras.

A partir da separação e linearização dos regimes de retração, foi realizado o cálculo da *velocidade média* com que a retração ocorreu nestes períodos. Os valores de velocidade média de retração para os regimes encontram-se na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Velocidade de desenvolvimento da retração endógena e da retração total ao longo da idade, para os regimes R1, R2 e R3.

Retração	Concreto	$V_{ret}$ (ε/dia)			$V_{retR2}/V_{retR1}$	$V_{retR3}/V_{retR2}$
		R1	R2	R3		
ENDÓGENA	C <sub>1</sub>	-20,37	-2,68	-0,89	12,6%	51,3%
	C <sub>2</sub>	-20,16	-4,73	-1,38	29,1%	39,5%
	C <sub>3</sub>	-75,45	-9,05	-2,83	13,1%	33,6%
TOTAL	C <sub>1</sub>	-34,14	-10,94	-4,28	25,9%	52,7%
	C <sub>2</sub>	-27,70	-10,24	-2,09	38,3%	57,9%
	C <sub>3</sub>	-28,99	-12,59	-1,74	31,1%	62,7%

A distinção na variabilidade dos pontos através da idade indicou que o desenvolvimento da retração endógena foi sensivelmente acentuado do patamar de percolação até 1 dia de idade e, em seguida, de 1 até 20 dias. A partir deste ponto, as retas de tendência apresentaram inclinação diferenciada, inclusive no ponto inicial (correspondente à idade de 20 dias) ocasionando a ausência de intersecção entre as retas referentes ao comportamento de um mesmo concreto entre os regimes R2 e R3.

Para a retração total, nas datas referentes à diferenciação dos regimes (1 e 20 dias de idade), os pontos correspondentes aos valores finais do regime R1 e iniciais do regime R2, para um mesmo concreto, foram próximos. Nos pontos correspondentes aos valores finais do regime R2 e iniciais do regime R3, para um mesmo concreto, também houve proximidade, e no caso do concreto C<sub>2</sub>, ocorreu intersecção no ponto intermediário dos dois regimes. Ademais, pela análise dos valores apresentados na Tabela 5.17, verificou-se que, na transição entre regimes houve sensível queda na velocidade de retração, para as três composições.

Considerando o mecanismo da pressão capilar para explicar o desenvolvimento das retrações endógena e total, infere-se que:

- até os 28 dias de idade, a rede porosa dos concretos estudados sofreu efetiva modificação, com sensível redução da porosidade total. Este comportamento pode ser confirmado pela análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, cujos resultados encontram-se no Item 5.4;

- como a formação da rede porosa do material é um processo contínuo, estima-se que, até os 20 dias, parte do refinamento dos poros já havia se processado;
- com os poros capilares formados e preenchidos por quantidade suficiente de água para prosseguimento da autodessecação e da secagem, as maiores velocidades de desenvolvimento da retração endógena e total se deram até os 20 dias;
- após os 20 dias de idade, provavelmente devido tanto à menor disponibilidade de água como ao fato de grande parte do cimento anidro já ter sido hidratado, embora os fenômenos tenham continuado a se desenvolver, a velocidade média foi reduzida ocasionando a diferenciação entre os regimes.

Pelos resultados médios de velocidade de retração endógena, independentemente do regime, o concreto  $C_3$  apresentou maior velocidade de desenvolvimento de retração endógena ao longo do tempo. No caso desta composição, a menor relação água/cimento, o maior consumo de cimento e o uso de sílica ativa podem ter contribuído para o refinamento da rede porosa e para maiores pressões capilares durante a autodessecação, em comparação aos demais concretos. O concreto  $C_2$  apresentou menor velocidade média no regime R1, enquanto a composição  $C_1$  apresentou menor velocidade de retração endógena nos regimes subsequentes. Subseqüentemente, nos regimes R2 e R3, os menores valores de velocidade de retração endógena para a composição  $C_1$  podem estar associados à relação água/cimento e ao menor consumo de cimento deste concreto.

Pelas velocidades apuradas para a retração total, do regime R2 para o regime R3, a velocidade da retração foi sensivelmente reduzida, para todos os concretos. Nos regimes R1 e R3, o concreto  $C_1$  apresentou maior taxa de desenvolvimento da retração, enquanto que no regime intermediário, o concreto  $C_3$  apresentou maiores velocidades, embora as taxas tenham sido próximas para as três composições. Os resultados indicam que nas primeiras horas de desenvolvimento da retração (regime R1) e após 20 dias de idade (regime R3), a maior quantidade de água existente na rede porosa do concreto  $C_1$  provavelmente exerceu maior influência sobre as deformações totais. No regime R2, supõe-se que o refinamento da rede porosa do concreto  $C_3$  e a maior quantidade de cimento ávido por hidratação possam ter ocasionado maiores pressões capilares devido à autodessecação e à secagem.

### 5.2.4 Variação relativa de massa de água

A diferenciação dos resultados de variação relativa de massa de água foi realizada de acordo com os valores médios da variação relativa de massa de água e os respectivos desvios-padrão em relação a leituras subseqüentes, seguindo os mesmos procedimentos desenvolvidos para a velocidade de retração. Nas Figuras 5.15 e 5.16 ilustra-se a diferenciação destes regimes para a variação relativa de massa de água determinada durante os ensaios de retração total e retração por secagem, respectivamente. No Apêndice C encontram-se as tabelas (Tabelas C-7 e C-8) com as equações de correlação linear para o desenvolvimento da variação relativa de massa de água ao longo da idade, bem como os coeficientes de correlação e determinação para as curvas.

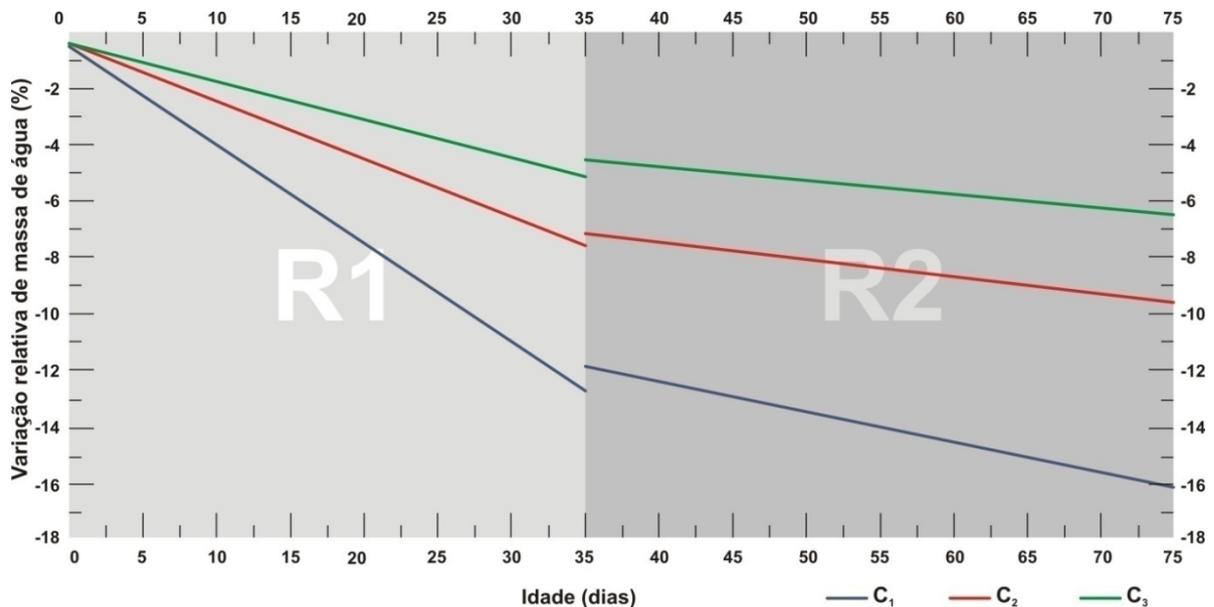


Figura 5.15 – Diferenciação de regimes para os resultados de variação relativa de massa de água durante o ensaio de retração total, sendo regime R1 do patamar de percolação até 35 dias de idade e regime R2 de 35 dias até o final das leituras.

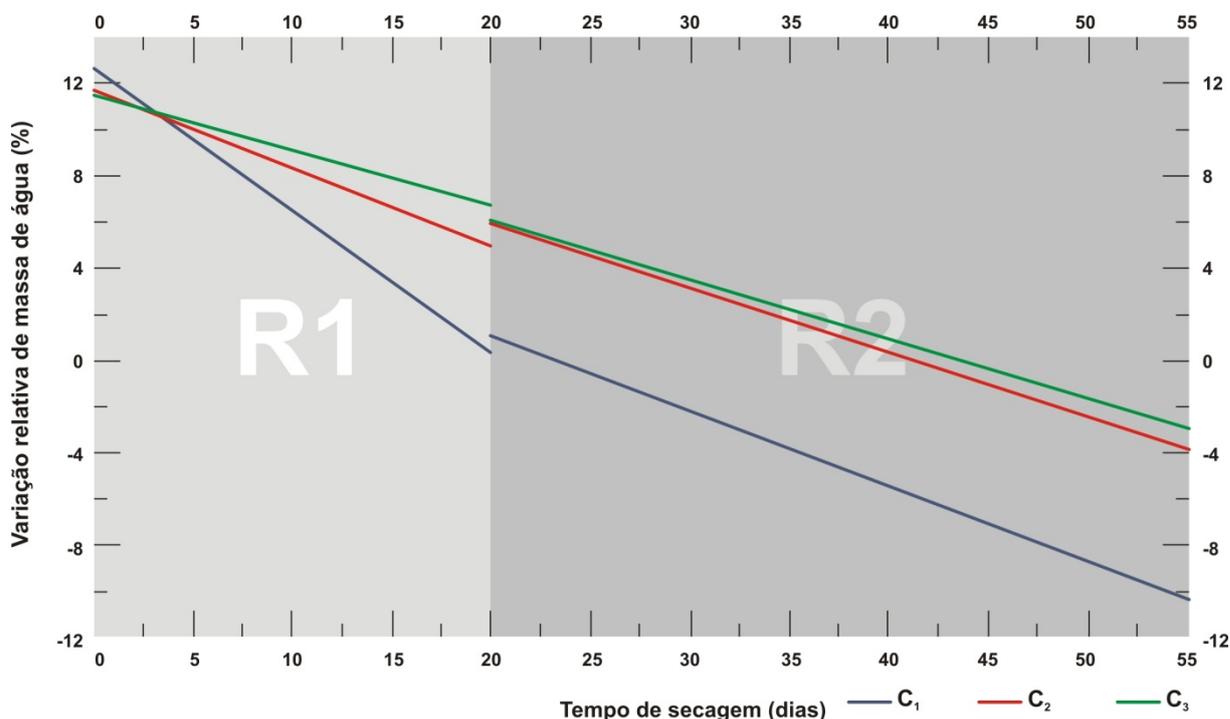


Figura 5.16 – Diferenciação de regimes para os resultados de variação de massa de água durante o ensaio de retração por secagem, sendo regime R1 até os 20 dias de secagem e regime R2 a partir de 20 dias e até o final das leituras.

Os valores registrados de variação relativa de água *versus* idade foram utilizados para calcular os índices dispostos na Tabela 5.18, que correlacionam a *variação relativa de massa de água e a idade* e a *perda de massa de água e a idade*.

Tabela 5.18 – Índices aplicados à análise de variação relativa de massa de água durante os ensaios de retração total e retração por secagem, para os regimes R1 e R2.

Retração	Concreto	Relação entre a variação relativa de massa de água e o tempo de secagem (%/dia)		Relação entre a perda de massa de água e o tempo de secagem (g/dia)	
		R1	R2	R1	R2
TOTAL	C <sub>1</sub>	0,34	0,13	0,65	0,24
	C <sub>2</sub>	0,21	0,07	0,42	0,15
	C <sub>3</sub>	0,13	0,04	0,26	0,09
POR SECAGEM	C <sub>1</sub>	0,62	0,34	1,18	0,66
	C <sub>2</sub>	0,30	0,28	0,62	0,58
	C <sub>3</sub>	0,25	0,23	0,50	0,48

Pela comparação dos índices, percebe-se que, independente do regime em análise, a variação de massa de água no ensaio prescrito pela ASTM C 157 (ASTM, 2004) se processou de forma mais intensa que a saída de água durante as leituras de retração realizadas desde o patamar de

percolação, nos prismas não selados. A comparação entre a perda média de massa de água e o tempo de secagem mostrou que, no regime R1, os índices foram incrementados em aproximadamente 81% para o concreto C<sub>1</sub>, 48% para C<sub>2</sub> e em aproximadamente 92% para o concreto C<sub>3</sub>, após cura submersa. Verifica-se, portanto, que, embora as condições de cura submersa propiciassem a formação de uma rede porosa menos interligada, o fator mais influente para a saída de água durante a execução de leituras foi sua grande disponibilidade nos prismas de concreto, durante a realização das medidas.

Pela análise dos índices relativos aos ensaios de retração total dispostos na Tabela 5.18, verificou-se que, do regime R1 para o regime R2, houve sensível redução na variação relativa de massa de água, independente do concreto em estudo. Assim, para o concreto C<sub>3</sub>, a partir dos 35 dias, a saída de água das amostras foi praticamente insignificante. A comparação indicou que a saída de água dos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> representou aproximadamente 65% e 40% da saída de água do concreto C<sub>1</sub>, independente do regime em análise.

Pelos índices calculados para a variação relativa de água durante os ensaios de retração por secagem, para o concreto C<sub>1</sub>, a partir de 20 dias de secagem, a saída média de água das amostras foi praticamente metade da inicial. No entanto, para os concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, houve variação da saída média de água entre um e outro regime, mas esta variação não foi tão acentuada. No regime R1, durante as medidas de retração por secagem, a comparação indicou que a saída de água dos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> representou 53% e 43% da saída de água do concreto C<sub>1</sub>.

Comprova-se, portanto, que a variação da relação água/cimento e sua contribuição para a maior porosidade do material (maior volume de poros e maior diâmetro destes poros) contribuiu de forma decisiva para a variação relativa de massa de água desta composição, durante o prosseguimento da secagem, tanto nos ensaios de retração total como nos ensaios de retração por secagem.

Ademais, considerando que os valores de absorção apurados para os três concretos foram altos (6,7%, 5,5% e 5,1%, para C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente), independente do traço do concreto, estima-se que as diferenças nos valores de saída de água dos concretos durante as leituras de retração por secagem foi ocasionada principalmente pela interligação da rede porosa dos concretos. No caso do ensaio de retração por secagem, cabe ressaltar que a

quantidade de água na rede porosa foi incrementada pela cura submersa dos concretos. Assim, o concreto de maior relação água/cimento provavelmente apresentava maior interconexão da rede porosa, desenvolvendo saída mais rápida de água, sendo seguido pelos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Dentre os vários fatores que influenciam a saída de água do concreto, cabe destacar a quantidade de água presente na estrutura do material (dependente da relação água/cimento), o diâmetro e a interligação da estrutura de poros, além do desenvolvimento dos meniscos no sistema de poros interconectados. Assim, a diferenciação entre os regimes de variação de massa de água poderia estar relacionada: (i) à maior disponibilidade de água durante os primeiros dias de secagem; (ii) ao mecanismo de transporte dessa água para a face externa dos corpos-de-prova de concreto e (iii) à variação na fase de secagem do material, devido ao aprofundamento da frente úmida através do material, de forma que, no regime R2, o mecanismo principal de saída de água se daria através da difusão a partir da frente úmida.

### **5.2.5 Retração *versus* variação relativa de massa de água**

Os gráficos da Figuras 5.17 e 5.18 ilustram o comportamento da retração total e da retração por secagem, respectivamente, *versus* variação relativa de massa de água apurada durante as leituras. No Apêndice C encontram-se tabelas (Tabelas C-9 e C-10) com as equações de correlação linear aplicadas e os respectivos valores dos coeficientes de correlação e determinação.

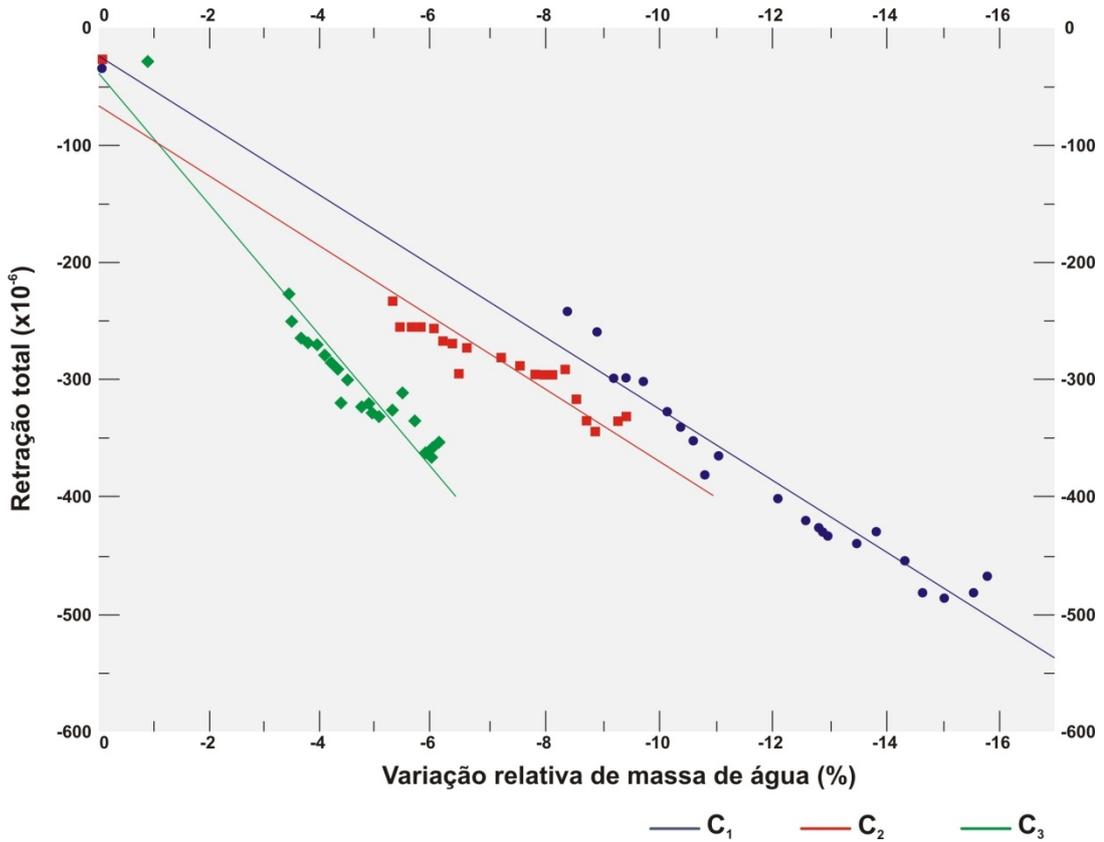


Figura 5.17 – Relação entre a retração total e a variação relativa de massa de água, para as composições C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

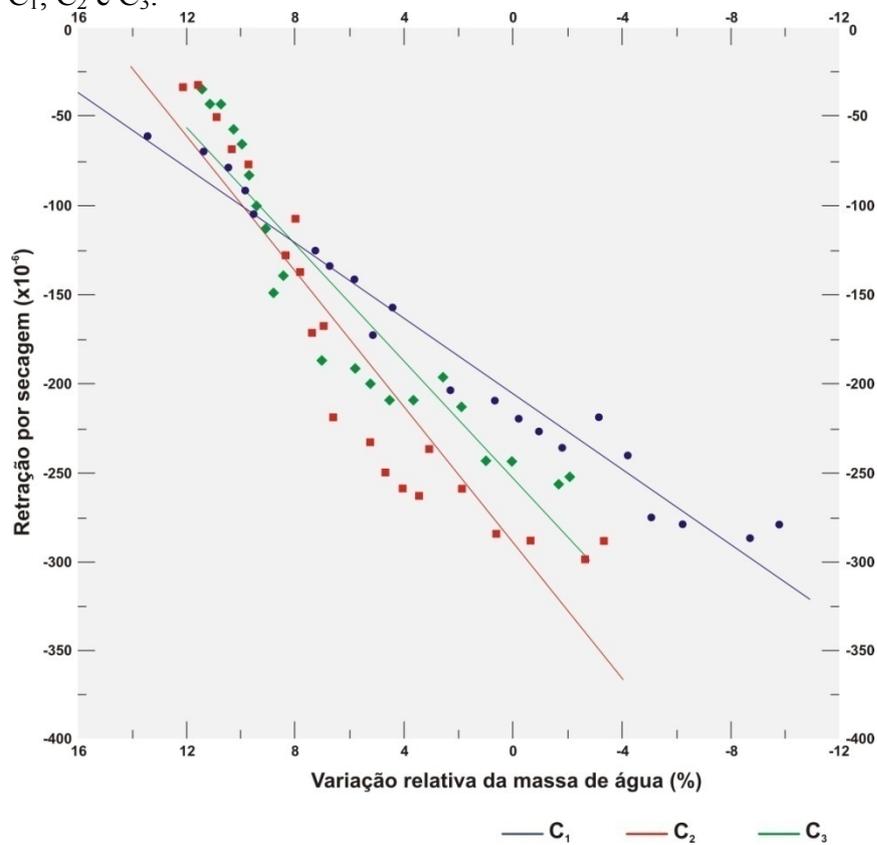


Figura 5.18 – Relação entre a retração por secagem e a variação relativa de massa de água, para as composições C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Pelos pontos ilustrados nos gráficos, verifica-se que existe certa *correlação* entre as duas variáveis, seja para os resultados de retração total ou de retração por secagem. Este comportamento obviamente se deve ao fato de que a retração somente se processa pela ocorrência de variação de massa de água (devido à secagem ou à autodessecação), independente da proporção desta variação ao longo do tempo de secagem.

De modo geral, o comportamento das duas grandezas ao longo do tempo demonstrou variações semelhantes. Assim, durante os primeiros dias, a velocidade da retração foi maior, independentemente do traço do concreto, assim como a variação relativa de massa de água. A partir de alguns dias de secagem, a velocidade do processo se reduziu, provavelmente devido à indisponibilidade de água no sistema (a frente úmida teria se aprofundado no volume do material e a água estaria presente em poros menos interconectados), o que também pode ter contribuído para reduzir a taxa de saída de água destes concretos.

Ademais, pela análise dos gráficos expostos nas Figuras 5.17 e 5.18, ocorreu grande dispersão entre as variáveis e as regressões aplicadas. Segundo Aly e Sanjaian (2009), a retração por secagem nas baixas idades do concreto é governada primordialmente pelas pressões capilares, não estando, necessariamente, relacionada à perda de massa de água. Ademais, uma vez que a perda da água livre não ocasiona retração (Mehta e Monteiro, 2006), o desenvolvimento da retração total ou da retração por secagem não pode ser totalmente explicado pela variação relativa de massa de água no período das leituras.

### **5.2.6 Comparação dos resultados com a literatura**

A compreensão física dos mecanismos incidentes durante os ensaios de retração e a comparação de resultados entre um e outro autor apresenta a limitação de que a determinação experimental pode incluir erros de interpretação que dizem respeito, principalmente, às diferentes técnicas de medição. Essa distinção diz respeito, principalmente, ao início das leituras de retração que pode se iniciar desde uma hora após a mistura como somente após 24 horas. Neste último caso, uma parcela significativa de retração já se processou, denotando que as medidas obtidas provavelmente foram menosprezadas (SILVA, 2007-a). Ademais, concretos de mesma relação água/cimento podem apresentar comportamentos diferenciados devido aos materiais presentes ou aos demais parâmetros de mistura, de modo que a comparação entre concretos deve ser realizada com parcimônia e cuidado, a fim de não

incorrer em enganos relativos à generalização do comportamento do material.

Conforme esperado, as composições com menores relações água/cimento apresentaram os maiores valores de retração endógena. Sabendo que a retração endógena se deve, principalmente, à parcela autógena de retração, conclui-se que concretos de menores relações água/cimento desenvolveram maiores retrações autógenas. Além disso, a maior retração autógena a longo prazo (60 dias) foi alcançada para a composição contendo sílica ativa (C<sub>3</sub>), resultado consistente com as pesquisas reportadas por Brooks *et al.*, (1999) e Esping (2007).

A retração por secagem da composição C<sub>3</sub> foi aproximadamente 11% menor que a retração por secagem da composição C<sub>1</sub>, aos 53 dias. Esta composição também demonstrou menores valores de retração por secagem inicial (24 horas) e intermediárias, embora tenha apresentado 227% de aumento na retração endógena aos 60 dias, se comparada à composição C<sub>1</sub>. Em relação à retração total, os valores das leituras aos 60 dias mostraram redução de aproximadamente 30% e 24%, para C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, em relação à composição C<sub>1</sub>. Este comportamento foi semelhante aos resultados apurados por vários pesquisadores (Weiss, 1999; Esping, 2007, Silva, 2007-a), uma vez que a redução na relação água/cimento correspondeu a uma redução na retração por secagem, embora essa redução não tenha influenciado a magnitude da retração total (devido ao incremento da retração autógena nas composições de menor relação água/cimento). Contabilizando todos os efeitos incidentes, a composição de concreto de maior relação água/cimento (C<sub>1</sub>) apresentou maior retração total após 60 dias.

### 5.3 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS COM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

Para efeitos da análise dos valores de deformação apurados sob carregamento mantido constante nesta pesquisa, toda deformação registrada durante a aplicação e manutenção do carregamento ao longo do tempo, após descontar a parcela devida à deformação elástica imediata foi contabilizada como devida ao potencial de fluência, sem retirar as parcelas devidas ao desenvolvimento da retração de quaisquer naturezas. Esse procedimento foi adotado visando apurar os valores totais de deformação durante a manutenção do carregamento a baixas idades do concreto, sem focalizar a análise distinta das parcelas individuais (retração autógena, retração térmica e retração por secagem). Os resultados serão referidos como potencial de fluência específica, uma vez que, sob manutenção de

carregamento, estima-se que a maior contribuição para o desenvolvimento das deformações tenha se dado pela ocorrência da fluência.

### 5.3.1 Evolução do potencial de fluência específica

A análise dos resultados constantes deste Item foi realizada através da fluência específica, a fim de facilitar a análise do fenômeno, sem a influência da resistência característica de cada composição de concreto. Os resultados apresentados correspondem à média aritmética dos resultados individuais determinados experimentalmente, apresentados no Apêndice B. No Apêndice C encontram-se os gráficos que ilustram o comportamento do potencial de fluência específica média para os concretos estudados, além das respectivas curvas de correlação logarítmicas e coeficientes de determinação aplicados.

Na Tabela 5.19 encontram-se destacados os valores médios do potencial de fluência específica média para os concretos, após 7 e 28 dias de carregamento, de acordo com as respectivas idades de carregamento.

Tabela 5.19 – Valores médios do potencial de fluência específica média para o concreto C<sub>1</sub>, após 7 e 28 dias de aplicação de carregamento.

Concreto	Idade de carregamento (dias)	Condição de exposição do corpo-de-prova	Tempo decorrido de carregamento (dias)	Carregamento mantido (MPa)	Potencial de fluência específica média (x10 <sup>-6</sup> /MPa)
C <sub>1</sub>	3	SELADO	7	5,40	-24,58
			28	5,40	-36,69
		NÃO SELADO	7	5,40	-52,59
			28	5,40	-98,52
	7	SELADO	7	7,00	-27,38
			28	7,00	-40,64
		NÃO SELADO	7	7,00	-54,68
			28	7,00	-92,55
	28	SELADO	7	9,50	-18,45
			28	9,50	-29,60
		NÃO SELADO	7	9,50	-50,11
			28	9,50	-93,17
C <sub>2</sub>	3	SELADO	7	11,25	-19,66
			28	11,25	-29,54
		NÃO SELADO	7	11,25	-39,46
			28	11,25	-68,06
	7	SELADO	7	14,60	-22,12
			28	14,60	-33,42
		NÃO SELADO	7	14,60	-44,35
			28	14,60	-76,47
	28	SELADO	7	17,70	-16,26
			28	17,70	-24,39
		NÃO SELADO	7	17,70	-42,24
			28	17,70	-60,33

Tabela 5.19 – Valores médios do potencial de fluência específica média para o concreto C<sub>1</sub>, após 7 e 28 dias de aplicação de carregamento. (Continuação)

Concreto	Idade de carregamento (dias)	Condição de exposição do corpo-de-prova	Tempo decorrido de carregamento (dias)	Carregamento mantido (MPa)	Potencial de fluência específica média (x10 <sup>-6</sup> /MPa)
C <sub>3</sub>	3	SELADO	7	11,40	-22,49
			28	11,40	-36,84
		NÃO SELADO	7	11,40	-28,30
			28	11,40	-48,81
	7	SELADO	7	15,25	-22,51
			28	15,25	-30,58
		NÃO SELADO	7	15,25	-32,05
			28	15,25	-44,39
	28	SELADO	7	23,50	-9,06
			28	23,50	-14,13
		NÃO SELADO	7	23,50	-14,71
			28	23,50	-22,80

### 5.3.1.1 Análise dos concretos

A análise dos valores dos resultados mostrados na Tabela 5.19 indicou que, independente das condições de revestimento dos corpos-de-prova, o potencial de fluência específica foi inversamente proporcional à resistência dos concretos estudados. Desta forma, o concreto C<sub>1</sub> apresentou maiores deformações, tanto intermediárias como finais, ao longo do tempo de carregamento aplicado. Secundariamente, o concreto C<sub>2</sub> apresentou maiores deformações ao longo do tempo, à exceção das leituras registradas na condição não selada para idade de carregamento de 3 dias.

Considerando que as deformações sob manutenção de carregamento determinadas nesta pesquisa se desenvolveram pelo desenvolvimento concomitante da retração e da fluência, e que, pelos resultados de retração o comportamento de uma e outra composições de concreto variou de acordo com o tipo de retração em análise, conclui-se que o comportamento delineado pelas deformações se deveu, primordialmente, aos mecanismos de desenvolvimento da fluência.

Especificamente em relação ao concreto C<sub>1</sub>, cabe salientar tratar-se de um material obtido com relação água/cimento e teor de argamassa superior aos demais concretos. Uma vez que o mecanismo de fluência a curto prazo está centrado na pasta de cimento hidratado e na movimentação interna da água adsorvida ou interlamelar (Powers, 1968, *apud* Tamtsia e Beaudoin, 2000; Coutinho, 1977, *apud* Kalintzis e Kuperman, 2001; Wittmann, 1982) tanto o maior teor de argamassa como a maior disponibilidade de água na mistura poderiam estar

relacionadas às maiores deformações do concreto  $C_1$ .

Para o concreto  $C_2$ , a diferenciação nas deformações sob ação de carregamento, em relação ao concreto  $C_3$  pode estar associada ao fato de que, tanto pelo maior consumo de cimento como pela adição de sílica ativa na composição  $C_3$ , menor quantidade de água estaria disponível na microestrutura do material para movimentação e difusão. Neste caso, a maior disponibilidade de água para movimentação na microestrutura do concreto  $C_2$  seria responsável por maiores deformações devido ao potencial de fluência específica.

### 5.3.1.2 Análise das idades de aplicação de carregamento

A variação nas idades de aplicação de carregamento demonstrou que, para os concretos  $C_1$  e  $C_2$ , os valores máximos do potencial de fluência específica após 7 e 28 dias de carregamento se deram para concretos carregados aos 7 dias de idade. Considerando que a fluência se dá pela *movimentação da água adsorvida* pelas camadas de C-S-H e que nas idades iniciais do concreto existe *maior disponibilidade de água para difusão*, quanto maior a proporção de C-S-H formado e de água disponível para movimentação, maior a deformação por fluência. Desta forma, para aplicação de carregamento aos 7 dias a influência conjunta destes dois fatores resultou nos maiores valores de deformação dos concretos  $C_1$  e  $C_2$ , em detrimento das demais idades de carregamento.

Para o concreto  $C_3$ , verificou-se que os valores máximos do potencial de fluência específica média, após 28 dias de carregamento, se deram para concretos carregados aos 3 dias de idade. Supõe-se, neste caso, que a adição de sílica ativa tenha contribuído para a formação de maior quantidade de C-S-H antes da data de carregamento (3 dias), comparativamente aos demais concretos. Assim, após a aplicação de carregamento, iniciou-se o processo de movimentação da água através das lamelas de C-S-H para outras regiões da microestrutura do material, acomodando o carregamento e ocasionando o desenvolvimento da deformação.

Pela análise dos gráficos constantes do Apêndice C e dos resultados apresentados na Tabela 5.19, verifica-se que os corpos-de-prova carregados aos 28 dias de idade apresentaram desenvolvimento de deformação notadamente inferior aos corpos-de-prova carregados aos 3 e 7 dias. A explicação para este comportamento pode estar relacionada ao fato de que, após 28 dias, embora grande parte dos produtos de hidratação tenham se formado, existiria menor

disponibilidade de água na microestrutura dos concretos. Desta forma, dentre as datas de aplicação de carregamento, a idade de 28 dias resultou em menores valores de deformação devida ao potencial de fluência específica.

### 5.3.1.3 Análise das condições de revestimento dos corpos-de-prova

A análise geral dos resultados indicou que corpos-de-prova mantidos expostos ao ambiente de laboratório desenvolveram deformações bastante superiores às deformações dos corpos-de-prova selados, chegando à diferença de 214,76% para o concreto C<sub>1</sub>, 147,35% para o concreto C<sub>2</sub> e 61,36% para o concreto C<sub>3</sub>, após 28 dias de carregamento. Pelos resultados obtidos, infere-se que o desenvolvimento da retração por secagem (e autodessecação) e o conseqüente desenvolvimento adicional da fluência por secagem ocasionaram o incremento das deformações ao longo do tempo nos corpos-de-prova submetidos à ação de carregamento. Ademais, de acordo com as porcentagens de variação, as diferenças nas deformações entre condições seladas e não seladas foram inversamente proporcionais à resistência à compressão dos concretos avaliados.

Estes resultados denotam as divergências existentes entre as medidas realizadas em corpos-de-prova selados e as deformações desenvolvidas em condições de obra, onde não se mantêm as condições ideais ao desenvolvimento da hidratação do cimento e manutenção da água no interior do concreto. Embora esta comparação represente uma simplificação do ponto de vista da ordem de grandeza do fenômeno, a análise indica que as deformações associadas ao fenômeno da fluência em condições de obra devem ser notadamente superiores às medidas obtidas durante o ensaio normalizado pela NBR 8224 (ABNT, 1983), pois incluem as parcelas devidas à retração por secagem e à fluência por secagem.

Cabe salientar, pela análise dos gráficos constantes do Apêndice C que, independente da idade de carregamento, o comportamento de deformação por fluência dos corpos-de-prova não selados foi semelhante, ocasionando, em alguns períodos, a sobreposição das curvas relativas aos concretos C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>. Relacionando este comportamento à teoria conceitual da fluência, presume-se que as deformações foram influenciadas sobremaneira pela saída da água presente no interior do concreto para o ambiente. Neste caso, as deformações foram bastante próximas ao longo do tempo, independente da idade de carregamento. Conclui-se, portanto, que o efeito simultâneo da deformação induzida pela carga, da autodessecação e da secagem (para os

corpos-de-prova carregados a baixas idades) ou o efeito isolado da autodessecação e da secagem e posterior aplicação do carregamento aos 28 dias, se processaram de formas semelhantes, ocasionando o comportamento de proximidade nas deformações ao longo do tempo.

#### 5.3.1.4 Tempo de manutenção do carregamento

De modo geral, as deformações obtidas durante manutenção de carregamento foram incrementadas ao longo do tempo, e os comportamentos delineados no início das curvas permanecem inalterados até o final das medidas. Cabe salientar que a variação da relação água/cimento e da resistência dos concretos ocasionou variação no valor máximo do potencial de fluência específica média após 35 dias de carregamento. Para o concreto C<sub>1</sub>, o valor máximo do potencial de fluência específica média para os corpos-de-prova carregados aos 7 dias foi da ordem de  $110 \times 10^{-6}$ /MPa, para o concreto C<sub>2</sub> as deformações médias máximas foram de aproximadamente  $80 \times 10^{-6}$ /MPa e para o concreto C<sub>3</sub>, de  $50 \times 10^{-6}$ /MPa. Verificou-se, portanto, uma relação inversamente proporcional entre as deformações devidas ao potencial de fluência e a resistência à compressão dos concretos.

### 5.4 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS DEVIDO AO DESENVOLVIMENTO DA FLUÊNCIA E DA RETRAÇÃO

A fim de realizar a análise das deformações totais desenvolvidas com e sem aplicação de carregamento, foram plotados os gráficos referentes aos resultados de deformação específica devida à retração endógena *versus* a deformação específica devida ao potencial de fluência dos corpos-de-prova selados e os resultados da deformação específica devida à retração total *versus* a deformação específica devida ao potencial de fluência dos corpos-de-prova não selados. Esta análise permitiu avaliar a diferenciação no desenvolvimento destas deformações comparativamente a cada tipo de concreto estudado, incluindo nesta avaliação a influência dos parâmetros de mistura de cada concreto. Cabe salientar que os pontos demarcados nos gráficos, embora cronologicamente divergentes (as retrações endógena e total estão relacionadas à idade do concreto e o potencial de fluência está relacionado ao tempo de manutenção de carregamento), servem para estimar a influência da retração nas deformações totais desenvolvidas sob manutenção de carregamento. Além disso, os valores de deformação específica dizem respeito aos totais de deformação (sob manutenção de carregamento)

desenvolvidos durante o período de leitura, sem diferenciar os diferentes patamares de tensão aplicados a cada concreto.

Nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 encontram-se os resultados de deformação específica devida à retração endógena *versus* a idade do concreto e os resultados de deformação específica devida ao potencial de fluência dos corpos-de-prova selados *versus* o tempo de carregamento, para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente.

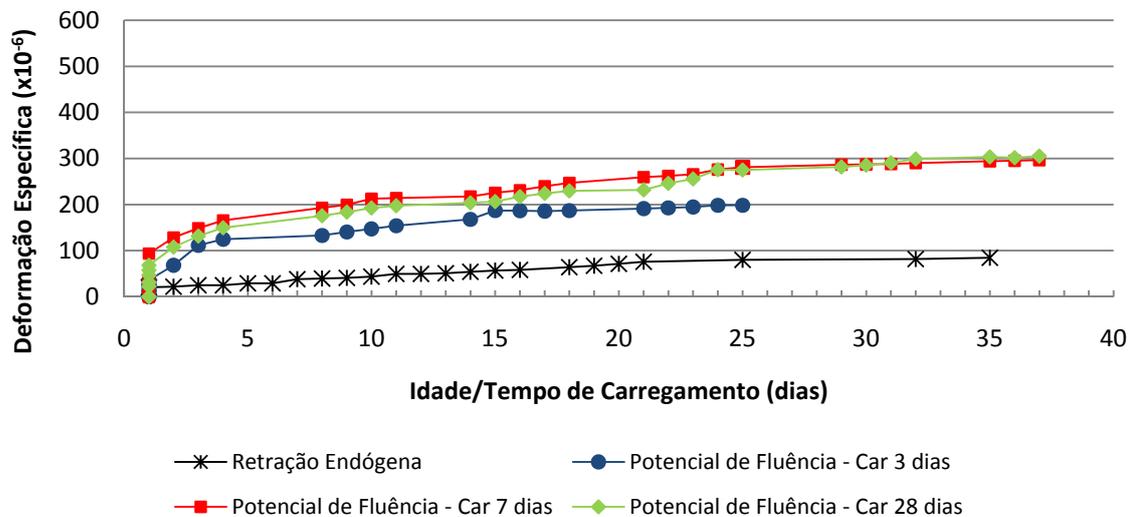


Figura 5.19 – Resultados de deformação específica devida à retração endógena *versus* a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova selados *versus* o tempo de carregamento, para o concreto C<sub>1</sub>.

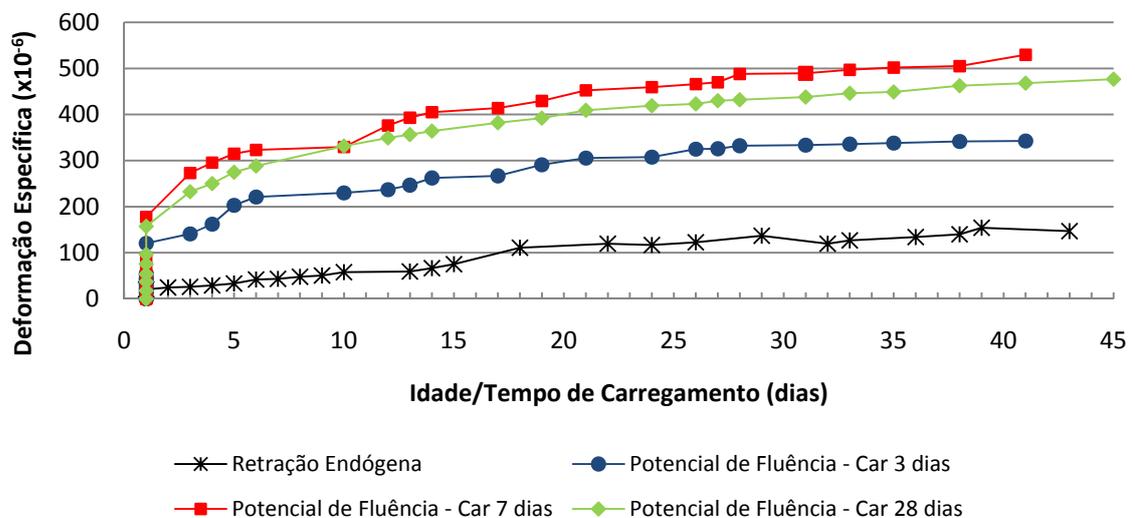


Figura 5.20 – Resultados de deformação específica devida à retração endógena *versus* a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova selados *versus* o tempo de carregamento, para o concreto C<sub>2</sub>.

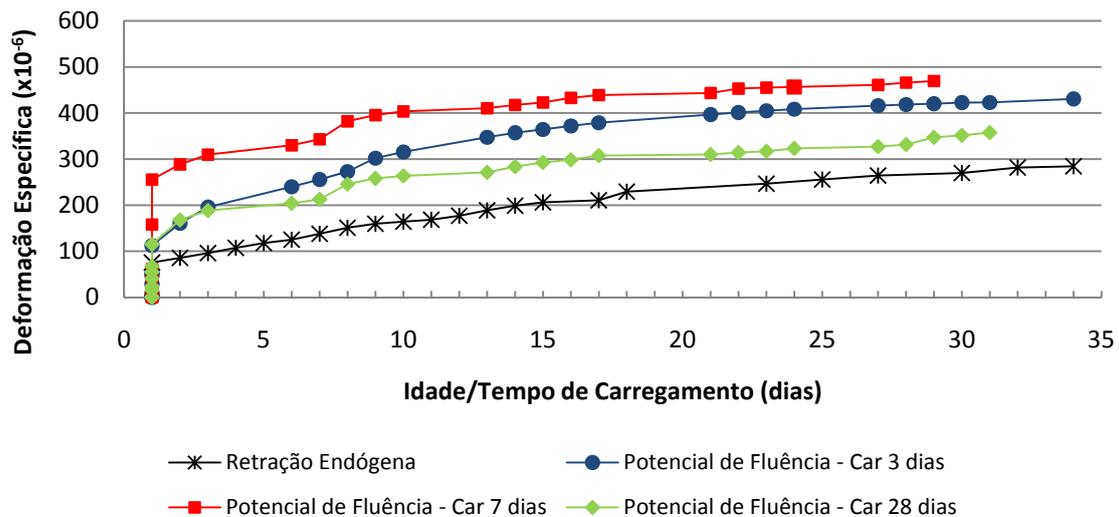


Figura 5.21 – Resultados de deformação específica devida à retração endógena *versus* a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova selados *versus* o tempo de carregamento, para o concreto C<sub>3</sub>.

Pode-se concluir, pela análise dos resultados de deformação específica mostrados nos gráficos das Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 que, independente da idade de carregamento, as deformações específicas durante manutenção de carregamento foram superiores às deformações específicas devidas à retração endógena.

Para aplicação de carregamento aos 3 dias, verificou-se, após 25 dias de carregamento, que a retração endógena representou 40,3%, 36,2% e 61,4% das deformações devidas ao potencial de fluência dos concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente. Para aplicação de carregamento aos 7 dias, essa relação foi da ordem de 28,5%, 24,4% e 55,4% e para carregamento aos 28 dias, a relação entre a retração endógena e a deformação específica total sob manutenção de carregamento foi de 29,1%, 27,1% e 78,1%, para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Estima-se que nos concretos selados, a retração endógena tenha representado uma parcela significativa do desenvolvimento da deformação sob manutenção de carregamento. Pela comparação, essa significância foi maior para o concreto C<sub>3</sub> que, por apresentar baixa relação água/cimento, adição de sílica ativa e maior consumo de cimento, em relação às demais composições, desenvolveu maiores deformações devido à retração endógena.

Independente do concreto, as maiores deformações específicas foram desenvolvidas para aplicação de carregamento aos 7 dias. Conforme mencionado anteriormente, esse comportamento pode estar associado tanto ao processo de hidratação do cimento, e

conseqüente formação do C-S-H, como à quantidade de água adsorvida às lamelas de C-S-H e passível de movimentação. Especificamente para o concreto C<sub>1</sub>, ao final das leituras, as deformações foram praticamente sobrepostas, para aplicação de carregamento aos 7 ou aos 28 dias.

Os valores das deformações, para aplicação de carregamento aos 7 dias, variaram sistematicamente, de forma que, após 35 dias de carregamento, foram desenvolvidas deformações específicas de  $294 \times 10^{-6}$ ,  $502 \times 10^{-6}$  e  $466 \times 10^{-6}$ , para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente. Para menores relações água/cimento e maiores consumos de cimento, as maiores deformações específicas totais dos corpos-de-prova selados podem estar associadas ao maior desenvolvimento da deformação endógena (parcela contributiva do fenômeno).

Nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 encontram-se os resultados de deformação específica devida à retração total *versus* a idade do concreto e os resultados de deformação específica devida ao potencial de fluência dos corpos-de-prova não selados *versus* o tempo de carregamento, para os concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, respectivamente.

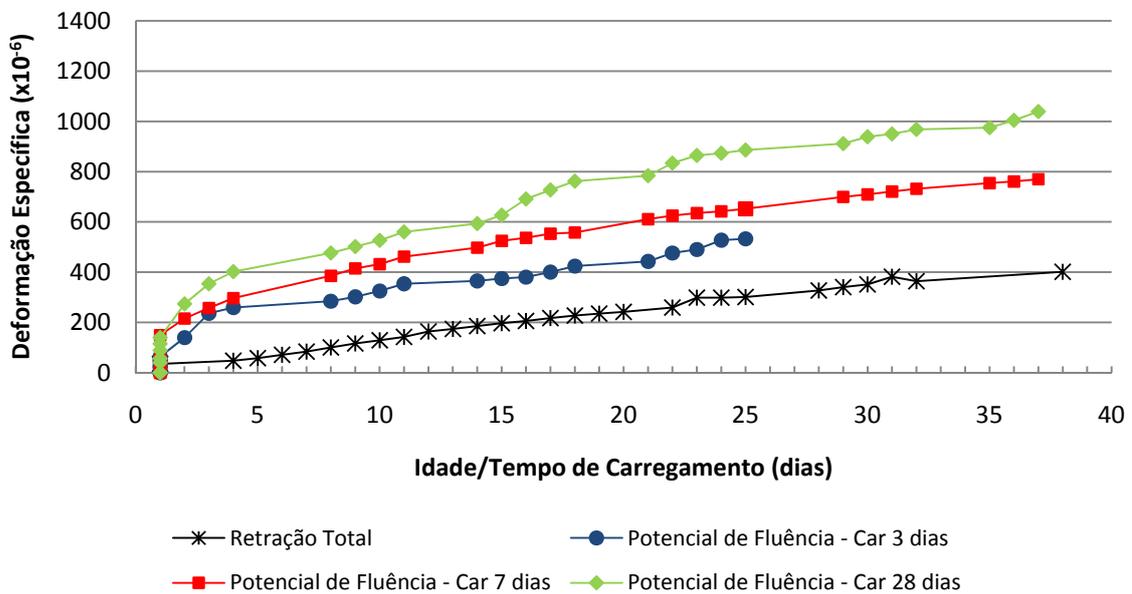


Figura 5.22 – Resultados de deformação específica devida à retração total *versus* a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova não selados *versus* o tempo de carregamento, para o concreto C<sub>1</sub>.

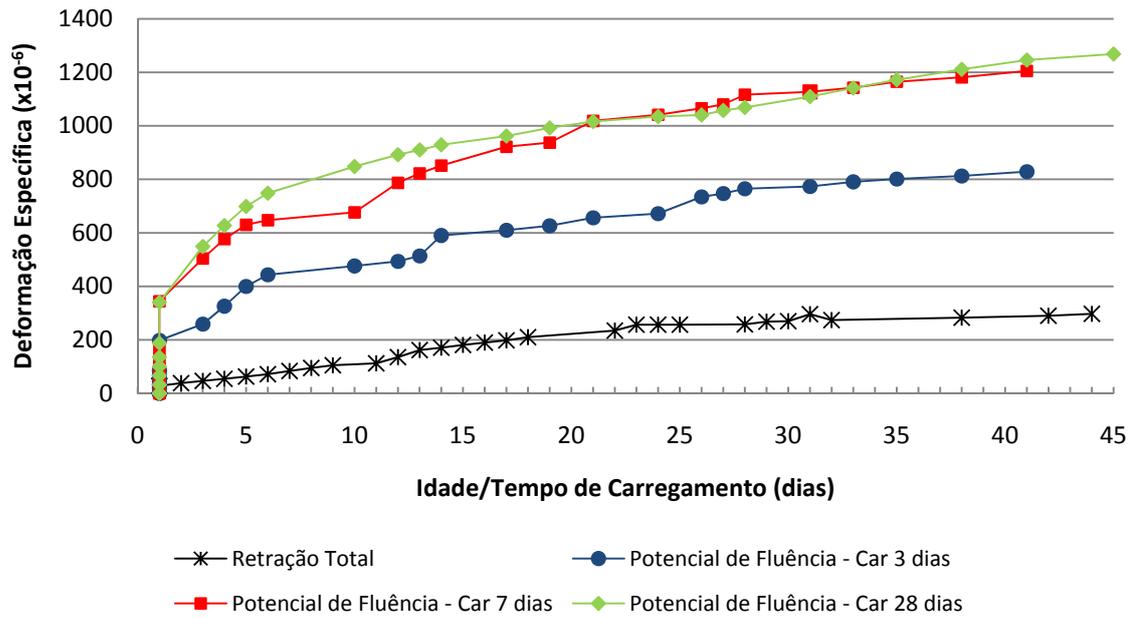


Figura 5.23 – Resultados de deformação específica devida à retração total *versus* a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova não selados *versus* o tempo de carregamento, para o concreto C<sub>2</sub>.

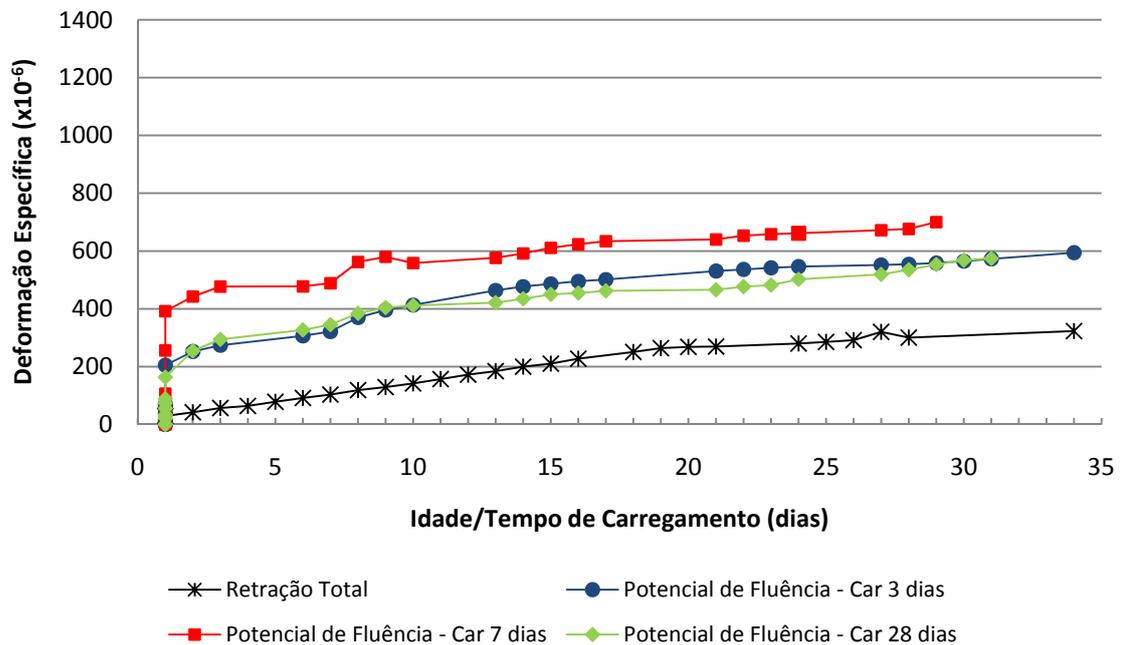


Figura 5.24 – Resultados de deformação específica devida à retração total *versus* a idade do concreto e de deformação específica devida ao potencial de fluência obtida nos corpos-de-prova não selados *versus* o tempo de carregamento, para o concreto C<sub>3</sub>.

Conforme delineado pela análise da retração endógena em relação às deformações sob manutenção de carregamento, as Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 indicaram que, independente da idade de carregamento, as deformações específicas durante manutenção de carregamento

foram superiores à retração total. Ademais, sob influência da secagem, as deformações totais foram sensivelmente incrementadas. Para aplicação de carregamento aos 28 dias, os concretos  $C_1$  e  $C_2$  desenvolveram, respectivamente, deformações máximas de  $1039 \times 10^{-6}$  e  $1269 \times 10^{-6}$ , ao final das leituras. Para o concreto  $C_3$ , a maior deformação registrada foi de  $700 \times 10^{-6}$  para aplicação de carregamento aos 7 dias.

Relacionando a retração total ao potencial de fluência desenvolvido após aplicação de carregamento aos 3 dias, verificou-se que, após 25 dias de carregamento, a retração total representou 56,5%, 34,9% e 51,8% das deformações devidas ao potencial de fluência, para os concretos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , respectivamente. Para aplicação de carregamento aos 7 dias, essa relação foi da ordem de 46,1%, 24,1% e 42,5%. Finalmente, para aplicação de carregamento aos 28 dias, a relação entre a retração total e a deformação específica sob manutenção de carregamento foi de 34,0%, 24,6% e 55,0%, para os concretos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ . Assim, estima-se que nos concretos não selados, a retração total tenha representado uma parcela significativa do desenvolvimento da deformação sob manutenção de carregamento.

Pela comparação, a relação foi mais significativa para o concreto  $C_3$ . Neste caso, nos corpos-de-prova não-selados, tanto a secagem como a autodessecação podem ter contribuído para o comportamento. No caso do concreto  $C_1$ , a influência também foi decisiva. Considerando que, pela relação água/cimento havia maior quantidade de água presente na microestrutura deste material, a contribuição da retração total pode estar mais relacionada à parcela retração por secagem que aos demais tipos de retração incidentes no material.

Pelos comportamentos visualizados nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24, não foi identificada uma determinada idade de carregamento que resultasse em maiores deformações para os três concretos estudados. No caso do concreto  $C_1$ , maiores deformações se desenvolveram para aplicação de carregamento aos 28 dias, sendo seguidas, secundariamente, pelo carregamento aplicado aos 7 dias. Para o concreto  $C_2$ , as deformações desenvolvidas para aplicação de carregamento aos 28 e aos 7 dias após 25 dias de manutenção de carga foram próximas, de forma que, ao final das leituras, os pontos do gráfico da Figura 5.23 se mostraram praticamente sobrepostos. No caso do concreto  $C_3$ , notadamente a aplicação de carregamento aos 7 dias resultou em maiores deformações ao longo do tempo. Para as demais idades de aplicação de carregamento, as deformações foram próximas, e ao final das leituras, os pontos se mostraram praticamente sobrepostos.

Desta forma, não se delineou um comportamento específico de desenvolvimento de deformação sob manutenção de carregamento, denotando a influência de uma vasta gama de variáveis durante os ensaios, principalmente no que diz respeito à ocorrência concomitante da secagem e da autodessecação, além da variabilidade do comportamento microestrutural dos materiais ocasionada pela saída de água durante a formação desta microestrutura. Esse comportamento poderia estar associado, ainda, à hipótese de que, nas condições de execução do ensaio (corpos-de-prova não selados), além da fluência por secagem, se desenvolveria uma parcela adicional de deformação devida à simultaneidade dos fenômenos.

#### 5.4.1 Desenvolvimento da retração e da fluência para os concretos em estudo

Com a finalidade de compilar os resultados evidenciados pelos ensaios aplicados à presente pesquisa, apresentam-se, na Tabela 5.20, os principais comportamentos verificados, para as variáveis aplicadas ao estudo, especificamente no que diz respeito aos fenômenos da retração e da fluência.

Tabela 5.20 – Resumo dos comportamentos evidenciados pela pesquisa.

Parâmetros Avaliados	Retração	
	Endógena	Total
Tipos de concreto	O concreto C <sub>3</sub> apresentou maiores valores de retração, tanto intermediários quanto finais. O concreto C <sub>1</sub> apresentou os menores valores de retração endógena e o concreto C <sub>2</sub> apresentou comportamento intermediário entre os demais concretos.	A partir de 20 dias de idade, somando todos os efeitos, o concreto C <sub>1</sub> apresentou maiores valores de retração. Do início das medidas até os 7 dias de idade, o concreto C <sub>3</sub> apresentou maiores valores de retração total. A partir desta idade, o comportamento do concreto C <sub>3</sub> foi intermediário entre os demais concretos.
Parâmetros de mistura	A influência do consumo de cimento e do teor de pasta foi mais decisiva para a retração endógena, haja vista que, durante as leituras deste tipo de retração, o concreto C <sub>3</sub> desenvolveu maiores valores de retração, tanto intermediários, quanto finais.	
Tipos de concreto	O desenvolvimento do potencial de fluência específica foi inverso ao comportamento da resistência dos concretos estudados. Assim, o concreto C <sub>1</sub> apresentou maior potencial de fluência específica e o concreto C <sub>3</sub> apresentou o menor potencial de fluência específica. O comportamento de C <sub>2</sub> foi intermediário aos demais concretos.	<i>Corpos-de-prova selados:</i> O concreto C <sub>2</sub> desenvolveu as maiores deformações totais durante os ensaios de fluência, sendo seguido pelo concreto C <sub>3</sub> . As deformações totais apresentadas pelos dois concretos superaram as deformações desenvolvidas pelo concreto C <sub>1</sub> em até 67%. <i>Corpos-de-prova não selados:</i> Os concretos C <sub>1</sub> e C <sub>2</sub> apresentaram maiores deformações totais, em comparação ao concreto C <sub>3</sub> . Neste caso, o incremento entre a deformação desenvolvida nos concretos C <sub>1</sub> e C <sub>3</sub> , após 35 dias de carregamento, para aplicação de carregamento na idade de 28 dias, chegou a 75%.
Parâmetros de mistura	A mistura C <sub>1</sub> , que apresentava menor consumo de cimento e menor teor de pasta, desenvolveu maior potencial de fluência específica. Os valores de potencial de fluência se reduziram com o aumento no consumo de cimento e no teor de pasta das demais misturas estudadas.	O concreto C <sub>1</sub> (menor consumo de cimento e menor teor de pasta) apresentou menores valores totais de deformação que os demais concretos. Este comportamento provavelmente se deve à menor resistência deste concreto e, conseqüentemente, à menor tensão aplicada neste concreto, em comparação às demais misturas.

Tabela 5.20 – Resumo dos comportamentos evidenciados pela pesquisa. (Continuação)

Parâmetros Avaliados	Potencial de Fluência	
	Específica	Deformação Total
Idade de aplicação do carregamento	A variação na idade de aplicação de carregamento aos concretos estudados demonstrou que o menor potencial de fluência foi desenvolvido para aplicação de carregamento aos 28 dias. A aplicação de carregamento aos 7 dias ocasionou o desenvolvimento de maior potencial de fluência específica, enquanto a aplicação de carregamento aos 3 dias apresentou comportamento intermediário entre as idades aplicadas ao estudo.	<i>Corpos-de-prova selados:</i> Independente do tipo de concreto, a aplicação de carregamento aos 7 dias ocasionou maiores deformações totais. Para os concretos C <sub>1</sub> e C <sub>2</sub> , a aplicação de carregamento aos 28 dias resultou em deformações intermediárias, enquanto para o concreto C <sub>3</sub> , as deformações ocasionadas pela aplicação de carregamento aos 3 dias foi intermediária às demais idades. <i>Corpos-de-prova não selados:</i> A aplicação de carregamento na idade de 7 dias resultou em maiores deformações totais para os concretos C <sub>2</sub> e C <sub>3</sub> . Para C <sub>1</sub> , a aplicação de carregamento aos 28 dias resultou em maiores deformações.
Condições de revestimento dos corpos-de-prova	Os corpos-de-prova não selados desenvolveram maior potencial de fluência específica que os corpos-de-prova não selados, para todas as misturas e idades de aplicação de carregamento.	Independente da mistura em questão, os corpos-de-prova não selados desenvolveram maiores deformações totais ao longo do tempo.

#### 5.4.2 Análise dos resultados de retração e potencial de fluência em relação à modelagem proposta pelo CEB

Com base nos resultados de retração e potencial de fluência determinados durante os ensaios realizados, foi realizada uma análise comparativa em relação à modelagem proposta por Gilbert (1998) para a retração autógena, bem como em relação à modelagem proposta pelo CEB (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990), para a retração por secagem e para a fluência. Os preceitos metodológicos das modelagens aplicadas, bem como os parâmetros adotados para os cálculos realizados encontram-se no Apêndice F. Os valores obtidos na aplicação das modelagens e os respectivos resultados encontram-se apresentados nas Tabelas 5.21 e 5.22.

Tabela 5.21 - Resultados de retração endógena e total em relação à modelagem proposta por Gilbert (1998).

CONCRETOS	IDADE	RESULTADOS DA PESQUISA		APLICAÇÃO DA MODELAGEM	
		Retração endógena (x10 <sup>-6</sup> )	Retração total (x10 <sup>-6</sup> )	Retração autógena (x10 <sup>-6</sup> )	Retração por secagem (x10 <sup>-6</sup> )
C <sub>1</sub>	3	-24,74	-47,92	+ 2,44	-118,94
	7	-37,85	-84,15	- 1,41	-171,49
	28	-80,06	-327,09	-2,00	-296,87
C <sub>2</sub>	3	-25,94	-46,65	-8,88	-100,90
	7	-43,21	-83,10	-29,99	-136,42
	28	-136,79	-257,82	-77,76	-226,11
C <sub>3</sub>	3	-95,75	-56,53	-9,12	-100,53
	7	-137,87	-102,89	-32,40	-133,45
	28	-264,13	-300,07	-118,27	-176,47

A análise dos resultados obtidos para as medidas de retração endógena realizadas, em comparação à modelagem proposta por Gilbert (1998) foi inconclusiva, devido às discrepâncias nas ordens de grandeza das deformações. Com relação à comparação entre a retração total registrada nos prismas de concreto avaliados pela pesquisa, em comparação à retração por secagem obtida pela aplicação do modelo proposto pelo CEB (1990), verificou-se que, embora os resultados tenham sido diferentes, o comportamento foi representado pelo crescimento ao longo do tempo. Ademais, para os concretos C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>, a comparação dos resultados para a idade de 28 dias demonstrou proximidade dos valores.

Tabela 5.22 - Resultados de potencial de fluência em relação à modelagem proposta pelo CEB (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990), após 35 dias de carregamento.

CONCRETOS	CONDIÇÕES DE REVESTIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA	RESULTADOS DA PESQUISA Deformação específica sob manutenção do carregamento (x10 <sup>-6</sup> )			APLICAÇÃO DA MODELAGEM Deformação específica por fluência (x10 <sup>-6</sup> )		
		Idade de Aplicação do Carregamento					
		3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
C <sub>1</sub>	SELADO	198,50	296,50	305,00	159,19	177,17	227,48
C <sub>2</sub>		342,50	529,50	476,50	152,12	204,43	251,39
C <sub>3</sub>		430,50	469,50	357,50	179,02	206,93	285,47
C <sub>1</sub>	NÃO SELADO	533,98	770,42	1039,32	697,87	781,23	985,17
C <sub>2</sub>		829,23	1205,50	1269,77	666,87	901,45	1088,69
C <sub>3</sub>		594,11	700,08	574,93	784,82	912,47	1236,31

A comparação entre os resultados obtidos pela aplicação do modelo CEB (1990) e os resultados de deformação específica sob manutenção de carregamento constante demonstrou que, especificamente para o concreto C<sub>1</sub> (resistência característica da ordem de 20 MPa), verificou-se certa adequação, independente da idade ou da condição de revestimento dos corpos-de-prova. Para os demais tipos de concreto, não se verificou a possibilidade de aplicação da modelagem para estimativa das deformações para estes tipos de concreto, submetidos às condições aplicadas a esta pesquisa.

As inadequações observadas, nas comparações realizadas entre os resultados das modelagens e os resultados das deformações registradas nesta pesquisa, podem estar associadas: (i) às propriedades das misturas em estudo (obtidas com uso de materiais com propriedades diferentes daqueles utilizados na obtenção das expressões), (ii) à incidência de um fator de forma, uma vez que as modelagens podem ser aplicadas à estimativa de deformações em estruturas de grandes dimensões, enquanto os corpos-de-prova utilizados na pesquisa envolveram dimensões reduzidas e (iii) à variabilidade comportamental dos fenômenos em

estudo, o que denota a necessidade adicional de estudos que possibilitem a adequação das modelagens para estimativas mais acertadas da ordem de grandeza das deformações incidentes nas estruturas de concreto.

## 5.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância, ou ANOVA, é uma técnica usada para determinar se as médias de duas ou mais populações são iguais. No caso da pesquisa em curso, a análise de variância foi utilizada para verificar se as variáveis aplicadas ao estudo produziram mudanças sistemáticas nas leituras de retração e do potencial de fluência dos concretos estudados.

### 5.5.1 Análise estatística dos resultados de retração endógena, retração total e retração por secagem

A análise de variância dos resultados de retração endógena, retração total e retração por secagem foi realizada através da comparação entre os valores calculados do Parâmetro de Fischer ( $F_{\text{calc}}$ ) e os valores tabelados ( $F_{\text{tab}}$ ), para o nível de significância de 5% ( $F_{\text{tab}} = F_{\alpha=0,05}(v_1, v_2)$ , onde  $v_1$  e  $v_2$  representam os graus de liberdade do efeito avaliado e do resíduo, respectivamente). Os resultados desta análise foram compilados no Apêndice D e indicaram, pela comparação entre os valores do Parâmetro de Fischer ( $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$ ) que os modelos fatoriais adotados na análise de variância foram significativos, para coeficientes de determinação  $r^2$  iguais a 0,96, 0,98 e 0,97, respectivamente. Desta forma, verificou-se que aproximadamente 97% dos dados apurados pelos resultados de retração seguiram o comportamento interpretado pela análise de variância.

A análise do Parâmetro de *Fischer* para os efeitos isolados evidenciou que o fator mais significativo estatisticamente variou, de acordo com o tipo de retração medida, de forma que:

- para a retração endógena, a composição do concreto foi o fator mais significativo estatisticamente, com valor de  $F_{\text{calc}}$  bastante superior aos demais efeitos testados. Embora em menor nível de significância, a idade de realização da leitura também se revelou significativa;
- para a retração por secagem e para a retração total, o tempo de secagem e a idade de

realização da leitura, respectivamente, foram os fatores mais significantes. Em especial para a retração total, cabe salientar que a variável idade está relacionada tanto ao desenvolvimento da microestrutura do material como à perda de água ao longo do tempo.

- assim, estatisticamente, a retração endógena estaria mais relacionada à relação água/cimento adotada (e aos parâmetros da mistura de concreto em questão) e as retrações por secagem e total seriam influenciadas primordialmente pelo tempo de secagem do material.

Além da significância observada para o efeito das variáveis isoladas, as interações entre os efeitos também resultou significativa para a retração endógena e para a retração total. Nos casos onde o efeito concomitante das duas variáveis foi significativo, pode-se concluir que existiu certa coordenação entre os fatores, de forma que o efeito da *composição do concreto* sobre as retrações endógenas e totais foi afetado pela *idade*, sendo que o mesmo pode ser dito trocando-se a ordem dos fatores.

Nos casos em que o cruzamento entre variáveis decorreu não significativo, como na retração por secagem, pode-se dizer que o efeito da *composição do concreto* sobre a retração por secagem não foi afetado pelo *tempo de secagem* e vice-versa. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que as medidas de retração por secagem se processaram após os 28 dias de idade, quando a microestrutura do material já estava formada, de forma que a variável *tempo de secagem* exerceu a influência mais significativa, não sendo estatisticamente alterado pela *composição do concreto*.

No Apêndice D encontram-se os resultados da análise de variância para verificação da influência das variáveis sobre as deformações registradas sem aplicação de carregamento.

#### 5.5.1.1 Análise estatística dos resultados de variação relativa de massa de água

No Apêndice D encontram-se os resultados da análise de variância para verificação da influência da *composição do concreto* e da *idade* sobre a variação relativa de massa de água durante os ensaios de retração total e retração por secagem. Os resultados indicaram, pela comparação entre os valores do Parâmetro de Fischer ( $F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$ ) que os modelos fatoriais adotados na análise de variância foram significativos, para coeficientes de determinação  $r^2$  iguais a 0,94 e 0,98, respectivamente.

A análise do Parâmetro de Fischer para os efeitos isolados indicou que o fator mais significativo estatisticamente variou, de acordo com o tipo de retração medida. Desta forma, verificou-se que:

- para a variação relativa de massa de água durante a retração por secagem, tanto a *composição do concreto* como o *tempo de secagem* foram significativos estatisticamente, com valor de  $F_{\text{calc}}$  praticamente da mesma ordem de grandeza, conforme mostrado na Tabela D-4 (Apêndice D);
- para a variação relativa de massa de água durante a retração total, a *composição do concreto* foi mais significativa que a *idade/tempo de secagem*.
- independente da retração medida, a variação relativa de massa de água não foi influenciada de forma significativa pela coordenação entre os efeitos da *composição do concreto* e da *idade/tempo de secagem*.

#### 5.5.1.2 Comparação múltipla de médias de resultados de retração

A comparação múltipla de médias foi realizada através do teste de Duncan, a fim de reunir as variáveis aplicadas ao estudo em grupos homogêneos de médias estatisticamente semelhantes e separando médias divergentes. Na Tabela 5.23 apresenta-se o resultado das comparações dos resultados de retração. Cabe ressaltar que a expressão estatística indicativa dos grupos reunidos consiste em barras presentes na parte superior das variáveis, de forma que os grupos são ordenados da esquerda para a direita, no sentido crescente de suas médias.

Tabela 5.23 – Grupos de valores de retração definidos pela comparação múltipla de médias através do teste de Duncan.

Tipo de comparação	Variável	Grupos		
RETRAÇÃO ENDÓGENA	Composição do concreto	$C_1$ (-58,67x10 <sup>-6</sup> )	$C_2$ (-106,35x10 <sup>-6</sup> )	$C_3$ (-184,99x10 <sup>-6</sup> )
RETRAÇÃO POR SECAGEM		$C_3$ (-154,26x10 <sup>-6</sup> )	$C_2$ (-181,71x10 <sup>-6</sup> )	$C_1$ (-184,52x10 <sup>-6</sup> )
RETRAÇÃO TOTAL		$C_2$ (-194,25x10 <sup>-6</sup> )	$C_3$ (-218,28x10 <sup>-6</sup> )	$C_1$ (-251,49x10 <sup>-6</sup> )

A comparação realizada mostrou que, com exceção da retração por secagem, a variável

*composição do concreto* formou grupos estatisticamente diferentes, sendo que as maiores médias de retração endógena se deram para o concreto C<sub>3</sub>. Considerando que a retração endógena representa a influência principal da parcela autógena, este resultado está de acordo com a revisão da literatura (Melo Neto, 2002; Pietra *et al.*, 2003; Kalintzis e Kuperman, 2005; Esping, 2007; Silva, 2007), segundo a qual concretos de menor relação água/cimento e maior consumo de cimento apresentam maior desenvolvimento de retração autógena. Para a retração total, o concreto C<sub>1</sub> teve a maior média apurada. Para a retração por secagem, a média dos grupos C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub> foi semelhante, de forma que as duas composições formaram um grupo estatisticamente equivalente.

As diferenças entre as médias dos grupos formados pelos critérios do teste de Duncan com a variação da relação água/cimento foi de 81%, entre os concretos C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>, e de 74%, entre os concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>, para a retração endógena. Para a retração total, a diferença máxima entre as médias foi de 15%, entre os concretos C<sub>1</sub> e C<sub>3</sub>. Para a retração por secagem, os dois grupos formados tiveram uma variação máxima entre suas médias da ordem de 20%. Pelos valores das médias de retração entre os grupos, infere-se que a *composição do concreto* ocasionou maiores diferenças para a retração endógena que para os demais tipos de retração. Verifica-se, deste resultado, que a ocorrência de secagem entre as leituras de retração por secagem e retração total diminuiu a influência da *composição do concreto* e, portanto, da relação água/cimento no desenvolvimento destes dois tipos de retração.

Cabe salientar que não foi demonstrada neste item a comparação múltipla de médias dos resultados de retração em relação às variáveis idade e tempo de secagem. Estas variáveis abrangeram uma vasta gama de valores, que se agruparam segundo médias próximas, de acordo com idades sucessivas e subseqüentes, não constituindo um comportamento agrupado. Considera-se, portanto, que as idades tiveram comportamento médio estatisticamente diferente.

Ademais, no Apêndice E, encontra-se a análise realizada acerca da influência das variáveis sobre as médias de retração endógena, retração total e retração por secagem, bem como os respectivos intervalos de confiança e desvios-padrão em relação às médias, para análise adicional das variáveis influentes no estudo.

### 5.5.2 Análise estatística dos resultados do potencial de fluência específica

A análise de variância dos resultados das deformações durante manutenção de carregamento contou com a aplicação de quatro variáveis: *composição do concreto* (relacionada à relação água/aglomerante adotada em cada concreto), *adoção ou não de revestimento na superfície dos corpos-de-prova*, *idade de carregamento* e o *tempo transcorrido de carregamento quando da realização das leituras de deformação*. Os resultados indicaram coeficiente de determinação da ordem de 0,90, com significância para o modelo fatorial adotado para a análise, sendo a adoção de revestimento na superfície dos corpos-de-prova o efeito mais significativo, com alto valor de  $F_{\text{calc}}$ , seguido pela *composição do concreto*. Os resultados da análise de variância dos resultados de fluência específica encontram-se mostrados no Apêndice D.

Com exceção da interação entre *superfície do corpo-de-prova x tempo de carregamento*, a análise fatorial para verificar interações duplas, triplas ou quádruplas, entre quaisquer dos fatores e o tempo de carregamento resultou em matrizes sem variância. Sabe-se que a variância equivale a uma medida da dispersão estatística de uma variável aleatória, indicando quão longe seus valores estão da média dos resultados. Nestas interações, os modelos de análise de variância conseguiram explicar os resultados decorrentes da interação entre os fatores e o tempo de carregamento, de forma que a variância do potencial de fluência específica resultou zero. Desta forma, não foi possível atestar significância para a maior parte da interação entre os fatores.

Sabe-se que o fator *tempo de carregamento* está intimamente relacionado à forma como o material se comporta sob a ação continuada do carregamento constante e conseqüentemente ao desenvolvimento da deformação por fluência ao longo do tempo. Assim, o comportamento delineado pela análise estatística indicou que o desenvolvimento da deformação ao longo do tempo pode ser explicado estatisticamente pela análise, quando os fatores são interligados ao tempo de carregamento, sem ocorrência de variância. Presume-se que, para os concretos estudados e interação aplicada aos fatores, o comportamento do potencial de fluência específica se desenvolveu de forma semelhante.

Esta constatação pode ser comprovada através da análise de variância aplicada às deformações totais sob manutenção do carregamento realizadas após um período equivalente

de carregamento. Nestes casos, a análise de variância resultou em modelos completamente adequados, sem a ocorrência de resíduos. Para um mesmo tempo de carregamento, os valores calculados para o parâmetro de Fischer ( $F_{\text{calc}}$ ) foram iguais a zero, constituindo-se insignificantes para todos os níveis de fatores e de interações entre estes fatores.

### 5.5.2.1 Comparação múltipla de médias do potencial de fluência específica

A conclusão do teste de Duncan para as médias de potencial de fluência específica está listada na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 – Grupos de valores de potencial de fluência específica definidos pela comparação múltipla de médias através do teste de Duncan.

<b>Tipo de comparação</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Grupos</b>		
POTENCIAL DE FLUÊNCIA ESPECÍFICA MÉDIA	Composição do concreto	$C_3$ (-21,68x10 <sup>-6</sup> )	$C_2$ (-31,00x10 <sup>-6</sup> )	$C_1$ (-40,91x10 <sup>-6</sup> )
	Superfície dos corpos-de-prova	SELADO (-19,89x10 <sup>-6</sup> )		NÃO SELADO (-42,43x10 <sup>-6</sup> )
	Idade de carregamento	28 dias (-27,36x10 <sup>-6</sup> )	3 dias (-30,70x10 <sup>-6</sup> )	7 dias (-35,56x10 <sup>-6</sup> )
POTENCIAL DE FLUÊNCIA ESPECÍFICA AGRUPAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS APÓS 3 DIAS DE CARREGAMENTO	Composição do concreto	$C_3$ (-18,92x10 <sup>-6</sup> )	$C_2$ (-22,16x10 <sup>-6</sup> )	$C_1$ (-28,80x10 <sup>-6</sup> )
	Superfície dos corpos-de-prova	SELADO (-16,16x10 <sup>-6</sup> )		NÃO SELADO (-30,42x10 <sup>-6</sup> )
	Idade de carregamento	28 dias (-19,28x10 <sup>-6</sup> )	3 dias (-23,52x10 <sup>-6</sup> )	7 dias (-27,07x10 <sup>-6</sup> )
POTENCIAL DE FLUÊNCIA ESPECÍFICA AGRUPAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS APÓS 7 DIAS DE CARREGAMENTO	Composição do concreto	$C_3$ (-21,52x10 <sup>-6</sup> )	$C_2$ (-30,68x10 <sup>-6</sup> )	$C_1$ (-37,96x10 <sup>-6</sup> )
	Superfície dos corpos-de-prova	SELADO (-20,28x10 <sup>-6</sup> )		NÃO SELADO (-39,83x10 <sup>-6</sup> )
	Idade de carregamento	28 dias (-25,14x10 <sup>-6</sup> )	3 dias (-31,18x10 <sup>-6</sup> )	7 dias (-33,85x10 <sup>-6</sup> )

Tabela 5.24 – Grupos de valores de potencial de fluência específica definidos pela comparação múltipla de médias através do teste de Duncan. (Continuação)

Tipo de comparação	Variáveis	Grupos				
POTENCIAL DE FLUÊNCIA ESPECÍFICA AGRUPAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS APÓS 30 DIAS DE CARREGAMENTO	Composição do concreto	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">C<sub>3</sub> (-40,54x10<sup>-6</sup>)</td> <td style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">C<sub>2</sub> (-53,60x10<sup>-6</sup>)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">C<sub>2</sub> (-53,60x10<sup>-6</sup>)</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">C<sub>1</sub> (-71,30x10<sup>-6</sup>)</td> </tr> </table>	C <sub>3</sub> (-40,54x10 <sup>-6</sup> )	C <sub>2</sub> (-53,60x10 <sup>-6</sup> )	C <sub>2</sub> (-53,60x10 <sup>-6</sup> )	C <sub>1</sub> (-71,30x10 <sup>-6</sup> )
	C <sub>3</sub> (-40,54x10 <sup>-6</sup> )	C <sub>2</sub> (-53,60x10 <sup>-6</sup> )				
	C <sub>2</sub> (-53,60x10 <sup>-6</sup> )	C <sub>1</sub> (-71,30x10 <sup>-6</sup> )				
Superfície dos corpos-de-prova	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">SELADO (-32,05x10<sup>-6</sup>)</td> <td style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">NÃO SELADO (-78,25x10<sup>-6</sup>)</td> </tr> </table>	SELADO (-32,05x10 <sup>-6</sup> )	NÃO SELADO (-78,25x10 <sup>-6</sup> )			
SELADO (-32,05x10 <sup>-6</sup> )	NÃO SELADO (-78,25x10 <sup>-6</sup> )					
Idade de carregamento	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">28 dias (-46,60x10<sup>-6</sup>)</td> <td style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">3 dias (-54,94x10<sup>-6</sup>)</td> <td style="text-align: center; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">7 dias (-63,91x10<sup>-6</sup>)</td> </tr> </table>	28 dias (-46,60x10 <sup>-6</sup> )	3 dias (-54,94x10 <sup>-6</sup> )	7 dias (-63,91x10 <sup>-6</sup> )		
28 dias (-46,60x10 <sup>-6</sup> )	3 dias (-54,94x10 <sup>-6</sup> )	7 dias (-63,91x10 <sup>-6</sup> )				

A comparação múltipla de médias dos resultados de fluência específica serviu para corroborar a discussão realizada no Item 5.3, uma vez que todos os fatores aplicados ao potencial de fluência específica média formaram grupos de médias distintas. Desta forma, os resultados da comparação múltipla de médias indicaram que:

- a variação das composições do concreto representou, para as médias dos valores globais do potencial de fluência específica, a formação de três grupos distintos, sendo o concreto C<sub>1</sub> aquele que sofreu maiores deformações médias sob manutenção de carregamento, sem contabilizar os demais efeitos. As diferenças das médias de resultados entre os grupos foram de 43% e 32%, respectivamente, de C<sub>3</sub> para C<sub>2</sub> e de C<sub>2</sub> para C<sub>1</sub>;
- as condições de revestimento da superfície dos corpos-de-prova também formaram grupos distintos, com maiores médias para corpos-de-prova não selados, e diferença entre as médias dos dois grupos da ordem de 113%.
- dentre as datas de aplicação de carregamento, a idade de 7 dias foi a responsável pelas maiores médias de deformação específica por fluência. As diferenças foram da ordem de 12,2% entre as médias dos resultados registrados para aplicação de carregamento aos 28 e aos 3 dias e 16%, entre a aplicação de carregamento realizada aos 3 dias e aos 7 dias.

Foi realizada ainda a comparação múltipla de médias para os resultados do potencial de fluência específica agrupados de acordo com o tempo decorrido de carregamento. Para esta comparação, a única variável cujos fatores formaram grupos distintos, independente do tempo

de carregamento, foi a condição de revestimento dos corpos-de-prova. Para as outras variáveis (composição do concreto e idade de aplicação de carregamento), foram formados grupos de médias correspondentes estatisticamente, conforme mostrado no Apêndice D.

A análise realizada acerca da influência das variáveis sobre as médias do potencial de fluência específica, bem como os respectivos intervalos de confiança e desvios-padrão em relação às médias encontram-se no Apêndice E.

## 6 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões delineadas a partir dos resultados discutidos nos Capítulos 5, considerando a influência das variáveis sobre as deformações desenvolvidas com ou sem aplicação de carregamento.

### 6.1 SOBRE OS OBJETIVOS PROPOSTOS

Os ensaios de verificação da retração e da fluência envolvem a leitura de deformações com ordens de grandeza pequenas, mas de importância considerável, uma vez que os encurtamentos subseqüentes culminam na perda de rigidez dos elementos, desenvolvimento de deformações diferenciais, fissuração e, para o concreto protendido, na redução das forças de protensão aplicadas. De forma geral, em função da ordem de grandeza envolvida, qualquer desatenção pode reduzir a confiabilidade dos resultados dos ensaios. Além disso, quando se pretende estudar o comportamento do concreto, a dificuldade reside no fato deste ser um material com propriedades e características bastante variáveis, a depender dos parâmetros de dosagem e mistura, das condições de preparo e realização dos ensaios e do ambiente de laboratório.

Considerando que o presente trabalho visou estudar o comportamento de concretos comerciais nas baixas idades, frente ao desenvolvimento de deformações devidas à retração e à fluência, pode-se dizer que os objetivos propostos foram alcançados. Além disso, a metodologia experimental utilizada para acompanhar o desenvolvimento das deformações se mostrou adequada ao estudo, uma vez que foi realizada a reprodução e determinação dos fenômenos em laboratório e os resultados serviram à discussão e ao estabelecimento de hipóteses acerca dos comportamentos evidenciados.

### 6.2 SOBRE OS RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

Pelos resultados apurados, verificou-se que os parâmetros de mistura influenciaram sobremaneira as deformações registradas com ou sem aplicação de carregamento, principalmente porque a formação da microestrutura do material e o conseqüente desenvolvimento da porosidade estão diretamente relacionados à quantidade de água e

consumo de cimento, sendo que o espaço ocupado pela água excedente posteriormente dará origem à rede porosa do material. Além disso, o teor de argamassa e o traço dos agregados graúdos também se revelaram importantes, uma vez que estes parâmetros estão relacionados ao conteúdo das fases que maximizam ou restringem o progresso das deformações. Ademais, as condições de exposição do material e o tempo decorrido entre a mistura e a exposição aos gradientes de umidade exerceram influência significativa, alterando a magnitude das deformações, com ou sem aplicação de carregamento.

Especificamente em relação à retração, verificou-se que a adoção de maiores consumos de cimento, menores relações água/cimento e uso de adições minerais incrementaram os valores finais de deformação, quer devido à autodessecação (pela maior quantidade de cimento anidro ávido por hidratação), quer devido às pressões capilares (pelo refinamento dos poros). Desta feita, além da especificação e verificação da resistência do concreto frente às solicitações, firma-se a importância do controle tecnológico da sua deformabilidade, com vistas à redução da fissuração.

### **6.2.1 Considerações sobre a retração endógena**

A partir dos resultados obtidos, para o período estudado, o desenvolvimento da retração endógena não constituiu uma função logarítmica da idade. A inadequação ocorreu, principalmente, na parte inicial do gráfico (até 20 dias de idade). Este comportamento foi associado ao fato dos resultados estarem contidos em um período (baixas idades) no qual as deformações se processam com expressiva velocidade.

A análise do gráfico de desenvolvimento da retração endógena indicou a existência de três regimes, sendo o regime R1 compreendido no intervalo de 0 (correspondente ao patamar de percolação) a 1 dia, o regime R2 compreendido entre 1 e 20 dias e o regime R3 entre 20 dias até o final das leituras realizadas. O cálculo da velocidade média com que a retração ocorreu nos períodos correspondentes aos regimes linearizados indicou que, independentemente do regime, o concreto C<sub>3</sub> apresentou maior velocidade de desenvolvimento de retração endógena. Dentre os três traços, o concreto C<sub>1</sub> apresentou menor velocidade de retração e também menor variação relativa do regime R1 para o regime R2. O comportamento do concreto C<sub>2</sub> foi intermediário aos demais.

## 6.2.2 Considerações sobre a retração total

### 6.2.1.1 Variação relativa de massa de água

Durante os primeiros 35 dias de secagem, a saída de água se processou de forma suavemente mais acentuada que nos dias subseqüentes. Esta diferenciação foi separada segundo dois regimes específicos de saída de água. Do regime R1 para o regime R2, houve sensível redução na variação relativa de massa de água, de forma que, para o concreto C<sub>3</sub>, a partir dos 35 dias, a saída de água das amostras foi praticamente insignificante. Os valores registrados de variação relativa de água *versus* idade foram utilizados para calcular índices correlacionando a *variação relativa de massa de água e a idade* e a *perda de massa e a idade*. Estes índices ressaltaram as diferenças na saída de água dos concretos estudados, comprovando que a relação água/cimento foi diretamente proporcional à quantidade de água disponível para saída do concreto, durante o prosseguimento da secagem.

### 6.2.1.2 Desenvolvimento da retração total

A análise das deformações totais desenvolvidas nos corpos-de-prova não selados indicou que, somados os efeitos das retrações de origem autógena, térmica e por secagem, o concreto C<sub>1</sub> apresentou maiores valores finais de retração. O comportamento dos concretos C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub> ficou bastante próximo, para o desenvolvimento da retração total ao longo do tempo. Particularmente em relação à análise do concreto C<sub>3</sub>, os valores apurados indicaram que a retração total obtida no sistema não selado, até os 7 dias, foi menor que a retração endógena dos corpos-de-prova selados, sugerindo que o desenvolvimento da microestrutura do concreto na condição selada se processou de forma diferente da condição não selada.

O desenvolvimento da retração total nas baixas idades não seguiu, de forma estrita, a tendência logarítmica, verificando-se que, até aproximadamente 20 dias, a retração total foi próxima para os três concretos em estudo. A partir desta idade, as medidas se distanciaram, evidenciando que o crescimento é maior nas primeiras idades e menor à medida que o tempo avança.

A análise do gráfico de desenvolvimento da retração total indicou a existência de três regimes, sendo o regime R1 compreendido no intervalo de 0 (correspondente ao patamar de

percolação) a 1 dia, o regime R2 compreendido entre 1 e 20 dias e o regime R3 entre 20 dias até o final das leituras realizadas. Pela velocidade da retração total, verificou-se que, no regime R1, a mistura C<sub>1</sub> apresentou maior taxa de desenvolvimento da retração. Nos regimes subsequentes, o concreto C<sub>3</sub> apresentou maiores velocidades, embora as taxas tenham sido próximas para as três misturas. Do regime R2 para o regime R3, a velocidade da retração foi sensivelmente reduzida, em aproximadamente 50%, para todos os concretos.

A *correlação linear* entre a retração total e variação relativa de massa de água evidenciou, através dos coeficientes de correlação, que existe uma tendência semelhante para o desenvolvimento da retração total e da variação relativa de massa de água, para todas as misturas estudadas. No que diz respeito às equações de correlação, tanto os coeficientes de determinação como os desvios em relação às regressões resultaram altos. Pelos valores de  $r^2$  obtidos nas curvas de regressão entre a retração total *versus* variação relativa de massa de água, verificou-se adequação das curvas, de forma que o desenvolvimento simultâneo das duas grandezas pôde ser correlacionado e explicado matematicamente.

### **6.2.3 Considerações sobre a retração por secagem**

Os resultados indicaram diferenças substanciais entre a estimativa de retração por secagem desenvolvida a partir do patamar de percolação e a retração por secagem desenvolvida após 28 dias de cura úmida. Pela dificuldade em adequar um modelo matemático aos valores estimados de retração por secagem, supõe-se que incidam vários fatores intervenientes sobre o fenômeno quando este ocorre conjuntamente aos demais tipos de retração aos quais o concreto encontra-se submetido. Assim, o provimento da cura durante os períodos relativos às maiores velocidades de retração, firma-se como uma providência essencial para compensar o desenvolvimento das deformações por retração, uma vez que a cura úmida se mostrou eficiente em reduzir de forma substancial os efeitos do fenômeno. Nesta esteira, a relação identificada entre o desenvolvimento da retração total e da retração por secagem e a variação relativa de massa de água confirma a importância dos procedimentos de cura, de modo a evitar que as pressões capilares se estabeleçam pelo gradiente de umidade entre o interior do material e o ambiente no qual a estrutura encontra-se inserida.

### 6.3 SOBRE OS RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS COM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

De modo geral, a análise dos valores do potencial de fluência indicou que, independente das condições de revestimento dos corpos-de-prova, as deformações específicas foram inversamente proporcionais à resistência dos concretos estudados. Nesta esteira, as características dos concretos se mostraram influentes no processo, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento da estrutura do material e à quantidade de água presente na microestrutura. Verificou-se ainda que corpos-de-prova não revestidos e expostos às condições de laboratório apresentaram deformações específicas notadamente superiores às deformações desenvolvidas pelos corpos-de-prova selados.

Além das condições de exposição do material ao ambiente, também a idade de aplicação do carregamento ocasionou variações significativas nas deformações apuradas. Estima-se, portanto, que nas estruturas das edificações corriqueiramente carregadas poucas horas após a moldagem, as deformações devidas ao fenômeno da fluência estejam sendo incrementadas significativamente, no que diz respeito ao período incluído nas análises desta pesquisa, a saber, as baixas idades.

Quanto à comparação realizada entre as deformações específicas totais de corpos-de-prova selados sob ação de carregamento e as deformações registradas devido ao desenvolvimento da retração endógena, verificou-se que, independente da idade de carregamento, as deformações específicas durante manutenção de carregamento foram superiores às deformações específicas devidas à retração endógena. No entanto, estima-se que nos concretos selados, a retração endógena tenha representado uma parcela significativa do desenvolvimento da deformação sob manutenção de carregamento. Pela comparação, essa significância foi maior para o concreto C<sub>3</sub>. Independente da mistura de concreto, as maiores deformações específicas foram desenvolvidas para aplicação de carregamento aos 7 dias, constituindo um comportamento que merece um estudo adicional mais aprofundado, para melhor interpretação.

Para a comparação entre as deformações específicas totais de corpos-de-prova não selados sob ação de carregamento e as deformações devidas à retração total, independente da idade de carregamento, as deformações específicas durante manutenção de carregamento foram superiores à retração total. Ademais, sob influência da secagem, as deformações totais foram

sensivelmente incrementadas. Assim, estima-se que nos concretos não selados, a retração total tenha representado uma parcela significativa do desenvolvimento da deformação sob manutenção de carregamento. Pela comparação, essa significância através do tempo, foi mais aplicada ao concreto C<sub>3</sub>. Não ocorreu um comportamento constante de maiores deformações para uma determinada idade de carregamento dos corpos-de-prova. Desta forma, não se delineou um comportamento específico de desenvolvimento de deformação sob manutenção de carregamento, denotando a influência de uma vasta gama de variáveis durante os ensaios, principalmente no que diz respeito à ocorrência concomitante da secagem e da auto-dessecação.

#### 6.4 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Pela profundidade do tema em questão, alguns aspectos relativos às deformações desenvolvidas em função da retração e da fluência merecem nova análise, com enfoque diferenciado, de forma a suprir as dúvidas recorrentes. Assim, sugerem-se como temas para futuras pesquisas:

- Verificação dos regimes de desenvolvimento da retração para outros tipos de concreto a fim de caracterizar o comportamento, interpretar o fenômeno e correlacionar os resultados aos mecanismos teóricos de desenvolvimento da retração e da fluência;
- Análise dos regimes de desenvolvimento da retração em relação ao desenvolvimento da resistência à tração e da fissuração;
- Desenvolvimento de um estudo a fim de associar a distribuição de poros, a variação relativa de massa de água e a retração ao longo do tempo;
- Identificação e quantificação do mecanismo de compensação da retração do concreto devido à cura submersa;
- Desenvolvimento de ensaio para determinação da retração por secagem que exprima de forma mais realística a ocorrência desse tipo de deformação;

- Desenvolvimento de modelos para estimativa da retração e da fluência em concretos comerciais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ØSTERGAARD, L.; LANGE, D. A.; ALTOUBAT, S. A.; STANG, H. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1895-1899, 2001.

AÏTCIN, P. C. Autogenous shrinkage measurement. In: International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete - Autoshrink'98, 1998, Hiroshima. **Proceedings...** Hiroshima: Ed. E. Tazawa, 1998. p. 245-256.

ALEXANDER, M. G.; MILNE, T. I. Influence of cement blend and aggregate type on stress-strain behavior and elastic modulus of concrete. **ACI Materials Journal**, v. 92, n. 3, p. 227-235, 1995.

ALY, T.; SANJAYAN, J. G. Mechanism of early age shrinkage of concretes. **Materials and Structures**, v. 42, p. 461-468, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 157**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. Philadelphia, 2004.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 403**: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. Philadelphia, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 490**: Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. Philadelphia, 2009.

ANDRADE, E. F. R.; GAMBALE, E. A. **Concretos**: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo. São Paulo: Pini, 1997.

ANDRADE, L. B. **Análise da influência da substituição do agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais na fase plástica de concretos**. 2008. 287 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento *Portland* de alta resistência inicial: especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova: procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218**: Agregados - determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8224**: Concreto endurecido - Determinação da fluência. Rio de Janeiro, 1983. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento *Portland*, concreto, argamassa e pasta de cimento *Portland*: especificação. Rio de Janeiro, 1997. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NM 30**: Agregados miúdos - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75  $\mu\text{m}$ , por lavagem. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23 p.

\_\_\_\_\_. **NM 49**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NM 58**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NM 65**: Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NM ISO 7500-1**: Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system. 2004. 17 p.

ATKINS, P.; DE PAULA, J. **Physical chemistry**. 8. ed. Great Britain: Oxford University Press, 2002. 1064 p.

AURICH, M. **Simulação computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades**. 2009. 248 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BALTHAR, V.K.B.L. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**. 2004. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Caracterization des pâtes de ciment et des bétons: methodes, analyse, interpretations**. 1994. 467 f. Thèse de doctorat de L.C.P.C., Paris, 2007.

BASTOS, P. K. X.; CINCOTTO, M. A. **Retração de compósitos à base de cimento**. 2000. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/arquivos/rev25a.pdf>. Acesso em 09 mai. 2007.

BENTZ, D. P.; GEIKER, M. R. HANSEN, K. K. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1075-1085, 2001.

BISSCHOP, J. Drying shrinkage cracking at early ages. In: Early Age Cracking in Cementitious Systems, 2002, France. **Proceedings...** France: RILEM, 2002. p. 47-55.

BOIVIN, S. G. **Retrait au jeune âge du béton: développement d'une method expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène**. 2001. 249 f. Thèse de doctorat de L.C.P.C., Paris, 2001.

BROOKS, J. J.; CABRERA, J. G.; MEGAT JOHARI, M. A. Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete. In: E. Tazawa (Ed), **Autoshrink' 98, Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete**, Hiroshima, p. 195-202, 1999.

BROOKS, J.J.; MEGAT JOHARI, M.A.; MAZLOOM, M. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.22, p.293-301, 2000.

BUIL, M.; ACKER, P. Creep of a silica fume concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 463-466, 1985.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 247 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

CAMPOS FILHO, A. **Análise de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão oblíqua**. 1982. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.

CÁNOVAS, M. F. **Hormigon**. Madrid: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1996.

CARLSON, R. W.; READING, T. J. Model study of shrinkage cracking in concrete building walls. **ACI Structural Journal**, v. 85, n. 4, p. 395-04, 1988.

COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; TROLI, R.; COLLEPARDI, M. Mechanisms of actions of different superplasticizers for high-performance concrete. In: CANMET/ACI International Conference in High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1999, Gramado. **Proceedings...** Gramado: ACI, 1999. p. 503-523.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **Model Code 1990**: design code. Thomas Telford, 1990.

CUNHA, C. H. M. **Deformabilidade das estruturas de concreto: impacto da variabilidade do módulo de elasticidade secante e da resistência à tração, decorrente das modificações dos materiais, cimentos e agregados**. 2000. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DE LARRARD, F.; ACKER, P.; LE ROY, R. Shrinkage creep and thermal properties. In: SHAH, S.P. and AHMAD, S. H. (Eds.), **High Performance Concrete**: properties and applications, New York: McGraw-Hill, p. 65-114, 1994.

DE SCHUTTER, G.; TAERWE, L. Fictitious degree of hydration method for the basic creep of early age concrete. **Materials and Structures**, v. 33, p. 370-380, 2000.

ESPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete: effects of fine aggregate and limestone filler**. 2007. 119 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Civil and Environmental Engineering Building Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2007.

FARINA, L. C. **Caracterização viscoelástica por meio de ensaios de fluência e ruptura por fluência de compósitos poliméricos de matriz epoxídica e fibra de carbono**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2009.

FERRAZ, A. L. N. **Avaliação de retração e fluência do concreto auto-adensável para aplicação em elementos pré-moldados**. 2009. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 2009.

FONTANIVE, J. A. **Análise numérico-experimental de problemas de fluência**. 1982. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.

FREITAS, A. A. **Situações críticas no projeto de edifícios de concreto armado submetidos a ações de construção**. 2004. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

GALLÉ, C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: a comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1467-1477, 2001.

GOMÁ, F. **El cement Portland y otros aglomerantes**. Barcelona: Editores técnicos asociados, 1979. 229 p.

GONÇALVES, R. **Análise de propagação de fissuras por fadiga em concreto pelo MEF mediante a mecânica do dano contínuo**. 2003. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

HANAI, J. B. **Fundamentos do concreto protendido**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2005.

HANSEN, T. C. **Estrutura física da pasta de cimento endurecida**: uma abordagem clássica. 16 p., s.l., s.d.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento *Portland*. **BT/PCC/330**. São Paulo: EPUSP, 2003. 20 p.

HE, Z.; LI, Z.J.; CHEN, M.Z.; LIANG, W.Q. Properties of shrinkage-reducing admixture-modified pastes. **Materials and Structures**, v.39, p. 445-453, 2006.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 p. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, pp. 1457-1468, 1995.

IGARASHI, S. I.; BENTUR, A.; KOVLER, K. Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes. **Cement and Concrete Research**, n.30, p.1701-1707, 2000.

JCI COMMITTEE REPORT OF JAPAN CONCRETE INSTITUTE. “Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete”, 1998, In: E. Tazawa (ed), **Autoshrink’ 98, Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete**, Hiroshima, Japan June, pp. 3-67.

JENSEN, O. M. Thermodynamic limitation of self-desiccation. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 1, pp. 157-164, 1995.

KADRI, E. H.; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, p. 138-142, 2002.

KALINTZIS, C. A. A. **Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho**. 2000. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KALINTZIS, C.A.; KUPERMAN, S.C. Fluência e retração por secagem de concreto de elevada resistência. **Revista Concreto**, Ano XXXIII, p.58-63, 2005.

KONIK, Z.; MALOLEPSZY, J.; ROSZCZYNIANSKI, W.; STOK, A. Production of expansive additive to *Portland* cement. **Journal of the European Ceramic Society**, v.27, p.

605-609, 2007.

KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. Overview and future trends of shrinkage research. **Materials and Structures**, v. 39, pp. 827-847, 2006.

LEE, Y.; YI, S. T.; KIM, M. S.; KIM, J. K. Evaluation of a basic creep model with respect to autogenous shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1268-1278, 2006.

LI, G.; ZHAO, Y.; PANG, S.; LI, Y. Effective Young's modulus estimation of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 9, p. 1455-1462, 1999.

LIMA, C. R. N. **Análise da deformação por fluência em uma viga de concreto armado e protendido: retroanálise e algoritmo genético**. 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

LIU, G. T.; GAO, H.; CHEN, F. Q. Microstudy on creep of concrete at early age under biaxial compression. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1865-1870, 2002.

LOPEZ, M.; KAHN, L. F.; KURTIS, K. E. Characterization of elastic and time-dependent deformations in normal strength and high performance concrete by image analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1265-1277, 2007.

LURA, P. **Autogenous deformation and internal curing of concrete**. 2003. 180 f. Thesis (Doctoral Thesis) – University of Technology, Delft, 2003.

MARÉCHAL, J. C. Le fluage du béton en fonction de la temperature. **Materials and Structures**, v. 2, p. 111-115, 1969.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 659 p.

MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais IFSC – IQSC – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2008. 253 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

MELO NETO, A. A.; CINCOTTO, M. A.; REPETTE, W. L. Efeito do aditivo redutor de retração (SRA) no cimento *Portland* de alta resistência inicial. In: Congresso Construção, 2007, Coimbra. **Proceedings...** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2007.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. 1. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.

MONTIJA, F. C.; FIGUEIREDO, A. D. Alguns aspectos da relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto. **BT/PCC/488**. São Paulo: EPUSP,

2008.

MORIOKA, M.; SAKAI, E.; DAIMON, M. Influence of preparation method on performance of expansive additive containing free - lime, haunyne and anhydrite. **Concrete Research and Technology**, v.14, n.2, 2003.

MORTIMER, R. G. **Physical chemistry**. 3. ed. Canada: Elsevier, 2008. 1385 p.

MOSTAFÁ, N. Y.; BROWN, P. W. Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: isothermal conduction calorimetry. **Termochimica Acta**, v. 435, p. 162-167, 2005.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. Singapore: Longman, 1994. 438 p.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. Retração do concreto de cimento *Portland*. **BT/PCC/453**. São Paulo: EPUSP, 2007. 59 p.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of *Portland* cement. In: Hewlett, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. Oxford: Elsevier, 1998.

OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. 2000. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PIETRA, I.F.D.; HELENE, P.R.L.; FIGUEIREDO, A.D. Influência da dosagem na retração por secagem em concretos. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 45, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003.

PITUBA, J.J.C. **Sobre a formulação de um modelo de dano para o concreto**. 2003. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

POPOVICS, S. **Fundamentals of Portland cement concrete: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1982. 476 p.

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.

PRADO, J. F. M. A.; CORRÊA, M. R. S. Estruturas de edificios em concreto armado submetidas a ações de construção. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 9, p. 51-79, 2002.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland**: estudo em pasta. 2008. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RADOCEA, A. Autogenous volume change of concrete at very early age. **Magazine of Concrete Research**, v. 50, n. 2, p. 107-113, 1998.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado submetidas a pré-carregamento e ações de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço.** 2003. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

RILEM. **NDT 1: Testing of concrete by the ultrasonic pulse method.** France: 1972.

RIXOM, R.; MAILVAGANAM, N. **Chemical admixtures for concrete.** 3. ed. London: E & FN Spon, 1999.

ROZIÈRE, E.; GRANGER, S.; TURCRY, P.; LOUKILI, A. Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, 2007.

SALVADOR, P. F. **Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos.** 2007. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SANTOS, H. C. **Análise de estruturas aperticadas de concreto armado e protendido com a consideração da deformação lenta.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica São Paulo: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

SANTOS, H. C. **Análise de estruturas de concreto sob o efeito do tempo: uma abordagem consistente com consideração da viscoelasticidade, da plasticidade, da fissuração, da protensão e de etapas construtivas.** 2006. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M., Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, 2007.

SHAH, S. P.; WINTER, G. Inelastic behavior and fracture of concrete. In: Symposium on causes, mechanism and control of cracking in concrete, ACI SP-20, 1988, Detroit. **Proceedings...** Detroit: ACI, 1988. p. 5-28.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração.** 2007. 332 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007-a.

SILVA, I. **Análise da redistribuição de esforços em vigas de concreto protendido com seções compostas.** 2003. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso / CHESF: influência da reação nas propriedades do concreto.** 2007. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007-b.

SILVOSO, M. M. **Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéticos.** 2003. 169 f. Tese (Doutorado em

Engenharia Civil) - COPPE, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

STRUBLE, L. J.; LEI, W. G. Rheological changes associated with setting of cement pastes. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, p. 224-230, 1995.

TAMTSIA, B. T.; BEAUDOIN, J. J. Basic creep of hardened cement paste: a re-examination of the role of water. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1465-1475, 2000.

TAMTSIA, B. T.; BEAUDOIN, J. J.; MARCHAND, J. The early age short-term creep of hardening cement paste: load-induced hydration effects. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 481-489, 2004.

TAKEUTI, A. R. **Comportamento resistente imediato e ao longo do tempo de pilares reforçados por meio de encamisamento em concreto de alto desempenho**. 2003. 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. Influence of constituent and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials. **Magazine of Concrete Research**, v. 49, p. 15-22, 1997.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S.; SATO, T. Macroscopic shrinkage of hardening cement paste due to hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 45, p. 528-535, 1995.

VAN BREUGEL, K. Numerical modeling of volume changes at early ages: potential, pitfalls and challengers. **Materials and Structures**, v. 34, n. 239, pp. 293-301, 2001.

VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 2008. 349 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 2008. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

VOCKA, R.; GALLÉ, C.; DUBOIS, M.; LOVERA, P. Mercury intrusion porosimetry and hierarchical structure of cement pastes: theory and experiment. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 521-527, 2000.

WEISS, W. J. **Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete**. 1999. 258 f. Dissertation (Doctor of Philosophy Field of Civil Engineering) – Graduate School, Northwestern University, Evanston, 1999.

WEISS, W. J. Experimental determination of the “time zero”  $t_0$  (maturity-zero  $M_0$ ). In: Early age cracking in cementitious systems, 2002, Cachan. **Proceedings...** Cachan: RILEM, 2002. p. 195-206.

WITTMANN, F. H. Creep and shrinkage mechanisms. In: Bazant P. and Whittmann F. H.

(Eds.), **Creep and shrinkage in concrete structures**, New York: John Wiley & Sons, p. 129-161, 1982.

ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; LEOW, M. P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1687-1694, 2003.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K; BENTUR, A. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, 2004.

## **APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PREPARAÇÃO DOS MOLDES, MOLDAGEM E REVESTIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES SOB MANUTENÇÃO DE CARREGAMENTO**

### *1 Preparação dos moldes e aplicação de concreto nos moldes*

Os equipamentos e acessórios necessários para a preparação do ensaio incluem moldes metálicos cilíndricos de dimensão 150 mm x 300 mm, extensômetros elétricos KM120 da marca Excel Sensores, mostrados na Figura A-1 (a), fio cordonê e um disco metálico. Este disco metálico serve para assegurar a planicidade da face inferior do corpo-de-prova, descartando a necessidade de capeamento e deve conter um orifício centralizado e uma ranhura com origem neste orifício e comprimento igual ao raio do disco, a fim de permitir a passagem do fio do extensômetro, conforme mostrado na Figura A-1 (b) e (c). Além disso, devem ser executados quatro pequenos orifícios diametralmente opostos no molde cilíndrico, sendo dois em cada lado, separados por uma distância próxima ao comprimento do extensômetro utilizado, e outro orifício na base do molde, também para passagem do fio do extensômetro.

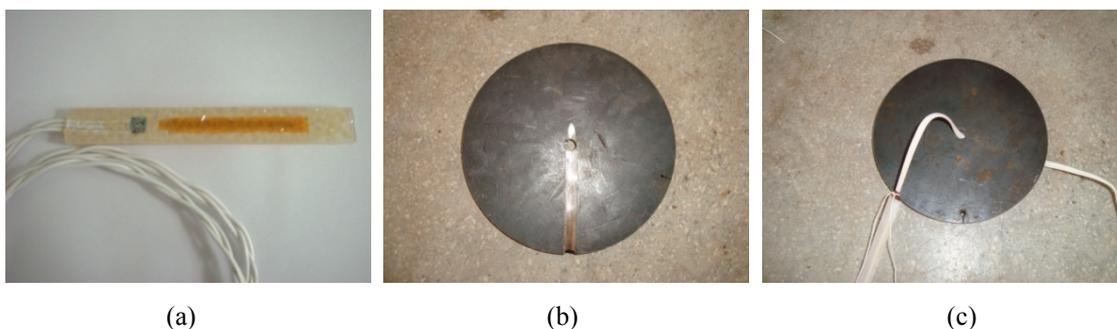


Figura A-1 – Vista do extensômetro utilizado na pesquisa (a); disco metálico a ser colocado no fundo do molde metálico para fixação do fio do extensômetro (b); orifício executado na base do molde para permitir a passagem do fio do extensômetro (c).

Para preparação anterior à moldagem, o disco metálico mostrado na Figura A-1 é posicionado no fundo do molde metálico com a ranhura virada para baixo, seguindo-se a montagem do extensômetro no molde com o auxílio dos fios de cordonê presos nas suas extremidades, conforme mostrado na Figura A-2 (a). O extensômetro é posicionado no centro do molde cilíndrico com o auxílio dos fios que atravessam os orifícios do molde, passando por toda a sua circunferência com o objetivo de posicioná-lo e garantir o seu alinhamento vertical,

conforme mostrado na Figura A-2 (b). Ao final desse procedimento, o molde está pronto para receber o concreto, conforme mostrado na Figura A-2 (c).

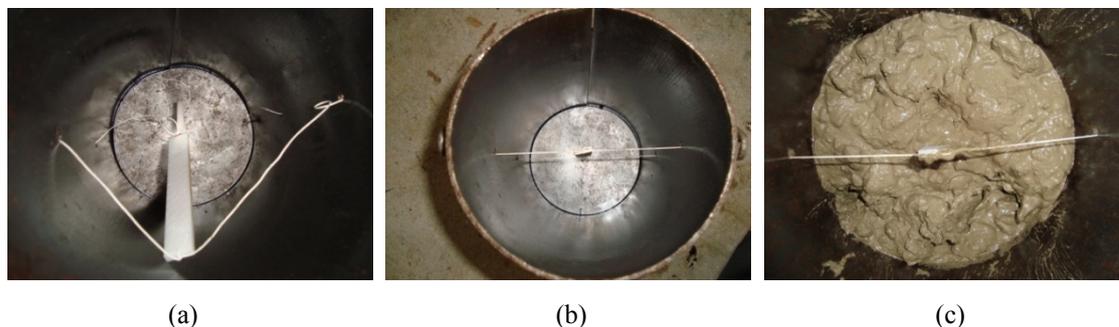


Figura A-2 – Preparação dos moldes e aplicação de concreto: (a) disco metálico colocado no fundo do molde metálico para fixação do fio do extensômetro; (b) posicionamento do extensômetro no centro do molde cilíndrico; (c) aplicação de concreto no molde metálico.

A exemplo do procedimento adotado para determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, a moldagem dos corpos-de-prova foi realizada em duas camadas, com adensamento feito por meio de vibradores internos. Durante o preenchimento do molde, procurou-se colocar quantidades similares de material em cada lado do extensômetro, de forma a mantê-lo na posição centralizada vertical, conforme mostrado na Figura A-2 (c).

O posicionamento dos fios presos ao extensômetro também deve ser observado mesmo após os mesmos terem sido cobertos por completo pelo concreto, pois a força exercida sobre os fios pelo vibrador, durante o adensamento, pode afrouxá-los. Caso isto aconteça, o extensômetro poderá se desalinhar no interior do concreto, ocasionando variações indesejadas nas leituras de deformação. Além disso, durante o adensamento, cuidado especial foi tomado a fim de evitar o contato do vibrador com o extensômetro, uma vez que esta ocorrência pode ocasionar danos à capacidade resistiva do extensômetro. Concluída a aplicação de concreto, os moldes cilíndricos foram acondicionados em sacos plásticos vedados, com panos umedecidos em seu interior, de forma a garantir a cura com 100% de umidade.

## 2 *Desmoldagem e selagem dos corpos de prova*

Completado o período de 24 horas, iniciou-se o processo de desmoldagem dos corpos-de-prova. Nesta etapa, os corpos-de-prova que não receberam revestimento foram submetidos a um período de cura em água saturada com cal até completarem 72 horas da mistura. Os demais corpos-de-prova, destinados a receberem revestimento, foram inicialmente limpos de

resquícios de concreto presente nos discos metálicos. Em seguida, as superfícies e laterais dos corpos-de-prova receberam uma fina película de água, para garantir melhor aderência do filme plástico, que foi aplicado em cinco camadas, conforme mostrado na Figura A-3 (a). Na seqüência, uma camada de fita alumínio foi colocada sobre o filme plástico, conforme mostrado na Figura A-3 (b). As faixas de fita foram coladas com uma sobreposição de aproximadamente 2 cm. No contato entre a fita de alumínio e os discos metálicos, realizou-se o arremate da fita de forma a impedir a saída de água nesta região, conforme mostrado na Figura A-3 (c).

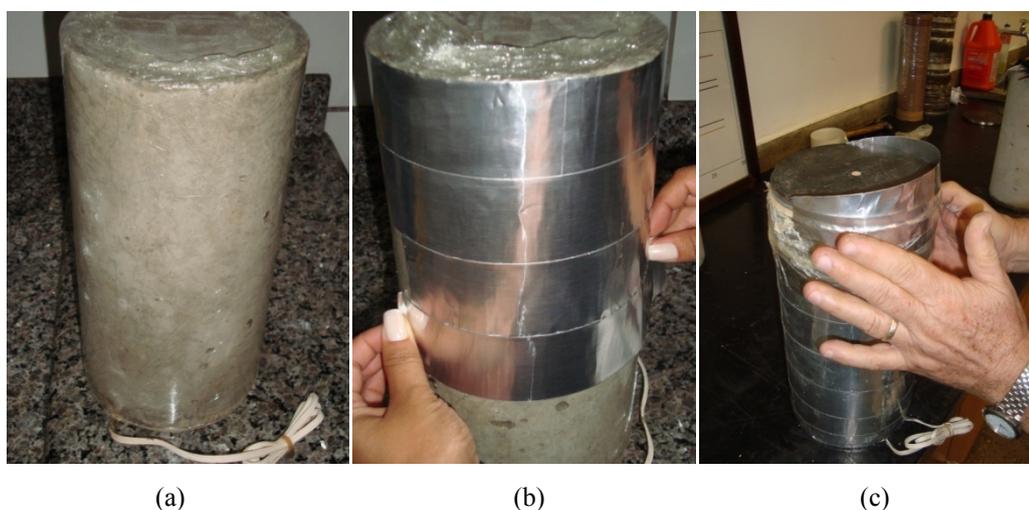


Figura A-3 – Revestimento dos corpos-de-prova para determinação do potencial de fluência: (a) corpo-de-prova revestido com camadas de filme plástico; (b) aplicação de fita alumínio colante; (c) acabamento final do revestimento.

Concluída a selagem dos moldes, um segundo disco metálico foi posicionado no topo dos moldes, através do uso de argamassa de gesso e água, conforme mostrado na Figura A-4 (a). Este segundo disco metálico também se presta a preservar a planicidade do topo dos corpos-de-prova, descartando a necessidade de capeamento. O nivelamento do disco foi verificado através de um nível, conforme mostrado na Figura A-4 (b). Este procedimento deve ser o mais preciso possível, de maneira a possibilitar, no momento do carregamento, o adequado contato do disco metálico presente no topo dos corpos-de-prova com o atuador de carga. Finalmente, realizou-se o arremate da fita alumínio na parte superior do corpo-de-prova, retirando os excessos, conforme mostrado na Figura A-4 (c). Este segundo procedimento de posicionamento e fixação dos discos metálicos foi utilizado na preparação de todos os corpos de prova, selados ou não. Após a selagem, os corpos-de-prova foram mantidos nesta condição até a idade de carregamento. Após completar três dias de idade, os corpos-de-prova não

selados foram retirados da cura e mantidos em condições de total exposição ao ambiente de laboratório ( $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ;  $\text{UR} = 50\% \pm 4\%$ ).

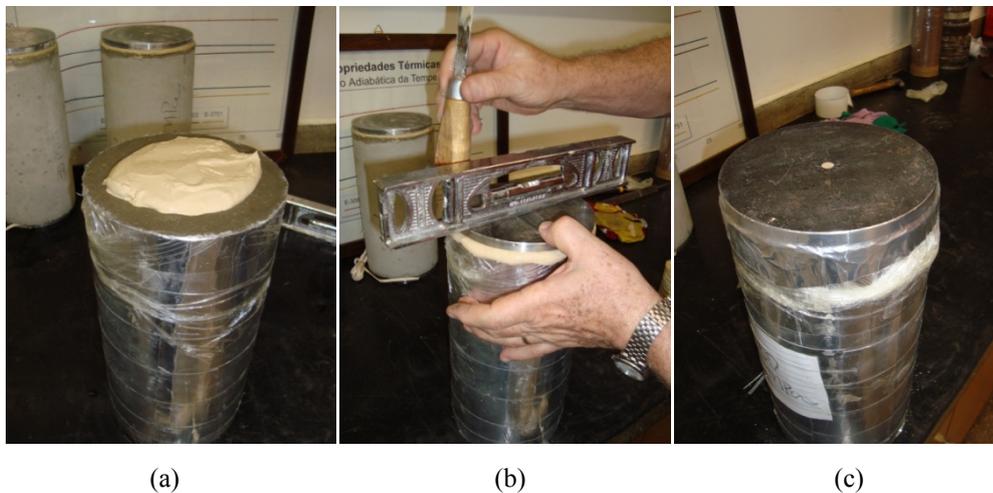


Figura A-4 – Instalação de disco metálico no topo do corpo-de-prova: (a) aplicação de argamassa de gesso e água; (b) nivelamento do disco; (c) acabamento final.

## APÊNDICE B – RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

Tabela B-1 – Resultados das deformações totais – corpos-de-prova não selados determinados antes da desforma – C<sub>1</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP1	E1 CP1	E1 CP 4	Média	$\epsilon_{tot} (x10^6)$
0,25	-8,64304E-06	-4,34405E-06	-2,6287E-05	-1,30914E-05	-13,09
0,38	-4,32152E-06	-1,30321E-05	-3,06681E-05	-1,60073E-05	-16,01
0,5	-8,64304E-06	-2,17202E-05	-3,50493E-05	-2,18042E-05	-21,80
0,875	-1,72861E-05	-3,47524E-05	-4,81928E-05	-3,34104E-05	-33,41
1,25	-2,16076E-05	-2,60643E-05	-5,69551E-05	-3,48757E-05	-34,88
4	-3,45722E-05	-3,90964E-05	-7,00986E-05	-4,79224E-05	-47,92
5	-4,32152E-05	-5,21286E-05	-7,88609E-05	-5,80682E-05	-58,07
6	-5,61798E-05	-7,38488E-05	-8,32421E-05	-7,10902E-05	-71,09
7	-6,91443E-05	-8,25369E-05	-0,000100767	-8,41493E-05	-84,15
8	-7,77874E-05	-0,000104257	-0,000118291	-0,000100112	-100,11
9	-9,07519E-05	-0,000112945	-0,000144578	-0,000116092	-116,09
10	-0,000108038	-0,000125977	-0,000153341	-0,000129119	-129,12
11	-0,000125324	-0,00013901	-0,000162103	-0,000142146	-142,15
12	-0,000155575	-0,00016073	-0,000175246	-0,00016385	-163,85
13	-0,000168539	-0,000169418	-0,000184009	-0,000173989	-173,99
14	-0,000181504	-0,000178106	-0,000197152	-0,000185587	-185,59
15	-0,000194468	-0,000195482	-0,000201533	-0,000197161	-197,16
16	-0,000207433	-0,000199826	-0,000210296	-0,000205852	-205,85
17	-0,000224719	-0,000212858	-0,000214677	-0,000217418	-217,42
18	-0,000233362	-0,000225891	-0,000223439	-0,000227564	-227,56
19	-0,000242005	-0,000234579	-0,00022782	-0,000234801	-234,80
20	-0,000250648	-0,000238923	-0,000236583	-0,000242051	-242,05

Tabela B-2 – Resultados das deformações totais – corpos-de-prova não selados determinados após a desforma – C<sub>1</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 4	Média	$\epsilon$ (x10 <sup>6</sup> )	$\epsilon_{tot}$ (x10 <sup>6</sup> )
22	-2,60643E-05	-8,76232E-06	-1,74133E-05	-1,74133E-05	-17,41	-259,46
23	-6,95048E-05	-4,38116E-05	-5,66582E-05	-5,66582E-05	-56,66	-298,71
24	-6,95048E-05	-4,38116E-05	-5,66582E-05	-5,66582E-05	-56,66	-298,71
25	-6,51607E-05	-5,25739E-05	-5,88673E-05	-5,88673E-05	-58,87	-300,92
28	-9,1225E-05	-7,88609E-05	-8,5043E-05	-8,5043E-05	-85,04	-327,09
29	-0,000104257	-9,20044E-05	-9,81308E-05	-9,81308E-05	-98,13	-340,18
30	-0,000112945	-0,000105148	-0,000109047	-0,000109047	-109,05	-351,10
31	-0,000147698	-0,000131435	-0,000139566	-0,000139566	-139,57	-381,62
32	-0,000130321	-0,00011391	-0,000122116	-0,000122116	-122,12	-364,17
38	-0,00016073	-0,000157722	-0,000159226	-0,000159226	-159,23	-401,28
42	-0,00018245	-0,000175246	-0,000178848	-0,000178848	-178,85	-420,90
44	-0,000186794	-0,000184009	-0,000185401	-0,000185401	-185,40	-427,45
46	-0,000191138	-0,00018839	-0,000189764	-0,000189764	-189,76	-431,82
49	-0,000195482	-0,000197152	-0,000196317	-0,000196317	-196,32	-438,37
52	-0,00018245	-0,000192771	-0,000187611	-0,000187611	-187,61	-429,66
56	-0,000208514	-0,000219058	-0,000213786	-0,000213786	-213,79	-455,84
59	-0,000234579	-0,000245345	-0,000239962	-0,000239962	-239,96	-482,01
63	-0,000238923	-0,000249726	-0,000244324	-0,000244324	-244,32	-486,38
70	-0,000234579	-0,000245345	-0,000239962	-0,000239962	-239,96	-482,01
73	-0,000221546	-0,000232202	-0,000226874	-0,000226874	-226,87	-468,93

Tabela B-3 – Resultados das deformações totais – corpos-de-prova não selados determinados antes da desforma – C<sub>2</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP2	E1 CP 5	E1 CP 6	Média	$\epsilon_{tot}$ (x10 <sup>6</sup> )
0,25	0	-1,31205E-05	-4,3735E-06	-5,83133E-06	-5,83
0,38	0	-2,18675E-05	-8,74699E-06	-1,02048E-05	-10,20
0,5	-4,3735E-06	-3,06145E-05	-2,18675E-05	-1,89518E-05	-18,95
1	-1,31205E-05	-3,4988E-05	-3,4988E-05	-2,76988E-05	-27,70
2	-1,7494E-05	-4,81085E-05	-4,81085E-05	-3,79036E-05	-37,90
3	-2,18675E-05	-6,1229E-05	-5,68555E-05	-4,66506E-05	-46,65
4	-3,06145E-05	-6,1229E-05	-6,99759E-05	-5,39398E-05	-53,94
5	-3,93615E-05	-6,99759E-05	-7,87229E-05	-6,26868E-05	-62,69
6	-4,81085E-05	-7,87229E-05	-8,74699E-05	-7,14338E-05	-71,43
7	-6,1229E-05	-8,74699E-05	-0,00010059	-8,30964E-05	-83,10
8	-6,99759E-05	-0,000104964	-0,000109337	-9,47591E-05	-94,76
9	-7,43494E-05	-0,000118084	-0,000122458	-0,000104964	-104,96
11	-7,87229E-05	-0,000126831	-0,000131205	-0,000112253	-112,25
12	-0,000131205	-0,000139952	-0,000135578	-0,000135578	-135,58
13	-0,00018806	-0,000153072	-0,000144325	-0,000161819	-161,82
14	-0,000192434	-0,000166193	-0,000153072	-0,000170566	-170,57
15	-0,000201181	-0,000179313	-0,000161819	-0,000180771	-180,77
16	-0,000209928	-0,00018806	-0,000170566	-0,000189518	-189,52
17	-0,000218675	-0,000205554	-0,000170566	-0,000198265	-198,27
18	-0,000227422	-0,000218675	-0,000183687	-0,000209928	-209,93

Tabela B-4 – Resultados das deformações totais – corpos-de-prova não selados determinados após a desforma – C<sub>2</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 2	E1 CP 5	E1 CP 6	Média	$\varepsilon$ (x10 <sup>6</sup> )	$\varepsilon_{tot}$ (x10 <sup>6</sup> )
22	-4,3735E-06	-1,74596E-05	-5,21853E-05	-2,46728E-05	-24,67	-234,60
23	-1,31205E-05	-3,92842E-05	-8,69754E-05	-4,646E-05	-46,46	-256,39
24	-1,31205E-05	-3,92842E-05	-8,69754E-05	-4,646E-05	-46,46	-256,39
25	-8,74699E-06	-3,49192E-05	-9,5673E-05	-4,64464E-05	-46,45	-256,37
28	-8,74699E-06	-3,49192E-05	-0,000100022	-4,7896E-05	-47,90	-257,82
29	-1,7494E-05	-4,36491E-05	-0,000113068	-5,80704E-05	-58,07	-268,00
30	-1,7494E-05	-4,36491E-05	-0,000117417	-5,952E-05	-59,52	-269,45
31	-4,3735E-05	-6,98385E-05	-0,000143509	-8,56943E-05	-85,69	-295,62
32	-2,18675E-05	-4,8014E-05	-0,000121766	-6,38824E-05	-63,88	-273,81
38	-3,06145E-05	-5,67438E-05	-0,000130463	-7,26071E-05	-72,61	-282,53
42	-3,06145E-05	-6,11087E-05	-0,000147858	-7,98605E-05	-79,86	-289,79
44	-4,3735E-05	-6,54736E-05	-0,000152207	-8,71385E-05	-87,14	-297,07
46	-4,3735E-05	-6,54736E-05	-0,000152207	-8,71385E-05	-87,14	-297,07
49	-4,3735E-05	-6,54736E-05	-0,000152207	-8,71385E-05	-87,14	-297,07
52	-4,3735E-05	-6,54736E-05	-0,000139161	-8,27897E-05	-82,79	-292,72
56	-6,99759E-05	-9,1663E-05	-0,000160905	-0,000107515	-107,51	-317,44
59	-9,18434E-05	-0,000104758	-0,000182648	-0,000126417	-126,42	-336,34
63	-0,00010059	-0,000113488	-0,000191346	-0,000135141	-135,14	-345,07
70	-8,74699E-05	-0,000104758	-0,000186997	-0,000126408	-126,41	-336,34
73	-8,74699E-05	-0,000100393	-0,000182648	-0,000123504	-123,50	-333,43

Tabela B-5 – Resultados das deformações totais – corpos-de-prova não selados determinados antes da desforma – C<sub>3</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 4	Média	$\varepsilon_{tot}$ (x10 <sup>6</sup> )
0,23	-1,30577E-05	-4,329E-06	-1,7452E-05	-1,16129E-05	-11,61
0,33	-2,17628E-05	-4,329E-06	-2,6178E-05	-1,74233E-05	-17,42
0,5	-3,48205E-05	-1,2987E-05	-3,0541E-05	-2,61162E-05	-26,12
1	-4,78781E-05	-2,1645E-05	-1,7452E-05	-2,89917E-05	-28,99
2	-6,09358E-05	-3,4632E-05	-3,0541E-05	-4,20363E-05	-42,04
3	-7,8346E-05	-4,7619E-05	-4,363E-05	-5,65317E-05	-56,53
4	-8,70511E-05	-6,92641E-05	-3,4904E-05	-6,37397E-05	-63,74
5	-0,000104461	-8,22511E-05	-4,7993E-05	-7,82352E-05	-78,24
6	-0,000121872	-9,09091E-05	-6,1082E-05	-9,12876E-05	-91,29
7	-0,000134929	-9,95671E-05	-7,4171E-05	-0,000102889	-102,89
8	-0,000143634	-0,000116883	-9,5986E-05	-0,000118835	-118,83
9	-0,000152339	-0,00012987	-0,000104712	-0,000128974	-128,97
10	-0,00016975	-0,000142857	-0,000113438	-0,000142015	-142,01
11	-0,000178455	-0,000164502	-0,000126527	-0,000156495	-156,49
12	-0,000200218	-0,000177489	-0,000139616	-0,000172441	-172,44
13	-0,000213275	-0,000186147	-0,000152705	-0,000184043	-184,04
14	-0,000226333	-0,000194805	-0,000178883	-0,000200007	-200,01
15	-0,000239391	-0,000203463	-0,000187609	-0,000210154	-210,15
16	-0,000261153	-0,00021645	-0,000205061	-0,000227555	-227,55

Tabela B-6 – Resultados das deformações totais – corpos-de-prova não selados determinados após a desforma – C<sub>3</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 2	E1 CP 5	E1 CP 6	Média	$\varepsilon$ (x10 <sup>6</sup> )	$\varepsilon_{tot}$ (x10 <sup>6</sup> )
18	-1,30577E-05	-3,0303E-05	-2,6178E-05	-2,31796E-05	-23,18	-250,73
19	-1,30577E-05	-4,7619E-05	-4,7993E-05	-3,62232E-05	-36,22	-263,78
20	-1,74102E-05	-4,7619E-05	-5,6719E-05	-4,05828E-05	-40,58	-268,14
21	-1,74102E-05	-5,19481E-05	-5,6719E-05	-4,20258E-05	-42,03	-269,58
24	-3,48205E-05	-6,06061E-05	-6,1082E-05	-5,21695E-05	-52,17	-279,72
25	-3,48205E-05	-6,92641E-05	-6,9808E-05	-5,79642E-05	-57,96	-285,52
26	-4,78781E-05	-7,35931E-05	-6,9808E-05	-6,37597E-05	-63,76	-291,31
27	-7,39935E-05	-9,95671E-05	-0,000104712	-9,27575E-05	-92,76	-320,31
28	-4,37158E-05	-8,65801E-05	-8,726E-05	-7,25187E-05	-72,52	-300,07
34	-6,96409E-05	-0,000108225	-0,000109075	-9,5647E-05	-95,65	-323,20
38	-6,96409E-05	-0,000103896	-0,000109075	-9,4204E-05	-94,20	-321,76
40	-7,8346E-05	-0,000112554	-0,000113438	-0,000101446	-101,45	-329,00
42	-8,26986E-05	-0,000112554	-0,000113438	-0,000102897	-102,90	-330,45
45	-7,8346E-05	-0,000108225	-0,000109075	-9,85487E-05	-98,55	-326,10
48	-5,65832E-05	-9,52381E-05	-0,000100349	-8,40568E-05	-84,06	-311,61
52	-8,26986E-05	-0,000112554	-0,000126527	-0,00010726	-107,26	-334,81
55	-0,000108814	-0,000142857	-0,000157068	-0,000136246	-136,25	-363,80
59	-0,000113166	-0,000142857	-0,000157068	-0,000137697	-137,70	-365,25
66	-0,000104461	-0,000138528	-0,000148342	-0,000130444	-130,44	-358,00
69	-0,000100109	-0,000134199	-0,000143979	-0,000126096	-126,10	-353,65

Tabela B-7 – Resultados de retração por secagem – Método ASTM C-157 (ASTM, 2004) – C<sub>1</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 3	Média	$\varepsilon$ (x10 <sup>6</sup> )	$\varepsilon_{sec}$ (x10 <sup>6</sup> )
29	-6,51749E-05	-7,8329E-05	-7,00832E-05	-7,11957E-05	-71,20	-61,60
30	-8,68998E-05	-7,8329E-05	-7,43982E-05	-7,98757E-05	-79,88	-70,28
31	-9,12448E-05	-9,13838E-05	-8,3151E-05	-8,85932E-05	-88,59	-78,99
32	-0,00010428	-0,000104439	-9,62801E-05	-0,000101666	-101,67	-92,07
33	-0,000117315	-0,000117493	-0,000109409	-0,000114739	-114,74	-105,14
36	-0,00013904	-0,000139252	-0,000126915	-0,000135069	-135,07	-125,47
37	-0,000143385	-0,000147955	-0,000140044	-0,000143794	-143,79	-134,19
38	-0,00014773	-0,00016101	-0,00014442	-0,000151053	-151,05	-141,45
39	-0,00018249	-0,000195822	-0,000170678	-0,000182997	-183,00	-173,40
40	-0,00016511	-0,000178416	-0,000157549	-0,000167025	-167,02	-157,42
46	-0,00020856	-0,000221932	-0,000210066	-0,000213519	-213,52	-203,92
50	-0,000204215	-0,000234987	-0,000218818	-0,00021934	-219,34	-209,74
52	-0,000221595	-0,00024369	-0,000223195	-0,000229493	-229,49	-219,89
54	-0,000230285	-0,000252393	-0,000227571	-0,00023675	-236,75	-227,15
57	-0,000238975	-0,000261097	-0,000236324	-0,000245465	-245,47	-235,87
60	-0,000221595	-0,00024369	-0,000218818	-0,000228034	-228,03	-218,43
64	-0,00022594	-0,000278503	-0,000245077	-0,00024984	-249,84	-240,24
67	-0,00026939	-0,000313316	-0,000271335	-0,00028468	-284,68	-275,08
71	-0,00027808	-0,000313316	-0,000275711	-0,000289036	-289,04	-279,44
78	-0,00027808	-0,000326371	-0,000284464	-0,000296305	-296,30	-286,70
81	-0,000265045	-0,000317668	-0,000284464	-0,000289059	-289,06	-279,46

Tabela B-8 – Resultados de retração por secagem – Método ASTM C-157 (ASTM, 2004) – C<sub>2</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 3	E1 CP 4	Média	$\varepsilon$ (x10 <sup>6</sup> )	$\varepsilon_{\text{sec}}$ (x10 <sup>6</sup> )
29	-5,20833E-05	-1,74064E-05	-3,93873E-05	-3,62924E-05	-52,08	-34,05
30	-5,20833E-05	-2,61097E-05	-4,37637E-05	-4,06522E-05	-52,08	-34,05
31	-6,94444E-05	-4,35161E-05	-5,25164E-05	-5,5159E-05	-69,44	-51,41
32	-8,68056E-05	-6,52742E-05	-7,00219E-05	-7,40339E-05	-86,81	-68,78
33	-9,54861E-05	-7,8329E-05	-9,19037E-05	-8,85729E-05	-95,49	-77,46
36	-0,000125868	-0,00010879	-0,000109409	-0,000114689	-125,87	-107,84
37	-0,000147569	-0,000126197	-0,000126915	-0,00013356	-147,57	-129,54
38	-0,00015625	-0,000130548	-0,000131291	-0,000139363	-156,25	-138,22
39	-0,000190972	-0,00016101	-0,000170678	-0,00017422	-190,97	-172,94
40	-0,000186632	-0,000156658	-0,000166302	-0,000169864	-186,63	-168,60
46	-0,000238715	-0,000208877	-0,000210066	-0,000219219	-238,72	-220,69
50	-0,000251736	-0,000226284	-0,000227571	-0,000235197	-251,74	-233,71
52	-0,000269097	-0,000234987	-0,000231947	-0,000245344	-269,10	-251,07
54	-0,000277778	-0,00024369	-0,0002407	-0,000254056	-277,78	-259,75
57	-0,000282118	-0,000256745	-0,000249453	-0,000262772	-282,12	-264,09
60	-0,000256076	-0,00024369	-0,000236324	-0,000245363	-256,08	-238,05
64	-0,000277778	-0,0002698	-0,000258206	-0,000268594	-277,78	-259,75
67	-0,000303819	-0,000295909	-0,000280088	-0,000293272	-303,82	-285,79
71	-0,00030816	-0,000300261	-0,000284464	-0,000297628	-308,16	-290,13
78	-0,00031684	-0,000313316	-0,000297593	-0,00030925	-316,84	-298,81
81	-0,00030816	-0,000308964	-0,00028884	-0,000301988	-308,16	-290,13

Tabela B-9 – Resultados de retração por secagem – Método ASTM C-157 (ASTM, 2004) – C<sub>3</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 4	E1 CP 5	E1 CP 6	Média	$\varepsilon$ (x10 <sup>6</sup> )	$\varepsilon_{\text{sec}}$ (x10 <sup>6</sup> )
29	-5,65832E-05	-7,35931E-05	-6,5445E-05	-6,52071E-05	-56,58	-35,25
30	-6,52884E-05	-0,000112554	-6,5445E-05	-8,10958E-05	-65,29	-43,96
31	-6,52884E-05	-0,000125541	-7,4171E-05	-8,83335E-05	-65,29	-43,96
32	-7,8346E-05	-0,000134199	-8,726E-05	-9,99351E-05	-78,35	-57,02
33	-8,70511E-05	-0,00012987	-9,5986E-05	-0,000104302	-87,05	-65,72
36	-0,000104461	-0,000164502	-0,000117801	-0,000128922	-104,46	-83,13
37	-0,000121872	-0,000181818	-0,00013089	-0,00014486	-121,87	-100,54
38	-0,000134929	-0,000199134	-0,000143979	-0,000159348	-134,93	-113,60
39	-0,000170492	-0,000225108	-0,000170157	-0,000188586	-170,49	-149,16
40	-0,000161045	-0,000220779	-0,000161431	-0,000181085	-161,04	-139,71
46	-0,000208923	-0,00025974	-0,000209424	-0,000226029	-208,92	-187,59
50	-0,000213275	-0,000272727	-0,000222513	-0,000236172	-213,28	-191,95
52	-0,00022198	-0,000277056	-0,000226876	-0,000241971	-221,98	-200,65
54	-0,000230686	-0,000281385	-0,000231239	-0,00024777	-230,69	-209,36
57	-0,000230686	-0,000285714	-0,000235602	-0,000250667	-230,69	-209,36
60	-0,000217628	-0,00025974	-0,000226876	-0,000234748	-217,63	-196,30
64	-0,000235038	-0,000277056	-0,000248691	-0,000253595	-235,04	-213,71
67	-0,000265506	-0,00030303	-0,000270506	-0,000279681	-265,51	-244,18
71	-0,000265506	-0,00030303	-0,000279232	-0,000282589	-265,51	-244,18
78	-0,000278564	-0,000320346	-0,000296684	-0,000298531	-278,56	-257,23
81	-0,000274211	-0,000320346	-0,000287958	-0,000294172	-274,21	-252,88

Tabela B-10 – Resultados das deformações endógenas – corpos-de-prova selados determinados antes da desforma – C<sub>1</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP1	E1 CP 4	E1 CP 5	Média	$\varepsilon_{\text{end}} (\times 10^6)$
0,17	0	0	4,37158E-06	1,45719E-06	1,46
0,25	-4,36872E-06	0	0	-1,45624E-06	-1,46
0,58	-8,73744E-06	-8,7203E-06	-4,37158E-06	-7,27644E-06	-7,28
0,67	-4,36872E-06	-8,7203E-06	-8,74317E-06	-7,2774E-06	-7,28
0,83	-1,31062E-05	-1,30804E-05	-1,31148E-05	-1,31005E-05	-13,10
0,99	-1,74749E-05	-1,74406E-05	-1,31148E-05	-1,60101E-05	-16,01
1	-1,74749E-05	-2,61609E-05	-1,74863E-05	-2,0374E-05	-20,37
2	-1,74749E-05	-2,61609E-05	-2,18579E-05	-2,18312E-05	-21,83
3	-2,18436E-05	-3,0521E-05	-2,18579E-05	-2,47409E-05	-24,74
4	-2,18436E-05	-3,0521E-05	-2,18579E-05	-2,47409E-05	-24,74
5	-2,62123E-05	-3,0521E-05	-3,06011E-05	-2,91115E-05	-29,11
6	-2,62123E-05	-3,0521E-05	-3,06011E-05	-2,91115E-05	-29,11
7	-3,0581E-05	-3,92413E-05	-4,37158E-05	-3,78461E-05	-37,85
8	-3,49498E-05	-3,92413E-05	-4,37158E-05	-3,93023E-05	-39,30
9	-3,49498E-05	-4,36015E-05	-4,37158E-05	-4,07557E-05	-40,76
10	-3,93185E-05	-4,79616E-05	-4,37158E-05	-4,36653E-05	-43,67
11	-4,36872E-05	-4,79616E-05	-5,68306E-05	-4,94931E-05	-49,49
12	-4,36872E-05	-4,79616E-05	-5,68306E-05	-4,94931E-05	-49,49
13	-4,36872E-05	-4,79616E-05	-6,12022E-05	-5,09503E-05	-50,95
14	-5,24246E-05	-4,79616E-05	-6,12022E-05	-5,38628E-05	-53,86
15	-5,24246E-05	-5,23218E-05	-6,55738E-05	-5,67734E-05	-56,77
16	-5,24246E-05	-5,66819E-05	-6,55738E-05	-5,82268E-05	-58,23

Tabela B-11 – Resultados das deformações endógenas – corpos-de-prova selados determinados após a desforma – C<sub>1</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 4	Média	$\varepsilon (\times 10^6)$	$\varepsilon_{\text{end acum}} (\times 10^6)$
15	0	0	0	0	0,00	-58,23
18	-8,73744E-06	-4,36015E-06	-4,37158E-06	-5,82306E-06	-5,82	-64,05
19	-8,73744E-06	-1,30804E-05	-4,37158E-06	-8,72982E-06	-8,73	-66,96
20	-1,31062E-05	-1,74406E-05	-8,74317E-06	-1,30966E-05	-13,10	-71,32
21	-1,74749E-05	-1,30804E-05	-2,18579E-05	-1,74711E-05	-17,47	-75,70
25	-1,74749E-05	-2,61609E-05	-2,18579E-05	-2,18312E-05	-21,83	-80,06
32	-1,74749E-05	-2,18007E-05	-3,06011E-05	-2,32922E-05	-23,29	-81,52
35	-2,18436E-05	-2,18007E-05	-3,49727E-05	-2,62057E-05	-26,21	-84,43
39	-2,62123E-05	-2,18007E-05	-3,93443E-05	-2,91191E-05	-29,12	-87,35
40	-2,62123E-05	-2,18007E-05	-4,37158E-05	-3,05763E-05	-30,58	-88,80
41	-2,62123E-05	-2,61609E-05	-4,37158E-05	-3,20297E-05	-32,03	-90,26
46	-2,62123E-05	-3,48812E-05	-5,2459E-05	-3,78508E-05	-37,85	-96,08
48	-3,49498E-05	-3,92413E-05	-4,37158E-05	-3,93023E-05	-39,30	-97,53
50	-3,93185E-05	-4,36015E-05	-4,37158E-05	-4,22119E-05	-42,21	-100,44
53	-3,93185E-05	-4,79616E-05	-4,37158E-05	-4,36653E-05	-43,67	-101,89
55	-3,93185E-05	-5,23218E-05	-4,80874E-05	-4,65759E-05	-46,58	-104,80
57	-4,36872E-05	-5,23218E-05	-4,37158E-05	-4,65749E-05	-46,57	-104,80
60	-4,36872E-05	-5,23218E-05	-4,80874E-05	-4,80321E-05	-48,03	-106,26
61	-5,24246E-05	-6,10421E-05	-4,37158E-05	-5,23942E-05	-52,39	-110,62

Tabela B-12 – Resultados das deformações endógenas – corpos-de-prova selados determinados antes da desforma – C<sub>2</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 4	Média	$\varepsilon_{\text{end}} (\times 10^6)$
0,17	4,30385E-06	4,34594E-06	-4,3122E-06	1,44586E-06	1,45
0,33	-4,30385E-06	0	-8,62441E-06	-4,30942E-06	-4,31
0,42	-8,6077E-06	-8,69187E-06	-1,72488E-05	-1,15161E-05	-11,52
0,5	-8,6077E-06	-1,30378E-05	-1,72488E-05	-1,29648E-05	-12,96
1	-1,72154E-05	-1,73837E-05	-2,58732E-05	-2,01575E-05	-20,16
2	-1,72154E-05	-2,60756E-05	-3,01854E-05	-2,44922E-05	-24,49
3	-1,72154E-05	-3,04216E-05	-3,01854E-05	-2,59408E-05	-25,94
4	-2,15193E-05	-3,04216E-05	-3,44976E-05	-2,88128E-05	-28,81
5	-2,58231E-05	-3,47675E-05	-3,88098E-05	-3,31335E-05	-33,13
6	-3,87347E-05	-4,34594E-05	-4,3122E-05	-4,1772E-05	-41,77
7	-3,87347E-05	-4,34594E-05	-4,74342E-05	-4,32094E-05	-43,21
8	-4,30385E-05	-4,78053E-05	-5,17464E-05	-4,75301E-05	-47,53
9	-4,73424E-05	-5,21512E-05	-5,17464E-05	-5,04134E-05	-50,41
10	-5,59501E-05	-5,64972E-05	-6,03708E-05	-5,7606E-05	-57,61
13	-5,59501E-05	-6,08431E-05	-6,03708E-05	-5,90547E-05	-59,05
14	-6,45578E-05	-6,9535E-05	-6,46831E-05	-6,62586E-05	-66,26
15	-7,31655E-05	-7,82269E-05	-7,33075E-05	-7,48999E-05	-74,90

Tabela B-13 – Resultados das deformações endógenas – corpos-de-prova selados determinados após a desforma – C<sub>2</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 4	Média	$\varepsilon (\times 10^6)$	$\varepsilon_{\text{end acum}} (\times 10^6)$
18	-4,30385E-05	-3,04216E-05	-3,44976E-05	-3,59859E-05	-35,99	-110,89
22	-4,30385E-05	-4,34594E-05	-4,74342E-05	-4,4644E-05	-44,64	-119,54
24	-3,87347E-05	-3,91134E-05	-4,74342E-05	-4,17608E-05	-41,76	-116,66
26	-4,73424E-05	-4,78053E-05	-4,74342E-05	-4,75273E-05	-47,53	-122,43
29	-8,17732E-05	-5,21512E-05	-5,17464E-05	-6,18903E-05	-61,89	-136,79
32	-5,16462E-05	-3,91134E-05	-4,3122E-05	-4,46272E-05	-44,63	-119,53
33	-7,31655E-05	-3,91134E-05	-4,3122E-05	-5,18003E-05	-51,80	-126,70
36	-7,74693E-05	-4,78053E-05	-5,17464E-05	-5,9007E-05	-59,01	-133,91
38	-8,17732E-05	-5,21512E-05	-6,03708E-05	-6,47651E-05	-64,77	-139,67
39	-9,46847E-05	-6,9535E-05	-7,33075E-05	-7,91757E-05	-79,18	-154,08
43	-9,46847E-05	-6,08431E-05	-6,03708E-05	-7,19662E-05	-71,97	-146,87
50	-0,000103292	-6,9535E-05	-6,03708E-05	-7,77328E-05	-77,73	-152,63
53	-9,89886E-05	-6,9535E-05	-6,03708E-05	-7,62981E-05	-76,30	-151,20
57	-9,89886E-05	-6,08431E-05	-5,60586E-05	-7,19635E-05	-71,96	-146,86
58	-0,000103292	-6,9535E-05	-6,03708E-05	-7,77328E-05	-77,73	-152,63
59	-0,0001119	-7,82269E-05	-6,89953E-05	-8,63741E-05	-86,37	-161,27
64	-0,000116204	-7,38809E-05	-7,33075E-05	-8,77975E-05	-87,80	-162,70
66	-0,000116204	-9,56106E-05	-8,19319E-05	-9,79155E-05	-97,92	-172,82
68	-0,000120508	-9,99565E-05	-8,62441E-05	-0,000102236	-102,24	-177,14
71	-0,000124812	-0,000104302	-9,05563E-05	-0,000106557	-106,56	-181,46
73	-0,000129116	-0,000108648	-9,48685E-05	-0,000110877	-110,88	-185,78
75	-0,000129116	-0,00011734	-9,91807E-05	-0,000115212	-115,21	-190,11
78	-0,000129116	-0,00011734	-0,000103493	-0,00011665	-116,65	-191,55
79	-0,000133419	-0,000121686	-0,000116429	-0,000123845	-123,85	-198,74

Tabela B-14 – Resultados das deformações endógenas – corpos-de-prova selados determinados antes da desforma – C<sub>3</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 3	Média	$\epsilon_{\text{end}} (\times 10^6)$
0,17	0	4,34594E-06	4,3122E-06	2,88605E-06	2,89
0,33	-1,72712E-05	-2,1725E-05	-1,31723E-05	-1,73895E-05	-17,39
0,75	-3,88601E-05	-3,91049E-05	-3,9517E-05	-3,91607E-05	-39,16
0,99	-5,18135E-05	-6,95199E-05	-6,14709E-05	-6,09348E-05	-60,93
1	-6,47668E-05	-8,25549E-05	-7,9034E-05	-7,54519E-05	-75,45
2	-7,34024E-05	-9,55898E-05	-8,78156E-05	-8,56026E-05	-85,60
3	-8,2038E-05	-0,000108625	-9,65971E-05	-9,57533E-05	-95,75
4	-8,63558E-05	-0,000126005	-0,000109769	-0,000107377	-107,38
5	-9,49914E-05	-0,00013904	-0,000118551	-0,000117527	-117,53
6	-9,93092E-05	-0,000143385	-0,000131723	-0,000124806	-124,81
7	-0,000112263	-0,000152075	-0,000149286	-0,000137875	-137,87
8	-0,000125216	-0,00016511	-0,000162459	-0,000150928	-150,93
9	-0,000133851	-0,0001738	-0,00017124	-0,000159631	-159,63
10	-0,000133851	-0,00018249	-0,000175631	-0,000163991	-163,99
11	-0,000133851	-0,000186835	-0,000184413	-0,000168366	-168,37
12	-0,000142487	-0,000195525	-0,000193194	-0,000177069	-177,07
13	-0,000151123	-0,00020856	-0,000206367	-0,000188683	-188,68
14	-0,000159758	-0,00021725	-0,000219539	-0,000198849	-198,85
15	-0,000168394	-0,00022594	-0,00022393	-0,000206088	-206,09

Tabela B-15 – Resultados das deformações endógenas – corpos-de-prova selados determinados após a desforma – C<sub>3</sub>.

IDADE (dias)	E1 CP 1	E1 CP 2	E1 CP 3	Média	$\epsilon (\times 10^6)$	$\epsilon_{\text{end acum}} (\times 10^6)$
17	0	-4,34499E-06	-8,78156E-06	-4,37552E-06	-4,375517	-210,46
18	-1,29534E-05	-2,607E-05	-3,07355E-05	-2,32529E-05	-23,252926	-229,34
23	-3,45423E-05	-3,91049E-05	-4,82986E-05	-4,06486E-05	-40,648606	-246,74
25	-4,31779E-05	-5,21399E-05	-5,26894E-05	-4,93357E-05	-49,335718	-255,42
27	-5,18135E-05	-6,08299E-05	-6,14709E-05	-5,80381E-05	-58,038092	-264,13
30	-5,61313E-05	-6,51749E-05	-7,02525E-05	-6,38529E-05	-63,852872	-269,94
32	-6,47668E-05	-7,38649E-05	-8,78156E-05	-7,54824E-05	-75,482432	-281,57
34	-6,90846E-05	-7,38649E-05	-9,22064E-05	-7,83853E-05	-78,385289	-284,47
37	-6,90846E-05	-7,38649E-05	-9,22064E-05	-7,83853E-05	-78,385289	-284,47
40	-7,77202E-05	-8,25549E-05	-0,000100988	-8,70877E-05	-87,087663	-293,18
44	-9,06736E-05	-9,12448E-05	-0,000118551	-0,000100156	-100,15649	-306,24
60	-0,000129534	-0,000143385	-0,000153677	-0,000142199	-142,19857	-348,29

Tabela B-16 – Resultados da determinação do patamar de percolação – concretos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>.

Tempo após a mistura (água + cimento) - minutos	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
180	12,5	13,55	14,02
200	12,5	13,52	14,02
220	12,5	13,53	14,02
240	12,55	13,52	14,02
270	12,55	13,95	14,05
280	12,56	13,95	14,48
295	12,97	13,95	14,49
300	12,97	13,95	14,51
330	12,97	14,1	14,52
360	12,98	14,06	14,55
400	12,97	14,01	14,56

Tabela B-17 – Resultados da determinação das deformações sob manutenção de carregamento – C<sub>1</sub>.

Carregamento aos 3 dias			Carregamento aos 7 dias			Carregamento aos 28 dias		
Tempo de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{esp}} (\times 10^{-6}/\text{MPa})$		Tempo de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{esp}} (\times 10^{-6}/\text{MPa})$		Tempo de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{esp}} (\times 10^{-6}/\text{MPa})$	
	Selado	Não selado		Selado	Não selado		Selado	Não selado
s/ carga	0,00	0,00	s/ carga	0,00	0,00	s/ carga	0,00	0,00
c/ carga	0,00	0,00	c/ carga	0,00	0,00	c/ carga	0,00	0,00
5'	2,03	3,79	5'	1,77	2,34	5'	2,37	4,21
10'	2,68	5,18	10'	2,84	4,68	10'	3,26	5,94
30'	4,44	8,13	30'	4,11	6,52	30'	4,89	9,36
1hora	4,99	9,98	1hora	5,25	7,80	1hora	6,05	12,09
2horas	6,65	11,74	1	13,26	21,13	1	7,15	14,67
1	12,57	25,88	2	18,23	30,57	2	11,30	28,81
4	20,61	43,62	3	21,06	36,52	3	13,83	37,17
5	23,01	47,87	4	23,48	42,06	4	15,72	42,27
6	24,58	52,59	8	27,38	54,68	8	18,45	50,11
7	25,97	55,73	9	28,30	58,87	9	19,30	52,79
8	27,17	60,17	10	30,14	61,28	10	20,24	55,36
12	28,47	65,34	11	30,35	65,53	11	20,77	58,89
13	31,05	67,47	14	30,85	70,57	14	21,40	62,41
14	34,57	69,32	15	31,99	74,40	15	21,71	65,93
15	34,47	70,33	16	32,77	76,10	16	22,82	72,66
18	34,29	73,94	17	33,97	78,44	17	23,55	76,50
19	34,57	78,47	18	35,04	79,15	18	24,13	80,18
20	35,30	81,79	21	36,81	86,67	21	24,34	82,44
21	35,67	88,08	22	37,16	88,65	22	25,87	87,70
22	35,95	90,67	23	37,66	90,07	23	26,87	90,90
25	36,69	97,41	24	39,15	91,06	24	28,97	91,85
26	36,69	98,52	25	39,86	92,55	25	28,92	93,17
			29	40,64	99,22	29	29,60	95,85
			30	40,71	100,64	30	30,02	98,74
			31	40,85	102,27	31	30,55	99,95
			32	41,13	103,83	32	31,44	101,79
			35	41,70	107,02	35	31,91	102,52
			36	41,84	107,94	36	31,70	105,63
			37	42,06	109,22	37	32,07	109,25

Tabela B-18 – Resultados da determinação das deformações sob manutenção de carregamento – C<sub>2</sub>.

Carregamento aos 3 dias			Carregamento aos 7 dias			Carregamento aos 28 dias		
Tempo de carregamento (dias)	e <sub>esp</sub> (x10 <sup>-6</sup> /MPa)		Tempo de carregamento (dias)	e <sub>esp</sub> (x10 <sup>-6</sup> /MPa)		Tempo de carregamento (dias)	e <sub>esp</sub> (x10 <sup>-6</sup> /MPa)	
	Selado	Não selado		Selado	Não selado		Selado	Não selado
s/ carga	0,00	0,00	s/ carga	0,00	0,00	s/ carga	0,00	0,00
c/ carga	0,00	0,00	c/ carga	0,00	0,00	c/ carga	0,00	0,00
5'	1,25	1,78	5'	1,20	2,23	5'	0,99	1,81
10'	1,96	2,94	10'	1,82	3,39	10'	2,09	3,73
30'	2,76	4,27	30'	3,42	6,37	30'	3,02	5,67
1hora	3,83	5,87	1hora	4,52	8,32	1hora	4,26	7,65
2horas	4,80	7,56	2horas	6,13	11,20	2horas	5,45	10,56
1	10,72	17,62	1	12,16	23,56	1	8,87	19,20
2	12,54	23,04	4	18,70	34,52	3	13,13	31,00
3	14,41	28,96	5	20,24	39,49	4	14,12	35,40
6	18,06	35,59	6	21,58	43,15	5	15,50	39,47
7	19,66	39,46	7	22,12	44,35	6	16,26	42,24
8	20,46	42,35	8	22,57	46,34	10	18,72	47,88
9	21,09	43,91	11	25,75	53,90	12	19,71	50,37
10	21,93	45,73	12	26,92	56,30	13	20,13	51,38
13	23,31	52,49	13	27,74	58,32	14	20,55	52,46
14	23,71	54,27	14	28,36	63,15	17	21,57	54,32
15	25,89	55,74	15	29,42	64,21	19	22,13	56,04
16	27,18	58,41	19	30,99	69,76	21	23,09	57,37
17	27,36	59,79	20	31,47	71,34	24	23,66	58,41
21	28,91	65,35	21	31,92	73,01	26	23,88	58,75
22	28,96	66,46	22	32,19	73,97	27	24,28	59,71
23	29,54	68,06	25	33,42	76,47	28	24,39	60,33
24	29,67	68,82	26	33,53	77,23	31	24,73	62,65
27	29,85	70,33	27	34,04	78,25	33	25,18	64,46
28	30,07	71,31	28	34,38	79,79	35	25,35	66,18
29	30,38	72,33	29	34,59	80,92	38	26,12	68,41
30	30,47	73,75	32	36,27	82,57	41	26,43	70,36
						45	26,91	71,65

Tabela B-19 – Resultados da determinação das deformações sob manutenção de carregamento – C<sub>3</sub>.

Carregamento aos 3 dias			Carregamento aos 7 dias			Carregamento aos 28 dias		
Tempo de carregamento (dias)	e <sub>esp</sub> (x10 <sup>-6</sup> /MPa)		Tempo de carregamento (dias)	e <sub>esp</sub> (x10 <sup>-6</sup> /MPa)		Tempo de carregamento (dias)	e <sub>esp</sub> (x10 <sup>-6</sup> /MPa)	
	Selado	Não selado		Selado	Não selado		Selado	Não selado
s/ carga	0,00	0,00	s/ carga	0,00	0,00	s/ carga	0,00	0,00
c/ carga	0,00	0,00	c/ carga	0,00	0,00	c/ carga	0,00	0,00
5'	0,26	0,53	5'	0,75	0,72	5'	0,66	0,92
10'	0,70	1,06	10'	1,12	1,44	10'	1,00	1,41
30'	2,55	3,35	30'	2,92	3,67	30'	1,73	2,34
1hora	4,18	5,06	1hora	4,04	6,99	1hora	2,32	3,15
2horas	4,67	6,16	2horas	10,37	16,80	2horas	2,88	3,77
1	9,90	18,00	1	16,77	25,72	1	4,90	6,97
2	14,13	22,18	2	18,93	29,04	3	7,16	10,85
3	17,21	24,12	3	20,31	31,30	4	8,03	12,53
6	21,13	26,98	6	21,65	31,33	5	8,70	13,94
7	22,49	28,30	7	22,51	32,05	6	9,06	14,71
8	24,03	32,57	8	25,07	36,88	10	10,46	16,39
9	26,58	34,86	9	25,95	38,06	12	11,00	17,22
10	27,77	36,36	10	26,48	36,65	13	11,23	17,54
13	30,59	40,85	13	26,94	37,83	14	11,55	17,97
14	31,43	41,99	14	27,40	38,81	17	12,08	18,52
15	32,09	42,83	15	27,76	40,09	19	12,47	19,18
16	32,75	43,62	16	28,41	40,91	21	12,72	19,37
17	33,36	44,15	17	28,81	41,60	24	13,11	19,69
21	34,90	46,70	21	29,10	41,99	26	13,21	19,86
22	35,30	47,18	22	29,72	42,85	27	13,38	20,31
23	35,65	47,67	23	29,86	43,18	28	13,51	20,55
24	35,96	48,06	24	29,95	43,41	31	13,77	21,40
27	36,62	48,55	27	30,25	44,09	33	13,94	22,12
28	36,84	48,81	28	30,58	44,39	35	14,13	22,80
29	36,97	49,12	29	30,81	45,93	38	14,79	23,59
30	37,19	49,74				41	14,98	24,21
31	37,24	50,40				45	15,24	24,47
34	37,90	52,29						

Tabela B-20 - Resultados da determinação da variação relativa de massa de água durante as medidas de retração endógena.

IDADE (dias)	DEF. END. C1	MASSA C1 (g)			VARIACÃO DE MASSA (g)	%	DEF. END. C2	MASSA C2 (g)			VARIACÃO DE MASSA (g)	%	DEF. END. C3	MASSA C3 (g)			VARIACÃO DE MASSA (g)	%
		CP1	CP2	CP3				CP1	CP2	CP3				CP1	CP2	CP3		
1	-20,37	3843,00	3834,30	3807,40	0,00	0,00	-20,16	3972,08	3953,20	3987,40	0,00	0,00	-75,45	3882,84	3876,40	3893,60	0,00	0,00
2	-21,83						-24,49						-85,60					
3	-24,74						-25,94						-95,75					
4	-24,74						-28,81						-107,38					
5	-29,11						-33,13						-117,53					
6	-29,11						-41,77						-124,81					
7	-37,85						-43,21						-137,87					
8	-39,30						-47,53						-150,93					
9	-40,76						-50,41						-159,63					
10	-43,67						-57,61						-163,99					
11	-49,49												-168,37					
12	-49,49												-177,07					
13	-50,95						-59,05						-188,68					
14	-53,86						-66,26						-198,85					
15	-56,77						-74,90	3971,99	3953,09	3987,33	-0,09	-0,04	-206,09	3882,69	3876,28	3893,48	-0,13	-0,07
16	-58,23																	
17													-210,46	3882,67	3876,26	3893,46	-0,15	-0,07
18	-64,05	3842,91	3834,18	3807,29	-0,11	-0,06	-110,89	3971,97	3953,05	3987,31	-0,12	-0,06	-229,34	3882,67	3876,25	3893,46	-0,16	-0,08
19	-66,96	3842,91	3834,18	3807,28	-0,12	-0,06												
20	-71,32	3842,90	3834,17	3807,27	-0,12	-0,06												
21	-75,70	3842,89	3834,16	3807,27	-0,13	-0,07												
22							-119,54	3971,94	3953,03	3987,29	-0,14	-0,07						
23													-246,74	3882,61	3876,19	3893,42	-0,21	-0,10
24							-116,66	3971,94	3953,02	3987,28	-0,15	-0,07						
25	-80,06	3842,82	3834,12	3807,23	-0,18	-0,09							-255,42	3882,60	3876,17	3893,41	-0,22	-0,11
26							-122,43	3971,92	3953,01	3987,27	-0,16	-0,08						
27													-264,13	3882,59	3876,17	3893,40	-0,23	-0,11
29							-136,79	3971,90	3953,00	3987,24	-0,18	-0,09						
30													-269,94	3882,58	3876,16	3893,38	-0,24	-0,12
32	-81,52	3842,77	3834,08	3807,18	-0,23	-0,12	-119,53	3971,89	3952,99	3987,23	-0,19	-0,09	-281,57	3882,57	3876,14	3893,37	-0,25	-0,12
33							-126,70	3971,89	3952,98	3987,22	-0,20	-0,10						
34													-284,47	3882,56	3876,13	3893,36	-0,26	-0,13
35	-84,43	3842,75	3834,04	3807,15	-0,26	-0,14												
36							-133,91	3971,87	3952,96	3987,21	-0,22	-0,11						
37													-284,47	3882,54	3876,12	3893,35	-0,27	-0,14
38							-139,67	3971,86	3952,96	3987,20	-0,22	-0,11						
39	-87,35	3842,71	3834,02	3807,11	-0,29	-0,15	-154,08	3971,85	3952,95	3987,20	-0,23	-0,11						
40	-88,80	3842,71	3834,01	3807,11	-0,30	-0,16							-293,18	3882,53	3876,11	3893,34	-0,29	-0,14
41	-90,26	3842,70	3834,00	3807,09	-0,31	-0,16												
43							-146,87	3971,83	3952,94	3987,18	-0,25	-0,12						
44													-306,24	3882,51	3876,09	3893,32	-0,31	-0,15
46	-96,08	3842,67	3833,98	3807,07	-0,33	-0,17												
48	-97,53	3842,66	3833,97	3807,06	-0,34	-0,18												
50	-100,44	3842,66	3833,96	3807,05	-0,35	-0,18	-152,63	3971,77	3952,90	3987,15	-0,29	-0,14						
53	-101,89	3842,65	3833,96	3807,03	-0,36	-0,19	-151,20	3971,75	3952,89	3987,13	-0,30	-0,15						
55	-104,80	3842,64	3833,95	3807,02	-0,36	-0,19												
57	-104,80	3842,63	3833,94	3807,02	-0,37	-0,20	-146,86	3971,73	3952,87	3987,10	-0,33	-0,16						
58							-152,63	3971,73	3952,86	3987,10	-0,33	-0,16						
59							-161,27	3971,72	3952,86	3987,09	-0,34	-0,17						
60	-106,26	3842,61	3833,91	3807,01	-0,39	-0,21							-348,29	3882,40	3876,02	3893,21	-0,41	-0,20
61	-110,62	3842,60	3833,91	3807,00	-0,40	-0,21												
64							-162,70	3971,69	3952,82	3987,05	-0,38	-0,18						
66							-172,82	3971,67	3952,80	3987,03	-0,39	-0,19						
68							-177,14	3971,66	3952,80	3987,02	-0,40	-0,20						
71							-181,46	3971,65	3952,78	3987,00	-0,42	-0,20						
73							-185,78	3971,64	3952,77	3986,98	-0,43	-0,21						
75							-190,11	3971,62	3952,76	3986,97	-0,44	-0,22						
78							-191,55	3971,61	3952,75	3986,96	-0,45	-0,22						
79		3842,58	3833,85	3806,94	-0,44	-0,24	-198,74	3971,61	3952,69	3986,95	-0,48	-0,23		3882,30	3875,96	3893,13	-0,49	-0,24
Massa de água evaporável		188,00	189,30	187,40				202,08	208,20	202,40				207,84	201,40	198,60		

Tabela B-21 - Resultados da determinação da variação relativa de massa de água durante as medidas de retração total.

IDADE (dias)	DEF. TOT. C1				VARIÇÃO DE MASSA (g)	%	DEF. TOT. C2				VARIÇÃO DE MASSA (g)	%	DEF. TOT. C3				VARIÇÃO DE MASSA (g)	%
		CP1	CP2	CP3				CP1	CP2	CP3				CP1	CP2	CP3		
1	-34,88	3851,00	3848,70	3839,30	0,00	0,00	-27,70	3952,90	3938,20	3975,40	0,00	0,00	-28,99	3870,20	3881,50	3892,70	0,00	0,00
2							-37,90					0,00	-42,04					
3							-46,65					0,00	-56,53					
4	-47,92						-53,94					0,00	-63,74					
5	-58,07						-62,69					0,00	-78,24					
6	-71,09						-71,43					0,00	-91,29					
7	-84,15						-83,10					0,00	-102,89					
8	-100,11						-94,76					0,00	-118,83					
9	-116,09						-104,96					0,00	-128,97					
10	-129,12											0,00	-142,01					
11	-142,15						-112,25					0,00	-156,49					
12	-163,85						-135,58					0,00	-172,44					
13	-173,99						-161,82					0,00	-184,04					
14	-185,59						-170,57					0,00	-200,01					
15	-197,16						-180,77					0,00	-210,15					
16	-205,85						-189,52					0,00	-227,55	3865,08	3875,49	3886,00	-5,94	-2,95
17	-217,42						-198,27					0,00						
18	-227,56						-209,93	3943,78	3928,23	3964,41	-10,03	-4,93	-250,73	3864,99	3875,32	3885,86	-6,08	-3,01
19	-234,80												-263,78	3864,63	3875,01	3885,43	-6,44	-3,19
20	-242,05	3836,52	3832,83	3822,35	-15,77	-8,33							-268,14	3864,00	3874,88	3885,22	-6,77	-3,35
21													-269,58	3863,66	3874,54	3884,96	-7,08	-3,51
22	-259,46	3835,74	3831,16	3821,77	-16,78	-8,87	-234,60	3942,98	3927,45	3964,04	-10,68	-5,25						
23	-298,71	3834,92	3830,79	3821,15	-17,38	-9,18	-256,39	3942,77	3926,94	3963,77	-11,01	-5,41						
24	-298,71	3834,72	3830,23	3820,72	-17,78	-9,39	-256,39	3942,52	3926,45	3963,32	-11,40	-5,60	-279,72	3863,32	3874,12	3884,74	-7,41	-3,67
25	-300,92	3833,96	3829,85	3820,11	-18,36	-9,70	-256,37	3942,23	3926,04	3962,99	-11,75	-5,77	-285,52	3862,99	3873,83	3884,49	-7,70	-3,82
26													-291,31	3862,72	3873,54	3884,35	-7,93	-3,93
27													-320,31	3862,55	3873,40	3884,19	-8,09	-4,01
28	-327,09	3832,86	3829,08	3819,65	-19,14	-10,11	-257,82	3941,89	3925,75	3962,33	-12,18	-5,98	-300,07	3862,43	3872,96	3883,98	-8,34	-4,14
29	-340,18	3832,29	3828,57	3819,32	-19,61	-10,36	-268,00	3941,53	3925,22	3962,08	-12,56	-6,17						
30	-351,10	3831,88	3828,15	3818,93	-20,01	-10,58	-269,45	3941,21	3925,01	3961,89	-12,80	-6,29						
31	-381,62	3831,43	3827,79	3818,52	-20,42	-10,79	-295,62	3940,96	3924,73	3961,57	-13,08	-6,43						
32	-364,17	3830,99	3827,34	3818,03	-20,88	-11,03	-273,81	3940,45	3924,55	3961,28	-13,41	-6,59						
34													-323,20	3861,89	3872,24	3883,34	-8,98	-4,45
38	-401,28	3828,43	3825,89	3815,97	-22,90	-12,10	-282,53	3939,14	3923,81	3959,89	-14,55	-7,15	-321,76	3861,67	3872,07	3882,98	-9,23	-4,57
40													-329,00	3861,39	3871,86	3882,69	-9,49	-4,70
42	-420,90	3827,65	3824,99	3814,82	-23,85	-12,60	-289,79	3938,89	3922,43	3959,22	-15,32	-7,53	-330,45	3861,22	3871,64	3882,58	-9,65	-4,79
44	-427,45	3827,21	3824,54	3814,36	-24,30	-12,84	-297,07	3938,04	3922,1	3958,86	-15,83	-7,78						
45												0,00	-326,10	3860,05	3871,41	3882,39	-10,18	-5,05
46	-431,82	3826,89	3823,97	3814,78	-24,45	-12,92	-297,07	3937,92	3921,79	3958,27	-16,17	-7,95						
48												0,00	-311,61	3859,76	3871,02	3881,55	-10,69	-5,30
49	-438,37	3825,65	3823,05	3813,74	-25,52	-13,49	-297,07	3937,44	3921,68	3957,98	-16,47	-8,09						
52	-429,66	3824,72	3822,89	3812,97	-26,14	-13,81	-292,72	3936,92	3921,17	3957,64	-16,92	-8,32	-334,81	3859,27	3870,79	3880,86	-11,16	-5,53
55												0,00	-363,80	3858,89	3870,25	3880,43	-11,61	-5,76
56	-455,84	3823,85	3821,85	3811,89	-27,14	-14,34	-317,44	3936,45	3920,78	3957,23	-17,35	-8,53						
59	-482,01	3823,01	3820,99	3811,86	-27,71	-14,65	-336,34	3936,03	3920,32	3956,88	-17,76	-8,73	-365,25	3858,72	3870,13	3880,17	-11,79	-5,85
63	-486,38	3822,32	3820,45	3810,94	-28,43	-15,02	-345,07	3935,87	3919,99	3956,62	-18,01	-8,85						
66													-358,00	3858,56	3869,98	3880,02	-11,95	-5,92
69													-353,65	3858,34	3869,76	3879,75	-12,18	-6,04
70	-482,01	3821,03	3819,64	3810,07	-29,42	-15,55	-336,34	3934,92	3919,04	3955,83	-18,90	-9,29						
73	-468,93	3820,43	3819,12	3809,56	-29,96	-15,83	-333,43	3934,64	3918,86	3955,54	-19,15	-9,41						
Massa de água evaporável		187,80	190,20	189,70				201,80	205,40	203,20				205,30	200,10	199,80		

Tabela B-22 - Resultados da determinação da variação relativa de massa de água durante as medidas de retração por secagem.

IDADE (dias)	TEMPO DE SECAGEM (dias)	DEF. SEC. C1	MASSA C1 (g)			VARIÇÃO DE MASSA (g)	%	DEF. SEC. C2	MASSA C2 (g)			VARIÇÃO DE MASSA (g)	%	DEF. SEC. C3	MASSA C3 (g)			VARIÇÃO DE MASSA (g)	%
			CP1	CP2	CP3				CP1	CP2	CP3				CP1	CP2	CP3		
1	0		3878,93	3855,90	3842,74	0,00	0,00		3953,12	3942,21	3962,90	0,00	0,00		3871,87	3885,60	3889,21	0,00	0,00
29	1	-61,60	3904,53	3881,84	3868,14	25,65	13,43	-34,05	3977,11	3967,11	3988,10	24,70	12,07	-35,25324	3898,54	3906,43	3911,37	23,22	11,42
30	2	-70,28	3899,67	3877,52	3865,54	21,72	11,37	-34,05	3977,44	3964,8	3986,32	23,44	11,45	-43,96	3897,85	3905,87	3910,69	22,58	11,11
31	3	-78,99	3898,02	3875,28	3864,02	19,92	10,43	-51,41	3976,32	3963,53	3984,88	22,17	10,83	-43,96	3897,23	3904,93	3909,89	21,79	10,72
32	4	-92,07	3896,42	3874,78	3862,83	18,82	9,85	-68,78	3975,77	3962,24	3983,34	21,04	10,28	-57,01603	3896,68	3903,31	3909,22	20,84	10,26
33	5	-105,14	3895,83	3872,49	3863,81	18,19	9,52	-77,46	3974,38	3960,99	3982,25	19,80	9,67	-65,72	3895,92	3902,70	3908,58	20,17	9,93
36	8	-125,47	3890,32	3869,23	3859,31	13,76	7,20	-107,84	3971,4	3957,96	3977,86	16,33	7,98	-83,13137	3895,52	3902,23	3907,99	19,69	9,69
37	9	-134,19	3887,54	3868,77	3859,84	12,86	6,73	-129,54	3971,20	3958,77	3979,34	17,03	8,32	-100,5416	3894,89	3901,75	3907,37	19,11	9,40
38	10	-141,45	3885,76	3866,97	3858,12	11,09	5,81	-138,22	3969,72	3957,67	3978,66	15,94	7,79	-113,60	3894,26	3901,13	3906,58	18,43	9,07
39	11	-173,40	3884,16	3865,23	3857,56	9,79	5,13	-172,94	3969,11	3956,79	3977,52	15,06	7,36	-149,1618	3893,68	3900,54	3905,92	17,82	8,77
40	12	-157,42	3882,90	3864,01	3855,99	8,44	4,42	-168,60	3968,54	3955,43	3976,78	14,17	6,93	-139,7146	3893,02	3899,89	3905,21	17,15	8,44
46	18	-203,92	3877,35	3860,85	3852,37	4,33	2,27	-220,69	3967,98	3954,55	3976,25	13,52	6,60	-187,59	3890,77	3896,05	3902,46	14,20	6,99
50	22	-209,74	3874,34	3857,27	3849,67	1,24	0,65	-233,71	3965,53	3950,94	3973,73	10,66	5,21	-191,9453	3887,43	3893,92	3900,67	11,78	5,80
52	24	-219,89	3872,9	3856,11	3847,45	-0,37	-0,19	-251,07	3964,84	3949,14	3972,99	9,58	4,68	-200,6504	3886,32	3892,78	3899,57	10,66	5,25
54	26	-227,15	3870,85	3855,34	3845,98	-1,80	-0,94	-259,75	3963,89	3948,77	3970,35	8,26	4,04	-209,36	3885,89	3889,92	3898,43	9,19	4,52
57	29	-235,87	3868,87	3853,92	3844,43	-3,45	-1,81	-264,09	3962,56	3947,23	3969,55	7,04	3,44	-209,3555	3883,91	3888,23	3896,99	7,48	3,68
60	32	-218,43	3866,21	3851,28	3841,97	-6,04	-3,16	-238,05	3961,29	3946,8	3968,93	6,26	3,06	-196,2979	3881,87	3886,16	3894,34	5,23	2,57
64	36	-240,24	3864,19	3849,95	3839,43	-8,00	-4,19	-259,75	3958,54	3944,98	3966,21	3,83	1,87	-213,7081	3879,93	3885,58	3892,79	3,87	1,91
67	39	-275,08	3862,65	3847,48	3838,21	-9,74	-5,10	-285,79	3955,78	3941,89	3964,14	1,19	0,58	-244,176	3877,32	3884,93	3890,53	2,03	1,00
71	43	-279,44	3859,89	3845,31	3836,59	-11,93	-6,24	-290,13	3952,56	3938,92	3962,75	-1,33	-0,65	-244,176	3875,41	3883,57	3887,95	0,08	0,04
78	50	-286,70	3855,12	3840,47	3831,98	-16,67	-8,72	-298,81	3948,89	3934,67	3958,04	-5,54	-2,71	-257,2337	3873,76	3879,95	3882,76	-3,40	-1,67
81	53	-279,46	3853,9	3837,92	3829,76	-18,66	-9,77	-290,13	3947,32	3933,26	3957,38	-6,76	-3,30	-252,8811	3872,99	3879,26	3881,85	-4,19	-2,06
Massa de água evaporável			192,00	189,90	191,20				203,90	207,20	202,90				205,92	203,08	200,74		

## APÊNDICE C – REGRESSÕES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

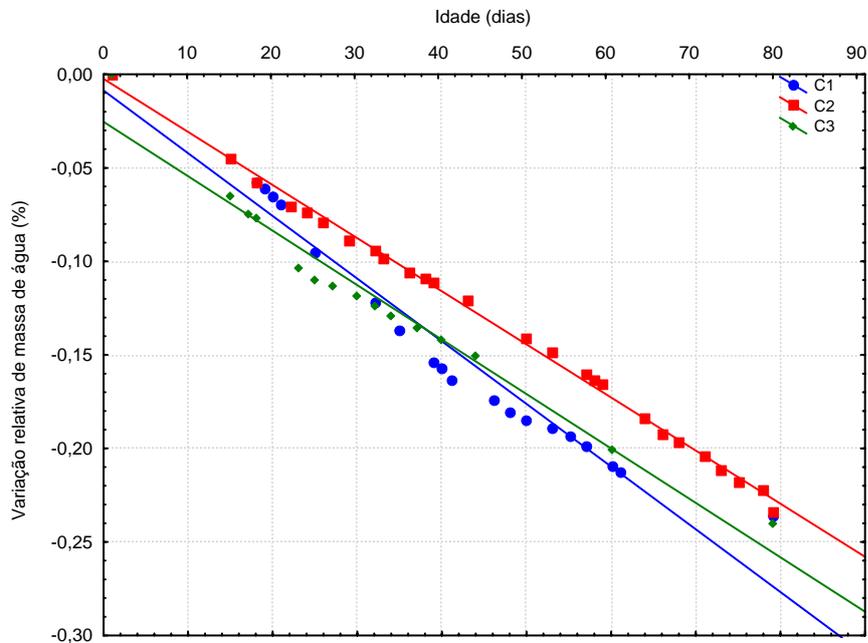


Figura C-1 – Resultados médios de variação de massa de água em relação à massa de água evaporável, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, selados, com  $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

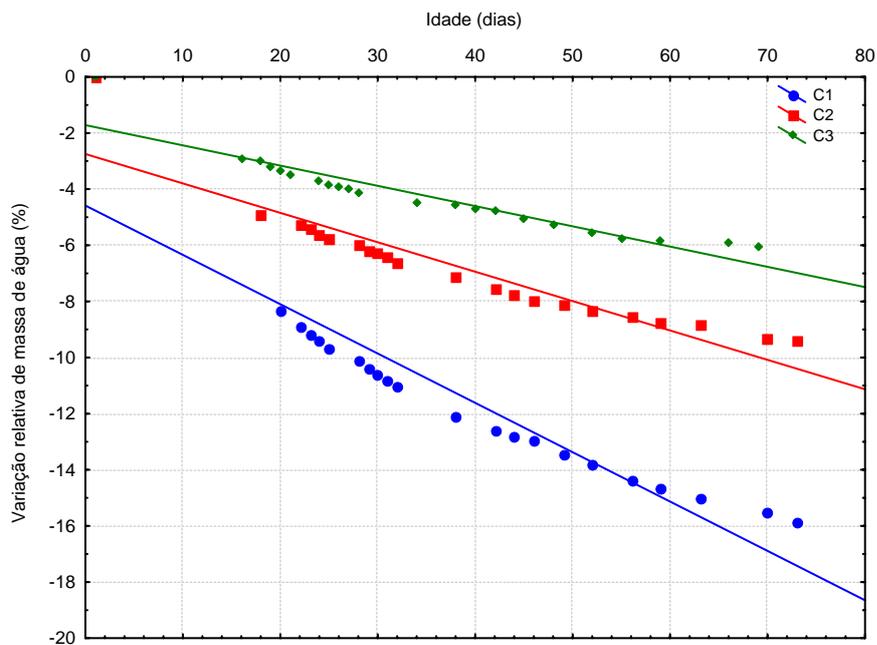


Figura C-2 – Resultados médios de variação de massa de água em relação à massa de água evaporável, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, não selados, com  $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

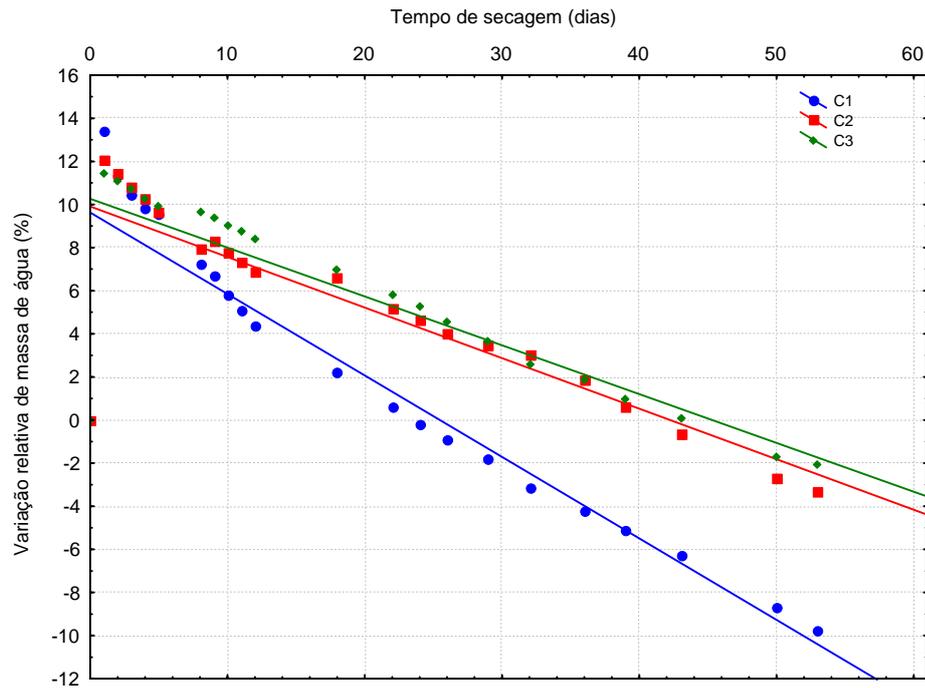


Figura C-3 – Resultados médios de variação de massa de água em relação à massa total, em corpos-de-prova prismáticos de 75 mm x 75 mm x 285 mm, não selados, após 28 dias de cura submersa, até 60 dias de secagem, com  $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Tabela C-1 – Equações de correlação logarítmica e linear entre a retração endógena e a idade e respectivos coeficientes de determinação ( $r^2$ ).

Concreto	Equação de correlação		Coeficiente de determinação ( $r^2$ )	
	Logarítmica	Linear	Logarítmica	Linear
C <sub>1</sub>	$\varepsilon_{\text{end}} = -20,9 \ln(\text{Idade}) - 8,64$	$\varepsilon_{\text{end}} = -1,586(\text{Idade}) - 23,71$	0,91	0,91
C <sub>2</sub>	$\varepsilon_{\text{end}} = -37,3 \ln(\text{Idade}) - 1,83$	$\varepsilon_{\text{end}} = -2,221(\text{Idade}) - 34,75$	0,86	0,91
C <sub>3</sub>	$\varepsilon_{\text{end}} = -63,4 \ln(\text{Idade}) - 42,41$	$\varepsilon_{\text{end}} = -5,397(\text{Idade}) - 93,39$	0,93	0,88

Tabela C-2 – Equações de correlação logarítmica e linear entre a retração total e a idade e respectivos coeficientes de determinação ( $r^2$ ).

Concreto	Equação de correlação		Coeficiente de determinação ( $r^2$ )	
	Logarítmica	Linear	Logarítmica	Linear
C <sub>1</sub>	$\varepsilon_{\text{tot}} = -97,0 \ln(\text{Idade}) + 4,62$	$\varepsilon_{\text{tot}} = -7,264(\text{Idade}) - 71,04$	0,79	0,90
C <sub>2</sub>	$\varepsilon_{\text{tot}} = -70,5 \ln(\text{Idade}) - 10,29$	$\varepsilon_{\text{tot}} = -4,771(\text{Idade}) - 75,19$	0,87	0,82
C <sub>3</sub>	$\varepsilon_{\text{tot}} = -81,7 \ln(\text{Idade}) - 3,55$	$\varepsilon_{\text{tot}} = -5,161(\text{Idade}) - 96,99$	0,88	0,79

Tabela C-3 – Equações de correlação linear entre a retração endógena e a idade, para os regimes R1 (a partir do patamar de percolação até 1 dia), R2 (de 1 até 20 dias) e R3 (a partir dos 20 dias até o final das medidas).

Concreto	Regime	Equação de correlação linear	Coefficiente de correlação (r)	Coefficiente de determinação (r <sup>2</sup> )
C <sub>1</sub>	R1	$\epsilon_{\text{end}} = -23,13 (\text{Idade}) + 5,74$	-0,96	0,92
	R2	$\epsilon_{\text{end}} = -2,72 (\text{Idade}) - 16,14$	-0,99	0,98
	R3	$\epsilon_{\text{end}} = -1,81 (\text{Idade}) - 10,84$	-0,95	0,91
C <sub>2</sub>	R1	$\epsilon_{\text{end}} = -19,89 (\text{Idade}) - 1,05$	-0,92	0,84
	R2	$\epsilon_{\text{end}} = -4,57 (\text{Idade}) - 11,02$	-0,96	0,92
	R3	$\epsilon_{\text{end}} = -2,30 (\text{Idade}) - 30,58$	-0,93	0,87
C <sub>3</sub>	R1	$\epsilon_{\text{end}} = -77,24 (\text{Idade}) + 11,05$	-0,95	0,91
	R2	$\epsilon_{\text{end}} = -8,67 (\text{Idade}) - 74,17$	-0,99	0,99
	R3	$\epsilon_{\text{end}} = -6,87 (\text{Idade}) - 28,63$	-0,94	0,89

Tabela C-4 – Equações de correlação linear entre a retração total e a idade, para os regimes R1 (a partir do patamar de percolação até 1 dia), R2 (de 1 até 20 dias) e R3 (a partir dos 20 dias até o final das medidas).

Concreto	Regime	Equação de correlação linear	Coefficiente de correlação (r)	Coefficiente de determinação (r <sup>2</sup> )
C <sub>1</sub>	R1	$\epsilon_{\text{tot}} = -30,50 (\text{Idade}) - 5,53$	-0,99	0,99
	R2	$\epsilon_{\text{tot}} = -12,76 (\text{Idade}) - 0,36$	-0,99	0,99
	R3	$\epsilon_{\text{tot}} = -4,09 (\text{Idade}) - 221,03$	-0,93	0,87
C <sub>2</sub>	R1	$\epsilon_{\text{tot}} = -28,24 (\text{Idade}) - 0,67$	-0,96	0,92
	R2	$\epsilon_{\text{tot}} = -12,76 (\text{Idade}) - 7,79$	-0,99	0,99
	R3	$\epsilon_{\text{tot}} = -1,84 (\text{Idade}) - 212,74$	-0,94	0,89
C <sub>3</sub>	R1	$\epsilon_{\text{tot}} = -14,67 (\text{Idade}) - 15,21$	-0,95	0,91
	R2	$\epsilon_{\text{tot}} = -13,06 (\text{Idade}) - 13,94$	-0,99	0,99
	R3	$\epsilon_{\text{tot}} = -1,71 (\text{Idade}) - 251,05$	-0,99	0,80

Tabela C-5 – Equações de correlação logarítmica e linear entre a retração por secagem e a idade e respectivos coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>).

Concreto	Equação de correlação		Coefficiente de determinação (r <sup>2</sup> )	
	Logarítmica	Linear	Logarítmica	Linear
C <sub>1</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -64,2 \ln (\text{Idade}) - 15,31$	$\epsilon_{\text{sec}} = -4,32 (\text{Idade}) - 91,88$	0,94	0,91
C <sub>2</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -80,8 \ln (\text{Idade}) + 24,86$	$\epsilon_{\text{sec}} = -5,23 (\text{Idade}) - 75,72$	0,95	0,85
C <sub>3</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -66,1 \ln (\text{Idade}) + 16,99$	$\epsilon_{\text{sec}} = -4,40 (\text{Idade}) - 62,76$	0,93	0,88

Tabela C-6 – Equações de correlação linear entre a retração por secagem e a idade, para os regimes R1 (do início das leituras até 20 dias de secagem) e R2 (a partir de 20 dias de secagem até o final das medidas).

Concreto	Equação de correlação linear		Coeficiente de correlação (r)		Coeficiente de determinação (r <sup>2</sup> )	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
C <sub>1</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -8,70 (\text{Idade}) - 56,53$	$\epsilon_{\text{sec}} = -2,54 (\text{Idade}) - 157,11$	-0,98	-0,92	0,97	0,84
C <sub>2</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -11,97 (\text{Idade}) - 19,07$	$\epsilon_{\text{sec}} = -1,84 (\text{Idade}) - 201,92$	-0,99	-0,86	0,98	0,75
C <sub>3</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -9,58 (\text{Idade}) - 20,38$	$\epsilon_{\text{sec}} = -2,14 (\text{Idade}) - 146,23$	-0,98	-0,92	0,96	0,86

Tabela C-7 – Equações de correlação linear entre a variação relativa de água e a idade, para os regimes R1 (a partir do patamar de percolação até 35 dias) e R2 (a partir dos 35 dias até o final das medidas).

Concreto	Equação de correlação linear		Coeficiente de correlação (r)		Coeficiente de determinação (r <sup>2</sup> )	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
C <sub>1</sub>	$P_{\text{ag}} = -0,35 (\text{Idade}) - 0,48$	$P_{\text{ag}} = -0,11 (\text{Idade}) - 8,10$	0,98	0,95	0,99	0,99
C <sub>2</sub>	$P_{\text{ag}} = -0,20 (\text{Idade}) - 0,41$	$P_{\text{ag}} = -0,06 (\text{Idade}) - 5,02$	0,97	0,93	0,98	0,99
C <sub>3</sub>	$P_{\text{ag}} = -0,13 (\text{Idade}) - 0,42$	$P_{\text{ag}} = -0,05 (\text{Idade}) - 2,84$	0,97	0,94	0,93	0,96

Tabela C-8 – Equações de correlação linear entre a variação relativa de água e a idade, nos regimes R1 (a partir do patamar de percolação até 20 dias) e R2 (a partir dos 20 dias até o final das medidas).

Concreto	Equação de correlação linear		Coeficiente de correlação (r)		Coeficiente de determinação (r <sup>2</sup> )	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
C <sub>1</sub>	$P_{\text{ag}} = -0,64 (\text{Idade}) + 12,69$	$P_{\text{ag}} = -0,33 (\text{Idade}) + 12,69$	-0,98	-0,99	0,96	0,99
C <sub>2</sub>	$P_{\text{ag}} = -0,35 (\text{Idade}) + 11,69$	$P_{\text{ag}} = -0,28 (\text{Idade}) + 11,55$	-0,94	-0,99	0,89	0,99
C <sub>3</sub>	$P_{\text{ag}} = -0,25 (\text{Idade}) + 11,50$	$P_{\text{ag}} = -0,26 (\text{Idade}) + 11,19$	-0,98	-0,99	0,98	0,99

Tabela C-9 – Equações de correlação linear entre a retração total e a variação relativa de massa de água e respectivos valores de r<sup>2</sup> e r.

Concreto	Equação de correlação linear	r <sup>2</sup>	r
C <sub>1</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -22,55 + 30,32 P_{\text{ag}}$	0,97	0,99
C <sub>2</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -66,68 + 30,41 P_{\text{ag}}$	0,93	0,96
C <sub>3</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -87,33 + 48,99 P_{\text{ag}}$	0,90	0,95

Tabela C-10 – Equações de correlação linear entre a retração por secagem e a variação relativa de massa de água e respectivos valores de  $r^2$  e  $r$ .

Concreto	Equação de correlação linear	$r^2$	$r$
C <sub>1</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -205,20 + 10,57 P_{\text{ag}}$	0,96	0,96
C <sub>2</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -290,22 + 19,22 P_{\text{ag}}$	0,86	0,93
C <sub>3</sub>	$\epsilon_{\text{sec}} = -253,77 + 16,48 P_{\text{ag}}$	0,88	0,94

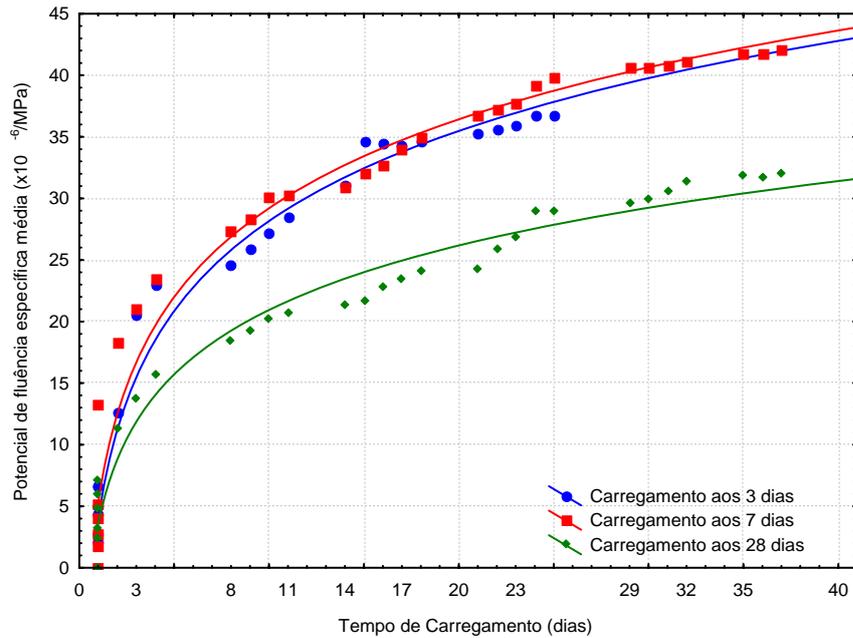


Figura C-4 – Potencial de fluência específica média para C<sub>1</sub> para corpos-de-prova selados.

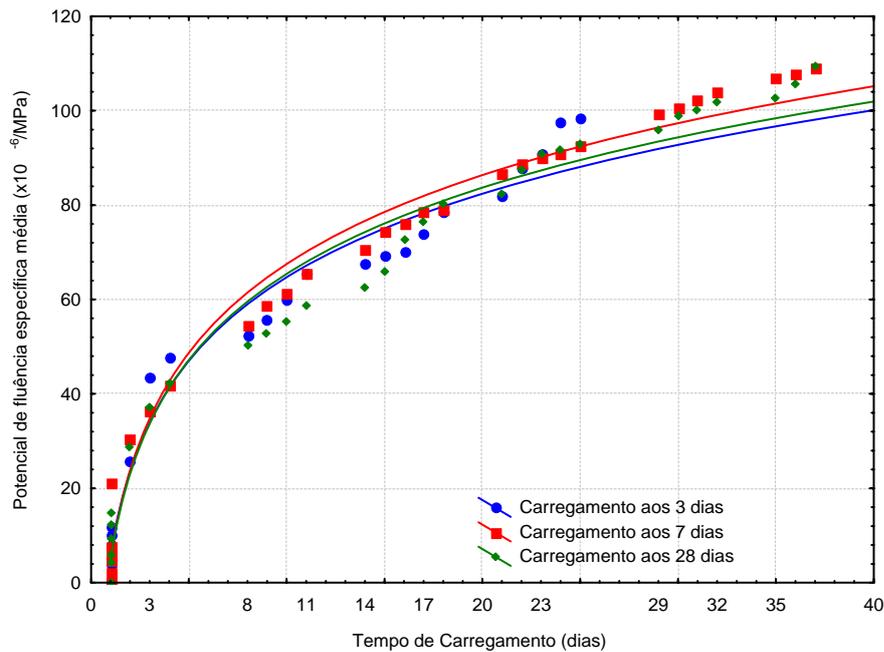


Figura C-5 – Potencial de fluência específica média para C<sub>1</sub> para corpos-de-prova mantidos expostos ao ambiente de laboratório (não selados).

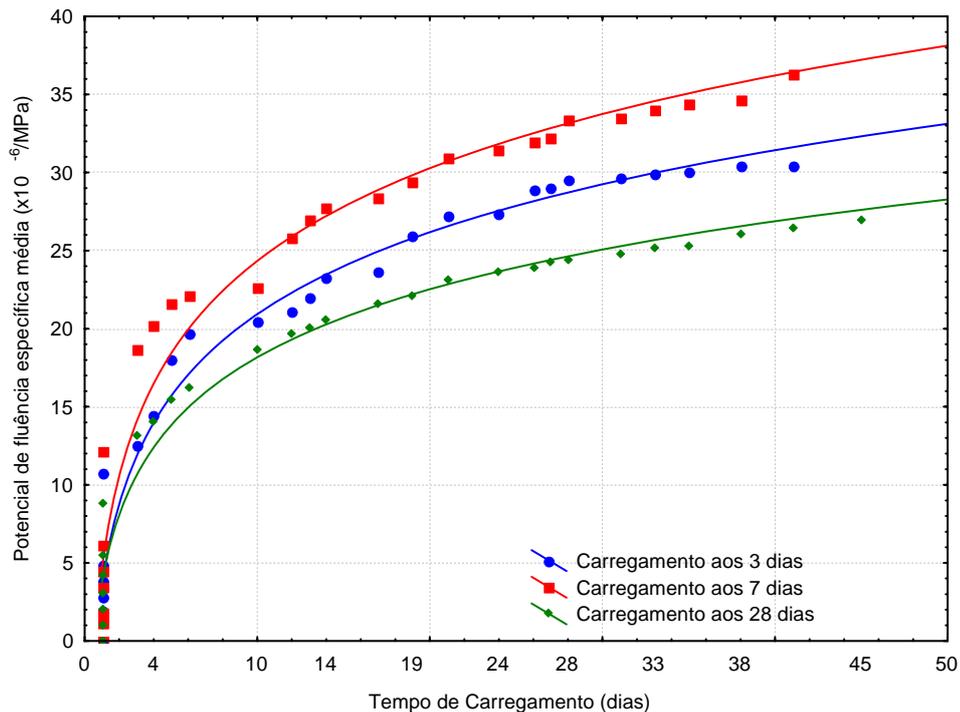


Figura C-6 – Potencial de fluência específica média para  $C_2$  para corpos-de-prova selados.

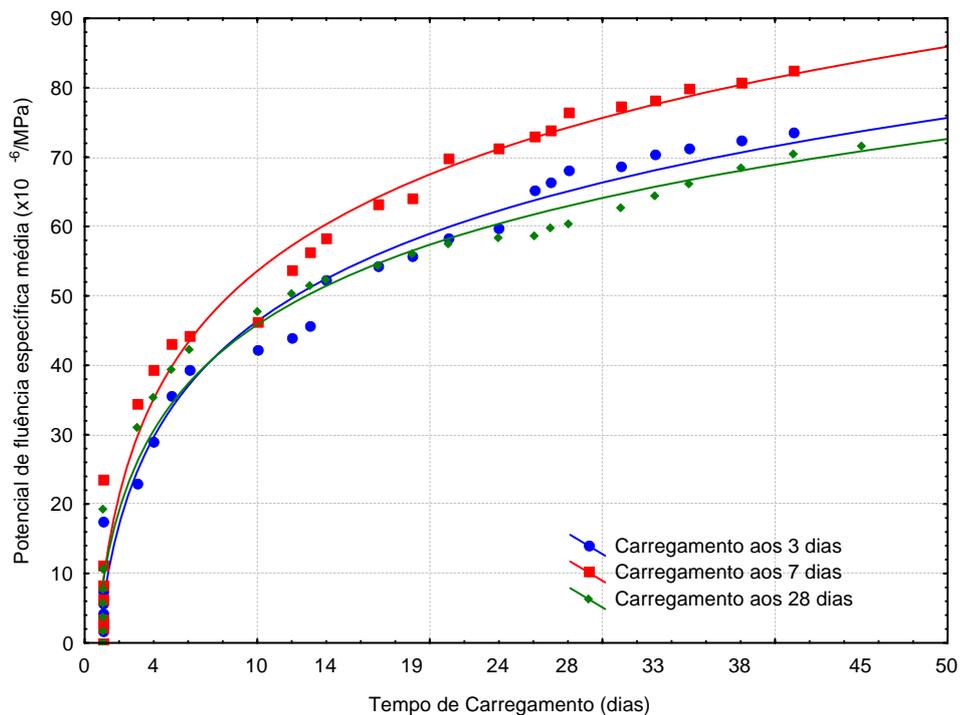


Figura C-7 – Potencial de fluência específica média para  $C_2$  para corpos-de-prova mantidos expostos ao ambiente de laboratório (não selados).

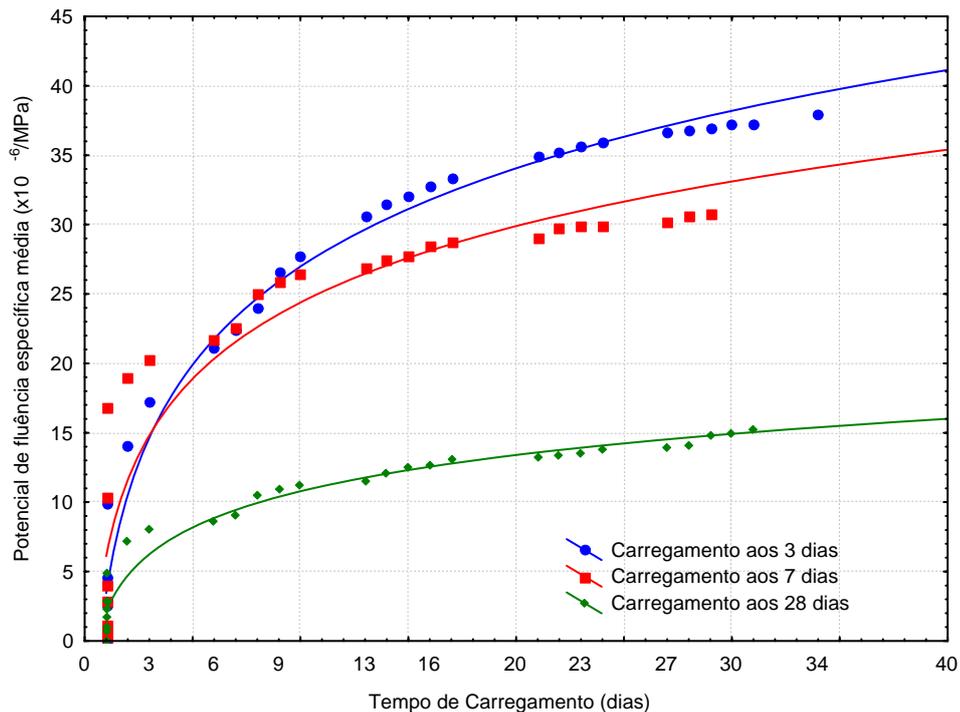


Figura C-8 – Potencial de fluência específica média para C<sub>3</sub> para corpos-de-prova selados.

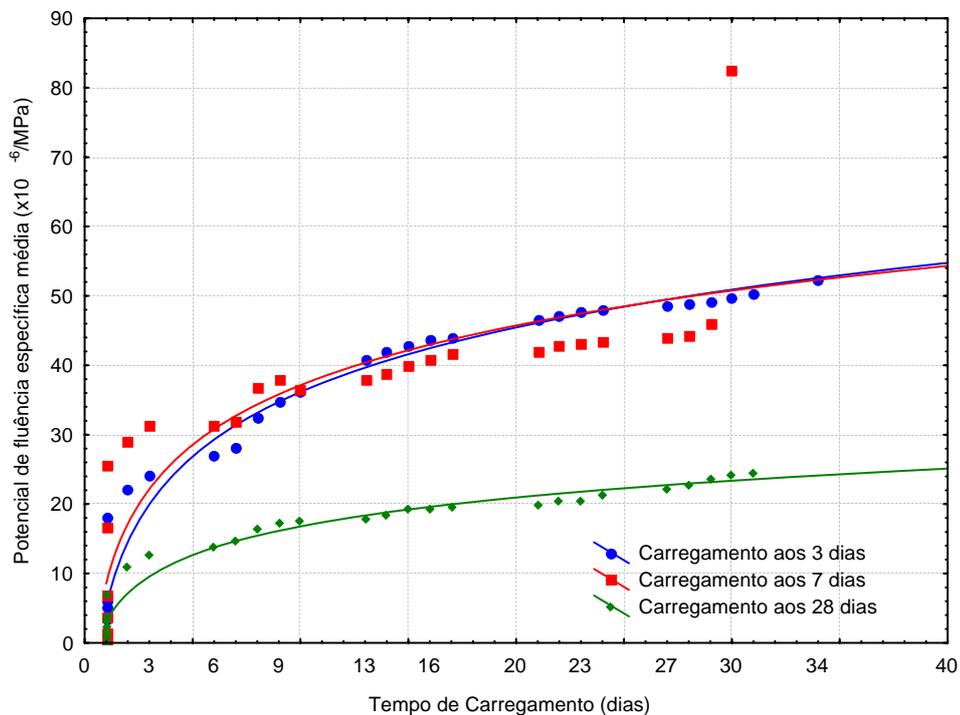


Figura C-9 – Potencial de fluência específica média para C<sub>3</sub> para corpos-de-prova mantidos expostos ao ambiente de laboratório (não selados).

Tabela C-11 – Equações de correlação logarítmica para expressar a fluência específica em função da idade e respectivos coeficientes de determinação.

Concreto	Condição de exposição selado (S) ou não selado (NS)	Idade de carregamento (dias)	Equação de correlação logarítmica	r <sup>2</sup>
C <sub>1</sub>	S	3	$\epsilon_{\text{fluência}} = 10,55\ln(\text{Idade}) + 3,86$	0,98
		7	$\epsilon_{\text{fluência}} = 10,40\ln(\text{Idade}) + 5,24$	0,97
		28	$\epsilon_{\text{fluência}} = 7,55\ln(\text{Idade}) + 3,55$	0,97
	NS	3	$\epsilon_{\text{fluência}} = 25,53\ln(\text{Idade}) + 5,92$	0,97
		7	$\epsilon_{\text{fluência}} = 27,14\ln(\text{Idade}) + 5,02$	0,98
		28	$\epsilon_{\text{fluência}} = 26,33\ln(\text{Idade}) + 4,81$	0,97
C <sub>2</sub>	S	3	$\epsilon_{\text{fluência}} = 7,58\ln(\text{Idade}) + 3,49$	0,97
		7	$\epsilon_{\text{fluência}} = 8,57\ln(\text{Idade}) + 4,61$	0,96
		28	$\epsilon_{\text{fluência}} = 6,28\ln(\text{Idade}) + 3,70$	0,97
	NS	3	$\epsilon_{\text{fluência}} = 18,20\ln(\text{Idade}) + 4,43$	0,98
		7	$\epsilon_{\text{fluência}} = 20,08\ln(\text{Idade}) + 7,33$	0,98
		28	$\epsilon_{\text{fluência}} = 16,61\ln(\text{Idade}) + 7,59$	0,97
C <sub>3</sub>	S	3	$\epsilon_{\text{fluência}} = 10,26\ln(\text{Idade}) + 3,40$	0,98
		7	$\epsilon_{\text{fluência}} = 7,94\ln(\text{Idade}) + 6,10$	0,88
		28	$\epsilon_{\text{fluência}} = 3,77\ln(\text{Idade}) + 2,11$	0,96
	NS	3	$\epsilon_{\text{fluência}} = 13,43\ln(\text{Idade}) + 5,22$	0,96
		7	$\epsilon_{\text{fluência}} = 11,29\ln(\text{Idade}) + 9,36$	0,86
		28	$\epsilon_{\text{fluência}} = 5,99\ln(\text{Idade}) + 2,99$	0,96

## APÊNDICE D – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA APLICADA AOS RESULTADOS DE DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

Tabela D-1 – Resultados da análise de variância para verificação da influência da composição do concreto e da idade sobre a retração endógena.

Efeito	GL	SQ	MQ	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	<b>61</b>	6,54x10 <sup>5</sup>	1,07x10 <sup>5</sup>	17,15	1,59	Significativo
<b>ERRO</b>	<b>47</b>	29363,4	624,8	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>108</b>	6,83x10 <sup>5</sup>	1,08x10 <sup>5</sup>	-	-	-
<b>COMPOSIÇÃO DO CONCRETO (1)</b>	<b>2</b>	330179	165089	264,25	3,19	Significativo
<b>IDADE (2)</b>	<b>59</b>	323473	5483	8,78	1,59	Significativo
<b>(1) e (2)</b>	<b>61</b>	67057,9	1099,31	17,87	1,51	Significativo
<b>r<sub>mod</sub> = 0,98; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = 0,96</b>						

Onde:

GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = resultado da análise;

r<sub>mod</sub> = coeficiente de correlação do modelo; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = coeficiente de determinação do modelo.

Tabela D-2 – Resultados da análise de variância para verificação da influência da composição do concreto e da idade sobre a retração por secagem.

Efeito	GL	SQ	MQ	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	<b>22</b>	4,08x10 <sup>5</sup>	0,19x10 <sup>5</sup>	131,79	1,81	Significativo
<b>ERRO</b>	<b>40</b>	5632,06	140,80	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>62</b>	4,14x10 <sup>5</sup>	0,19x10 <sup>5</sup>	-	-	-
<b>COMPOSIÇÃO DO CONCRETO (1)</b>	<b>2</b>	330179	165089	41,69	1,64	Significativo
<b>TEMPO DE SECAGEM (2)</b>	<b>20</b>	323473	5483	140,80	1,59	Significativo
<b>(1) e (2)</b>	<b>40</b>	5632	141	0,00	1,69	Não significativo
<b>r<sub>mod</sub> = 0,99; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = 0,98</b>						

Onde:

GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultados = resultado da análise;

r<sub>mod</sub> = coeficiente de correlação do modelo; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = coeficiente de determinação do modelo.

Tabela D-3 – Resultados da análise de variância para verificação da influência da composição do concreto e da idade sobre a retração total.

Efeito	GL	SQ	MQ	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	<b>52</b>	19,29x10 <sup>5</sup>	37091,1	36,86	1,53	Significativo
<b>ERRO</b>	<b>67</b>	67424,0	1006,4	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>119</b>	19,96x10 <sup>5</sup>	38097,5	-	-	-
<b>COMPOSIÇÃO DO CONCRETO (1)</b>	<b>2</b>	64421	32211	32,00	3,13	Significativo
<b>IDADE (2)</b>	<b>50</b>	18,60x10 <sup>5</sup>	37218	36,98	1,54	Significativo
<b>(1) e (2)</b>	<b>61</b>	67057,9	1099,31	17,87	1,51	Significativo
<b>r<sub>mod</sub> = 0,98; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = 0,97</b>						

Onde:

GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultados = resultado da análise;

r<sub>mod</sub> = coeficiente de correlação do modelo; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = coeficiente de determinação do modelo.

Tabela D-4 – Resultados da análise de variância para verificação da influência da composição do concreto e da idade sobre a variação relativa de massa de água durante os ensaios de retração por secagem.

Efeito	GL	SQ	MQ	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	<b>42</b>	1919,86	30,96	-	1,82	Significativo
<b>ERRO</b>	<b>20</b>	142,80	1,12	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>62</b>	2062,66	30,96	-	-	-
<b>COMPOSIÇÃO DO CONCRETO (1)</b>	<b>2</b>	1,79x10 <sup>5</sup>	89579	38,00	3,49	Significativo
<b>TEMPO DE SECAGEM (2)</b>	<b>20</b>	16,46x10 <sup>5</sup>	82321	34,93	2,12	Significativo
<b>(1) e (2)</b>	<b>40</b>	94,28	2,36	0,00	1,99	Não significativo
<b>r<sub>mod</sub> = 0,97; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = 0,94</b>						

Onde:

GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultados = resultado da análise;

r<sub>mod</sub> = coeficiente de correlação do modelo; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = coeficiente de determinação do modelo.

Tabela D-5 – Resultados da análise de variância para verificação da influência da composição do concreto e da idade sobre a variação relativa de massa de água durante os ensaios de retração total.

Efeito	GL	SQ	MQ	F calculado	F tabelado	Resultado
<b>MODELO</b>	<b>35</b>	768,13	21,95	45,99	1,86	Significativo
<b>ERRO</b>	<b>27</b>	12,88	0,48	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>62</b>	781,01	22,43	-	-	-
<b>COMPOSIÇÃO DO CONCRETO (1)</b>	<b>2</b>	3,58x10 <sup>5</sup>	1,79x10 <sup>5</sup>	375,46	3,35	Significativo
<b>IDADE (2)</b>	<b>33</b>	4,09x10 <sup>5</sup>	12417	26,02	1,87	Significativo
<b>r<sub>mod</sub> = 0,99; r<sup>2</sup><sub>mod</sub> = 0,98</b>						

Tabela D-6 - Resultados da análise de variância para verificação da influência da composição do concreto, do revestimento na superfície dos corpos-de-prova, da idade de carregamento e do tempo de carregamento sobre as deformações sob manutenção de carregamento.

Efeito	GL	SQ	MQ	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	<b>43</b>	$2,74 \times 10^5$	$0,06 \times 10^5$	40,30	1,41	Significativo
<b>ERRO</b>	<b>471</b>	$0,74 \times 10^5$	$0,16 \times 10^3$	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>514</b>	$3,48 \times 10^5$	$0,32 \times 10^3$	-	-	-
<b>COMPOSIÇÃO DO CONCRETO (1)</b>	<b>2</b>	31914,3	15957,1	100,76	3,01	Significativo
<b>SUPERFÍCIE DO CORPO-DE-PROVA (2)</b>	<b>1</b>	65613,1	65613,1	414,31	3,86	Significativo
<b>IDADE DE CARREGAMENTO (3)</b>	<b>2</b>	5577,4	2788,7	17,61	3,01	Significativo
<b>TEMPO DE CARREGAMENTO (4)</b>	<b>38</b>	$1,71 \times 10^5$	4508,8	28,47	1,43	Significativo
<b>(1) e (2)</b>	<b>2</b>	16386	8193	17,74	3,01	Significativo
<b>(1) e (3)</b>	<b>4</b>	6109,4	1527,3	2,53	2,39	Não significativo
<b>(2) e (3)</b>	<b>2</b>	887	443,5	0,81	3,01	Não significativo
<b>(2) e (4)</b>	<b>38</b>	34670,3	912,4	6,18	1,43	Significativo
<b>(1) e (2) e (3)</b>	<b>4</b>	1025,4	256,3	0,57	2,39	Não significativo
<b><math>r_{\text{mod}} = 0,94</math>; <math>r^2_{\text{mod}} = 0,90</math></b>						

Onde:

GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados;

F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultados = resultado da análise;

$r_{\text{mod}}$  = coeficiente de correlação do modelo;  $r^2_{\text{mod}}$  = coeficiente de determinação do modelo.

## APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA - INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS SOBRE AS MÉDIAS DAS DEFORMAÇÕES COM E SEM APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO

### 1 *Influência das variáveis sobre as médias de retração*

Nas Figuras E-1 a E-6 ilustram-se as médias globais dos valores de retração obtidos na pesquisa, de acordo com as variáveis influentes (composição do concreto e idade/tempo de secagem). Para todos os gráficos, foram plotados os valores médios de retração no centro do intervalo de confiança adotado como  $\pm 95\%$ . Foram assinalados ainda os intervalos referentes ao desvio-padrão. Cabe salientar que, em cada análise apresentada, a representação do intervalo de confiança e do desvio-padrão pode se inverter, em virtude da melhor apresentação da análise, conforme será discutido oportunamente. De uma forma generalizada, as Figuras E-1 a E-6 resumem a análise estatística desenvolvida, representando a variabilidade dos resultados registrados.

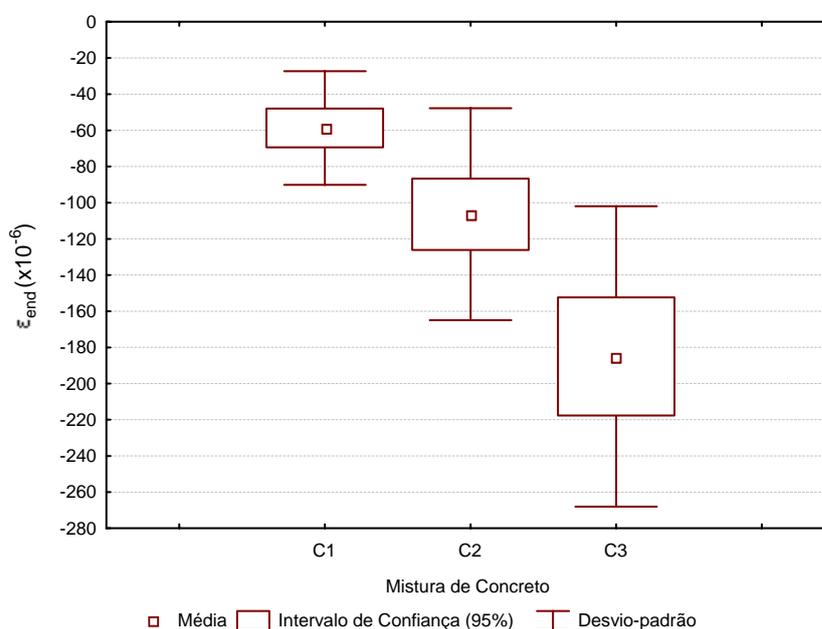


Figura E-1 – Média dos valores de retração endógena apurados na pesquisa, com desvio padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à composição do concreto.

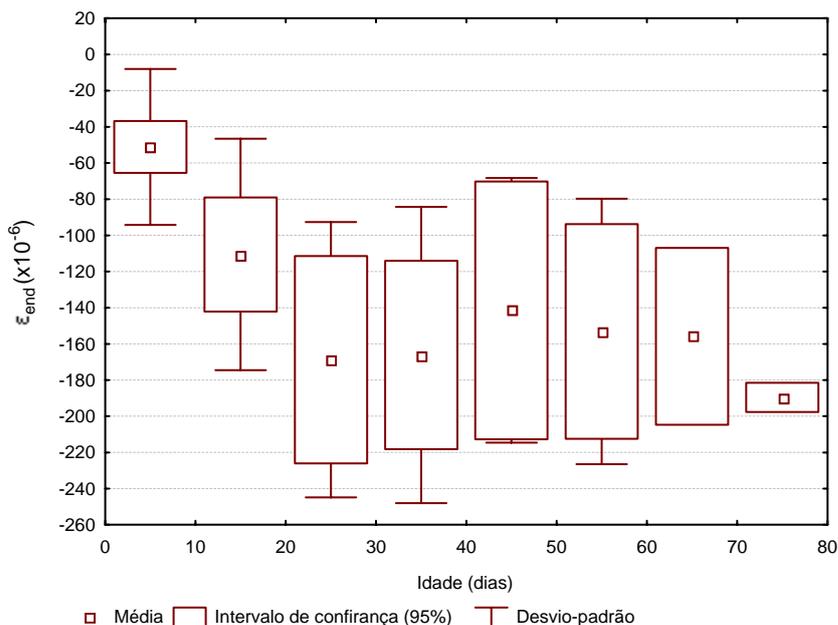


Figura E-2 – Média dos valores de retração endógena apurados na pesquisa, com desvio padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à idade de realização da leitura.

Na Figura E-1 verifica-se o quadro geral do desenvolvimento da retração endógena, ilustrando a tendência dos maiores valores para a relação água/aglomerante igual a 0,44 (concreto C<sub>3</sub>). Pela análise da Figura E-2, onde consta a média dos valores de retração endógena em relação à idade de realização das leituras, comprova-se que, até aproximadamente 20 dias de idade, desenvolveu-se maior taxa de desenvolvimento da retração. A partir desta idade até o final das leituras, a variação resultou médias mais aproximadas.

Adotando o desvio-padrão (medida da variabilidade dos resultados apurados na pesquisa) e o intervalo de confiança (intervalo de valores que contêm a média da população com certa probabilidade de certeza) de  $\pm 95\%$ , pela análise da Figura E-1, verifica-se que os desvios-padrão das composições de concreto foram superiores aos respectivos intervalos de confiança. Esse aspecto se deve ao fato de que esta análise se refere ao agrupamento dos dados segundo a composição do concreto, contendo registros de deformação durante todo o período de ensaios. Para a análise disposta na Figura E-2, os desvios-padrão foram reduzidos, de forma que, nas medidas realizadas em idades mais avançadas, os desvios foram menores que os respectivos intervalos de confiança. Assim, para os resultados de retração endógena, tanto as composições de concreto pesquisadas, como as baixas idades influenciam a variabilidade dos resultados, ocasionando maior comprimento para o desvio-padrão. Entre as duas análises, somente a composição do concreto C<sub>1</sub> (Figura E-1) e os dados apurados na idade aproximada

de 80 dias (Figura E-2) apresentaram intervalos de confiança mais estreitos, para  $\pm 95\%$  de precisão.

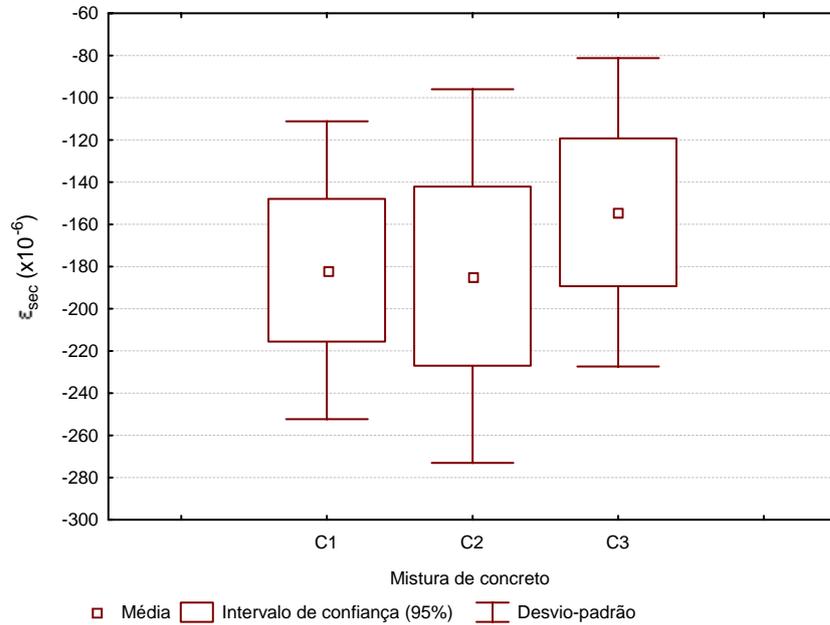


Figura E-3 – Média dos valores de retração por secagem apurados na pesquisa, com desvio padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à composição do concreto.

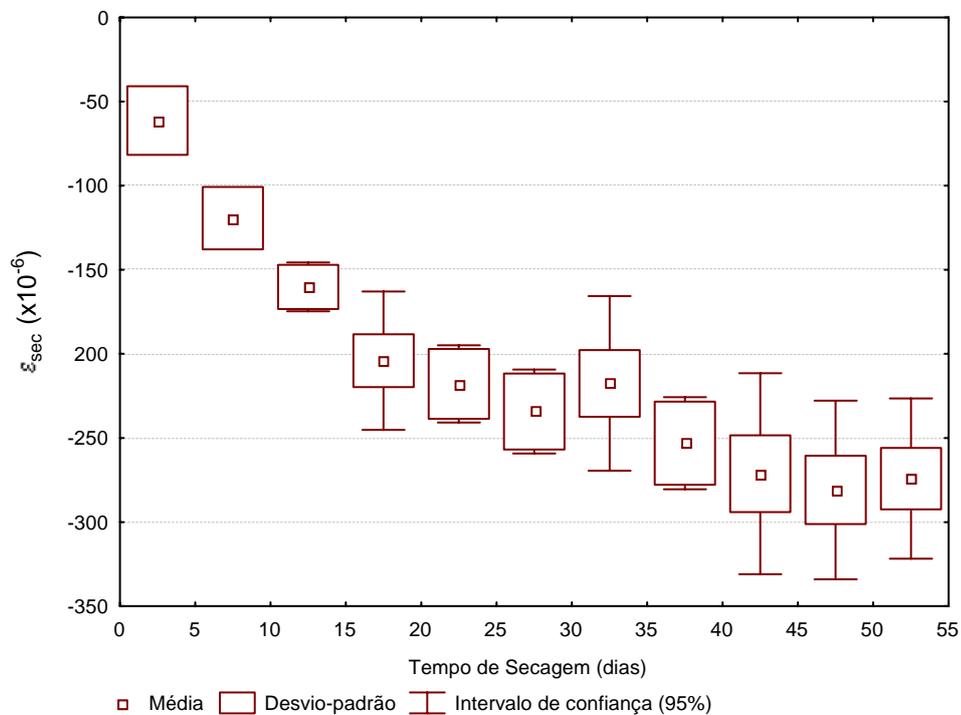


Figura E-4 – Média dos valores de retração por secagem apurados na pesquisa, com desvio padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação ao tempo de secagem.

Pela Figura E-3 verifica-se que as médias de retração por secagem dos concretos C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>

foram bastante próximas e superiores à média obtida para o concreto C<sub>3</sub>, comprovando o resultado do agrupamento de médias. Além disso, a exemplo do comportamento delineado para a retração endógena, os desvios-padrão foram superiores aos respectivos intervalos de confiança, independente da composição do concreto em questão.

A visualização das médias demonstradas na Figura E-4 ilustra a diferenciação no desenvolvimento de retração, segundo uma velocidade mais acentuada até aproximadamente 20 dias de secagem. Nesta análise, de um modo geral, tanto os desvios-padrão como os intervalos de confiança tiveram comprimentos inferiores aos calculados para a retração endógena, sendo possível englobar os desvios dentro dos respectivos intervalos de confiança. A partir dos 40 dias, o comprimento dos intervalos de confiança aumentou, denotando maior dificuldade em englobar a média dos dados registrados com  $\pm 95\%$  de confiança. Assim, o prosseguimento da secagem gerou maior variabilidade dos resultados de retração por secagem.

Ademais, a exemplo do comportamento demonstrado pelas médias das retrações endógena e por secagem, a Figura E-5 ilustra que a variabilidade dos resultados de retração, em relação à composição do concreto, foi alta. As médias foram estatisticamente diferentes, sendo o concreto C<sub>1</sub> o mais afetado pelo desenvolvimento da retração total. A análise dos resultados de retração total em relação à idade de realização dos ensaios, mostrada na Figura E-6, comprovou ser a idade o fator mais significativo do modelo de análise. Através desta análise, sem considerar a influência do fator composição do concreto, verificou-se a redução da extensão dos desvios-padrão e dos intervalos de confiança, com exceção dos resultados apurados para idades entre 70 e 80 dias, que resultaram em intervalo de confiança com extensão mais ampla. Desta forma, conforme citado para a retração por secagem, o prosseguimento da secagem ocasionou maior variabilidade nos resultados registrados de retração total.

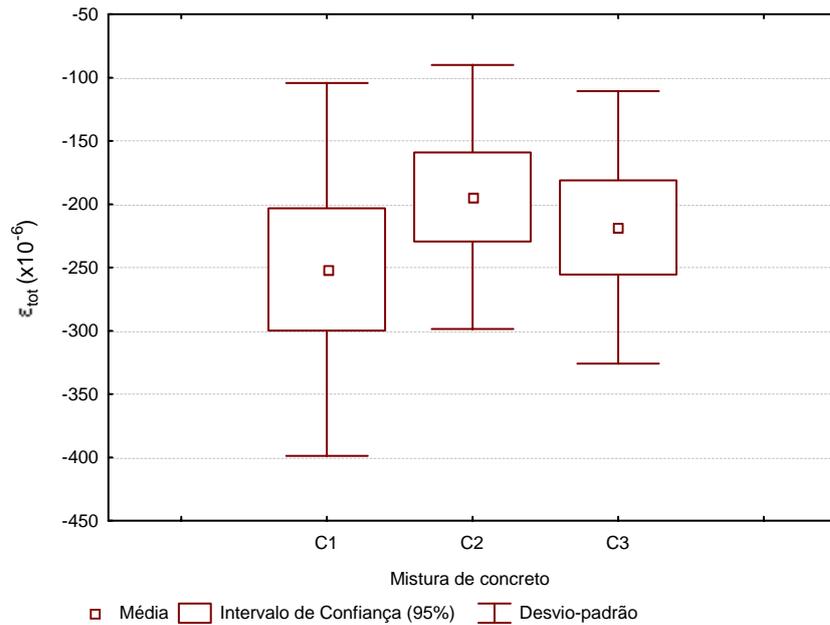


Figura E-5 – Média dos valores de retração total apurados na pesquisa, com desvio padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à composição do concreto.

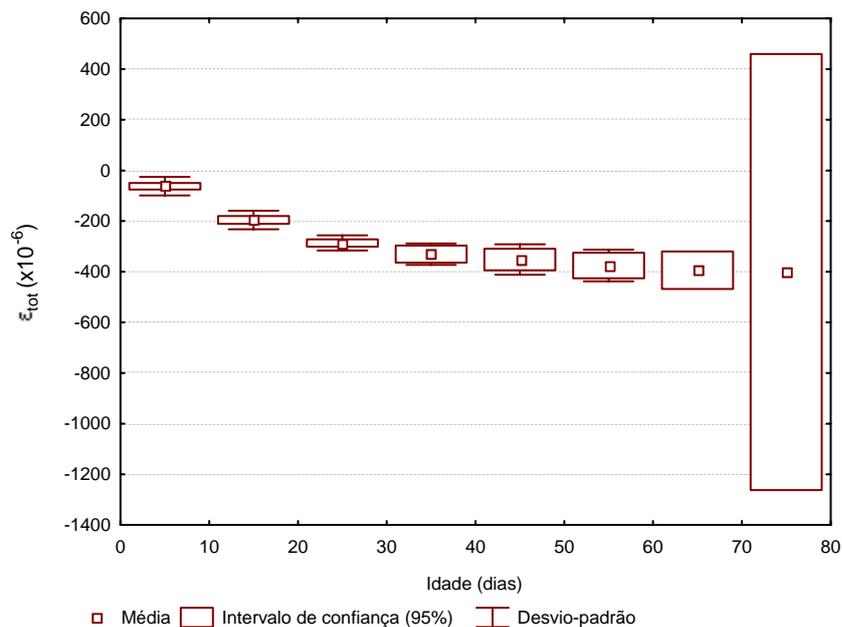


Figura E-6 – Média dos valores de retração total apurados na pesquisa, com desvio padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à idade de realização da leitura.

## 2. Influência das variáveis sobre as médias do potencial de fluência específica

Nas Figuras E-7 a E-10 ilustram-se, respectivamente, as médias dos resultados globais do potencial de fluência específica em relação às variáveis aplicadas ao estudo. Para todos os gráficos, foram plotados os valores médios do potencial de fluência específica no centro do

intervalo de confiança adotado como  $\pm 95\%$ . Foram assinalados ainda os intervalos referentes ao desvio-padrão.

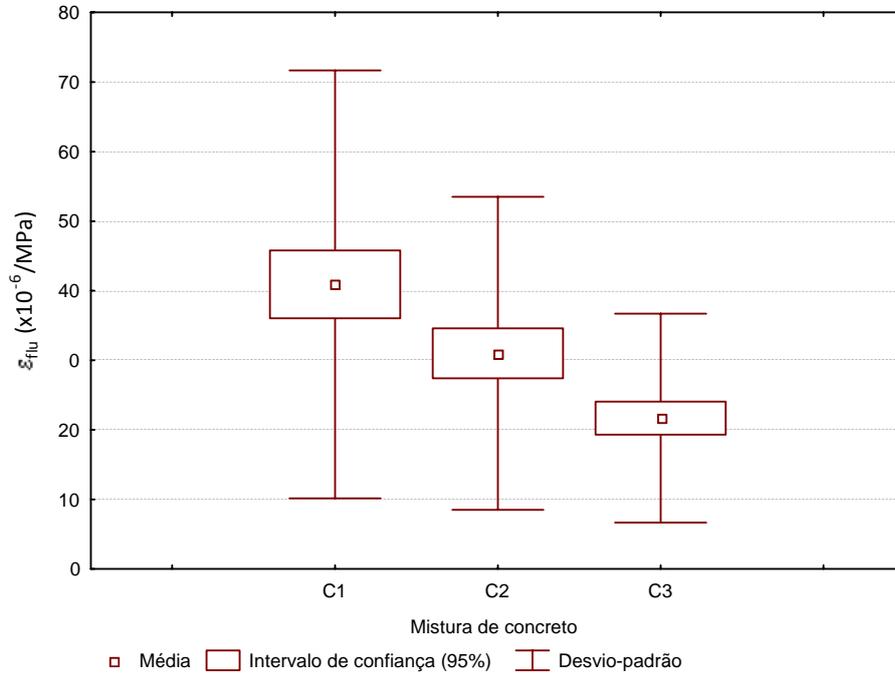


Figura E-7 – Média dos valores globais do potencial de fluência específica, com desvio-padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à composição do concreto.

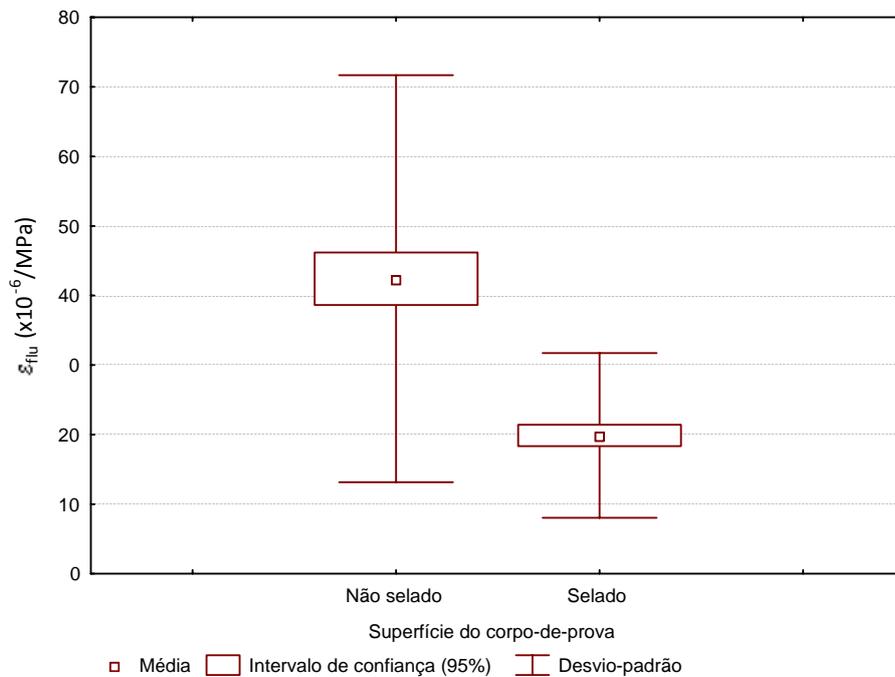


Figura E-8 – Média dos valores globais do potencial de fluência específica, com desvio-padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação ao revestimento da superfície dos corpos-de-prova.

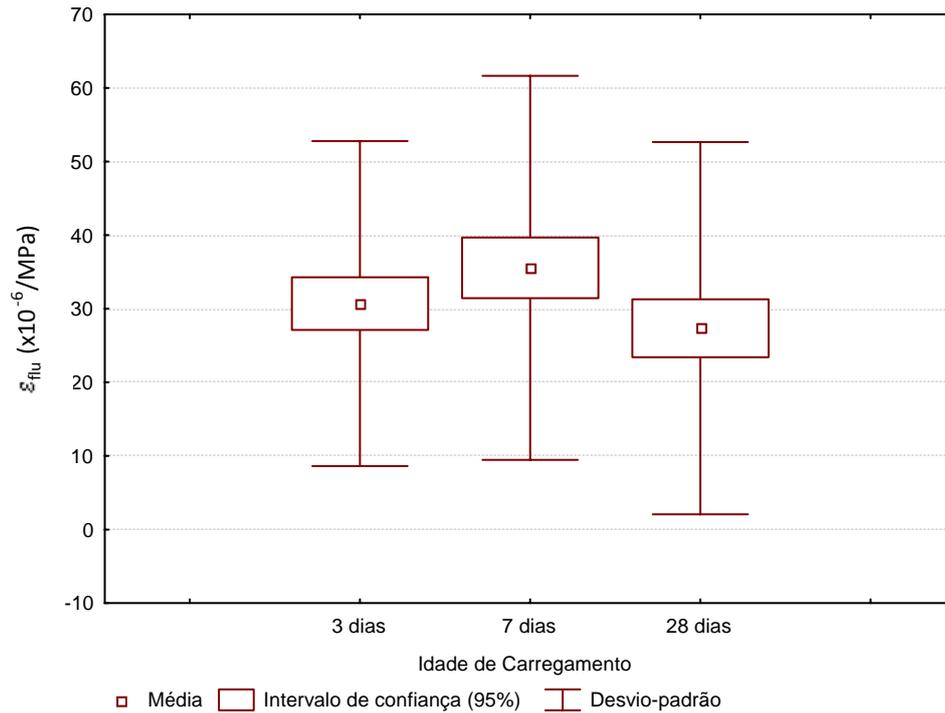


Figura E-9 – Média dos valores globais do potencial de fluência específica, com desvio-padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à idade de aplicação do carregamento.

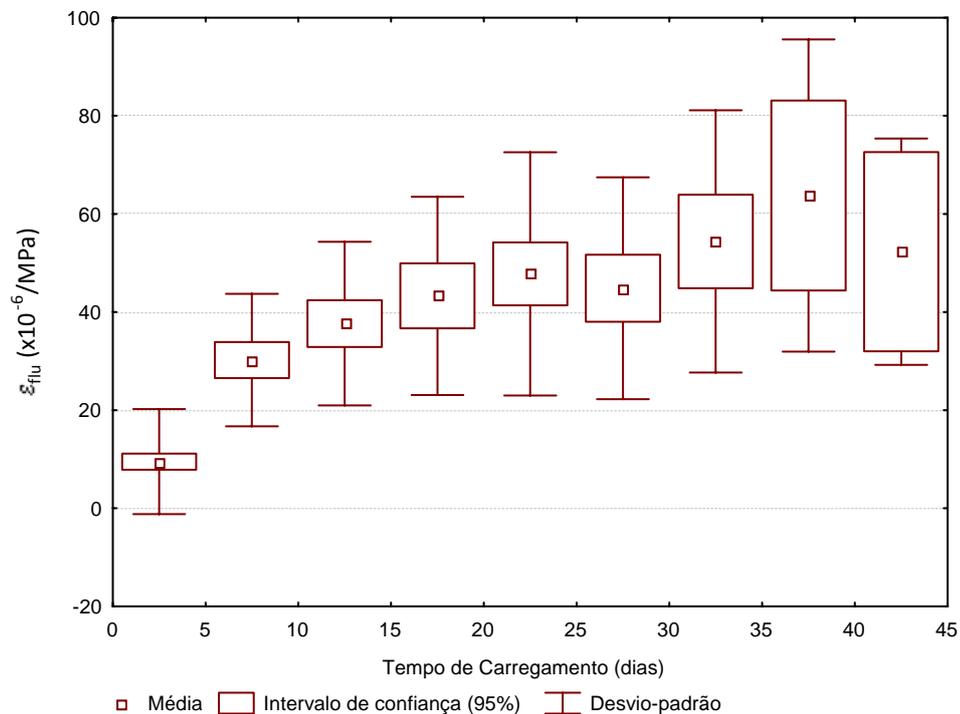


Figura E-10 – Média dos valores globais do potencial de fluência específica, com desvio-padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação ao tempo transcorrido de carregamento na data de leitura da deformação.

De modo geral, as Figuras E-7 a E-10 resumem a análise estatística desenvolvida até o momento, representando a variabilidade dos resultados registrados. Pela análise dos gráficos,

verifica-se que, embora os desvios tenham sido grandes, os intervalos de confiança foram mais estreitos. Para as médias de resultados em relação ao tempo transcorrido de carregamento na data de leitura de deformação, nas últimas idades de leitura, o comprimento dos intervalos de confiança aumentou consideravelmente, denotando que, conforme aumentou o período de carregamento, as deformações aumentaram e se processaram com maior dificuldade em englobar a média dos resultados, com  $\pm 95\%$  de certeza. Esse comportamento também foi comum às deformações por retração. Denota-se, desta forma, que uma parcela da deformação por fluência específica engloba a retração de várias naturezas desenvolvida pelos concretos em estudo. Esse comportamento pode ser comprovado através da análise das Figuras E-11, E-12 e E-13, onde constam as médias do potencial de fluência específica apurados após 35 dias de carregamento.

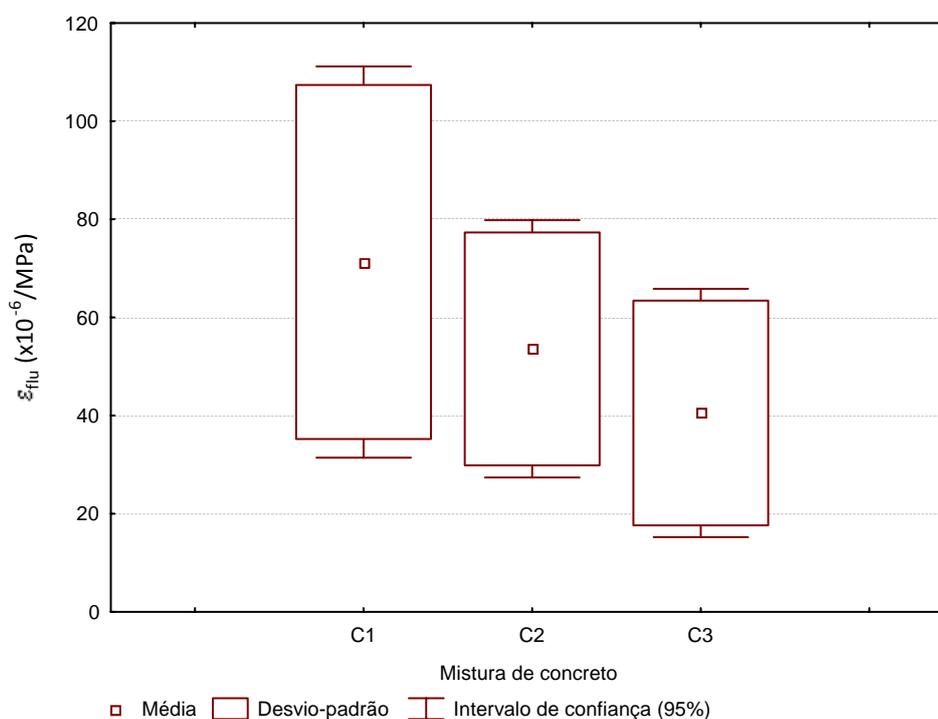


Figura E-11 – Média dos valores globais do potencial de fluência específica, com desvio-padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à composição do concreto, para idade de 35 dias.

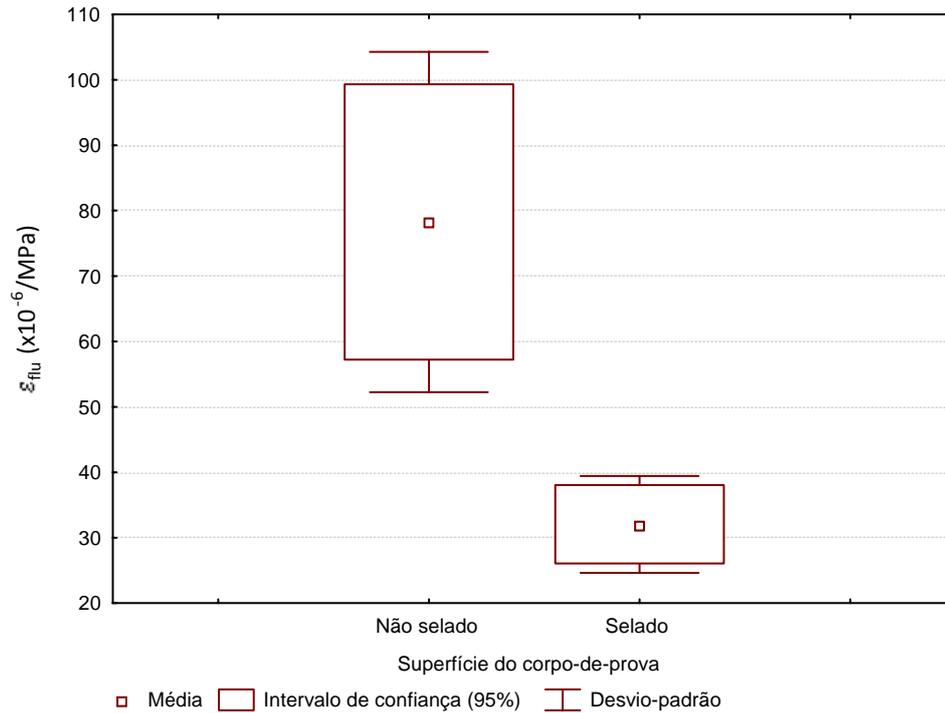


Figura E-12 – Média dos valores globais do potencial de fluência específica, com desvio-padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação ao revestimento da superfície dos corpos-de-prova, para idade de 35 dias.

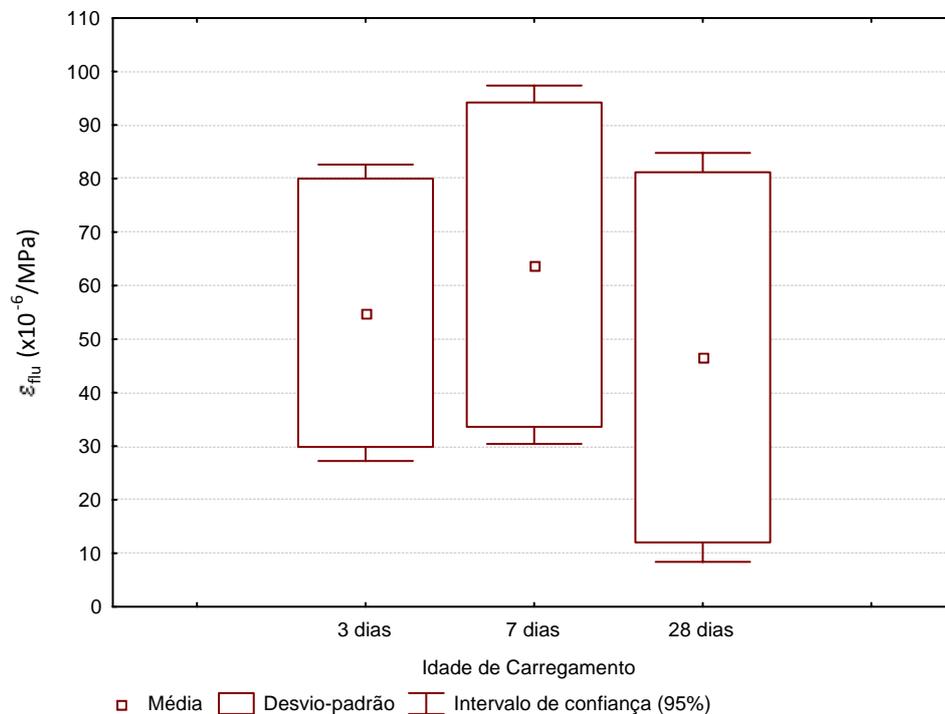


Figura E-13 – Média dos valores globais do potencial de fluência específica, com desvio-padrão e intervalo de confiança de  $\pm 95\%$ , em relação à idade de aplicação do carregamento, para idade de 35 dias.

Conforme citado anteriormente, após 35 dias de carregamento, a maior diferença entre as

médias foi ocasionada pela aplicação (ou não) de revestimento na superfície dos corpos-de-prova. Além disso, dentre as demais variáveis aplicadas ao estudo (composição do concreto e idade de aplicação de carregamento), especificamente na análise dos resultados após 35 dias de carregamento, somente a composição do concreto se diferenciou, segundo duas médias distintas, conforme evidenciado no Teste de Duncan. Para a variação da idade de aplicação do carregamento, as médias foram próximas. De modo geral, independentemente da variável analisada, os desvios-padrão foram consideráveis, demonstrando a influência de vários fatores durante a realização das leituras. De acordo com a análise realizada no Item 5.3, estima-se que essa variabilidade poderia estar associada, ainda, à hipótese do desenvolvimento adicional de deformação devida à simultaneidade dos fenômenos.

## APÊNDICE F – DESCRIÇÃO DA MODELAGEM APLICADA NA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

### 1. Modelagem da retração do concreto

#### 1.1 Retração autógena segundo Gilbert (1998):

$$\varepsilon_{aS}(t) = \varepsilon_{aS}^* (1 - e^{-0,1t}),$$

Onde:

$\varepsilon_{aS}(t)$  é a retração autógena final, adotada como  $(3f'_c - 50) \cdot 10^{-6}$ , com  $f'_c$  em MPa.

#### 1.2 Retração por secagem segundo CEB (Comite Euro-Internacional du Beton, 1990):

$$\varepsilon_S(t, t_S) = \varepsilon_{cSo} \cdot \beta_S(t - t_S),$$

Onde:

$\varepsilon_S(t, t_S)$  é a retração por secagem, para concreto estrutural de 12 MPa até 80 MPa, no domínio linear (para tensões solicitantes não excedentes a 40% da resistência à compressão na idade de carregamento  $t_0$ );

$t_S$  representa a idade do concreto, em dias, ao iniciar a retração por secagem;

$\varepsilon_{cSo}$  representa a influência da umidade relativa e da taxa de resistência média à compressão do concreto ( $f_{cm}/f_{cm0}$ ) na retração;

$\beta_S(t-t_S)$  é a componente temporal da retração, em função das propriedades geométricas da peça a ser analisada.

$$\varepsilon_{cSo} = \varepsilon_{S(f_{cm})} \cdot \beta_{UR}$$

$$\beta_{UR} = -1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{UR}{100} \right)^3 \right], \text{ para } 40\% \leq UR \leq 99\%$$

$$\beta_{UR} = 0,25, \text{ para } UR \geq 99\%$$

$$\varepsilon_{S(f_{cm})} = \left[ 160 + 10 \cdot \beta_{Sc} \cdot \left( 9 - f_{cm}/f_{cmo} \right) \right] \cdot 10^{-6}$$

Onde:

UR é a umidade relativa do ar atmosférico, em porcentagem;

$\beta_{Sc}$  tem valor igual a 4 para cimentos de endurecimento lento, 5 para cimentos de endurecimento normal ou rápido e 8 para cimentos de endurecimento rápido ou concretos de alta resistência;

$f_{cm}$  é a média de resistência à compressão aos 28 dias (em MPa);

$f_{cmo}$  vale 10 MPa.

$$\beta_S(t - t_S) = \left[ \frac{(t - t_S)/t_1}{350 \cdot (h/h_o)^2 + (t - t_S)/t_1} \right]^{0,5}$$

Onde:

$t_1$  equivale ao período de 1 dia;

$h_o$  equivale a 100 mm;

$h$  é a espessura efetiva ou equivalente da peça em análise (em mm), obtida através da expressão:  $h = 2A_c/U$ , sendo que  $A_c$  é a área da seção transversal (em mm<sup>2</sup>) e  $U$  é o perímetro da seção em contato com a atmosfera (em mm).

### 1.3 Fluência segundo CEB (Comite Euro-Internacional du Beton, 1990):

A deformação específica por fluência em um dado instante  $t$ , considerando uma tensão constante ( $\sigma_c$ ) aplicada no instante  $t_o$  é definida pelo CEB como:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_o) = \frac{\sigma_c(t_o)}{E_{ci}} \cdot \phi(t, t_o),$$

Onde:

$E_{ci}$  é o módulo de elasticidade aos 28 dias de idade;

$\phi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência que define as propriedades da fluência e é expresso por  $\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$ , onde  $\phi_0$  é o coeficiente de fluência nominal e  $\beta_c$  é o coeficiente correspondente ao desenvolvimento da fluência com o tempo depois do carregamento.

A expressão do coeficiente de fluência nominal é dada por:

$$\phi_0 = \phi_{UR} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0),$$

Sendo:

$$\phi_{UR} = 1 + \frac{1 - UR/UR_0}{0,46 \left(h/h_0\right)^{1/3}}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{\left(f_{cm}/f_{cm0}\right)^{0,5}}$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + \left(t_0/t_1\right)^{0,2}}$$

Onde:  $UR_0 = 100\%$ .

O coeficiente  $\beta_c$ , que determina o desenvolvimento da fluência ao longo do tempo, é explicitado por:

$$\beta_c(t - t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]$$

Onde:

$$\beta_H = 150 \cdot \left[ 1 + \left( 1,2 \cdot \frac{UR}{UR_0} \right)^{18} \right] \cdot \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500$$

#### 1.4 *Parâmetros adotados para o cálculo dos índices aplicados às modelagens:*

##### 1.4.1 *Modelagem da retração do concreto*

- a) Para o cálculo da retração autógena final, foi adotado o tempo  $t$  igual a 3, 7 e 28 dias e a resistência  $f'_c$  como as resistências médias determinadas para cada uma das idades avaliadas;
- b) Para o cálculo da retração por secagem, foi considerado que a idade  $t_s$ , na qual iniciou-se a retração por secagem, foi igual a 0 dias, uma vez que, para determinação da retração nos prismas não selados, as medidas se iniciaram a partir da determinação do patamar de percolação;
- c) Para o cálculo da retração por secagem, foi adotado para  $f_{cm}$ , a resistência média à compressão, para cada tipo de concreto, determinada aos 28 dias de idade;
- d) Para o cálculo da retração por secagem, foi adotado o valor de 50% para UR dos corpos-de-prova não selados e o valor de 100% para UR dos corpos-de-prova selados;
- e) Para o cálculo da retração por secagem, foi adotado  $\beta_{sc}$  igual a 8 (cimento de endurecimento rápido);
- f) Para o cálculo da retração por secagem, foi adotado o tempo  $t$  igual a 3, 7 e 28 dias, a depender da idade avaliada;
- g) Para o cálculo da retração por secagem, o parâmetro  $h$  (espessura efetiva) foi calculado com base na área da seção transversal do prisma de concreto (75 mm x 75 mm x 285 mm) e no perímetro da seção em contato com a atmosfera, sendo que, anteriormente à desforma, a secagem se processou através de uma face de 75 mm x 285 mm.

##### 1.4.2 *Modelagem da fluência do concreto*

- a) Para o cálculo da fluência, foi adotado o valor do módulo de elasticidade determinado aos 28 dias, para cada mistura de concreto;
- b) Para o cálculo da fluência, foi adotado o valor de 50% para UR;
- c) Para o cálculo da fluência, foi adotado para  $f_{cm}$ , a resistência média à compressão, para cada tipo de concreto, determinada aos 28 dias de idade;

- d) Para o cálculo da fluência, foi adotado para  $t_0$  a data de aplicação de carregamento aos corpos-de-prova e para  $t$  o período (em dias) decorrido desde a aplicação de carregamento até à data de determinação da fluência;
- e) Para o cálculo da fluência, o parâmetro  $h$  (espessura efetiva) foi calculado com base na área da seção transversal do corpo-de-prova cilíndrico (diâmetro de 150 mm) e no perímetro total da seção em contato com a atmosfera (corpos-de-prova não selados).