

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL  
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

FELIPE PEDROSA DE LIMA

FLUÊNCIA EM CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO: MODELOS DE  
PREVISÃO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Maceió  
2020

FELIPE PEDROSA DE LIMA

FLUÊNCIA EM CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO: MODELOS DE  
PREVISÃO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wayne Santos de Assis

Maceió

2020

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

L732f Lima, Felipe Pedrosa de.  
Fluência em concretos de ultra-alto desempenho : modelos de previsão e simulação computacional / Felipe Pedrosa de Lima. - 2020.  
100 f. : il.

Orientador: Wayne Santos de Assis.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 84-93.  
Apêndice: f. 94-100.

1. Concreto de ultra-alto desempenho. 2. Fluência dos materiais. 3. Simulação (Computadores). 4. Geometria e modelagem computacional. I. Título.

CDU:621.7.04



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC



**FLUÊNCIA EM CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO:  
MODELOS DE PREVISÃO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

**FELIPE PEDROSA DE LIMA**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 23 do mês de junho do ano de 2020.

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Wayne Santos de Assis**  
(Orientador – PPGEC/UFAL)

**Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques**  
(Avaliador Interno-PPGEC/UFAL)

**Prof. Dr. Manoel Martins dos Santos Filho**  
(Avaliador Externo – UFAL)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por fortalecer minha capacidade de enfrentar e superar obstáculos.

Aos meus pais, Flávio e Valéria, por todo amor, dedicação e perseverança depositadas em mim.

As minhas irmãs, Camila e Carolina, assim como minha família, pelo suporte e união.

A minha namorada, Nathália, pelo amor e carinho mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Professor Dr. Wayne Santos de Assis, pela confiança na minha pesquisa, orientação e apoio à realização desde trabalho.

Aos professores Dra. Karolinne Moraes e Dr. Paulo Gomes, pelas contribuições pertinentes na minha banca de qualificação.

Ao Professor Dr. Romildo Toledo (PUC – Rio), por me motivar e disponibilizar referências científicas para o trabalho.

Aos meus amigos, que me acompanharam nessa trajetória, em especial Ricardo Vital, Lucas Omena, Matheus Cedrim, Jonas Duarte, Diogo Rayan e Helene Soares, pela amizade e ótimos momentos de descontração.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e do Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), que contribuíram para minha formação acadêmica.

Ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) e o Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA), pelas oportunidades e instalações ofertadas.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro à pesquisa.

A todos, muito obrigado.

## RESUMO

Avanços nas pesquisas de materiais cimentícios guiaram o desenvolvimento dos Concretos de Ultra-Alto Desempenho (UHPC). No Brasil ainda não existe uma norma com a definição consensual sobre UHPC. Neste trabalho, entende-se por UHPC concretos com uma microestrutura bastante densa, boa durabilidade, alta trabalhabilidade e altíssima resistência à compressão. Nesta dissertação, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os modelos de previsão da fluência do UHPC, onde identificou-se as recomendações internacionais da AFGC/SETRA (2013), da JSCE (2006) e da Austrália (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000); assim como implementou-se o modelo de previsão da AFGC/SETRA (2013), utilizando o software de análise estrutural Abaqus®. No desenvolvimento do trabalho foram identificadas limitações para a implementação de modelos como o do fib MC2010 e da NBR6118. Os modelos numéricos criados apresentaram resultados com boa aderência ao modelo de previsão e obtiveram resultados de coeficiente de fluência e fluência específica satisfatórios. Entretanto, observou-se que os coeficientes de fluência obtidos nos modelos numéricos criados foram inferiores às sugestões das recomendações internacionais para concretos de ultra-alto desempenho com cura a vapor.

**Palavras-chave:** UHPC, Fluência, Simulação Numérica, Modelagem Computacional.

## **ABSTRACT**

Advances in the research of cementitious materials field have guided the development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). In Brazil there are no standards defining UHPC. This study understands UHPC as concretes with a very dense microstructure, great durability, high workability and very high compressive strength. In this work, a literature review of UHPC creep prediction models was conducted, where international recommendations were identified such as AFGC/SETRA (2013), JSCE (2006) and Australia (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000); as well as the implementation of the AFGC/SETRA (2013) model, using Abaqus<sup>®</sup> structural analysis software. In the development it was identified limitations for the implementation of models like fib MC2010 and NBR 6118. The created numerical models results exhibited a good adherence to the creep model and a satisfactory creep coefficient and specific creep were obtained. However, it was observed that the creep coefficients obtained in the created numerical models were inferior to the suggestions of the international recommendations for UHPC with heat treatment.

Keywords: UHPC, Creep, Numerical Simulation, Computational Modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Passarela de Sherbrooke, Quebec, Canadá, 1997. ....  | 17 |
| Figura 1.2 – Passarela Sakata-Mirai, Japão, 2003. ....  | 18 |
| Figura 1.3 – Ministério das Relações Exteriores, São Paulo, Brasil, 2016. ....  | 19 |
| Figura 1.4 – Casa Japão, São Paulo, Brasil, 2017. ....  | 19 |
| Figura 1.5 – Produção de painéis de UHPC. ....  | 20 |
| Figura 1.6 – Unidade habitacional, São Paulo, Brasil, 2019. ....  | 20 |
| Figura 2.1 – Resistência à compressão com diferentes adições ao UHPC. ....  | 28 |
| Figura 2.2 – Perda de fluidez a partir da abertura inicial. ....  | 29 |
| Figura 2.3 – Perda de fluidez aplicando-se 15 golpes. ....  | 30 |
| Figura 2.4 – Diagrama tensão – deformação de diversos tipos de concreto. ....   | 35 |
| Figura 2.5 – Diagrama tensão – deformação do UHPC em ensaio de compressão uniaxial. ..  | 35 |
| Figura 2.6 – Variação da resistência à compressão de UHPCs com o teor fibras. ....  | 36 |
| Figura 2.7 – Variação da resistência à compressão de UHPCs sujeitos a distintos regimes de cura. ....   | 37 |
| Figura 2.8 – Diagrama tensão – deformação de UHPC reforçado com fibras, obtido a partir de ensaio de tração uniaxial. ....                                      | 38 |
| Figura 2.9 – Corpo de prova de UHPC após ensaio de tração uniaxial. ....  | 39 |
| Figura 2.10 – Resistência à compressão do UHPC com diferentes tipos e teor de fibras. ....  | 41 |
| Figura 2.11 – Comportamento mecânico do UHPC com diferentes tipos e teor de fibras. ....  | 41 |
| Figura 2.12 – Resultados de fluência em corpos de prova com diferentes regimes de cura e idade de carregamento. ....  | 45 |
| Figura 2.13 – Distribuição da intrusão diferencial e raio dos poros em espécimes de concreto classe C45/C55, C105, UHPC com agregado graúdo e UHPC. ....        | 48 |
| Figura 2.14 – Porosidade acumulada e diâmetro de poros em concretos de classe de resistência C30, C80 e de pós reativos de 200 MPa com e sem cura térmica. .... | 49 |
| Figura 3.1 – Deformação dependente do tempo em concreto submetido à carga constante. ....   | 50 |
| Figura 3.2 – Deformação do concreto convencional durante um ciclo de carregamento e descarregamento. ....   | 51 |
| Figura 3.3 – Fluência específica básica de um concreto Ductal® curado no ar ambiente. ....  | 58 |
| Figura 3.4 – Coeficiente de fluência de concretos de ultra-alto desempenho reforçado com fibras após cura a vapor. ....   | 59 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.1 – Representação do mecanismo usado nos ensaios de fluência apresentado nas<br>Recomendações da AFGC/SETRA (2013) e no trabalho de Loukili et al. (1998). ... | 66  |
| Figura 4.2 – Elemento B21 do ABAQUS® .....  | 67  |
| Figura 4.3 – Distribuição dos elementos. ....   | 67  |
| Figura 4.4 – Elemento C3D6 e C3D8R do ABAQUS®, respectivamente. ....  | 68  |
| Figura 4.5 – Malha do modelo tridimensional. ....   | 68  |
| Figura 4.6 – Distribuição da malha do modelo. ....  | 69  |
| Figura 5.1 – Análise de convergência de deformação ao longo tempo no modelo<br>unidimensional. ....   | 70  |
| Figura 5.2 – Análise de convergência de deformação ao longo tempo no modelo<br>tridimensional. ....   | 71  |
| Figura 5.3 – Deformação ao longo do tempo do modelo matemático e dos modelos numéricos<br>tridimensional e unidimensional. ....   | 72  |
| Figura 5.4 – Deformação ao longo do tempo dos resultados experimentais e dos modelos<br>numéricos tridimensional e unidimensional. ....                                 | 72  |
| Figura 5.5 – Deformação na direção do carregamento ( $\epsilon_{xx}$ ), em mm/mm, no modelo<br>unidimensional. ....   | 75  |
| Figura 5.6 – Deslocamentos na direção do carregamento ( $\delta_{xx}$ ), em mm, no modelo<br>unidimensional. ....   | 75  |
| Figura 5.7 – Deformação na direção do carregamento ( $\epsilon_{zz}$ ), em mm/mm, no modelo<br>tridimensional. ....   | 76  |
| Figura 5.8 – Deslocamentos na direção do carregamento ( $\delta_{xx}$ ), em mm, no modelo<br>tridimensional. ....   | 76  |
| Figura 5.9 – Deformação longitudinal ao longo do tempo do modelo numérico e do ensaio de<br>Graybeal (2006). ....   | 78  |
| Figura 5.10 – Deformação $\epsilon_{zz}$ , em mm/mm, no modelo tridimensional. ....   | 80  |
| Figura 5.11 – Deslocamentos $\delta_{xx}$ , em mm, no modelo tridimensional. ....   | 80  |
| Figura A.1 – Diretório do arquivo “ifortvars.bat” .....   | 96  |
| Figura A.2 – Propriedades do Abaqus CAE. ....   | 96  |
| Figura A.3 – Configuração do Destino das Propriedades do Abaqus CAE .....   | 97  |
| Figura A.4 – Configuração do Destino das Propriedades do Abaqus Command. ....   | 97  |
| Figura A.5 – Configuração do Destino das Propriedades do Abaqus Verification .....  | 98  |
| Figura A.6 – Criando um arquivo de texto com o nome de “ifortvars_intel64.bat” .....  | 100 |
| Figura A.7 – Indicação do caminho para o ifortvars.bat no arquivo “ifortvars_intel69.bat”. ....   | 100 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura A.8 – Verificação “Abaqus verify -std” no Abaqus Command..... | 101 |
| Figura A.9 – Arquivo verify.log.....                                 | 101 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Composição genérica de um concreto Ductal® .....  | 26 |
| Tabela 2.2 – Composição econômica com desempenho ótimo de Alkaysi (2016).....  | 27 |
| Tabela 2.3 – Tipos de cura mais utilizados em UHPC e principais citações. ....   | 32 |
| Tabela 2.4 – Descrição dos espécimes ensaiados por Soliman (2014) e resistência à<br>compressão. ....  | 40 |
| Tabela 2.5 – Descrição dos tipos de fibras utilizadas por Yoo et al. (2017). ....  | 40 |
| Tabela 3.1 – Limitações dos modelos de fluência.....   | 55 |
| Tabela 3.2 – Fluência em compressão em corpos de prova com cura ao ar ambiente.....  | 57 |
| Tabela 3.3 – Coeficiente de fluência aos 150 dias, em relação a idade no carregamento.....   | 60 |
| Tabela 5.1 – Coeficiente de fluência aos 90 dias e sugeridos nas recomendações<br>internacionais.....  | 73 |
| Tabela 5.2 – Erro relativo dos resultados do coeficiente de fluência dos modelos<br>unidimensional e tridimensional em relação as recomendações internacionais.....                                    | 73 |
| Tabela 5.3 – Resultados da fluência específica aos 90 dias e estimativas de acordo com<br>recomendações internacionais. ....   | 74 |
| Tabela 5.4 – Erro relativo dos resultados de fluência específica dos modelos unidimensional e<br>tridimensional em relação as estimativas de acordo com as recomendações<br>internacionais.....        | 74 |
| Tabela 5.5 – Deformação inicial e final dos resultados da modelagem e de Graybeal (2006).  | 77 |
| Tabela 5.6 – Coeficientes de fluência e fluência específicas aos 360 dias.....   | 77 |
| Tabela 5.7 – Coeficientes de fluência obtidos e sugeridos nas recomendações internacionais.<br>.....   | 78 |
| Tabela 5.8 – Comparação dos erros relativos do modelo numérico e de Graybeal (2006) em<br>relação às sugestões das recomendações internacionais .....  | 79 |
| Tabela 5.9 – Fluências específicas obtidas e estimados de acordo com as recomendações<br>internacionais.....   | 79 |
| Tabela 5.10 – Erros relativos dos resultados de fluência específica do modelo numérico e de<br>Graybeal (2006) em relação às estimativas criadas de acordo com as recomendações<br>internacionais..... | 80 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |   |
|--------|---|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                      |
| ACI    | <i>American Concrete Institute</i>                            |
| AFGC   | <i>Association Française de Génie Civil</i>                   |
| ASTM   | <i>American Society for Testing and Materials</i>             |
| CAD    | Concreto alto desempenho                                      |
| CC     | Concreto do grupo I da NBR 8953: 2015                         |
| CNPq   | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| CP     | Cimento Portland  |
| CPR    | Concreto de Pós Reativos                                      |
| fib    | <i>International Federation for Structural Concrete</i>       |
| INCT   | Programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia         |
| JSCE   | <i>Japanese Society of Civil Engineers</i>                    |
| NBR    | Norma Brasileira do concreto NBR                              |
| SETRA  | <i>Service D'étude des Transports</i>                         |
| UFAL   | Universidade Federal de Alagoas UFAL                          |
| UHPC   | <i>Ultra-High Performance Concrete</i>                        |
| UHPRRC | <i>Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete</i>       |
| UNSW   | <i>University of New South Wales</i>                          |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Romanos:

|              |  |
|--------------|--|
| $A_c$        | Área da seção transversal do corpo de prova          |
| $J$          | Fluência específica por unidades de tensão           |
| $t$          | Idade do concreto na moldagem                        |
| $t_0$        | Idade do concreto no carregamento                    |
| $t_T$        | Idade do concreto ajustada pela temperatura          |
| $E$          | Módulo de elasticidade tangente do concreto          |
| $E_0$        | Módulo de elasticidade secante do concreto           |
| $E_{28}$     | Modulo de elasticidade aos 28 dias do concreto       |
| $E_c$        | Módulo de elasticidade na compressão do concreto     |
| $E_{ct}$     | Módulo de elasticidade longitudinal do concreto      |
| $E_{cm,28}$  | Módulo de elasticidade médio aos 28 dias do concreto |
| $u$          | Perímetro de um corpo de prova                       |
| $f'_c$       | Resistência característica à compressão do concreto  |
| $f_{ck}$     | Resistência característica à compressão do concreto  |
| $f_{cm}$     | Resistência média à compressão do concreto           |
| $f_{cm,cal}$ | Resistência média à compressão ajustada do concreto  |
| $f_{ct}$     | Resistência do concreto à tração direta              |
| $T$          | Temperatura  |
| $RH$         | Umidade relativa do ar                               |

### Símbolos Gregos:

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\varphi$            | Coefficiente de fluência  |
| $\varphi_{bc}$       | Coefficiente de fluência básica   |
| $\varphi_{dc}$       | Coefficiente de fluência por secagem  |
| $\beta_{bc}(f_{cm})$ | Coefficiente na fluência básica que considera a resistência à compressão      |
| $\beta_{bc}(t, t_0)$ | Coefficiente na fluência básica que considera a evolução ao longo do tempo    |
| $\beta_{dc}(f_{cm})$ | Coefficiente na fluência por secagem que considera a resistência à compressão |
| $\beta_{dc}(RH)$     | Coefficiente na fluência por secagem que considera a umidade relativa         |
| $\beta_{dc}(t_0)$    | Coefficiente na fluência por secagem que considera a idade ajustada           |
| $\beta_{dc}(t, t')$  | Coefficiente na fluência por secagem a evolução ao longo do tempo             |

|                        |   |
|------------------------|---|
| $\beta_h$              | Coefficiente que considera ao tamanho do corpo de prova |
| $\varepsilon$          | Deformação  |
| $\varepsilon_{cu}$     | Deformação por fluência básica específica               |
| $\varepsilon_f$        | Deformação por fluência                                 |
| $\varepsilon_s$        | Deformação por fluência básica por unidade de tensão    |
| $\varepsilon_{xx}$     | Deformação na direção xx                                |
| $\varepsilon_{zz}$     | Deformação na direção zz                                |
| $\delta_{xx}$          | Deslocamento na direção xx                              |
| $\delta_{zz}$          | Deslocamento na direção zz                              |
| $\dot{\varepsilon}(t)$ | Incremento de deformação em função do tempo             |
| $\sigma$               | Tensão  |
| $\sigma_{xx}$          | Tensão na direção xx                                    |
| $\sigma_{zz}$          | Tensão na direção zz                                    |
| $\sigma_{zz}$          | Tensão na direção zz                                    |
| $\Delta$               | Varição de algum parâmetro                              |

### **Níveis de Escala**

$\mu$  microescala ( $10^{-6}$ )

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                              | <b>16</b> |
| 1.1 Objetivos.....                                     | 22        |
| 1.1.1 Objetivos gerais .....                           | 22        |
| 1.1.2 Objetivos específicos.....                       | 22        |
| 1.1.3 Delimitação do trabalho.....                     | 22        |
| 1.2 Justificativa.....                                 | 22        |
| 1.3 Organização do trabalho.....                       | 24        |
| <b>2 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO .....</b>       | <b>25</b> |
| 2.1 Composição e Mistura .....                         | 26        |
| 2.2 Cura .....   | 31        |
| 2.3 Propriedades Mecânicas .....                       | 34        |
| 2.3.1 Resistência à Compressão .....                   | 34        |
| 2.3.2 Resistência à Tração .....                       | 38        |
| 2.3.3 Módulo de Elasticidade .....                     | 42        |
| 2.3.4 Coeficiente de Poisson .....                     | 43        |
| 2.3.5 Retração .....                                   | 43        |
| 2.3.6 Fluência .....                                   | 44        |
| 2.4 Durabilidade .....                                 | 47        |
| <b>3 FLUÊNCIA DO UHPC .....</b>                        | <b>50</b> |
| 3.1 Fatores que afetam a fluência .....                | 52        |
| 3.1.1 Materiais e dosagem .....                        | 52        |
| 3.1.2 Tensão aplicada e resistência.....               | 52        |
| 3.1.3 Propriedades do cimento .....                    | 53        |
| 3.1.4 Aditivos .....                                   | 53        |
| 3.1.5 Umidade relativa do ambiente e temperatura ..... | 53        |
| 3.1.6 Geometria do elemento.....                       | 54        |
| 3.1.6 Idade no carregamento e cura .....               | 54        |
| 3.2 Ensaio de Fluência .....                           | 54        |
| 3.3 Recomendações de Fluência.....                     | 55        |
| 3.3.1 Recomendações Francesas .....                    | 56        |
| 3.3.2 Recomendações Japonesas .....                    | 58        |
| 3.3.3 Recomendações Australianas .....                 | 60        |
| 3.3.4 Outros Trabalhos .....                           | 61        |
| <b>4 METODOLOGIA.....</b>                              | <b>65</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.1 Metodologia da modelagem unidimensional dos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013) .....                        | 66        |
| 4.2 Metodologia da modelagem tridimensional dos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013) .....                        | 67        |
| 4.3 Metodologia da modelagem dos ensaios apresentados por Graybeal (2006).....   | 68        |
| <b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>   | <b>70</b> |
| 5.1 Modelos unidimensional e tridimensional que simulam a fluência nos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013) ..... | 70        |
| 5.2 Resultados da modelagem tridimensional do ensaio de fluência de Graybeal (2006) ...  | 77        |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....</b>   | <b>82</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>84</b> |
| <b>APÊNDICE A .....</b>  | <b>94</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material construtivo mais utilizado no mundo, é amplamente difundido entre projetistas, construtores e operários da construção civil, e constitui uma ótima opção para obras dos mais variados tipos (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011). Por isso, também, é um dos materiais mais estudados, com diversas misturas e patentes desenvolvidas, conferindo-lhe diferentes propriedades mecânicas e físicas. Foi nesse contexto que o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC – *Ultra-High Performance Concrete*) foi criado. Um de seus objetivos é servir de alternativa a concretos dos grupos I e II da NBR 8953: 2015, podendo ser usado, por exemplo, para a minimização das seções de elementos estruturais em sistemas com rigoroso suporte de cargas, em plantas petrolíferas e em ambientes com classe de agressividade forte e muito forte, como classificado pela NBR 6118: 2014 (SANTOS e TUTIKIAN, 2015).

Por ser um material relativamente novo, há poucas normas técnicas sobre a aplicação, produção e controle de qualidade do UHPC. O principal conjunto de recomendações preliminares para projetos usando este material foi elaborado pela Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC/SETRA, 2013), publicado em 2002 e atualizado em 2013. As diretrizes e recomendações de projeto e construção no Japão (JSCE, 2006), e as instruções de cálculo de barras protendidas na Austrália (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000 e FLIETSTRA, J. C., 2011) compõem as iniciativas pioneiras de normatização do UHPC.

A Associação Francesa de Engenharia Civil definiu o UHPC como material de matriz cimentícia com resistência característica à compressão superior a 150 MPa e contendo fibras de aço para obter ductilidade e aumentar a capacidade de resistência à tração.

Existem divergências entre as definições do concreto de ultra-alto desempenho. A Federação Internacional do Concreto Estrutural (*International Federation for Structural Concrete - fib*, 2009) caracteriza o UHPC como uma classe de concreto estrutural com resistência à compressão acima de 120 MPa com perspectiva de elevada durabilidade. No Brasil, ainda, não existe uma definição em norma do que é o concreto de alto desempenho e UHPC (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

Em geral, entende-se por UHPC um concreto com resistência característica à compressão superior a 120 MPa, resistência característica à tração acima de 5 MPa, relação água/cimento (a/c) igual ou inferior a 0,25, no qual a alta densidade e a baixa porosidade da matriz cimentícia conduzem à perspectiva de alta durabilidade. A adição de superplastificantes promove alta trabalhabilidade à mistura e a adição de fibras descontínuas melhora a ductilidade em relação ao concreto estrutural convencional (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013).

Em 1994, os pesquisadores Pierre Richard e Marcel Cheyrezy, do laboratório *Bouygues* na França, em parceria com a empresa Lafarge, desenvolveram uma mistura de concreto de ultra-alto desempenho, que foi chamada de concreto de pós reativos (CPR) e posteriormente transformada em patente. Uma das primeiras aplicações desse concreto foi na substituição de pilares de aço em torres de resfriamento em uma estação de energia (FEHLING *et al.*, 2014).

Segundo Aïtcin (2008), o conceito de concretos de pós reativos se baseia em três princípios básicos: o aumento da homogeneidade do material pela exclusão das partículas graúdas, com conseqüente supressão da zona de transição nas interfaces pasta/agregados graúdos; aumento da compacidade pela otimização das dimensões dos grãos da mistura e refinamento da microestrutura da pasta hidratada por tratamento de cura.

A primeira ponte em UHPC foi a passarela Sherbrooke, sobre o rio Magog, na província de Quebec, Canadá, ilustrada na Figura 1.1. Pré-moldada e protendida, foi construída sem nenhum reforço metálico convencional. Erguida em julho 1997, a passarela apresenta um vão único de 60 m de comprimento e 3 m de largura, permitindo o tráfego de pedestres e ciclistas (BLAISE e COUTURE, 1999).

**Figura 1.1** – Passarela de Sherbrooke, Quebec, Canadá, 1997.



Fonte: Blaise e Couture (1999).

A Figura 1.2 ilustra a passarela Sakata-Mirai, sobre o rio Niita, no Japão, na qual foi empregado concreto de pós reativos no sistema estrutural da superestrutura. A passarela possui vão único com 50,2 m de comprimento e 2,4 m de largura, construída com elementos pré-moldados com protensão externa (FEHLING *et al.*, 2014). De acordo com Tanaka *et al.* (2002), a passarela pesa 56 toneladas – equivalente a 20% do peso caso fosse construída com concreto

estrutural do grupo I –, além disso os materiais e métodos utilizados produziram uma economia de 10% no custo total da obra.

**Figura 1.2** – Passarela de Sakata-Mirai, Japão, 2003.



Fonte: Tanaka *et al.*, 2002 e Couture (1999).

Em 2005, a Alemanha criou um programa nacional de pesquisa e desenvolvimento com orçamento de 12 milhões de euros com o objetivo de ampliar os conhecimentos básicos sobre o UHPC e torná-lo um material mais confiável, disponível e viável (FEHLING *et al.*, 2014; SCHMIDT, 2012). Assim, foi viabilizado o processo de construção de diversas pontes na Alemanha utilizando UHPC (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013).

Desde então, mais de 90 pontes usando UHPC em um ou mais componentes já foram construídas, em países como Austrália, Áustria, Canadá, Coreia do Sul, Croácia, Estados Unidos, França, Itália, Japão, Holanda, Nova Zelândia e Suíça (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013).

O uso de UHPC no Brasil é mais recente, tendo como uma das primeiras obras a fachada do Ministério de Relações Exteriores de São Paulo (ilustrada na Figura 1.3), que foi revitalizada com painéis pré-moldados. A solução proporcionou uma redução de aproximadamente 33% do peso do painel, facilitando a montagem das 8 placas de 2,5 m por 4,5 m, resultando em uma fachada com painel arquitetônico de 90 m<sup>2</sup> (MULLER, KOELLE e ALMEIDA, 2017).

**Figura 1.3** – Ministério das Relações Exteriores, São Paulo, Brasil, 2016.



Fonte: Muller, Koelle e Almeida (2017).

A Casa Japão, inaugurada em 2017 na cidade de São Paulo, é outro exemplo da aplicação de UHPC no Brasil. Ilustrada na Figura 1.4, a fachada do edifício contempla um painel arquitetônico de 116 m<sup>2</sup>, sendo 50% de vazios, produzido com UHPC na cor branca, sem a utilização de pigmentos ou pinturas externas. O painel é composto por 220 placas sobrepostas, de 0,7 m por 0,8 m com 2 cm de espessura média (MULLER, KOELLE e ALMEIDA, 2017).

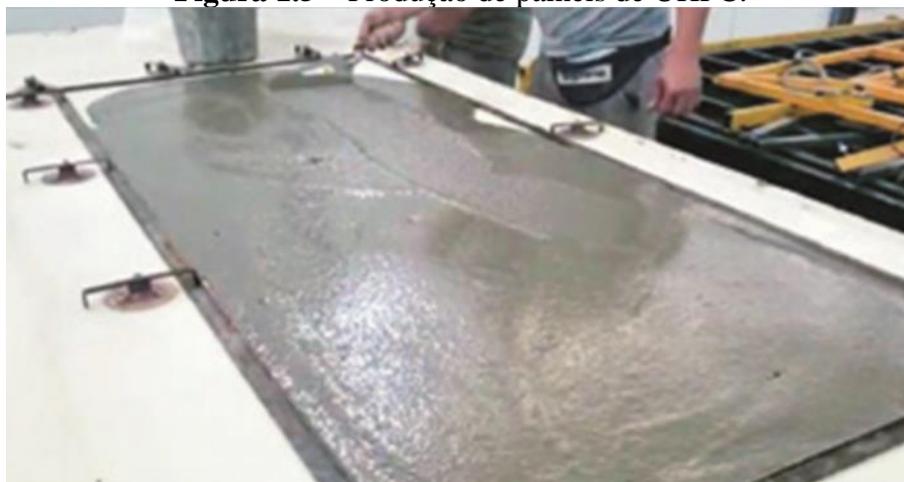
**Figura 1.4** – Casa Japão, São Paulo, Brasil, 2017.



Fonte: Muller, Koelle e Almeida (2017).

Uma aplicação de UHPC em sistema construtivo habitacional no Brasil foi relatada por Christ *et al.* (2019), na construção de casas onde o sistema estrutural empregado é composto por uma estrutura metálica interna, que por sua vez é revestida com painéis tipo sanduíche em UHPC, sendo duas placas de 10 mm de espessura cada, como estrutura de vedação. A Figura 1.5 ilustra a produção dos painéis de UHPC e a Figura 1.6 uma das casas construídas. O método de dosagem aplicado foi desenvolvido por Christ (2019) e devido à logística e custo, fibras de vidro álcali resistente (AR) foram empregadas no lugar de fibras de aço.

**Figura 1.5** – Produção de painéis de UHPC.



Fonte: Christ (2019).

**Figura 1.6** – Unidade habitacional, São Paulo, Brasil, 2019.



Fonte: Christ, (2019).

A relevância do estudo da fluência do UHPC está associada à possibilidade de potencializar uma série de efeitos indesejáveis, como por exemplo o aumento das flechas de vigas e lajes e da curvatura de pilares, com introdução momentos fletores adicionais. Entre os

trabalhos desenvolvidos nesse tema destacam-se os de Graybeal (2006) e Flietstra (2011), nos quais é realizada a caracterização da fluência e retração para diferentes regimes de cura; e os estudos experimentais e numéricos sobre a fluência realizado por Yi Xu et al.(2018) e Li Zhu et al. (2020).

Dentre os estudos e publicações internacionais relevantes, salientam-se alguns marcos tais como: os relatórios acerca do estado de arte do UHPC, em nível global, por Russell e Graybeal (2013); o livro *Ultra-High Performance Concrete UHPC* publicado por Fehling *et al.* (2014), com enfoque nos fundamentos, recomendações de projetos e aplicações pelo mundo; o relatório técnico de Haber et al. (2018), sobre as propriedades e comportamento de materiais da classe UHPC; a atualização de versões das recomendações francesas (AFGC/SETRA, 2013) e japonesas (JSCE, 2006) e os anais das edições do *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, da Universidade de Kassel, na Alemanha.

Considerando os trabalhos realizados por brasileiros, destacam-se a tese de Formagini (2005) orientada pelo professor Romildo Toledo, da UFRJ, abordando a dosagem científica e caracterização mecânica de UHPC; o artigo de Buttignol, Sousa e Bittencourt (2017) sobre a análise das propriedades e especificações de projeto de concretos de ultra alto desempenho reforçado com fibras, fruto de pesquisa realizada na Escola Politécnica da USP, e as produções em parceria do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (ITT Performance) com a Unisinos-RS, com a participação do professor Bernado Tutikian e Roberto Christ.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivos gerais a realização de uma revisão do estado da arte dos concretos de ultra-alto desempenho, a identificação de modelos de previsão da fluência utilizados em UHPC presentes em normas e na literatura, e a implementação do modelo visando obter o comportamento de fluência de um corpo de prova solicitado a compressão axial.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Nesse contexto, buscou-se estabelecer metas específicas tais como:

- a) Implementar de sub-rotinas com os modelos de previsão da fluência de UHPCs identificados na literatura;
- b) Analisar e comparar os resultados da simulação dos modelos de fluência em UHPC com dados de ensaios experimentais disponíveis.

### 1.1.3 Delimitação do trabalho

Nesse trabalho não serão realizados ensaios experimentais, de modo que os resultados obtidos a partir da modelagem numérica serão confrontados com valores disponíveis na literatura.

## 1.2 Justificativa

Os avanços na tecnologia do concreto resultaram no desenvolvimento dos concretos de ultra-alto desempenho. Esses concretos oferecem diversas vantagens, como elevadas resistências e previsão de expressiva durabilidade, permitindo a execução de estruturas mais esbeltas, mais leves e mais duráveis. Diante das vantagens, as aplicações de UHPCs vêm crescendo no mundo todo, tanto em peças pré-moldadas como *in loco*. Porém, o custo direto de execução ainda é bastante alto quando comparado ao de concretos estruturais convencionais.

Além da esperada longevidade do material, da redução de manutenções de segurança e da diminuição do peso próprio, os UHPCs ainda oferecem vantagens econômicas

(MCDONAGH e FODEN, 2016). Esses concretos têm o potencial de melhorar a qualidade da infraestrutura contemporânea e de reduzir a quantidade de energia para a sua produção (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013). Assim, os relevantes e positivos impactos econômicos e ambientais desses materiais justificam a realização de projetos de pesquisa e desenvolvimento, bem como ações que promovam a efetiva transição da academia para o mercado.

Nesse contexto, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do Programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT), aprovou em 2017 o projeto *Tecnologias ecoeficientes avançadas em produtos cimentícios* que, por meio de uma parceria de instituições de ensino superior liderada pela Universidade de São Paulo (USP) e que inclui a Universidade Federal de Alagoas (UFAL), busca fomentar o desenvolvimento tecnologias cimentícias ecoeficientes. Um dos objetivos específicos do projeto aprovado é avaliar a retração e fluência de materiais cimentícios.

O estudo da fluência e retração é muito importante, visto que esses fenômenos têm influência na análise estrutural, pois interferem nas deformações do concreto e do aço, no controle de qualidade e cura do concreto e na avaliação das flechas dos elementos submetidos à flexão, como vigas e lajes. Esses fenômenos são apontados como fatores causadores de patologias pós obra em peças de concreto armado, como em fissuras de vedações devido à deformação excessiva (KATAOKA, 2010).

Por outro ponto de vista, a fluência do concreto contribui de maneira favorável para a redução de tensões localizadas, como por exemplo em nós de pórticos, e em tensões impostas por recalques de apoios em estruturas hiperestáticas (LEONHART, 1983).

Em pilares de concreto armado, a fluência é levada em consideração na análise dos efeitos de segunda ordem. A NBR 6118: 2014 recomenda a consideração do efeito de fluência em pilares com índice de esbeltez maior que 90, embora de acordo com Araújo (2012) as consequências da fluência nos efeitos de segunda ordem podem ser relevantes a partir do índice de esbeltez 50. O EUROCÓDIGO 2 (2010), por sua vez, permite que o efeito de fluência seja ignorado caso três condições sejam satisfeitas: o coeficiente de fluência no infinito seja menor ou igual a 2, o índice de esbeltez seja menor ou igual a 75 e caso a excentricidade seja maior ou igual a altura da seção transversal na direção correspondente.

Em elementos de concreto protendido, a fluência atua nas perdas progressivas da força de protensão, no encurtamento de peças de concreto devido a carregamentos permanentes e no alongamento do aço sob tensão constante. A fluência do concreto ainda é um tema pouco explorado em relação à sua importância e consequências, sendo considerado um tema complexo.

Nesse sentido, esse trabalho visa apresentar o estado da arte de concretos de ultra-alto desempenho, compreender os modelos de previsão de fluência de concretos dessa classe de resistência e simular seu comportamento computacionalmente. Como os UHPCs são relativamente recentes, deve-se considerar os efeitos da fluência que possam afetar a qualidade e durabilidade desse concreto.

### **1.3 Organização do trabalho**

Esse trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo 1 engloba a introdução do tema, conceituação e histórico do UHPC, e apresenta os objetivos, delimitação e justificativa do trabalho.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo trata do estado da arte do UHPC, abordando os principais materiais constituintes, as indicações para a cura e as principais propriedades mecânicas do UHPC.

O capítulo 3 refere-se principalmente à fluência do concreto de ultra-alto desempenho, comentando as hipóteses básicas dos principais modelos de previsão da fluência do concreto, bem como as recomendações e modelos de previsão da fluência do UHPC encontrados na literatura especializada.

O capítulo 4 trata da metodologia usada na para criar os modelos numéricos. A construção dos modelos foram realizadas através do *software* comercial Abaqus<sup>®</sup> devido à sua disponibilidade e adequação aos objetivos deste trabalho.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e análises das simulações realizadas. Os resultados obtidos foram confrontados com valores encontrados nas recomendações internacionais sobre o UHPC disponíveis.

No capítulo 6 estão apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

O Apêndice A apresenta as configurações do Abaqus<sup>®</sup> adotadas para a realização dos modelos.

## 2 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

O concreto de ultra-alto desempenho é uma classe de concreto recentemente desenvolvida, com aplicações em vários países e que já se encontra disponível comercialmente no Brasil (MULLER, KOELLE e ALMEIDA, 2017). Em comparação com concretos do grupo I e II da NBR 8953: 2015, o UHPC apresenta propriedades mecânicas e de durabilidade excepcionais, como a alta resistência à compressão e a baixa permeabilidade. Isto torna o UHPC interessante para aplicações que necessitam de longa vida útil, como estruturas em ambientes com alta agressividade.

O UHPC tem maior porcentagem de cimento e menor relação água/cimento que concretos do grupo I da NBR 8953: 2015, entretanto, mais partículas de cimento permanecem não hidratadas. Essas partículas remanescentes executam a função de filer na matriz cimentícia, atribuindo a capacidade de autocicatrização na ocorrência de pequenas fissuras (LOUKILI *et al.*, 1998; MOREIRA, T. N. DA C.; FORMAGINI, S.; TOLEDO FILHO, R. D., 2018).

Como se sabe, o concreto se torna mais frágil à medida que sua resistência à compressão aumenta, sendo esse efeito bastante evidente nos UHPCs. Apesar disso, esse efeito pode ser reduzido com a adição de fibras de alto módulo, tornando o concreto mais dútil e capaz de suportar as tensões de tração de forma mais confiável (FEHLING *et al.*, 2014). É importante ressaltar que a dispersão e orientação das fibras influenciam no comportamento mecânico final (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013).

Determinados autores se referem ao UHPC reforçados com fibras como Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete – UHPFRC), ressaltando a presença e importância das fibras em seus trabalhos (TOUTLEMONDE e RESPLENDINO, 2011; HABEL *et al.*, 2006; KANG *et al.*, 2010; BUTTIGNOL, SOUSA e BITTENCOURT, 2017; YU, SPIESZ e BROUWERS, 2014). Outros autores utilizam o termo UHPC para concretos de ultra-alto desempenho reforçados ou não com fibras (FEHLING *et al.*, 2008; FEHLING *et al.*, 2014; RUSSELL e GRAYBEAL, 2013; FLIETSTRA, 2011; ABBAS, NEHDI e SALEEM, 2016; SBIA, L. A. *et al.*, 2016).

As propriedades mecânicas e as especificações de dosagem do UHPC estão intrinsecamente relacionadas, e devem corresponder às aplicações específicas deste material. Isto porque, devido às suas características, é possível, por exemplo, reduzir o consumo de materiais e o peso próprio de estruturas (ALMEIDA, 2015). Dessa maneira, permite-se ampliar suas opções de utilização, como em elementos arquitetônicos (exemplo: painéis de fachada), em elementos estruturais de pontes e em ambientes com alta agressividade.

A seguir, serão apresentadas as principais propriedades mecânicas e parâmetros levados em consideração na produção dos UHPC atuais.

## 2.1 Composição e Mistura

De acordo com Russell e Graybeal (2013), as composições de UHPC são, geralmente, uma combinação de cimento Portland, areia fina, sílica ativa, superplastificantes, fibras (normalmente de aço) e água. Uma combinação genérica para criar um concreto de ultra alta performance está apresentado na Tabela 2.1. Combinações diferentes destes materiais podem ser usadas, dependendo da aplicação e do fornecedor. Um dos UHPCs mais comumente usados nos Estados Unidos, tanto para pesquisa como para aplicações comerciais, é conhecido como Ductal<sup>®</sup> e sua composição está apresentada na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** – Composição genérica de um concreto Ductal<sup>®</sup>.

| <b>Materiais</b>   | <b>Kg/m<sup>3</sup></b> |
|--------------------|-------------------------|
| Cimento Portland   | 712                     |
| Areia Fina         | 1020                    |
| Sílica Ativa       | 231                     |
| Pó de Quartzo      | 211                     |
| Superplastificante | 30,7                    |
| Acelerador de Pega | 30                      |
| Fibras de Aço      | 156                     |
| Água               | 109                     |

Fonte: Adaptada de Russell e Graybeal (2013).

Alkaysi (2016) investigou o desempenho de diversas dosagens de UHPC, com a intenção de minimizar o custo dos componentes. Foram analisados parâmetros como a resistência à compressão, tração e durabilidade. As variáveis do experimento foram o tipo de cimento (cimento branco, tipo I e tipo V), quantidades e tipo de sílica ativa e volume de fibras de aço. Todos os espécimes alcançaram resistência à compressão satisfatória para concretos de ultra-alto desempenho.

Alkaysi (2016) produziu, então, o UHPC apresentado na Tabela 2.2, que leva em consideração a minimização do custo dos componentes e a resistência à compressão, superior

a 170 MPa, e durabilidade. Foi utilizado cimento CP I, duas granulometrias de areia fina, sílica ativa, superplastificante e água, sem a aplicação de fibras.

**Tabela 2.2** – Composição econômica com desempenho ótimo de Alkaysi (2016).

| <b>Materiais</b>   | <b>Kg/m<sup>3</sup></b> |
|--------------------|-------------------------|
| Cimento Portland   | 775                     |
| Sílica Ativa       | 194                     |
| Areia Fina I       | 245                     |
| Areia Fina II      | 975                     |
| Superplastificante | 10                      |
| Água               | 165                     |

Fonte: Adaptada de Alkaysi (2016).

Li *et al.* (2017) avaliaram o desempenho do UHPC com a aplicação de calcário na forma de agregado miúdo. Seus resultados apontaram que a areia de calcário gera uma melhoria na trabalhabilidade do material, enquanto a sílica ativa diminui a trabalhabilidade. Entretanto, o agregado calcário tem partículas maiores, reduzindo a compactação e resultando em uma diminuição da resistência mecânica. Para que isso seja evitado, o trabalho utilizou agregado de calcário com dimensão máxima inferior a 8 mm.

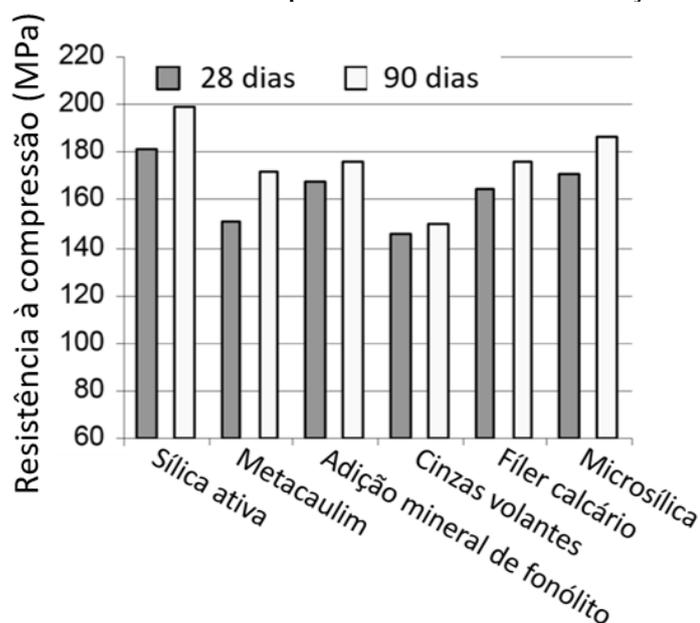
O elevado teor de componentes cimentícios influenciam calor de hidratação e o custo da produção. Por isso, cimentos com baixo calor de hidratação são mais indicados (SHI *et al.*, 2015). Esses cimentos, além do potencial de alcançar grandes resistências, têm uma menor necessidade de água, apresentam retração química limitada e a reação álcali-agregado é ínfima (FEHLING *et al.*, 2014).

A sílica ativa é um subproduto das indústrias de silício metálico e ligas de ferrosilício, possui partículas com diâmetro médio de 0,2  $\mu\text{m}$  e funciona como uma adição pozolânica que reduz os efeitos de exsudação (MEHTA e MONTEIRO, 2014). De acordo com Shin *et al.* (2015) a sílica ativa é uma adição mineral importante do concreto de ultra-alto desempenho, sua proporção depende da relação água/cimento, variando geralmente de 20% a 30% da massa de cimento.

Rougeau e Borys (2004) realizaram um trabalho sobre diferentes adições ao UHPC, no qual foram utilizadas adições de sílica ativa, metacaulim, cinzas volantes, microsílica, filer calcário e mineral de fonólito. A Figura 2.1 ilustra os resultados dos ensaios de resistência à compressão, sendo observada a maior resistência à compressão tanto aos 28 como aos 90 dias

no espécime com a adição de sílica ativa, embora as adições envolvendo metacaulim, microsíllica, filler calcário e mineral de fonólito também tenham apresentados resultados satisfatórios, com resistência à compressão superior a 150 MPa em 90 dias.

**Figura 2.1** – Resistência à compressão com diferentes adições ao UHPC.



Fonte: Adaptado de Rougeau e Borys (2014).

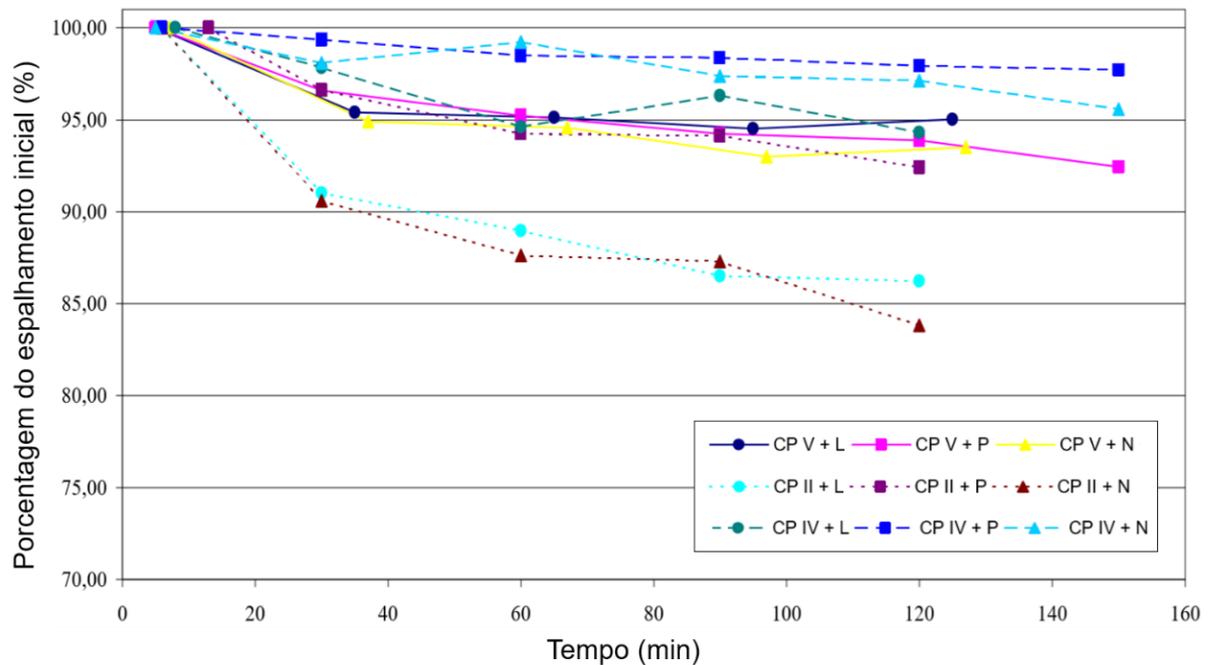
Os superplastificantes, ou aditivos redutores de água de alta eficiência, são capazes de reduzir a água de amassamento de uma determinada mistura de concreto e são responsáveis pela fluidez dos concretos de ultra-alto desempenho, que apresentam uma baixa relação água/cimento. Segundo Melo *et al.* (2004), os superplastificantes atuam na dispersão dos grãos de cimento. Quando estes entram em contato com a água tendem a flocular e parte desta fica aprisionada dentro dos flocos, reduzindo assim a quantidade disponível de água para a hidratação do cimento.

Quando as moléculas de superplastificantes são adsorvidas nas partículas de cimento propiciam o surgimento de cargas negativas em sua superfície, que resultam na repulsão entre as partículas vizinhas. Esse feito é chamado de repulsão eletrostática e é característico de superplastificantes a base de naftaleno e melamina. Os superplastificantes a base de policarboxilato, além do efeito eletrostático, realizam a dispersão através de repulsão estérica, que consiste em barreiras físicas que impedem a aproximação das partículas (Melo *et al.*, 2004). De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o efeito do mecanismo de repulsão estérica dura mais que a repulsão eletrostática.

De acordo com Vanderlei (2004), os superplastificantes à base de policarboxilato são mais indicados na dosagem do UHPC. Entretanto, de acordo com o estudo realizado por Melo *et al.* (2004), verificar a eficiência dos superplastificantes não é simples. Nesse estudo foi empregado o ensaio da mesa de consistência para avaliar a perda de fluidez de combinações argamassas, essas utilizaram os cimentos tipo CP V ARI RS, CP II Z e CP IV e com adições de superplastificantes à base de lignosulfonatos (L), de naftaleno sulfonatos (N) e de policarboxilatos (P).

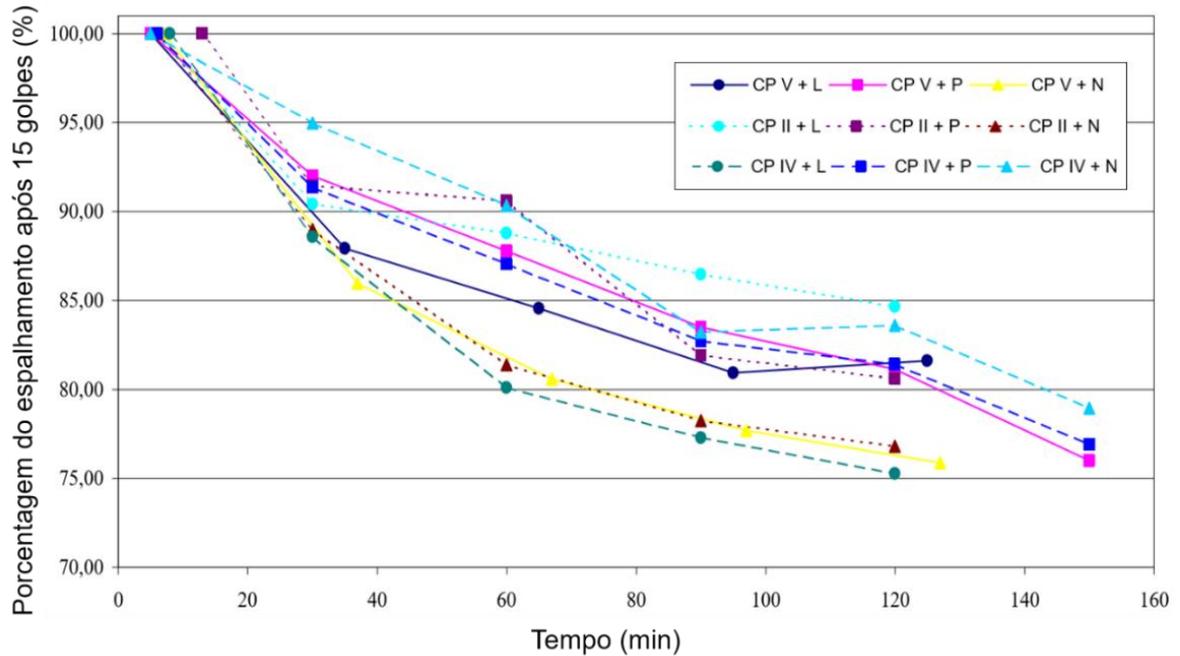
As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram a perda de fluidez de argamassas logo após sua produção representada pela abertura inicial e após aplicar quinze golpes, respectivamente.

**Figura 2.2** – Perda de fluidez a partir da abertura inicial.



Fonte: Adaptado de Melo *et al.* (2004).

**Figura 2.3** – Perda de fluidez aplicando-se 15 golpes.



Fonte: Adaptado de Melo *et al.* (2004).

Na Figura 2.2 as combinações que apresentaram a menor perda de fluidez foram das combinações CP IV e aditivos à base de policarboxialtos e naftaleno. Na Figura 2.3 o comportamento das misturas foi alterado e as combinações que apresentaram os melhores resultados foram os CP IV com naftaleno e o CP II Z com porlicarboxilatos que sofreram redução de fluidez de 5 % e 10 % até 60 min, respectivamente. Melo *et al.* (2004) concluíram que nenhuma das combinações apresentaram resultados uniformes e por isso não foi possível classificar a melhor.

A adição de fibras também é bastante comum nos UHPCs e contribui para a melhora da utilidade da mistura. Segundo as recomendações da AFGC/SETRA (2013), o teor de fibras aumenta a utilidade e reduz os riscos de ruína frágil em peças de concreto de ultra-alto desempenho, ou seja, diminui o comportamento frágil na capacidade final. Entretanto, segundo Christ (2019), o aumento demasiado do volume de fibras diminui a trabalhabilidade do concreto, prejudicando o adensamento do concreto.

De acordo com Kang *et al.* (2010) a variação do teor de fibras, de 0% a 5%, influencia diretamente o aumento de resistência à tração do concreto de ultra-alto desempenho. Em geral, a adição de fibras de aço é a mais utilizada. Entretanto, segundo Christ *et al.* (2019), o UHPC reforçado com fibras de vidro AR, seguindo a metodologia de dosagem de Christ (2019), obteve resistência à compressão de 132 MPa e resistência à tração de 24 MPa aos 28 dias.

De acordo com Graybeal (2012), o UHPC deve ser produzido em conformidade com as especificações estabelecidas pelo fabricante. Essas informações incluem o percentual de cada

constituente e a ordem e tempo necessário de mistura. O UHPC é bastante sensível a desvios de mistura, portanto, variações além das faixas estabelecidas podem ser prejudiciais ao desempenho esperado. As condições de clima e temperatura durante a mistura também podem afetar as propriedades do UHPC. Por isso, é indicado que os materiais sejam armazenados em baixa temperatura (entre 10°C e 16°C), e a mistura ocorra em dias úmidos, protegida da exposição ao sol e ao vento, evitando que a temperatura do UHPC ultrapasse os 27,7°C. A utilização de cubos de gelo tem-se demonstrado viável como parte da água da mistura.

Para obtenção de boa trabalhabilidade, o procedimento de mistura deve garantir a dispersão das fibras no concreto e assegurar uma boa densidade de empacotamento, evitando a aglomeração de materiais. Devido à tendência de aglomeração, as partículas finas devem ser misturadas previamente à adição de água. As fibras são incorporadas na última fase, após a adição de água e aditivos químicos. A movimentação das próprias fibras ajuda a destruir os aglomerados remanescentes. A execução do procedimento supracitado leva em torno de 8 a 20 minutos (BUTTIGNOL, SOUSA e BITTENCOURT, 2017).

O UHPC pode ser misturado na maioria dos misturadores de concreto ou argamassa. O único requisito é que o misturador tenha energia suficiente para solubilizar as devidas proporções de partículas finas e dispersar os líquidos uniformemente na matriz (GRAYBEAL, 2012).

## **2.2 Cura**

A cura tem duas finalidades principais: evitar a perda de umidade da mistura e controlar a temperatura até se obter uma resistência desejada, sendo essencial a manutenção apropriada da temperatura para que sejam alcançadas as taxas desejadas de hidratação. Para o UHPC, devido à baixa relação água/cimento, quanto menor a perda da água interna, melhor. Este controle da perda pode ser realizado pela vedação do sistema e/ou controle da umidade do ambiente (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013). A cura inadequada, frequentemente, provoca a resistência e durabilidade inadequadas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Flietstra (2011), as propriedades do UHPC variam de acordo com o tratamento de cura empregado. Os tipos de cura mais encontrados na literatura sobre UHPC são: cura a vapor por pelo menos 48 horas, sob temperatura de 90 °C e umidade relativa de 95%; cura em laboratório por no mínimo 48 horas, temperatura controlada entre 20 °C ± 2 e umidade relativa superior a 60 %; cura em ambiente com temperatura controlada por pelo

menos 48 horas, sob temperatura de 60°C e umidade relativa superior a 90%; e um processo de cura em laboratório por um período e cura a vapor em sequência que, segundo Flietstra (2011), é uma prática recorrente em fábricas de pré-fabricados.

Os processos de cura de UHPCs supracitados estão elencados na Tabela 2.3, bem como as principais referências encontradas na literatura.

**Tabela 2.3** – Tipos de cura mais utilizados em UHPC e principais citações.

| <b>Método de Cura</b>                      | <b>Tempo (horas)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Umidade (%)</b> | <b>Citações</b>   |
|--|----------------------|-------------------------|--------------------|---|
| <b>Em laboratório</b>                      | ≥48                  | 21±3                    | >50                | GAYBREAL, 2006;<br>AHLBORN <i>et al.</i> , 2008;<br>SCHACHINGER <i>et al.</i> , 2008;<br>YANG <i>et al.</i> 2008;<br>GARAS <i>et al.</i> , 2009;<br>FLIETSTRA 2011.                                   |
| <b>A vapor</b>                             | ≥48                  | ≥90                     | 95                 | GRAYBEAL, 2006;<br>AHLBORN <i>et al.</i> , 2008;<br>CWIRZEN <i>et al.</i> , 2008;<br>SCHACHINGER <i>et al.</i> , 2008;<br>YANG <i>et al.</i> 2008;<br>GARAS <i>et al.</i> , 2009;<br>FLIETSTRA, 2011. |
| <b>Ambiente com temperatura controlada</b> | ≥48                  | 60                      | >90                | GAYBREAL, 2006;<br>SCHACHINGER <i>et al.</i> , 2008;<br>GARAS <i>et al.</i> , 2009;<br>FLIETSTRA 2011.  |
| <b>A vapor após cura em laboratório</b>    | ≥48                  | 90                      | 95                 | GRAYBEAL, 2006;<br>AHLBORN <i>et al.</i> , 2008;<br>PEUSE, 2008;<br>FLIETSTRA, 2011.  |

Fonte: Autor (2020).

Segundo Buttignol, Sousa e Bittencourt (2017), a resistência à compressão do UHPC depende do regime de cura utilizado. Graybeal (2006) relatou um abrangente programa de experimentos para determinar as propriedades mecânicas de UHPCs utilizando quatro diferentes processos de cura, três métodos de cura a vapor e um método de cura com

temperatura controlada. Os resultados mostraram que os corpos de prova submetidos a cura a vapor obtiveram resistência à compressão, módulo de elasticidade, a resistência à abrasão e a resistência a penetração de íons cloreto superior aos demais corpos de prova submetidos a outros regimes de cura.

Schachinger, Hilbig e Stengel (2008) analisaram o efeito da temperatura de cura no desenvolvimento da resistência à compressão do UHPC. Os resultados apontaram a possibilidade de obter resistência à compressão de 225 MPa aos 7 dias, realizando a cura térmica a 90 °C por pelo menos 24 horas, com posterior armazenamento a 20°C durante 5 dias. Assim, concluíram que com isso é possível a maximização do processo de hidratação do UHPC.

Ahlborn *et al.* (2008) caracterizaram a resistência à compressão e durabilidade do concreto de ultra-alto desempenho submetido a vários regimes de cura, a saber: cura em laboratório, cura a vapor a 90°C com 100% de umidade relativa e cura em laboratório por 10 dias e 24 dias seguidos de cura a vapor por 48 horas cada. Constatou-se que os espécimes que passaram por cura a vapor, mesmo após a cura em laboratório, alcançaram resistências à compressão superiores a 200 MPa aos 28 dias, enquanto os submetidos a cura em laboratório alcançaram 165 MPa aos 28 dias.

Nos testes de durabilidade, todos os espécimes mostraram-se bastante resistentes à penetração de íons cloreto e resistência interna ao movimento dos íons. Os corpos de prova não apresentaram sinais de deterioração nos ensaios de ciclos de gelo-degelo. Os valores médios do coeficiente de dilatação térmica linear dos espécimes foram de  $14,7 \times 10^{-6}$  mm/mm/°C e  $13,9 \times 10^{-6}$  mm/mm/°C aos 28 dias para os espécimes que passaram por cura a vapor e os curados apenas em laboratório, respectivamente.

Flietstra (2011) caracterizou o comportamento da fluência e retração do concreto de ultra-alto desempenho até os 28 dias, utilizando cinco regimes de cura: cura em laboratório a 23° C; cura em laboratório por 70 horas seguida da cura a vapor a 90°C por 48 horas; cura em ambiente com temperatura controlada de 60°C por 14 horas seguida da cura a vapor 90°C por 48 horas; cura em ambiente com temperatura controlada de 60°C por 14 horas seguido de 72 horas de cura em laboratório finalizando com cura a vapor a 90°C por 48 horas; e, por fim, foi aplicada o mesmo regime de cura anterior sendo o período em cura em laboratório igual a 11 dias. Os espécimes foram submetidos a dois níveis de carregamento, equivalentes a 20% e 60% da resistência característica à compressão destes.

Nos estudos de Flietstra (2011), os espécimes de UHPC alcançaram a resistência à compressão de 96 MPa em 14 horas utilizando a cura em ambiente com temperatura controlada a 60 °C, enquanto foram necessárias 70 horas para alcançar esse objetivo utilizando cura em

laboratório a 23 °C. Entretanto, o período de 28 dias para fins de analisar a fluência do UHPC constitui uma limitação do trabalho.

## 2.3 Propriedades Mecânicas

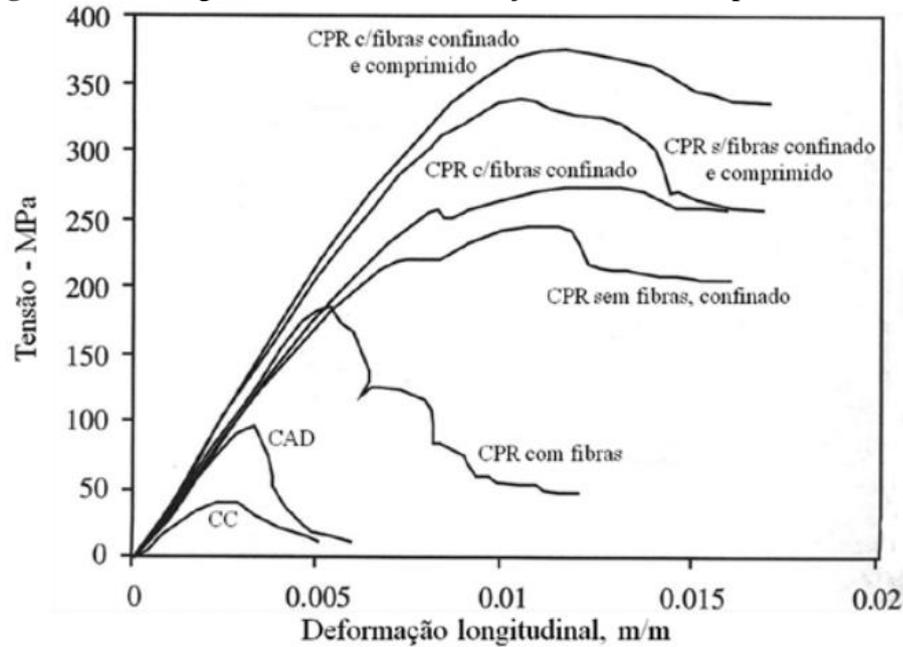
Nesse tópico será abordado as principais das propriedades mecânicas do UHPC endurecido. As propriedades mecânicas do UHPC estão intimamente relacionadas com sua microestrutura. A microestrutura do UHPC é muito densa comparada a microestrutura de concretos do grupo I e II conforme a NBR 8953: 2015. Segundo Reda *et al.* (1999), os componentes finos utilizados, a baixa relação água/cimento e a aplicação cura a vapor favorecem as reações de hidratação no UHPC, que apresenta uma microestrutura densa e uniforme, com pequenas zonas de transição entre as interfaces de agregados miúdos e partículas de cimento e pequenas microfissuras em relação a concretos do grupo I.

### 2.3.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão é uma propriedade fundamental no projeto de qualquer estrutura de concreto, e a propriedade do concreto mais mensurada (GRAYBEAL, 2007). É também diretamente afetada pela baixa relação água/cimento da mistura. O UHPC, em comparação com os concretos de grupo I e II, se distingue por alcançar resistências acima de 150 MPa.

A Figura 2.4 apresenta diagramas tensão – deformação de concretos obtido em ensaios na Universidade de Sherbooke, nos quais foram utilizados os seguintes tipos de concreto: do grupo I (CC), de alto desempenho (CAD) e de pós reativos (CPR) com e sem fibras, com e sem confinamento (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011, *apud* AİTCIN, 2008.). A maior tensão alcançada foi de 375 MPa em um corpo de prova de concreto de pós reativos reforçado com fibras de aço e confinado em um tubo de aço.

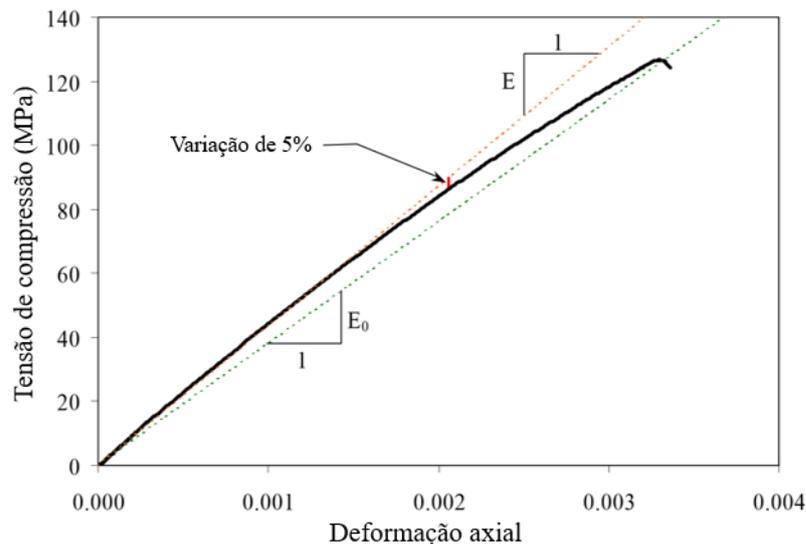
**Figura 2.4** – Diagrama tensão – deformação de diversos tipos de concreto.



Fonte: Tutikian, Isaia e Helene (2011) *apud*. Aïtcin (2008).

Segundo Fehling *et al.* (2014), durante o ensaio de compressão uniaxial em corpo de prova cilíndrico, o UHPC apresenta um comportamento elástico predominantemente linear até cerca de 70% a 80% da resistência à compressão. Graybeal (2006) observou esse comportamento em seus ensaios, com variação de até 5% dos resultados de Fehling *et al.* (2014). Na Figura 2.5 ilustra o diagrama tensão – deformação obtido por Graybeal (2006) o qual inclui os módulos de elasticidade usados nessa análise, que foram o módulo de elasticidade secante ( $E_0$ ) e o módulo de elasticidade tangente ( $E$ ).

**Figura 2.5** – Diagrama tensão – deformação do UHPC em ensaio de compressão uniaxial.

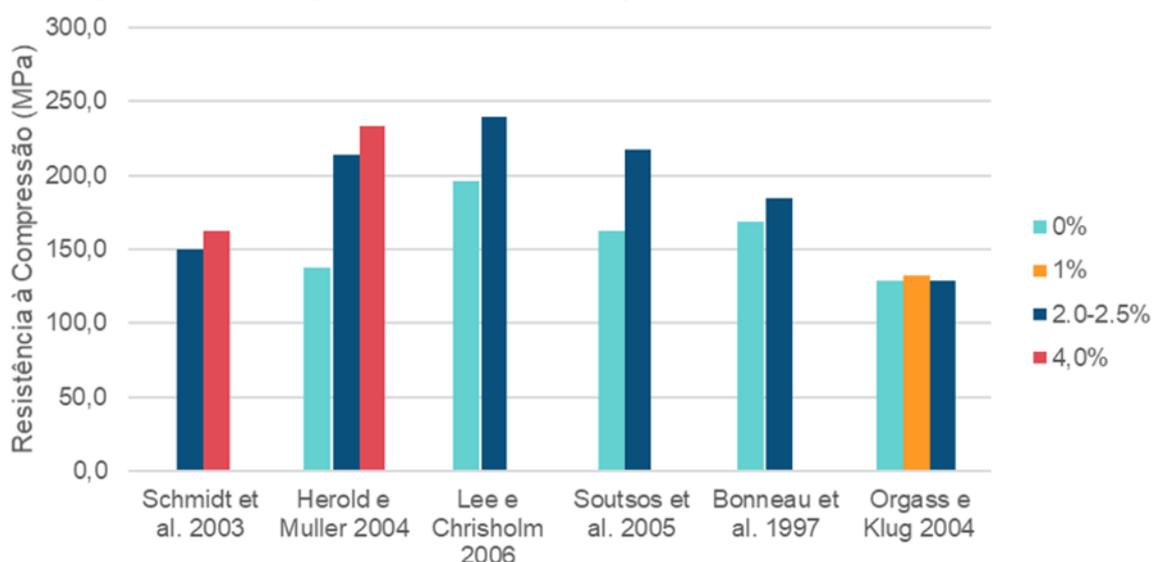


Fonte: Adaptado de Graybeal (2006).

De acordo com Almeida (2015), a adição de fibras tem pouca influência na resistência à compressão do UHPC, entretanto, a ausência de fibras pode resultar em ruptura brusca, sem ductilidade (FEHLING *et al.*, 2014). Apesar das divergências sobre a adição de fibras aumentar ou não a resistência à compressão (ALMEIDA, 2015; FEHLING *et al.*, 2014; VANDE VOORT *et al.*, 2008), é notório que o aumento obtido devido à adição de fibras é bastante inferior ao alcançado por meio de tratamentos de cura.

A Figura 2.6 compara resultados de resistência à compressão de UHPCs que diferentes autores obtiveram a partir da incorporação de distintos teores de fibra, sendo adotados teores de 0%, 1%, 2,0% a 2,5% e 4,0% em relação ao volume de cimento. Os resultados de cada autor foram obtidos em corpos de prova com a mesma dosagem e idade, permitindo a comparação dos acréscimos de resistência à compressão devidos, exclusivamente, ao teor de fibra utilizado. Na maioria dos resultados (SCHMIDT *et al.*, 2003; HEROLD e MULLER, 2004; SOUTSOS *et al.*, 2005; BONNEAU *et al.*, 1997; e HABER *et al.*, 2018), a média da resistência à compressão aumentou com o teor de fibras de aço. Entretanto, a média permaneceu constante nos ensaios de Orgass e Klug (2004).

**Figura 2.6** – Variação da resistência à compressão de UHPCs com o teor fibras.

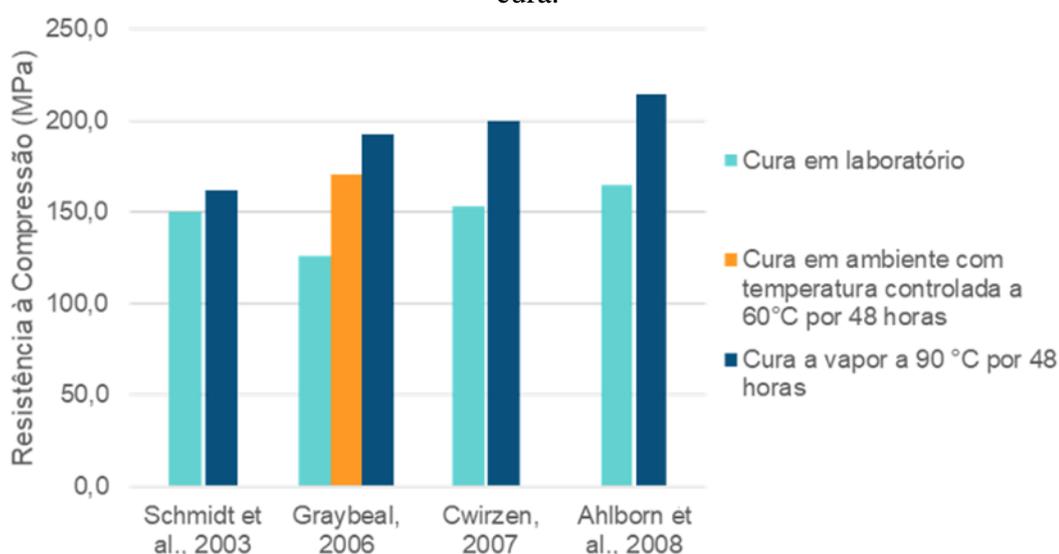


Fonte: Adaptado de Vande Voort *et al.* (2008).

Um dos processos que influencia a resistência à compressão é a cura do concreto, que aumenta a velocidade de hidratação do concreto. A Figura 2.7 compara a resistência à compressão de UHPCs sujeitos aos regimes de cura mais usuais (FLIETSTRA, 2011), como em laboratório a 20°C; cura em ambiente com temperatura controlada a 60 °C e umidade

relativa de 95% por 48 horas; e cura a vapor a 90°C e umidade relativa de 95% por 48 horas. Vande Voort *et al.* (2008) observaram que o acréscimo de temperatura durante a cura geralmente resulta em um acréscimo de resistência à compressão.

**Figura 2.7** – Variação da resistência à compressão de UHPCs sujeitos a distintos regimes de cura.



Fonte: Adaptado de Vande Voort *et al.* (2008).

É possível notar que grande parte das pesquisas atingiram a resistência de 150 MPa para os corpos de prova curados com temperatura ambiente de 20°C. A cura a vapor potencializa a resistência do UHPC, porém é uma técnica que, por muitas vezes, agrega um custo alto e inviável para aplicação em larga escala (CHRIST, 2019).

Graybeal (2006) utilizou três regimes de cura em seu trabalho, no qual foram ensaiados aproximadamente mil espécimes. Os regimes utilizados foram: cura em condições laboratoriais de temperatura a 20°C, cura a vapor a 60°C por 24 horas após o desmolde, e cura a vapor a 90°C por 24 horas após o desmolde. Os valores médios de resistência à compressão, obtidos após 28 dias, foram iguais a 126 MPa, 171 MPa e 193 MPa respectivamente ao regime de cura. Graybeal (2006) observou que os regimes de cura aplicados obtiveram influência direta na resistência à compressão e na densidade dos corpos de prova, que variaram de 2400 kg/m<sup>3</sup> a 2500 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

De forma empírica, Graybeal (2006) obteve Equação 2.1 que expressa o ganho de resistência à compressão do UHPC ao longo do tempo, curado em condições laboratoriais de temperatura a 20°C, um dia após o lançamento.

$$f'_c(t) = f'_c \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{t - 0,9}{3} \right)^{0,6} \right) \right] \quad (2.1)$$

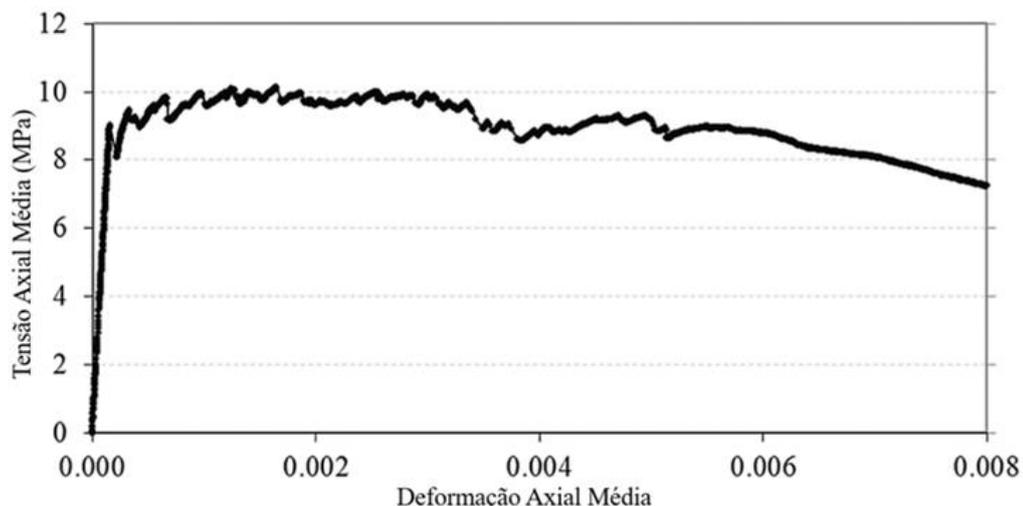
onde  $f'_c(t)$  representa a resistência à compressão em  $t$  dias,  $f'_c$  é a resistência à compressão na idade de 28 dias, e  $t$  o tempo após a moldagem, em dias.

### 2.3.2 Resistência à Tração

A resistência à tração direta dos concretos é da ordem de 7% a 11% em relação a resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Segundo Russell e Graybeal (2013), Fehling *et al.* (2014) e SOLIMAN (2016), o UHPC reforçado com fibras possui uma resistência à tração direta e na flexão maior que a de concretos do grupo I e II.

Graybeal *et al.* (2012) realizaram ensaios de tração uniaxial em 3 espécimes prismáticos com seção transversal de 51 mm por 51 mm e 431,8 mm de comprimento, resistência à compressão dos corpos de prova variaram entre 190 MPa a 237 MPa e teor de fibra igual a 2,5%. A Figura 2.8 ilustra o diagrama tensão – deformação da média dos resultados obtidos com os três corpos de prova.

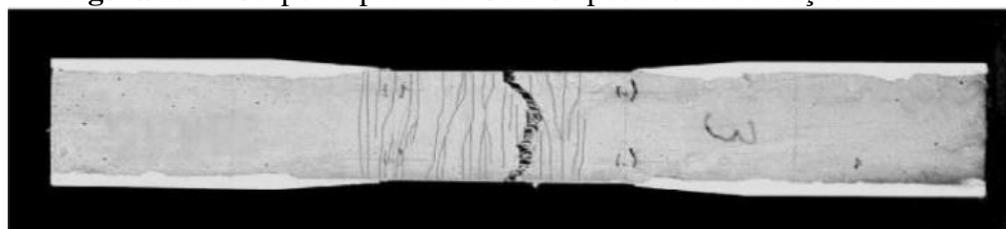
**Figura 2.8** – Diagrama tensão – deformação de UHPC reforçado com fibras, obtido a partir de ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Adaptado de Russel e Graybeal (2013).

Na Figura 2.8 é possível observar como ocorreu a média dos comportamentos dos espécimes reforçados com fibras após a primeira fissura, que aconteceu em aproximadamente 9 MPa. Em relação à resistência à compressão de 190 MPa, a resistência à tração direta corresponde aproximadamente a 4,7%. A Figura 2.9 apresenta um dos corpos de prova após o ensaio de tensão uniaxial.

**Figura 2.9** – Corpo de prova de UHPC após ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Graybeal *et al.* (2012).

Observa-se que a fissura ocorreu na região de tensão uniforme como esperado.

Os principais fatores para que as fibras promovam os benefícios esperados são: o teor de fibras a ser incorporado, a geometria, comprimento e dimensões das fibras, e a orientação das fibras na mistura.

Segundo Christ (2019), as fibras de aço são as mais utilizadas em UHPC, devido propriedades mecânicas tais como o alto módulo de elasticidade, resistência à tração e ductilidade elevadas. Por causa disso, as microfissuras iniciais são mais visíveis na ligação entre as fibras e a matriz. As fibras com módulo de elasticidade inferior ao módulo de elasticidade da matriz têm ruptura antes da primeira fissura surgir, de modo que não contribuem para o aumento da resistência à tração do UHPC.

De acordo com Fehling *et al.* (2014), a aderência das fibras à matriz é uma questão importante, visto que, tendo as fibras propriedades mecânicas superiores à matriz, o crescimento das fissuras será controlado pelas fibras, e isso gera solicitações de ancoragem. Ainda, o teor de fibras inserido no UHPC interfere diretamente na resistência à tração.

Soliman e Tagnit-Hamou (2014) realizaram estudos sobre caracterização das propriedades mecânicas de concretos de ultra-alto desempenho com adição de pó de vidro em substituição ao pó de quartzo. A resistência à tração na flexão foi um dos objetos do estudo, sendo analisada através do ensaio de 3 pontos em espécimes prismáticos com seção transversal de 100 mm por 100 mm e 350 mm de comprimento. O programa de ensaios abrangeu uma mistura de UHPC com pó de vidro com e sem a adição de fibras de aço, dois regimes de cura –

cura em laboratório a 20 °C e umidade relativa de 100% por 24 horas e cura a vapor a 90 °C e umidade relativa de 100% por 48 horas – e ensaios em três idades diferentes.

A Tabela 2.4 foi organizada a partir dos dados e resultados dos ensaios de Soliman (2014) e apresenta idade do ensaio, tipo de cura, teor de fibra, resistência à compressão e os resultados do ensaio de tração na flexão, bem como a relação percentual entre as resistências.

**Tabela 2.4** – Descrição dos espécimes ensaiados por Soliman (2014) e resistência à compressão.

| Idade do ensaio | Cura           | Teor de Fibra (%) | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à tração na flexão (MPa) | Resistência à tração/ Resistência à compressão (%) |
|-----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| 91 dias         | Em laboratório | 1                 | 171                            | 20                                   | 11,7%  |
| 91 dias         | Em laboratório | 0                 | 170                            | 17                                   | 10,0%  |
| 28 dias         | Em laboratório | 1                 | 141                            | 17                                   | 12,0%  |
| 28 dias         | Em laboratório | 0                 | 146                            | 16                                   | 11,3%  |
| 2 dias          | A vapor        | 1                 | 187                            | 21                                   | 11,2%  |
| 2 dias          | A vapor        | 0                 | 191                            | 17                                   | 8,9%   |

Fonte: Autor (2020).

A adição de fibras aumentou da resistência à tração na flexão em todos os ensaios. A cura a vapor proporcionou a maior resistência à compressão igual a 191 MPa aos 2 dias. Observou-se que a maior relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão foi de 12% e ocorreu na menor resistência à compressão, enquanto a menor relação foi de 8,9% e ocorreu na maior resistência à compressão.

Em um estudo sobre a resistência à tração na flexão do UHPC, Yoo *et al.* (2017) avaliaram fibras com diferentes geometrias e resistência à tração. O programa de ensaios contemplou 5 diferentes tipos de fibras de aço, todas com módulo de elasticidade igual a 200 GPa. As fibras curtas foram chamadas de SS, as médias de SM, as longas de SL, as longas com ganchos de HL e as longas trançadas de TL. A Tabela 2.5 apresenta o diâmetro, comprimento e resistência à tração das fibras usadas.

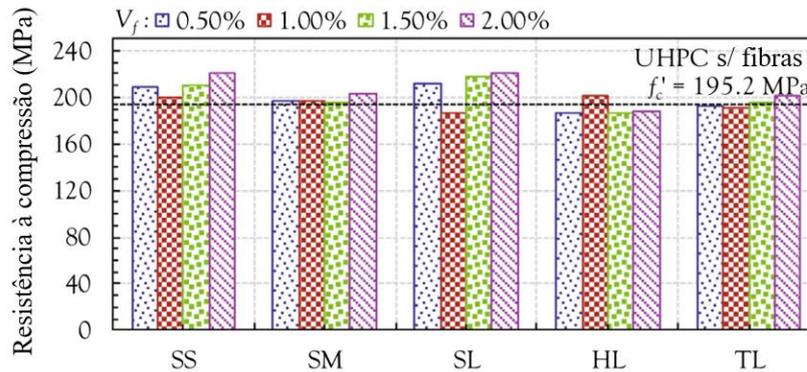
**Tabela 2.5** – Descrição dos tipos de fibras utilizadas por Yoo et al. (2017).

| Nomenclatura | Diâmetro (mm) | Comprimento (mm) | Resistência à tração (MPa) |
|--------------|---------------|------------------|----------------------------|
| SS           | 0,20          | 13,0             | 2788                       |
| SM           | 0,20          | 19,5             | 2500                       |
| SL           | 0,30          | 30,0             | 2580                       |
| HL           | 0,38          | 30,0             | 2500                       |
| TL           | 0,30          | 0,30             | 2428                       |

Fonte: Adaptada de Yoo et al. (2017).

Os corpos de prova foram moldados com 4 volumes de fibras diferentes ( $V_f$ ), 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. Nos ensaios de compressão foram usados corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, e no ensaio de flexão para 4 pontos foram usados corpos de prova prismáticos com seção transversal de 100 mm por 100 mm e 400 mm de comprimento. A Figura 2.10 apresenta as resistências à compressão obtidas com os diferentes tipos de fibras e teor de fibras.

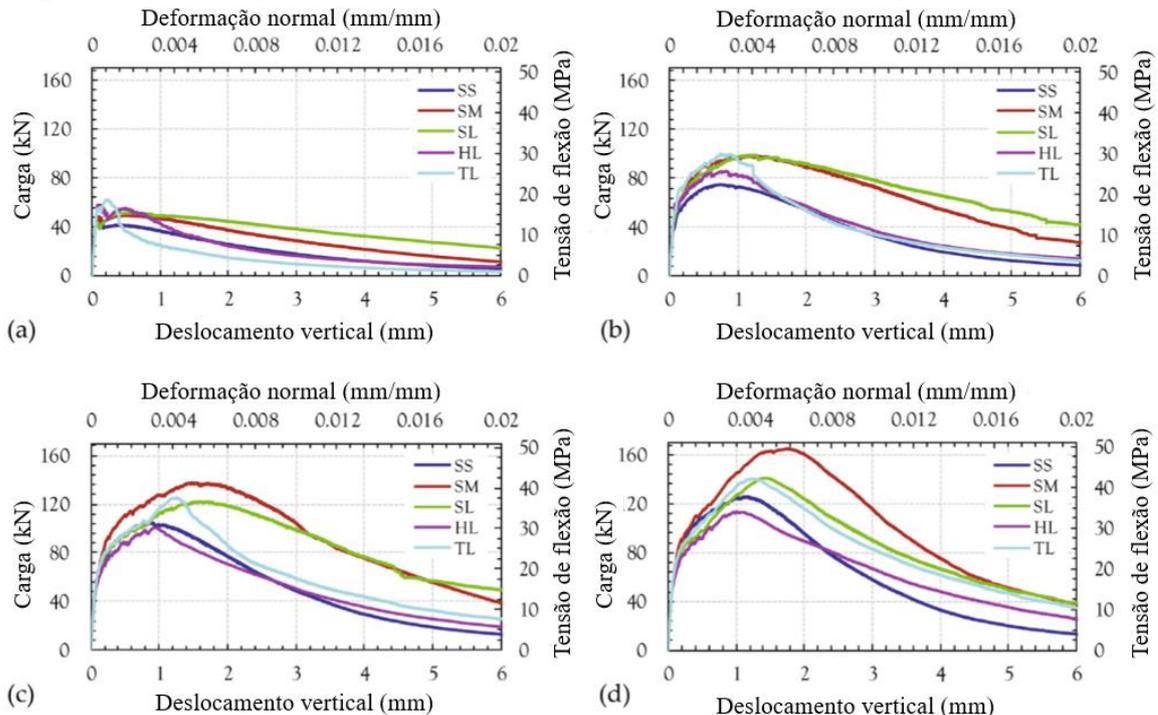
**Figura 2.10** – Resistência à compressão do UHPC com diferentes tipos e teor de fibras.



Fonte: Adaptado de Yoo *et al.* (2017).

A Figura 2.11 apresenta a resposta dos corpos de prova de UHPC nos ensaios flexão em 4 pontos com os diferentes tipos de fibras de aço e com o teor de fibras igual a 0,5% (a), 1,0% (b), 1,5% (c) e 2,0% (d).

**Figura 2.11** – Comportamento mecânico do UHPC com diferentes tipos e teor de fibras.



Fonte: Adaptado de Yoo *et al.* (2017).

Assim, pode-se observar na Figura 2.11 que, as fibras longas e médias apresentaram os maiores resultados para tração na flexão. Nota-se também que, à medida que o teor de fibras aumenta na mistura, a capacidade de resistir à tração na flexão também aumenta. A maior resistência à tração na flexão em relação a resistência à compressão foi de aproximadamente 25% observada no corpo de prova com 2,0 % de fibras médias SM, e menor relação foi de aproximadamente 4,8% com 0,5% de fibras curtas SS.

Segundo Graybeal (2006), é possível considerar a resistência à tração de UHPCs reforçados com fibra no dimensionamento de projetos estruturais. A resistência à tração desses UHPCs pode ser aproximada pela formulação empírica apresentada na Equação 2.2:

$$f_{ct} = a\sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

onde a resistência à tração  $f_{ct}$  e a resistência característica à compressão  $f'_c$  do UHPC são expressas em unidades do SI (MPa), e  $a$  é uma constante empírica que varia de acordo com a cura do concreto, sendo aproximadamente 0,55 em corpos de prova curados ao ar livre e entre 0,64 e 0,69 para outros métodos de cura (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013).

### 2.3.3 Módulo de Elasticidade

Graybeal (2006) realizou medições do módulo de elasticidade de espécimes de UHPC seguindo as orientações da ASTM C469M, que trata do ensaio estático do módulo de elasticidade em corpos de prova cilíndricos submetidos à compressão. Foi observado um aumento do módulo de elasticidade nos corpos de prova com cura a vapor de aproximadamente 15%. Os corpos de prova com cura a vapor a 90°C por 24 horas após o desmolde obtiveram o módulo de elasticidade de 50 GPa aos 28 dias, e de 42,7 GPa nos corpos de prova com cura em laboratório a 20°C.

A partir desses ensaios, Graybeal (2006) relacionou o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de UHPCs com a resistência à compressão até 193 MPa. A Equação 2.3 adapta para unidades de MPa a equação desenvolvida por Graybeal (2006).

$$E_c = 3836,2\sqrt{f'_c} \quad (2.3)$$

No mesmo estudo, Graybeal (2006) mensurou o módulo de elasticidade de corpos de prova de UHPC em ensaio de tração direta. Os corpos de prova obtiveram módulo de elasticidade de 51,9 GPa aos 28 dias com cura a vapor a 90°C por 24 horas, e de 47,6 MPa aos 28 dias com cura em laboratório. Assim, observou-se que os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de tração direta foram um pouco maiores que os obtidos no ensaio de compressão.

#### 2.3.4 Coeficiente de Poisson

Sendo um parâmetro importante, principalmente em placas e cascas, o valor do coeficiente de Poisson dos UHPCs não difere tanto dos observados em concretos usuais, sendo próximo de 0,2. Em seus ensaios, Graybeal (2006) encontrou pouca variação do coeficiente de Poisson devido à cura, mantendo-se igual a 0,2. Ahlborn et al. (2008) também avaliaram regimes de cura variados, e obtiveram valores para o coeficiente de Poisson de aproximadamente 0,21. O menor resultado encontrado foi o de Joh et al. (2008), que em estudos sobre lajes de concreto de ultra-alto desempenho, obtiveram o coeficiente de Poisson igual a 0,16.

#### 2.3.5 Retração

Vários fatores influenciam a retração dos concretos, entre eles destacam-se a qualidade dos materiais, as dimensões e geometrias dos elementos, as condições de cura e a temperatura ambiente. O UHPC possui expressivo teor de materiais reativos e extremamente finos em sua dosagem, isso favorece a retração autógena (HABER *et al.*, 2018). Isto é a redução do volume do material cimentício durante a hidratação do cimento, após o início da pega, e é consequência da remoção de umidade dos poros capilares pela hidratação do cimento anidro (KATAOKA, 2010).

O UHPC possui uma relação água/cimento muito baixa, da ordem de 0,20, o que também favorece à retração autógena. Entretanto, possui uma matriz cimentícia bastante compacta e densa, e apresenta retração por secagem do UHPC menor que a observada em concretos grupo I (HABER *et al.*, 2018). A retração por secagem, ou hidráulica, é uma deformação irreversível que está associada à perda de umidade para o meio ambiente. Essa retração é favorecida em pastas de cimento, argamassa ou concreto com baixa densidade de partículas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Segundo Toutlemonde e Resplendino (2011), a

retração autógena do UHPC está na faixa de 5,5 mm/mm, enquanto a retração por secagem é na faixa de 1,5 mm/mm.

A cura a vapor tem o potencial de reduzir a retração (RUSSELL e GRAYBEAL, 2013). Em geral, a retração por secagem do UHPC após cura a vapor é bastante pequena, devido à incorporação de fibras (WANG *et al.*, 2015). Nos ensaios de Yanni (2009), a incorporação de 2% de fibras de aço, em relação ao volume de cimento, diminuiu a retração autógena em 42% após 14 dias de desmolde, utilizando cura a vapor.

A utilização de retardantes de pega ou altas dosagens de superplastificantes na mistura tendem a aumentar a retração, tanto por secagem como autógena. Concretos com baixa relação água/aglomerante, normalmente, apresentam retração por secagem baixa e retração autógena alta. Analogamente, concretos com alta relação água/aglomerante relatam retração autógena baixa e uma maior retração por secagem (WANG *et al.*, 2015).

Staquet e Espion (2004) avaliaram a retração autógena do UHPC, substituindo a sílica ativa por cinzas volantes e metacaulim, e obtiveram a maior redução da retração autógena na substituição de 2/3 de sílica ativa por metacaulim. Em testes com concreto de pós reativos, Loukili *et al.* (1998) observaram benefícios causados pela cura a vapor em ensaios de fluência e retração. Em relação aos espécimes curados em condições ambientais controladas, os espécimes que passaram pela cura a vapor obtiveram redução de 42% da deformação devido à retração e de 50% da deformação devido à fluência.

### 2.3.6 Fluência

De acordo com Neville (1997), a fluência pode ser definida como o aumento da deformação ao longo do tempo devido a uma tensão constante. A fluência do UHPC é objeto de estudo de diversos grupos de pesquisadores (GRAYBEAL, 2006; BURKART e MÜLLER, 2008; YANNI, 2009; GARAS *et al.*, 2009; FLIETSTRA, 2011; FRANCISCO *et al.*, 2012; ALMEIDA, 2015; HABER *et al.*, 2018; YI XU *et al.*, 2018).

Segundo Haber *et al.* (2018), concretos de ultra-alto desempenho apresentam uma menor deformação devido à fluência que concretos do grupo I, principalmente devido aos elevados valores de resistência e módulo de elasticidade. De modo similar à retração, a fluência também pode ser reduzida significativamente por meio do método de cura utilizado.

Os resultados dos ensaios de fluência podem ser expressos por meio do coeficiente de fluência e da fluência específica. Segundo Russel e Graybeal (2013) e Fehling *et al.* (2014), o

coeficiente de fluência é definido como a razão entre a deformação desenvolvida ao longo do tempo e a deformação elástica inicial, sendo descrita pela Equação 2.4:

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)}{\varepsilon(t_0)} \quad (2.4)$$

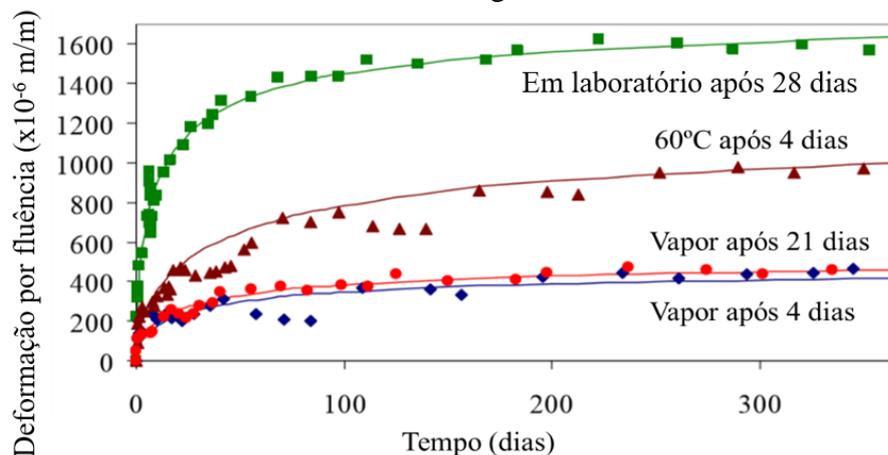
onde  $\varepsilon(t)$  é a deformação no tempo  $t$  e  $\varepsilon(t_0)$  é a deformação elástica decorrente do carregamento aplicado no instante inicial do ensaio ( $t_0$ ).

A fluência específica é a deformação por fluência por unidade de tensão ( $\times 10^{-6}/\text{MPa}$ ) e corresponde a razão entre o coeficiente de fluência e o módulo de elasticidade aos 28 dias ( $E_{28}$ ) do concreto (KATAOKA, 2010), conforme a Equação 2.5:

$$\varepsilon_{cu}(t) = \frac{\varphi(t)}{E_{28}} \quad (2.5)$$

Graybeal (2006) conduziu ensaios de fluência em corpos de prova cilíndricos, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, utilizando idades de aplicação de carga diferentes (de 4, 21 e 28 dias) e 4 regimes de cura. Cura em sala térmica a 60°C e cura a vapor a 90°C carregados com 4 dias após moldados, cura a vapor a 90°C com 15 dias após moldado e carregado no 21º dia, e cura em laboratório a, aproximadamente, 20°C carregado aos 28 dias após moldado. Para cada regime de cura 4 corpos de prova foram ensaiados. A Figura 2.12 apresenta os resultados obtidos por Graybeal (2006).

**Figura 2.12** – Resultados de fluência em corpos de prova com diferentes regimes de cura e idade de carregamento.



Fonte: Adaptado de Graybeal (2006).

A partir das deformações foi possível calcular o coeficiente de fluência e fluência específica. Os corpos de prova com cura a vapor, carregados após 4 dias, obtiveram o coeficiente de fluência de 0,29 e a fluência específica de  $5,7 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ , e de 0,78 e  $21,2 \times 10^{-6}/\text{MPa}$  no caso dos corpos de prova com cura em laboratório. De acordo com Graybeal (2006), o coeficiente de fluência de concretos do grupo I e II está entre 1,5 e 3,0 e a fluência específica entre  $36 \times 10^{-6}/\text{MPa}$  e  $145 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ .

Segundo Fehling *et al.* (2014) a fluência em concretos de ultra-alto desempenho é inferior à constatada em concretos de grupo I e II, mesmo sem a aplicação de cura a vapor. Ainda, de acordo com os autores, o coeficiente de fluência de UHPCs está entre 0,2 e 0,4 caso seja realizada cura a vapor e entre 0,6 e 1,4 caso não seja realizada a cura a vapor.

Burkhart e Müller (2008) avaliaram os efeitos da idade de carregamento, dimensões dos corpos de prova, nível de tensão e de dois regimes de cura na fluência do UHPC. Após 100 dias da aplicação de carga, foi obtida fluência específica na faixa de  $16 \times 10^{-6}/\text{MPa}$  a  $35 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ , e coeficientes de fluência entre 0,9 e 1,3. Observou-se que as deformações devido à fluência diminuíram com o avanço da idade de carregamento, além de aumentar com o tamanho da amostra, apresentando, portanto, comportamento qualitativo semelhante ao de concretos usuais.

Flietstra (2011) buscou avaliar a retração e fluência do UHPC reproduzindo em laboratório as condições de cura que, de acordo com o autor, são esperadas em fábricas de pré-moldados nos Estados Unidos. Foram ensaiados corpos de provas cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com cura em ambiente com temperatura controlada de 60°C por 14 horas seguido de 11 dias de cura em laboratório finalizando com cura a vapor a 90°C por 48 horas.

Nos ensaios de fluência, Flietstra (2011) utilizou dois níveis de carregamento, equivalentes a 20% e 60% da resistência à compressão dos corpos de prova. Os coeficientes de fluência obtidos foram de 0,68 e 1,00 aos 28 dias, respectivamente aos níveis de carregamento.

A influência das fibras na fluência do concreto foi avaliada por Yi Xu *et al.* (2018), onde, em comparação com UHPC sem adição de fibras, observou-se uma redução do coeficiente de fluência aos 180 dias em relação à adição de 1% e 2% de fibras, sendo a amplitude da variação, respectivamente, igual a 25,4% e 13,4%. Isso indica que a adição de fibras pode contribuir para a redução da fluência. Entretanto, segundo Yi Xu *et al.* (2018), elevadas adições de fibras podem provocar a redução da autoadensabilidade do UHPC, que resulta no relativo enfraquecimento da interface fibra e matriz cimentícia.

Aspectos mais aprofundados sobre fluência do UHPC, envolvendo modelos para a previsão de deformações decorrentes da fluência, serão apresentados no capítulo 3.

## 2.4 Durabilidade

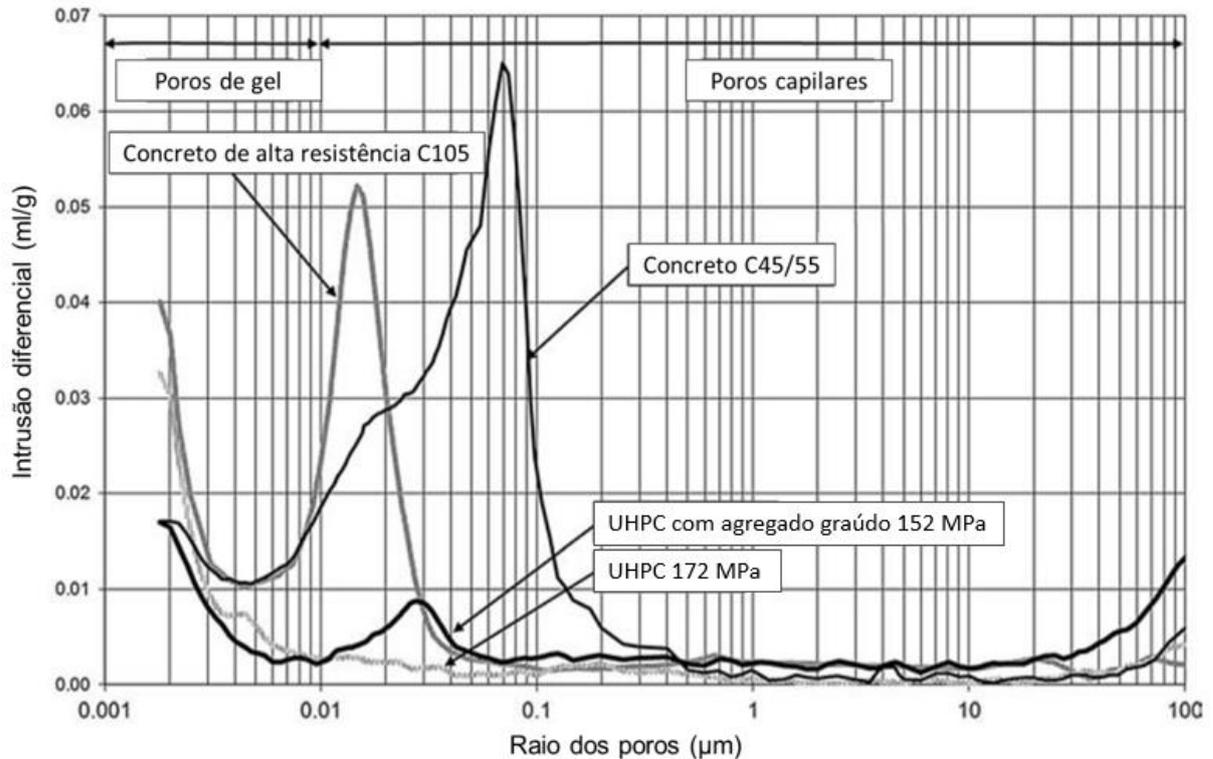
A durabilidade do concreto está relacionada com a capacidade deste resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão e condições de serviço. As estruturas de concreto, quando projetadas e executadas corretamente, devem apresentar condições de durabilidade de acordo com a vida útil estabelecida para o projeto. Segundo a NBR 6118:2014, entende-se por vida útil o período no qual as características das estruturas são mantidas sem intervenções significativas, atendendo os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e construtor. Desta forma, uma vida útil longa está associada à durabilidade.

Em se tratando de concreto, uma das propriedades que mais influenciam a durabilidade do concreto é a permeabilidade, que, por sua vez, está relacionada com a porosidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). De acordo com Roux, Andrade e Sanjuan (1996 *apud* CHRIST, 2019), em todos os tipos de concreto a permeabilidade do material depende do sistema de poros e de sua distribuição interna, dependendo da composição química e mineralógica da matriz cimentícia.

Russell e Graybeal (2013), Fehling *et al.* (2014), Christ (2019) e Ahlborn (2008) mencionam a permeabilidade como fator mais importante na durabilidade e que devido à composição mineralógica e grau de empacotamento das partículas do UHPC, é esperado que a durabilidade do UHPC seja maior que a durabilidade de concretos do grupo I e II.

Fehling *et al.* (2004) desenvolveram um estudo sobre a durabilidade do UHPC, no qual avaliou a permeabilidade de espécimes de concreto classe C45/C55, C105, uma mistura de UHPC com agregado graúdo e UHPC. O estudo de permeabilidade foi realizado por meio da análise de porosidade onde foi utilizado a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio para quantificar o diferencial de intrusão (ml/g) – ou volume específico – e distribuição dos tamanhos de poros. A Figura 2.13 ilustra a distribuição da intrusão diferencial em UHPC e dos tamanhos dos poros obtida nos experimentos de Fehling *et al.* (2004).

**Figura 2.13** – Distribuição da intrusão diferencial e raio dos poros em espécimes de concreto classe C45/C55, C105, UHPC com agregado graúdo e UHPC.

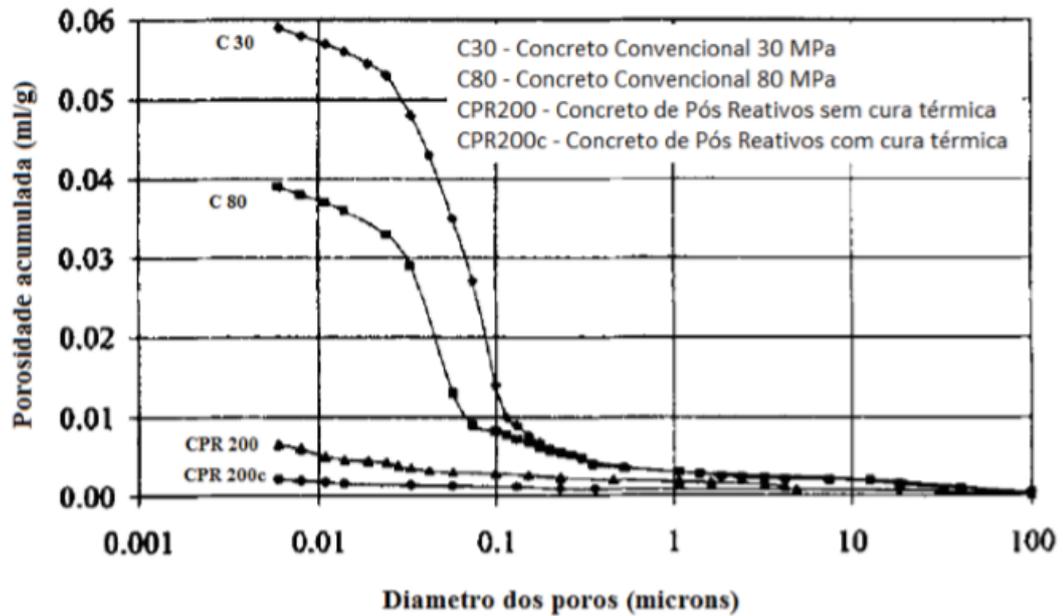


Fonte: Adaptado de Fehling *et al.* (2004).

Esses estudos apontam que o UHPC possui uma estrutura de poros capilares menor que a de concretos da classe C45/C55, C105 e que de UHPC com agregado graúdo, e portanto possui uma menor permeabilidade, o que contribui para maior durabilidade relativa do UHPC. Fehling *et al.* (2004) ressaltam no âmbito da porosidade os poros podem ser classificados como poros capilares e poros de gel e que os poros de gel são tão pequenos que os agentes agressivos não conseguem atravessá-los e por isso não influenciam na durabilidade do concreto.

Roux, Andrade e Sanjuan (1996 *apud* CHRIST, 2019) realizaram um estudo sobre a porosidade de concretos de classe de resistência C30, C80 e de concretos de pós reativos de resistência à compressão igual a 200 MPa com e sem a aplicação de cura térmica. A Figura 2.14 ilustra a relação entre a porosidade acumulada (ml/g) e o diâmetro dos poros encontrados.

**Figura 2.14** – Porosidade acumulada e diâmetro de poros em concretos de classe de resistência C30, C80 e de pós reativos de 200 MPa com e sem cura térmica.



Fonte: Roux, Andrade e Sanjuan (1996) *apud* Christ (2019).

Observa-se nos gráficos apresentados na Figura 2.12 que para todos os diâmetros dos poros medidos a porosidade acumulada dos espécimes de concreto de pós reativos foi menor que a dos espécimes de concreto classe C30 e C80. Também é possível verificar que a cura térmica realizada reduziu a porosidade acumulada entre os espécimes de cimento CPR200.

### 3 FLUÊNCIA DO UHPC

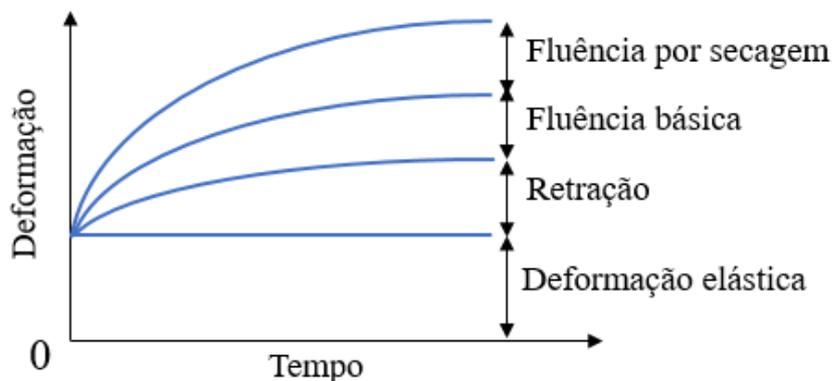
Em geral, tanto a fluência como a retração do concreto afetam a durabilidade, condições de serviço, integridade estrutural, estética e estabilidade da estrutura. As patologias influenciadas pela fluência e retração, comumente, são manifestadas através de deformações excessivas e aparecimento de fissuras (GOEL; KUMAR; PAUL, 2007). Este capítulo apresenta os principais fatores associados a ocorrência da fluência do UHPC e as principais recomendações disponíveis.

Quando submetido a um carregamento, o concreto apresenta uma deformação elástica instantânea. Caso o carregamento seja mantido constante durante um período, as deformações por fluência desenvolvem-se devido ao estreitamento das camadas de água adsorvida no concreto (WIGHT e MACGREGOR, 2012). O ritmo da fluência é ligeiramente maior no início e tende a diminuir com o tempo (FLIETSTRA, 2012).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a fluência básica é a deformação durante um período sob tensão constante sem que aconteça o equilíbrio higrotérmico com o ambiente. A fluência por secagem é a deformação adicional que ocorre quando a peça está carregada e sob secagem.

Assim, a fluência total é a soma da fluência básica e da fluência por secagem. Dessa forma, a deformação total é a soma entre a deformação elástica, a deformação devido à fluência e a deformação por retração. A Figura 3.1 ilustra as deformações que compõem a deformação total em função do tempo.

**Figura 3.1** – Deformação dependente do tempo em concreto submetido à carga constante.



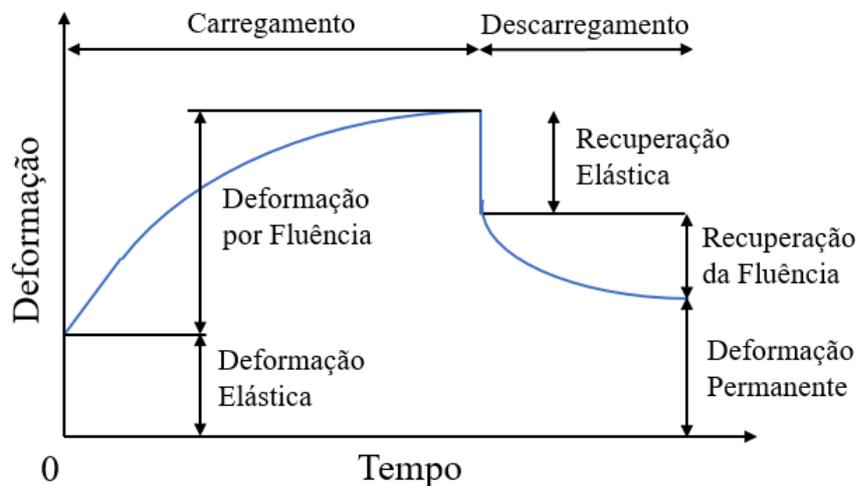
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

A deformação por fluência está inter-relacionada com a deformação causada pela retração por secagem. Um dos motivos é o compartilhamento da mesma origem, ou seja, a percolação interna associada ao movimento interno da água adsorvida. A distinção é que a

retração é impulsionada pela diferença de umidade entre o concreto e o meio externo, enquanto a fluência é impulsionada pela tensão aplicada (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Figura 3.2 ilustra, de forma simplificada, o comportamento da deformação ao longo do tempo de concreto do grupo I em um ciclo de carregamento e descarregamento. Pode-se observar a deformação elástica inicial (ou seja, a deformação instantânea), a deformação devido à fluência, as deformações recuperadas e a deformação permanente (ou deformação residual) ao final do ciclo.

**Figura 3.2** – Deformação do concreto convencional durante um ciclo de carregamento e descarregamento.



Fonte: Adaptado de Flietstra (2011).

De acordo com Flietstra (2011), a fluência deveria ser maior em concretos com alto teor de materiais cimentícios, como é o caso dos UHPCs. Isso ocorreria em consequência da menor quantidade de agregados graúdos no concreto, pois, assim como a retração, a fluência ocorre na pasta de cimento hidratado (WIGHT e MACGREGOR, 2012). Entretanto, isso não foi observado por Graybeal (2006), Garas *et al.* (2009), Yanni (2009), Almeida (2015) ou Haber *et al.* (2018).

Os fatores que afetam a fluência do concreto também podem ter efeito na fluência do UHPC. O tópico seguinte aborda os principais fatores que afetam a fluência.

### 3.1 Fatores que afetam a fluência

Os principais fatores que afetam a fluência do concreto são: a qualidade dos materiais e dosagem; carregamento, seja estático ou cíclico; a resistência à compressão da pasta cimentícia; a geometria do elemento estrutural; a idade em que o elemento foi carregado; e as condições de cura. Para efeito de melhor compreensão esse tópico faz uma análise entre os principais fatores que afetam a fluência do concreto e do UHPC.

#### 3.1.1 Materiais e dosagem

O módulo de elasticidade, a porosidade e o teor dos agregados são fatores relacionados que afetam a fluência do concreto. Quanto maior módulo de elasticidade menor deverá ser a fluência do concreto, o mesmo acontece com o seu teor de agregados. No entanto, a porosidade tem influência direta na fluência, pois quanto maior a porosidade dos agregados mais fácil a movimentação interna de água adsorvida (NEVILLE, 1997).

O UHPC, em geral, é produzido utilizando agregados finos e possui um maior módulo de elasticidade que concretos do grupo I e II. A porosidade do UHPC também é menor que a nesses concretos. Por isso é esperado que a influência desse fator seja menor em UHPCs.

#### 3.1.2 Tensão aplicada e resistência

Mehta e Monteiro (2014) e Neville (1997) afirmam que a tensão aplicada afeta diretamente a fluência do concreto, considerando que a tensão aplicada esteja na faixa linear da relação tensão deformação, ou seja, até 0,4 em concretos convencionais e 0,75 em concretos de alta resistência, e exceto em elementos carregados em idades muito pequenas. A faixa linear da relação tensão deformação do UHPC está entre 0,7 e 0,8.

A resistência à compressão do concreto afeta consideravelmente a fluência, de maneira inversa (METHA e MONTEIRO, 2008). Quanto maior a resistência do concreto menor sua deformação por fluência, um dos motivos disto é que em concretos com altas resistência à compressão devem utilizar uma quantidade reduzida de água em sua mistura (HOWELLS, LARK, BARR, 2005 *apud* KATAOKA). Isso pode ser observado na dosagem do UHPC, em que a relação água cimento, em geral, é na faixa de 0,25.

### 3.1.3 Propriedades do cimento

De acordo com Kataoka (2010), muitos pesquisadores observaram que mudanças normais na finura ou composição do cimento tem efeito insignificante sobre a retração do concreto. Entretanto, como o tipo de cimento influencia a resistência do concreto na aplicação da carga, a fluência é afetada (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Por esse motivo, qualquer comparação entre concretos feitos com diferentes tipos de cimento deveria levar em conta a influência do tipo de cimento sobre a resistência no momento da aplicação da carga.

Em estudos feitos por Neville (1997), cimentos extremamente finos com área específica de até 740 m<sup>2</sup>/kg apresentam uma fluência inicial maior, mas a longo prazo tendem para um valor de fluência total menor. Isso talvez se deva ao aumento rápido de resistência do cimento mais fino resultando em uma redução da relação tensão resistência efetiva. Entretanto, não foi encontrado pesquisas sobre UHPC com essa mesma abordagem.

Neville (1997), também, afirma que o modelo de evolução da fluência não é alterado pela presença de cinza volante Classe C ou F ou sílica ativa. Porém, deve ser lembrado que os diferentes materiais têm diferentes velocidade de reação e, portanto, aumento de resistências diferentes enquanto o concreto estiver carregado.

### 3.1.4 Aditivos

Segundo Mehta e Monteiro (2014), aditivos redutores de água e retardadores de pega, são capazes de melhorar a dispersão de cimento na água e levarem a um refinamento dos poros do concreto. Em geral, espera-se que esses aditivos aumentem a retração por secagem e a fluência. O principal efeito dos aditivos é indireto, reduzindo a relação de água cimento e aumentando a resistência do concreto ou pasta de cimento. Entretanto, não foi encontrado nenhum modelo confiável do efeito desses aditivos sobre a fluência (KATAOKA, 2010), tal como para superplastificantes.

### 3.1.5 Umidade relativa do ambiente e temperatura

Um dos fatores mais importantes que influenciam a fluência e retração do concreto é a umidade relativa do ar ambiente. Quanto maior a umidade relativa menor a fluência. Entretanto, a influência da umidade relativa é muito menor, ou nenhuma, quando o elemento tenha atingido

o equilíbrio higroscópico com o meio antes da aplicação da carga, ou seja, não é a umidade relativa que tem efeito sobre a fluência, mas o processo de secagem e cura (Neville, 1997).

Mehta e Monteiro (2014) relataram que se uma peça de concreto é exposta a uma temperatura maior que a ambiente antes de ser carregada, como parte do processo de cura, a resistência aumentará e a deformação por fluência será menor do que de um concreto armazenado a uma temperatura baixa. Por outro lado, a exposição à alta temperatura, durante o período em que o concreto está sendo carregado, pode aumentar a fluência.

### 3.1.6 Geometria do elemento

A espessura de uma peça de concreto tem grande influência no valor e na variação da fluência, que diminui com o aumento das dimensões do elemento (NEVILLE, 1997). Isso se deve ao fato de que a secagem no interior é mais demorada do que na parte externa da peça. Quando a umidade relativa é mantida constante, tanto a forma quanto o tamanho da peça influenciam diretamente na magnitude da fluência (EQUIPE DE FURNAS, 1997 *apud* KATAOKA, 2010).

### 3.1.6 Idade no carregamento e cura

A fluência dos concretos carregados a baixas idades é maior nas primeiras semanas de carregamento em relação a concretos carregados a maiores idades. Esse comportamento é devido ao maior grau de hidratação dos concretos mais velhos, que apresenta, estrutura interna mais compacta e menos água disponível (KALINTZIS, 2000). Como o tipo de cura afeta o grau de hidratação do concreto, também afeta a fluência do mesmo.

## 3.2 Ensaio de Fluência

As normas que descrevem os procedimentos utilizados na caracterização das propriedades do concreto, geralmente, requerem modificações de aplicabilidade para o emprego de concretos de ultra-alto desempenho (FLIETSTRA, 2011). Atualmente, não existe norma brasileira voltada para aplicações com UHPC. A ABNT NBR 8224: 2012, apresenta os procedimentos para determinação experimental da deformação devido ao fenômeno da fluência em concretos de grupo I e II.

Outras normas com procedimentos de ensaio de fluência do concreto à compressão são a ASTM C512 de 2010 (FLIETSTRA, 2011; RUSSEL e GRAYBEAL, 2013; HABER *et al.*, 2018) e a Chinese Standard GB/T 50082-2009 (YI XU *et al.*, 2018). A ASTM C512 (2010), prevê a utilização de um aparato experimental capaz de manter o carregamento constante durante o desenvolvimento de deformações no corpo de prova, empregando-se macaco hidráulico e célula de carga permanentemente instalados e capazes garantir o carregamento constante, com erro de até 2%.

Nas normas supracitadas, a tensão máxima de compressão permitida durante o ensaio de fluência é de 40% da resistência característica à compressão, no momento do carregamento. Normalmente, dois espécimes idênticos são produzidos e submetidos às mesmas condições de cura, sendo que um deles não é carregado. Assim, as deformações devidas à retração são avaliadas separadamente das deformações por fluência em um dos espécimes (HABER *et al.*, 2018).

### 3.3 Recomendações de Fluência

Desde 1982, diversos modelos foram propostos para a previsão das deformações por fluência (KATAOKA, 2010). A maioria dos modelos mais adotados para previsão de fluência é fundamentada em dados experimentais abrangentes e análises semi-empíricas. Cada modelo possui suas hipóteses básicas e alguns parâmetros próprios (YI XU *et al.*, 2018).

Modelos como o ACI 209R (2008), fib MC2010 e NBR 6118: 2014, possuem restrições que devem ser respeitadas a fim de serem obtidos resultados válidos. Na Tabela 3.1 são apresentadas as limitações desses modelos.

**Tabela 3.1** – Limitações dos modelos de fluência.

| <b>Dados</b>                            | <b>ACI209R</b> | <b>Fib MC2010</b> | <b>NBR6118</b> |
|---|----------------|-------------------|----------------|
| $f_{cm}$ (MPa)                          |                | 20 a 130          |                |
| $f_{ck}$ (MPa)                          |                |                   | 20 a 90        |
| Tensão aplicada (% do $f_{ck}$ )        | 0 a 40         | 0 a 40            | 0 a 40         |
| Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> ) | 279 a 446      |                   | > 300          |
| Umidade relativa (%)                    | 40 a 100       | 40 a 100          | 40 a 100       |
| Idade do carregamento (dias)            | > 1            | > 1               |                |
| Tempo de cura úmida (dias)              | > 7            | < 14              |                |

Fonte: Adaptada de Kataoka (2010).

Estes modelos apresentam significativa complexidade e necessitam de dados de entrada, tais como: propriedades do concreto fresco e endurecido, condições ambientais, dimensões dos corpos de prova e condições de carregamento. É pressuposto que quanto maior a quantidade de informações de entrada nos modelos, melhor a aproximação destes com os resultados experimentais (KATAOKA, 2010).

Atualmente, não existe norma brasileira para projeto de estruturas utilizando concreto de ultra-alto desempenho, tampouco norma nacional para a previsão da fluência e retração desses concretos. No entanto, estão disponíveis recomendações internacionais da França, Japão e Austrália sobre o assunto.

### 3.3.1 Recomendações Francesas

Em janeiro de 2002, a primeira edição das recomendações provisórias sobre concretos de ultra-alto desempenho reforçado com fibras elaborada pela AFGC/SETRA foi publicada, sendo revisadas em 2013. As recomendações sobre fluência e retração, contidas no anexo 7 do AFGC/SETRA 2013, fazem referência aos resultados obtidos por Loukili *et al.* (1998).

De acordo com as recomendações da AFGC/SETRA (2013), o coeficiente de fluência do UHPC com cura ao ar ambiente está entre 0,8 e 1,8. Quando tratamento de cura a vapor é aplicado, esse valor pode ficar entre 0,2 e 0,4.

Segundo a AFGC/SETRA (2013), a deformação total de um corpo de prova com cura a vapor é determinada pela Equação 3.1, obtida de forma empírica.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_i} \times [1 + \varphi \times f(t - t_0)] \quad (3.1)$$

sendo  $\varepsilon(t)$  a deformação total do UHPC (m/m),  $\sigma$  a tensão aplicada em MPa,  $E_i$  o módulo de elasticidade longitudinal em MPa, e  $\varphi$  o coeficiente de fluência.

Devido à cura a vapor, o coeficiente de fluência é igual a 0,3 e a Equação 3.2 representa a taxa de variação no tempo desse coeficiente.

$$f(t - t_0) = \frac{(t - t_0)^\alpha}{(t - t_0)^\alpha - \beta} \quad (3.2)$$

onde os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  foram obtidos de forma empírica e iguais a 0,6 e 10, respectivamente,  $t$  é a idade do UHPC desde seu lançamento, em dias, e  $t_0$  é a idade do UHPC no dia do carregamento, em dias.

É reafirmado que o tipo de cura aplicado pode reduzir ou aumentar a fluência. Loukili *et al.* (1998) também constataram que quanto maior a idade do concreto quando inicia-se o carregamento do corpo de prova, menores são a fluência específica e o coeficiente de fluência, conforme resultados na Tabela 3.2, referentes a um ensaio de fluência em corpos de prova à compressão que passaram pela cura ao ar ambiente.

**Tabela 3.2** – Fluência em compressão em corpos de prova com cura ao ar ambiente.

| Idade no carregamento (dias) | Fluência específica com idade infinita $J$ ( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ ) | Coefficiente de fluência |
|------------------------------|--|--------------------------|
| 1                            | 46,9   | 2,27                     |
| 4                            | 37,2   | 1,80                     |
| 7                            | 32,5   | 1,57                     |
| 28                           | 22,2   | 1,08                     |

Fonte: AFGC/SETRA (2013) e Loukili *et al.* (1998).

Na Tabela 3.2,  $J$  é a fluência específica após um tempo infinito de carregamento para uma tensão aplicada de 1 MPa, chamada de fluência específica e determinada pela Equação 3.3.

$$J(t, t_0) = \varepsilon_f / \sigma_0 \quad (3.3)$$

onde  $\varepsilon_f$  representa a deformação por fluência e  $\sigma_0$  a tensão aplicada no instante inicial.

De acordo com a AFGC/SETRA (2013), com cura ao ar ambiente a Equação 3.4 determina a deformação associada a fluência básica ( $\varepsilon_s$ ) a uma tensão unitária, em MPa.

$$\varepsilon_s = \varphi(t_0) \times f(t - t_0) + h(t_0) \quad (3.4)$$

sendo o coeficiente de fluência e sua taxa de variação determinados pelas Equações 3.5 e 3.6.

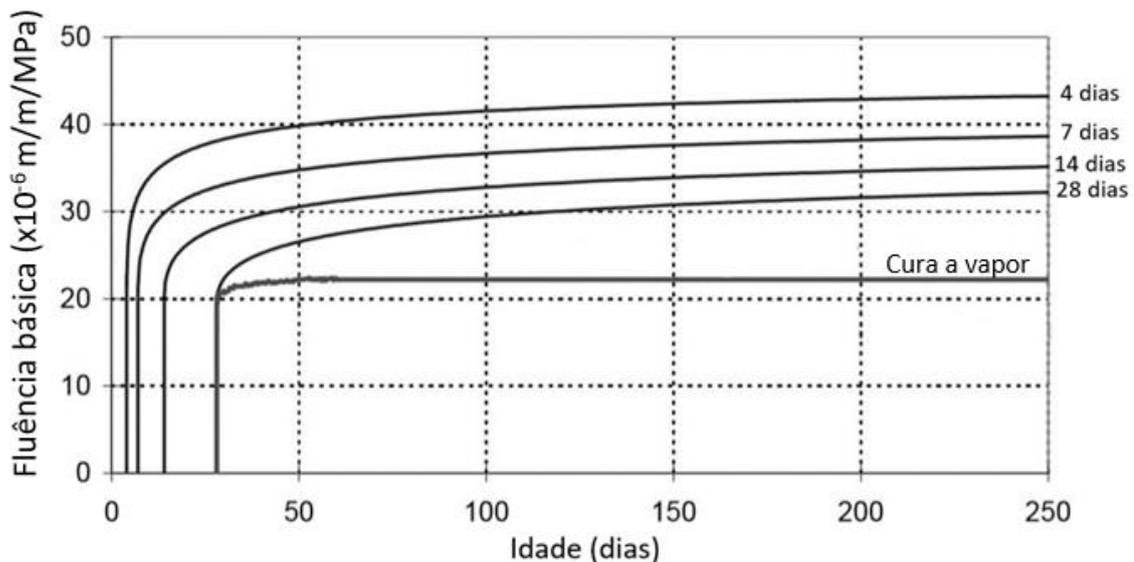
$$\varphi(t_0) = 19 \times \exp\left(\sqrt{\frac{0,1}{t_0 - 2,65}}\right) \quad (3.5)$$

$$f(t - t_0) = \frac{\sqrt{\frac{t - t_0}{3t_0 - 5}}}{\sqrt{\frac{t - t_0}{3t_0 - 5} + 1}} \quad (3.6)$$

$$h(t_0) = 18 \times \exp\left(\sqrt{\frac{0,2}{t_0 + 1,2}}\right) \quad (3.7)$$

De acordo com as recomendações da AFGC/SETRA (2013), a Figura 3.3 apresenta curvas de deformação por fluência básica para tensão de 1 MPa ao longo do tempo para diferentes idades de início de carregamento com cura ao ar ambiente e caso seja realizada cura a vapor a 90°C por 48 horas.

**Figura 3.3** – Fluência específica básica de um concreto Ductal<sup>®</sup> curado no ar ambiente.



Fonte: Adaptado de AFGC/SETRA (2013).

Pode-se observar na Figura 3.3 que quanto maior a idade do UHPC no início do carregamento menor é a fluência básica observada e que a cura a vapor apresenta a menor fluência básica.

### 3.3.2 Recomendações Japonesas

Em 2006, a Japanese Society of Civil Engineers (*JSCE*) publicou uma versão, em inglês, de recomendações preliminares para o projeto e construção de estruturas de concreto de ultra-alta resistência reforçado com fibras, similar a um UHPC. A JSCE realizou ensaios de fluência

em UHPC utilizando corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, os quais foram submetidos a tensão de com 100 MPa após 7 dias do início da cura (JSCE, 2006).

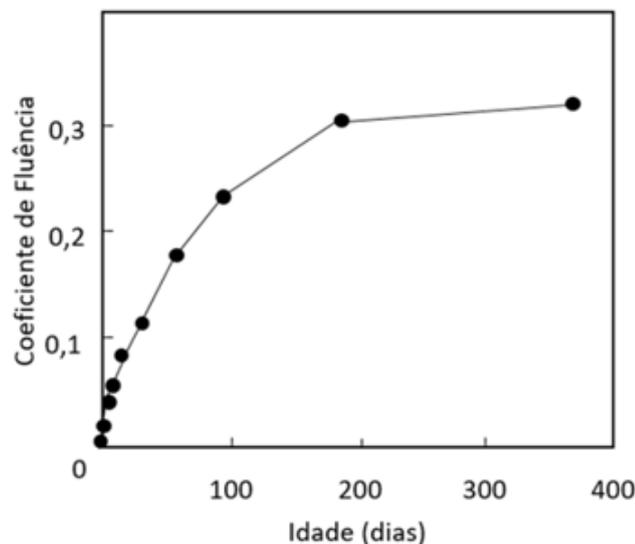
Segundo a JSCE (2006), a Equação 3.8 fornece a deformação por fluência do UHPC. Nessa equação a deformação devido à fluência  $\varepsilon_f$  é diretamente proporcional à deformação elástica, considerando que o nível de tensão aplicada é de até 40% da resistência à compressão característica do concreto, sendo  $\varphi$  coeficiente de fluência,  $\sigma$  a tensão aplicada, e  $E_{ct}$  o módulo de elasticidade longitudinal no momento do carregamento.

$$\varepsilon_f = \varphi \times \sigma / E_{ct} \quad (3.8)$$

Quando não for possível realizar ensaios de fluência, a JSCE recomenda um coeficiente de fluência conservador de 0,4, considerando que o UHPC seja submetido a um tratamento de cura a vapor a 90°C durante 48 horas, sendo a velocidade de aquecimento de 15°C por hora. Caso os espécimes não sejam submetidos ao processo de cura recomendado, é indicado o coeficiente de fluência do AFGC/SETRA (2003) de 1,2 como fator de fluência final.

A Figura 3.4 apresenta a relação entre o coeficiente de fluência e a idade do UHPC após a cura a vapor. Esses resultados foram obtidos através da média de ensaios com corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, onde a tensão aplicada foi de 100 MPa e ocorreu 7 dias após completar a cura a vapor a 90°C por 48 horas.

**Figura 3.4** – Coeficiente de fluência de concretos de ultra-alto desempenho reforçado com fibras após cura a vapor.



Fonte: Adaptado de JSCE (2006).

De acordo com a Figura 3.4, nota-se que o coeficiente de fluência apresenta um comportamento assintótico, assim como a fluência. Baseado nesses resultados, que a JSCE (2006) recomenda o valor de coeficiente de fluência de 0,4 para UHPCs com cura a vapor.

### 3.3.3 Recomendações Australianas

A School of Civil and Environmental Engineering da University of South Wales (UNSW), publicou recomendações para o projeto de vigas protendidas em UPHC a partir de ensaios com concreto de pós reativos, em janeiro do ano 2000. Entretanto, pouco foi abordado em relação às características da fluência em UHPCs (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000).

De acordo com as recomendações da australianas (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000), a fluência do UHPC depende da idade em que o concreto é carregado e da duração desse carregamento, tal como o concreto convencional. O valor final do coeficiente de fluência do UHPC também depende da temperatura e tempo do tratamento de cura (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000). Caso seja utilizado concreto de pós reativos, é recomendado o coeficiente de fluência de 0,3 para corpos de prova com cura a vapor e de 1,2 para corpos de prova com cura ao ar ambiente, ambos carregados aos 28 dias. As recomendações australianas (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000) também apresentam a Figura 3.3 com os mesmos resultados, entretanto até 150 dias.

A Tabela 3.3 apresenta os valores recomendados de coeficiente de fluência pelas recomendações australianas (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000). Observa-se que os valores de coeficiente de fluência diminuem com o aumento da idade no carregamento, isso ocorre para ambos tratamentos de cura.

**Tabela 3.3** – Coeficiente de fluência aos 150 dias, em relação a idade no carregamento.

| Idade no carregamento (dias) | Coeficiente de Fluência |              |
|------------------------------|-------------------------|--------------|
|                              | Cura ao ar              | Cura a vapor |
| 4                            | 1,80                    | 0,50         |
| 28                           | 1,20                    | 0,30         |

Fonte: Adaptado de Gowripalan e Gilbert (2000).

### 3.3.4 Outros Trabalhos

Francisco *et al.* (2012) e Toutlemonde e Resplendino (2011) analisaram a possibilidade de adaptar o modelo de previsão do comportamento do concreto na fluência do Eurocode 2 para concretos de ultra-alto desempenho reforçado com fibras. Por meios de ensaios experimentais e análises com outros modelos de previsão da fluência de concretos, Yi Xu *et al.* (2018) reafirmaram que a curva do modelo de fluência do fib MC2010 pode ser modificada para se adequar-se aos resultados obtidos em UHPC. Entretanto, em seus ensaios foi utilizado um concreto com agregados graúdos, que de acordo com a revisão bibliográfica do autor não caracteriza um concreto de ultra-alto desempenho.

A previsão do coeficiente de fluência ( $\varphi$ ) pelo modelo do fib MC2010, leva em consideração tanto o coeficiente de fluência básica ( $\varphi_{bc}$ ) como o coeficiente de fluência por secagem ( $\varphi_{dc}$ ), sendo dada por:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) \quad (3.9)$$

sendo  $t$  a idade do concreto no instante considerado, em dias, e  $t_0$  a idade em que o concreto foi carregado, ajustada de acordo com o tipo de cimento e temperatura de cura. Na Equação 3.9,  $\varphi_{bc}(t, t_0)$  corresponde ao coeficiente de fluência básica, sendo fornecido pela Equação 3.10.

$$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \times \beta_{bc}(t, t_0) \quad (3.10)$$

onde  $\beta_{bc}(f_{cm})$  representa o coeficiente modificado que considera a resistência à compressão média na idade de 28 dias na fluência básica determinado pela Equação 3.11, e  $\beta_{bc}(t, t_0)$  é a função do desenvolvimento da fluência básica no tempo determinada pela Equação 3.12.

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{f_{cm}^{0,7}} \quad (3.11)$$

$$\beta_{bc}(t, t') = \ln \left[ \left( \frac{30}{t_{0,adj}} + 0,035 \right)^2 \times (t - t') + 1 \right] \quad (3.12)$$

observa-se que  $f_{cm}$  é a resistência à compressão média aos 28 dias, em MPa, e  $t_{0,adj}$  a idade de carregamento ajustada, em dias, determinada pela Equação 3.13.

$$t_{0,adj} = t_{0,T} \times \left[ \frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ dias} \quad (3.13)$$

onde  $t_{0,T}$  é a idade do concreto no carregamento em dias ajustada pela Equação 3.14, e  $\alpha$  é o coeficiente que depende do tipo de cimento, sendo de -1 para cimento de resistência tipo 32,5N, de 0 para 32,5R e 42,5N, e de 1 para 42,5R, 52,5N e 52,5R. O cimento com resistência tipo N representa endurecimento normal e R endurecimento rápido, para cimentos fora dessas classes a norma recomenda a realização de análises experimentais.

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \exp \left[ 13,65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (3.14)$$

onde  $t_T$  é a idade do concreto ajustada pela temperatura em dias,  $\Delta t_i$  é o número de dias onde a temperatura  $T$  prevalece e  $T(\Delta t_i)$  é a temperatura em graus Celsius durante o período.

O coeficiente de fluência por secagem  $\varphi_{dc}$  é determinado pela Equação 3.15.

$$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \times \beta_{dc}(RH) \times \beta_{dc}(t_0) \times \beta_{dc}(t, t_0) \quad (3.15)$$

sendo  $\beta_{dc}(f_{cm})$  o coeficiente modificado que considera a resistência na fluência por secagem determinado pela Equação 3.16:

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{f_{cm}^{1,4}} \quad (3.16)$$

O  $\beta_{dc}(RH)$  a correção devido à umidade relativa determinada pela Equação 3.17:

$$\beta_{dc}(RH) = \frac{1 - RH/100}{(h/1000)^{1/3}} \quad (3.17)$$

onde  $RH$  a umidade relativa do ar em porcentagem. O  $\beta_{dc}(t_0)$  representa a correção devido à idade de carregamento ajustada determinada pela Equação 3.18:

$$\beta_{dc}(t_0) = \frac{1}{0,1 + (t_{0,adj})^{0,2}} \quad (3.18)$$

onde  $\beta_{dc}(t, t')$  é a função do desenvolvimento da fluência por secagem no tempo determinado pela Equação 3.19:

$$\beta_{dc}(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{\beta_h + (t - t_0)} \right]^{\gamma(t_0)} \quad (3.19)$$

sendo  $\beta_h$  um coeficiente referente ao tamanho do elemento determinado pela Equação 3.20, e  $\gamma(t_0)$  é um coeficiente referente ao ajuste do tempo determinado pela Equação 3.21.

$$\beta_h = 1,5 \times h + 250 \times \alpha_{f_{cm}} \leq 1500 \times \alpha_{f_{cm}} \quad (3.20)$$

$$\gamma(t_0) = \left[ \frac{1}{\sqrt{t_{0,adj}}} \right] \quad (3.21)$$

onde  $\alpha_{f_{cm}}$  é um coeficiente relacionado com a resistência do concreto média aos 28 dias determinado pela Equação 3.22, e  $h$  está relacionada ao tamanho do elemento e é determinado pela Equação 3.23.

$$\alpha_{f_{cm}} = \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (3.22)$$

$$h = \frac{2 \times A_c}{u} \quad (3.23)$$

sendo,  $A_c$  a área da seção transversal em  $\text{mm}^2$  e  $u$  o perímetro do elemento em mm.

Considerando a coordenação e importância entre o desenvolvimento da resistência e o módulo de elasticidade, Yi Xu *et al.* (2018) utilizou a Equação 3.24 e substituiu  $f_{cm}$  por  $f_{cm,cal}$  nas fórmulas anteriores, determinado pela Equação 3.25.

$$E_{cm,28} = 21,5 \times \alpha_E \times \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad (3.24)$$

$$f_{cm,cal} = 10 \times \left( \frac{E_{cm,28}}{21,5 \times \alpha_E} \right)^3 \quad (3.25)$$

onde  $\alpha_E$  é um fator de correção que depende dos agregados utilizados, sendo de 1,2 para agregados de basalto, de 1 para agregados de quartzo, de 0,9 para agregados de calcário e 0,7 para agregados de arenito.

Assim, baseado nos resultados experimentais, Yi Xu *et al.* (2018) modificaram a curva do coeficiente de fluência, obtendo a Equação 3.26.

$$\varphi(t, t') = \varphi_{bc}(t, t') + \varphi_{dc}(t, t') - 0,30 \quad (3.26)$$

## 4 METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho foi desenvolvida tendo como base a revisão do estado da arte do concreto de ultra-alto desempenho, o estudo dos componentes e características mecânicas do UHPC. Em seguida, realizou-se o estudo sobre a fluência do UHPC, onde identificou-se aspectos característicos e recomendações internacionais. Posteriormente, foi realizada a implementação do modelo de previsão da fluência apresentado na recomendação da AFGC/SETRA (2013), por ter sido o único a apresentar um modelo matemático possível de implementação para a modelagem numérica.

A modelagem e simulação numérica são práticas cada vez mais comuns em problemas de engenharia. Essas simulações são feitas por meio de *softwares* comerciais que agregam muitos recursos. O ABAQUS® consiste em um *software* que faz análises por meio do método dos elementos finitos, e foi escolhido para a realização deste trabalho.

Considerando que os modelos constitutivos existentes no programa não são compatíveis por terem sido desenvolvidos para elementos de aço, e também que o *software* permite a implementação de sub-rotinas adicionadas pelo usuário em linguagem FORTRAN, optou-se por implementar uma sub-rotina para representar a fluência do UHPC.

A sub-rotina de fluência no ABAQUS® necessita do incremento de deformação em função do tempo  $\dot{\varepsilon}(t)$ , que foi desenvolvido para o modelo apresentado nas recomendações da AFGC/SETRA (2013) para UHPCs com regime de cura a vapor, Equação 3.1, que foi adotado como modelo de previsão da fluência nesse trabalho. A Equação 4.1 apresenta a taxa de incremento de deformação do modelo adotado obtida a partir de sua derivação em função do tempo da Equação 3.1.

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\sigma}{E_i} \left[ 1 + \varphi \times \left( \frac{0,6}{(t - t_0)^{0,4} \times ((t - t_0)^{0,6} + 10)} - \frac{0,6 \times (t - t_0)^{0,2}}{((t - t_0)^{0,6} + 10)^2} \right) \right] \quad (4.1)$$

onde  $\sigma$  representa a tensão aplicada em MPa,  $E_i$  o módulo de elasticidade no instante de tempo,  $\varphi$  o coeficiente de fluência multiplicando uma parcela que determina sua variação no tempo, sendo  $t_0$  o tempo no início do carregamento e  $t$  o instante de tempo mensurado, ambos em dias.

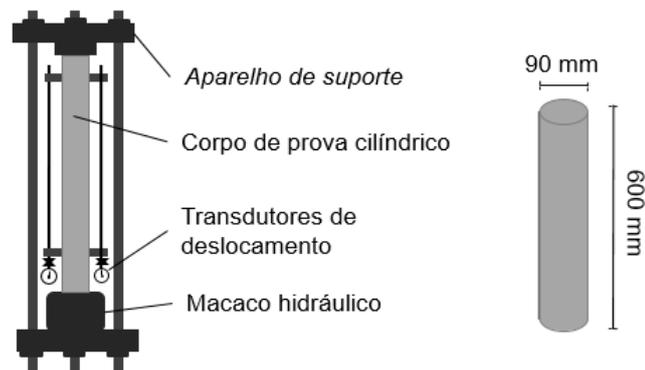
Com a finalidade de simular o efeito da fluência em corpos de prova de UHPC, buscou-se validar dois modelos, um unidimensional e outro tridimensional, comparando-os com o modelo matemático e as recomendações internacionais. Nesses modelos foram feitas análises

de convergência, quantitativa e qualitativa. Posteriormente, foi modelado e analisado um experimento realizado por Graybeal (2006).

#### 4.1 Modelagem unidimensional dos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013)

A geometria dos dois primeiros modelos foi escolhida de acordo com a apresentada nas recomendações da AFGC/SETRA (2013) e no trabalho de Loukili *et al.* (1998). Essa geometria consiste em um corpo de prova cilíndrico, com 600 mm de altura e 90 mm de diâmetro, que foi utilizado em um ensaio de fluência com a aparelhagem conforme ilustrada na Figura 4.1.

**Figura 4.1** – Representação do mecanismo usado nos ensaios de fluência apresentado nas Recomendações da AFGC/SETRA (2013) e no trabalho de Loukili *et al.* (1998).



Fonte: Adaptado de AFGC/SETRA (2013).

A face da base do modelo apresenta vinculação de apoio, enquanto na face superior é aplicado um carregamento constante. Tal como descrito nas recomendações da AFGC/SETRA (2013), o modelo utilizou o valor de 58 GPa para o módulo de elasticidade, 0,2 para o coeficiente de Poisson e 1068,770 kN de força concentrada, que representa o carregamento de 168 MPa aplicado na face do corpo de prova, desde o instante zero até 90 dias.

Inicialmente optou-se por um modelo hierarquicamente mais simples, sendo utilizado um modelo com elementos de barras. A geração de malha foi feita de forma estruturada no próprio *software*, sendo utilizado o elemento tipo B21. Esse elemento de formulação linear bidimensional possui dois nós, com dois graus de liberdade cada, e é bastante usado em modelos bidimensionais, além de modelos que envolvem contato. A Figura 4.2 ilustra o elemento utilizado.

**Figura 4.2** – Elemento B21 do ABAQUS®.

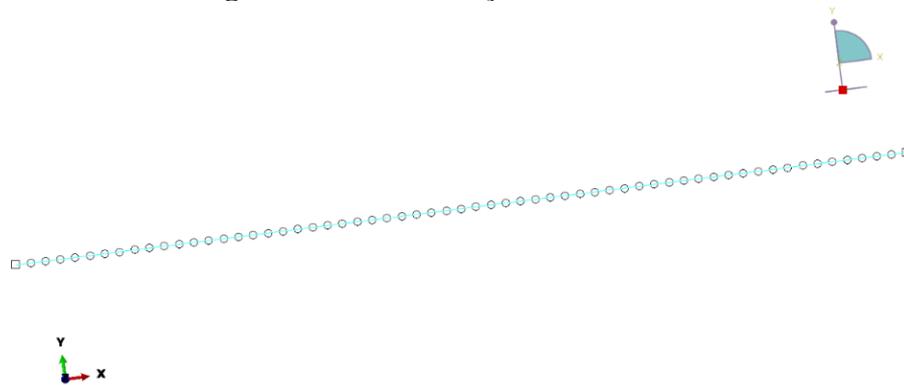


Elemento com 2 nós

Fonte: Adaptado de Tutorial ABAQUS® (2018).

A malha construída está ilustrada na Figura 4.3. É uma malha uniforme com 60 elementos B21, cada um com 10 mm de comprimento.

**Figura 4.3** – Distribuição dos elementos.



Fonte: Autor (2020).

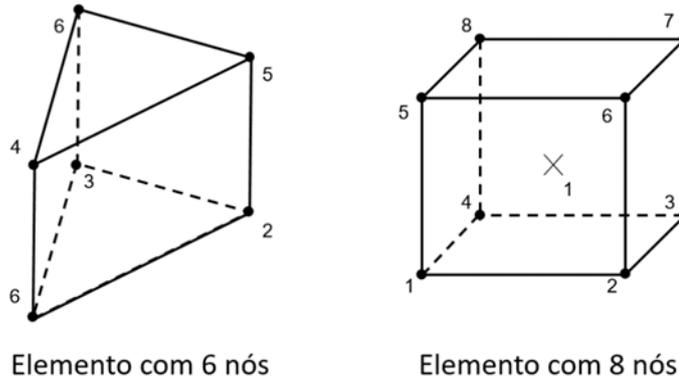
## 4.2 Modelagem tridimensional dos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013)

Esse tópico trata da modelagem numérica tridimensional dos corpos de prova utilizados nas recomendações francesas da AFGC/SETRA (2013). Assim, a geometria do modelo está conforme a geometria descrita nas recomendações. O modelo tridimensional permite uma melhor visualização dos resultados, entretanto possui um custo computacional maior. Conforme descrito na recomendação, o modelo utiliza uma vinculação de apoio na superfície inferior do cilindro e o carregamento distribuído na forma de pressão na superfície superior, com intensidade igual a 168 MPa. O módulo de elasticidade do modelo é de 58 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,2, desde o instante zero até 90 dias.

A geração da malha de elementos finitos foi feita no próprio *software*, sendo empregados dois tipos de elementos para obter uma malha estruturada: o C3D8R e o C3D6. O C3D8R é um elemento prismático quadrangular, com oito nós e integração reduzida, já o C3D6 é um

elemento prismático triangular, com seis nós e dois pontos de integração. A Figura 4.4 ilustra a forma dos elementos utilizados, nós e pontos de integração.

**Figura 4.4** – Elemento C3D6 e C3D8R do ABAQUS®, respectivamente.



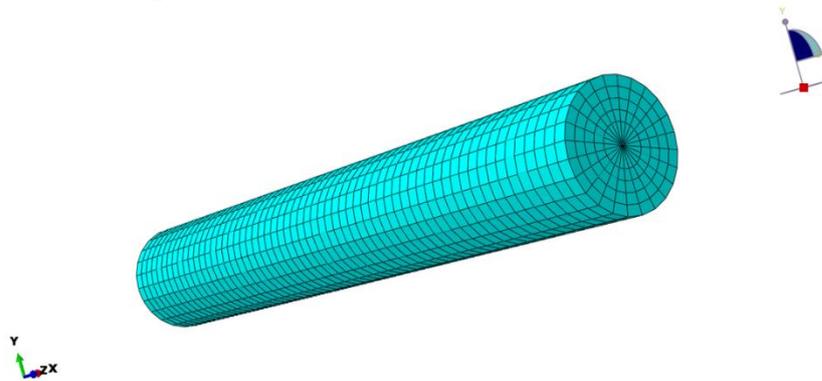
Elemento com 6 nós

Elemento com 8 nós

Fonte: Adaptado de Tutorial ABAQUS® (2018).

O cilindro foi particionado para criar uma malha estruturada e uniforme. Os elementos C3D6 foram colocados no eixo longitudinal e o C3D8R nos elementos fora do eixo. A Figura 4.6 ilustra essa divisão. Assim, a malha foi criada como apresentado na Figura 4.5, com 7200 elementos divididos em 60 camadas, cada uma com 10 mm de altura, e com 120 elementos por camada.

**Figura 4.5** – Malha do modelo tridimensional.



Fonte: Autor (2020).

### 4.3 Modelagem dos ensaios apresentados por Graybeal (2006)

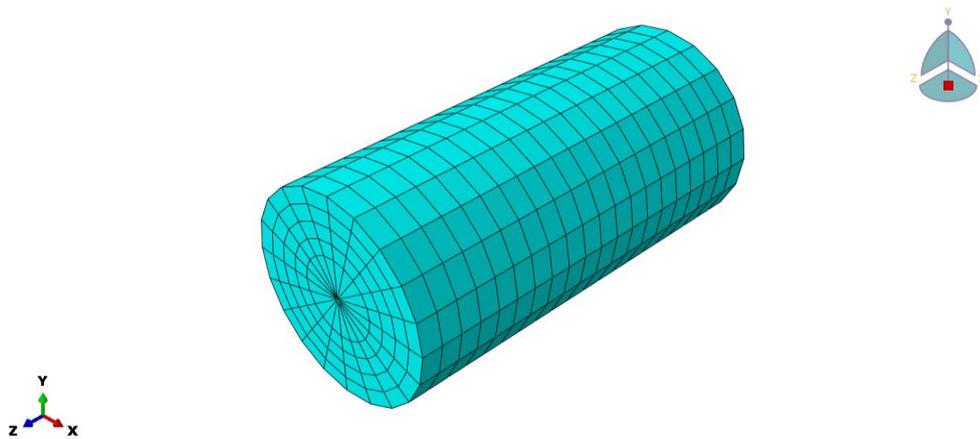
A geometria e propriedades mecânicas utilizadas nesse modelo foram extraídas dos ensaios de Graybeal (2006) em UHPCs com regime de cura a vapor, no qual buscou-se

caracterizar a fluência do concreto de ultra-alto desempenho até os 360 dias, seguindo as recomendações da ASTM C512. Sendo empregado na modelagem o método de previsão da fluência das recomendações da AFGC/SETRA (2013) e, assim, confrontar os resultados da modelagem com o dos ensaios de Graybeal (2006).

Desse modo, a geometria adotada nesse modelo consiste em um cilindro de 204 mm de altura e 102 mm de diâmetro. O modelo possui uma face com vinculação de apoio e a face oposta submetida a um carregamento distribuído de 77 MPa, na forma de pressão. Esse valor foi definido por Graybeal (2006) como 40% da resistência à compressão esperada do corpo de prova. O módulo de elasticidade utilizado foi de 52 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,2 do instante zero até 360 dias.

De maneira análoga ao modelo tridimensional dos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013), a malha de elementos finitos foi criada de forma estruturada no próprio *software* e está apresentada na Figura 4.6. Os elementos utilizados foram o C3D6 e o C3D8R como no modelo tridimensional do item 4.2, sendo 2000 mil elementos divididos em camadas com 100 elementos cada.

**Figura 4.6** – Distribuição da malha do modelo.



Fonte: Autor (2020).

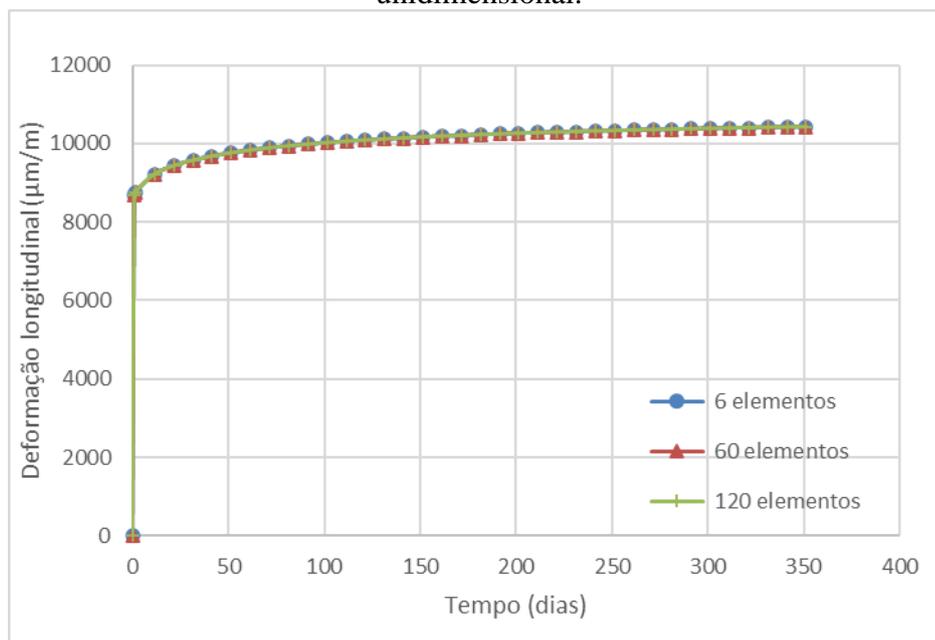
## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Primeiramente, serão apresentados e analisados os resultados dos dois primeiros modelos numéricos, que buscam simular os ensaios do trabalho de Loukili *et al.* (1998) utilizando o modelo de previsão da fluência adotado. Os resultados numéricos serão confrontados com os valores sugeridos nas recomendações japonesas (2006) e com as tabelas apresentadas nas recomendações australianas (2000) e francesas (2000). A seguir serão apresentados os resultados e análises do modelo numérico que reproduz o ensaio realizado por Graybeal (2006).

### 5.1 Modelos unidimensional e tridimensional que simulam a fluência nos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013)

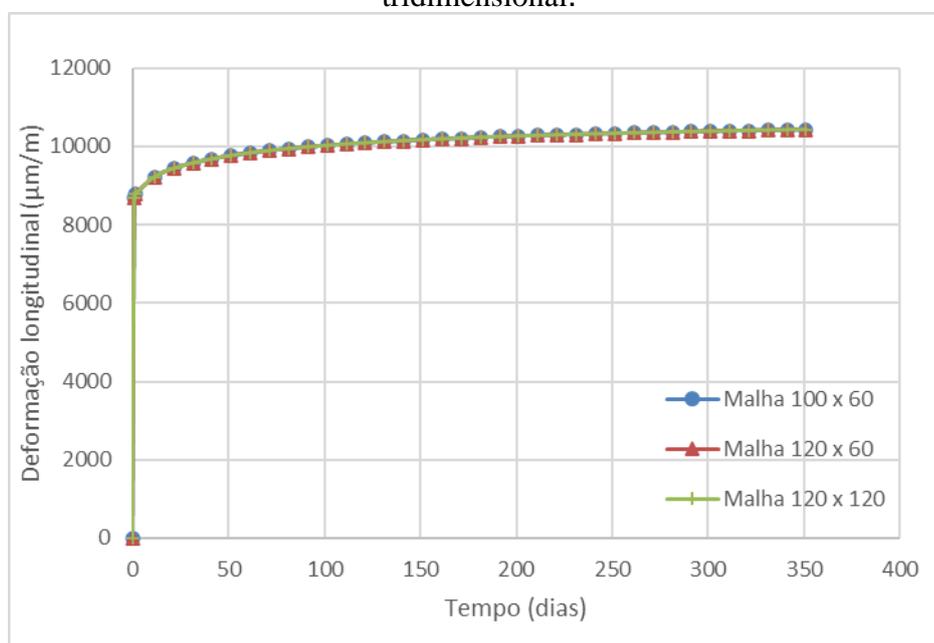
Inicialmente, foram realizadas análises de convergência da deformação ao longo do tempo com malhas de diferentes densidades nos modelos unidimensional e tridimensional. Os resultados dessas análises estão apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2. No modelo unidimensional foram analisadas malhas com 6, 60 e 120 elementos, enquanto as malhas testadas no modelo tridimensional correspondem a 60 camadas com 100 elementos cada, 60 camadas com 120 elementos cada e 120 camadas com 120 elementos cada.

**Figura 5.1** – Análise de convergência de deformação ao longo tempo no modelo unidimensional.



Fonte: Autor (2020).

**Figura 5.2** – Análise de convergência de deformação ao longo tempo no modelo tridimensional.

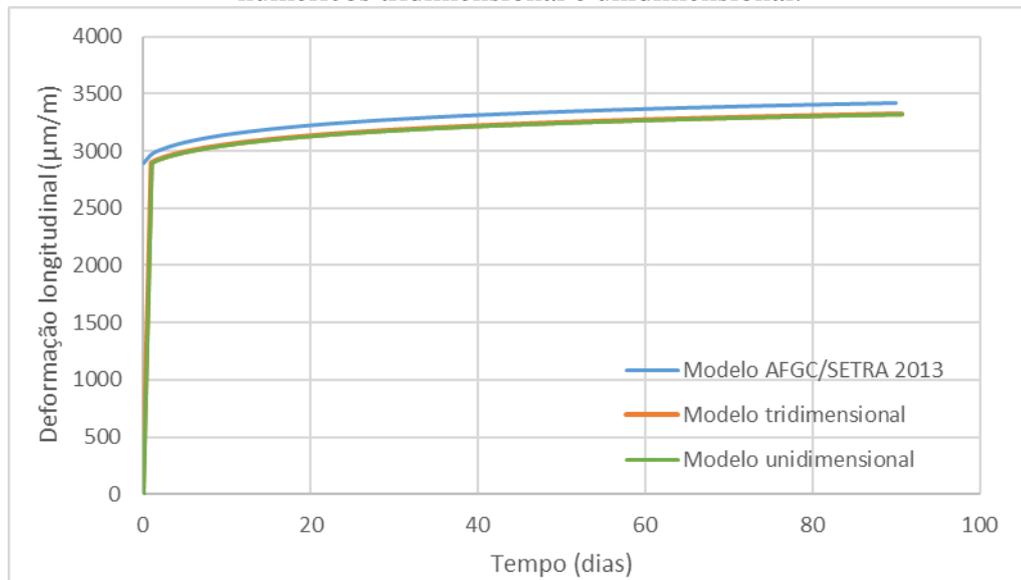


Fonte: Autor (2020).

Observa-se que o comportamento da deformação ao longo do tempo, nas Figuras 5.1 e 5.2, resultam no mesmo valor de deformação elástica e que a deformação por fluência varia muito pouco com o refinamento. Tal resultado se deve principalmente às condições de contorno do problema. Assim, adotou-se para os modelos unidimensionais malha constituída por 60 elementos e, para os modelos tridimensionais a malha com 60 camadas com 120 elementos por camada, totalizando 7200 elementos.

A Figura 5.3 apresenta os resultados da deformação ao longo do tempo obtidos no modelo numérico tridimensional, no modelo do unidimensional e no modelo matemático apresentado na AFGC/SETRA (2013). Os resultados obtidos no modelo unidimensional e no tridimensional foram praticamente idênticos. Percebe-se que os resultados dos modelos numéricos criados possuem boa aderência aos do modelo matemático proposto pela AFGC/SETRA (2017), com uma diferença equivalente a aproximadamente 2,7% ao final do período de 90 dias.

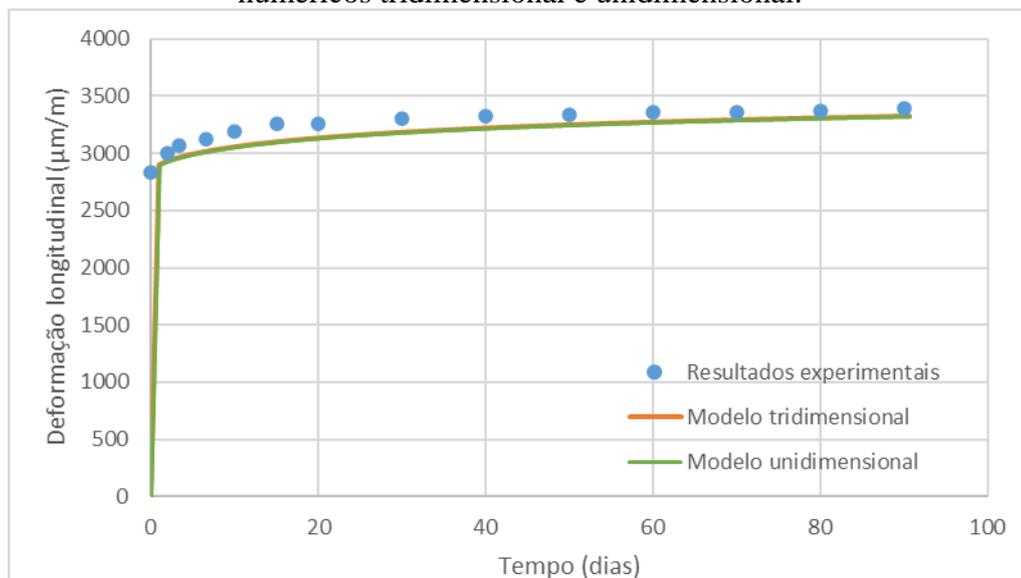
**Figura 5.3** – Deformação ao longo do tempo do modelo matemático e dos modelos numéricos tridimensional e unidimensional.



Fonte: Autor (2020).

Essa mesma análise foi feita em relação aos resultados obtidos pelos modelos numéricos criados e os resultados experimentais utilizados na construção do modelo matemático de previsão da fluência da AFGC/SETRA (2013), e está apresentada na Figura 5.4. Nota-se que todos os resultados, ao final dos 90 dias, foram bastante semelhantes.

**Figura 5.4** – Deformação ao longo do tempo dos resultados experimentais e dos modelos numéricos tridimensional e unidimensional.



Fonte: Autor (2020).

Os coeficientes de fluência foram calculados e confrontados com os coeficientes de fluência indicados nas recomendações japonesas (JSCE, 2006), nas recomendações francesas

(AFGC/SETRA, 2013) e na Tabela 3.2 das recomendações australianas da UNSW (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000), bem como com valores do coeficiente de fluência de concretos convencionais dos grupos I e II, de acordo com Graybeal (2006). Os resultados estão apresentados na Tabela 5.1. Observa-se que os valores indicados nas recomendações da AFGC/SETRA (2013) para UHPCs com cura a vapor foram obtidos de maneira empírica, entretanto, são diferentes dos valores obtidos utilizando o modelo de previsão da fluência da própria recomendação.

**Tabela 5.1** – Coeficiente de fluência aos 90 dias e sugeridos nas recomendações internacionais.

| Modelos numéricos |      | AFGC/SETRA<br>2013 | JSCE<br>2006 | UNSW<br>200 | Concreto<br>Convencional |
|-------------------|------|--------------------|--------------|-------------|--------------------------|
| 1D                | 3D   |                    |              |             |                          |
| 0,15              | 0,15 | 0,20               | 0,40         | 0,30        | 1,50 – 3,0               |

Fonte: Autor (2020).

Nota-se que os resultados obtidos através das simulações são inferiores aos valores fornecidos por todas as recomendações. Isso indica que as recomendações apresentaram indicações conservadoras em relação aos resultados obtidos através dos modelos numéricos. Para fins de comparação, os valores de coeficiente de fluência obtidos foram bastante inferiores aos de concretos do grupo I e II observados por Russel e Graybeal (2013).

O erro relativo dos resultados dos modelos, em comparação aos valores indicados nas recomendações, encontra-se na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2** – Erro relativo dos resultados do coeficiente de fluência dos modelos unidimensional e tridimensional em relação as recomendações internacionais.

| AFGC/SETRA 2013 |       | JSCE 2006 |       | UNSW 2000 |       |
|-----------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| 1D              | 3D    | 1D        | 3D    | 1D        | 3D    |
| 25,0%           | 25,0% | 62,5%     | 62,5% | 50,0%     | 50,0% |

Fonte: Autor (2020).

O valor recomendado da AFGC/SETRA (2013) de 0,2 apresentou o valor mais próximo, sendo o erro relativo igual a 25,0%. Os erros em relação às recomendações da JSCE (2006) e UNSW (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000) foram maiores.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de fluência específica dos modelos e o valor estimado de acordo com as recomendações da AFGC/SETRA (2013) e da JSCE (2006), utilizando o módulo de elasticidade igual a 50 GPa, valor indicado nas duas recomendações.

**Tabela 5.3** – Resultados da fluência específica aos 90 dias e estimativas de acordo com recomendações internacionais.

| Fluência específica<br>$\varepsilon_{cu}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ ) |     | AFGC/SETRA<br>2013<br>( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ ) | JSCE<br>2006<br>( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ ) |
|---|-----|---|---|
| 1D  | 3D  |   |   |
| 2,5   | 2,5 | 4,0   | 8,0   |

Fonte: Autor (2020).

Os resultados da fluência específica dos modelos foi de 2,5  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ . Os valores continuaram abaixo dos recomendados. De acordo com Graybeal (2006), a fluência específica de concretos do grupo I e II varia entre 36  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$  até 145  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ , bastante superior aos resultados apresentados. Os erros relativos dos resultados da fluência específica estão apresentados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4** – Erro relativo dos resultados de fluência específica dos modelos unidimensional e tridimensional em relação as estimativas de acordo com as recomendações internacionais.

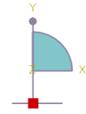
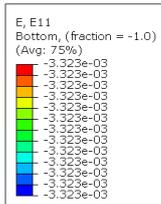
| AFGC/SETRA 2013 |       | JSCE 2006 |       |
|-----------------|-------|-----------|-------|
| 1D              | 3D    | 1D        | 3D    |
| 37,5%           | 37,5% | 68,7%     | 68,7% |

Fonte: Autor (2020).

Os modelos numéricos apresentaram o valor de fluência específica bastante semelhante. Conforme esperado, os valores de fluência específica permaneceram abaixo das recomendações internacionais. É possível que parte da discrepância dos resultados decorra da limitação do modelo constitutivo, que não consegue reproduzir a progressão da resistência à compressão do concreto com o passar do tempo, sendo adotado a resistência à compressão aos 28 dias.

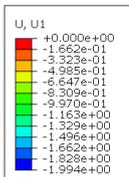
Para melhor entendimento do que ocorreu com o espécime no final de um ensaio de fluência como o desse exemplo, os valores de deformação e deslocamento final obtidos pelos modelos numéricos foram ilustrados nas Figuras 5.5 e 5.6. As Figuras 5.5 e 5.6 demonstram a deformação ( $\varepsilon_{xx}$ ) e o deslocamento ( $\delta_{xx}$ ) na direção do carregamento, respectivamente.

**Figura 5.5** – Deformação na direção do carregamento ( $\epsilon_{xx}$ ), em mm/mm, no modelo unidimensional.



Fonte: Autor (2020).

**Figura 5.6** – Deslocamentos na direção do carregamento ( $\delta_{xx}$ ), em mm, no modelo unidimensional.

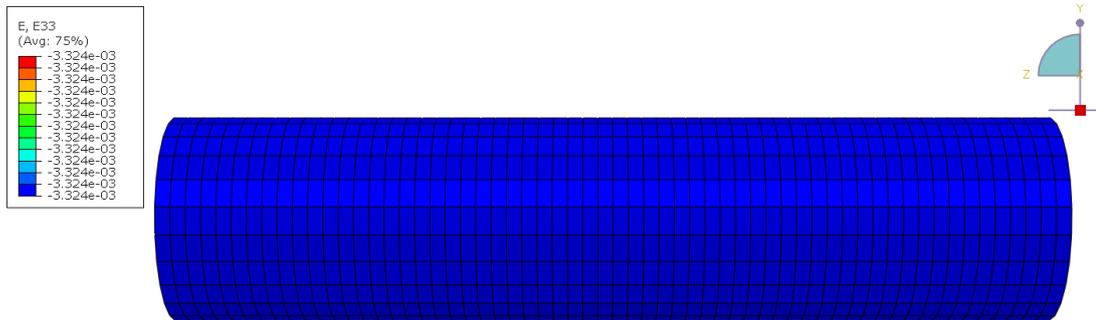


Fonte: Autor (2020).

Pode-se observar nas Figuras 5.5 que o valor da deformação no instante final da modelagem permanece uniforme ao longo de toda geometria, tal como é esperado nos ensaios de fluência. O valor final de tensão obtido foi de 168 MPa. A deformação final foi igual a  $3,323 \times 10^{-3}$  mm/mm. A Figura 5.6 ilustra o deslocamento final, que apresenta a característica de um deslocamento linear onde a superfície vinculada ao apoio permanece com deslocamento nulo e a superfície onde se dá a aplicação do carregamento apresenta um deslocamento de 1,994 mm.

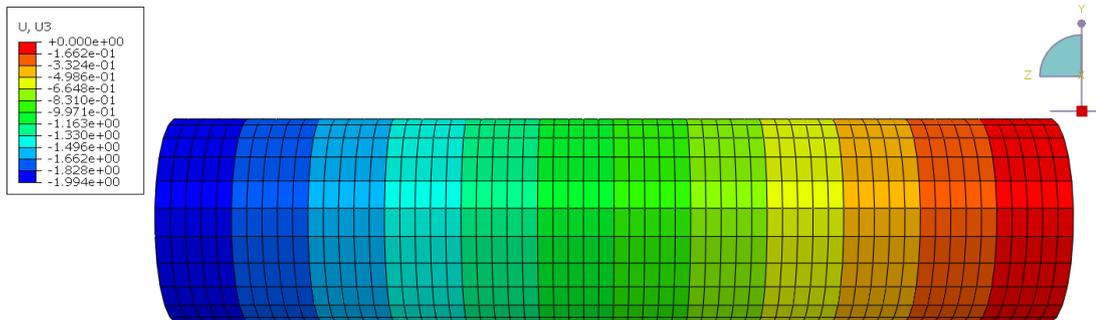
Os resultados do campo deformação ( $\epsilon_{zz}$ ) e deslocamento ( $\delta_{zz}$ ) na direção do carregamento obtidos no instante final a partir do modelo tridimensional são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente.

**Figura 5.7** – Deformação na direção do carregamento ( $\epsilon_{zz}$ ), em mm/mm, no modelo tridimensional.



Fonte: Autor (2020).

**Figura 5.8** – Deslocamentos na direção do carregamento ( $\delta_{zz}$ ), em mm, no modelo tridimensional.



Fonte: Autor (2020).

Do ponto de vista qualitativo, o modelo tridimensional permite uma melhor visualização do espécime modelado. Como esperado, os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos no modelo unidimensional. A Figura 5.7 apresenta o campo de deformação uniforme ao longo de toda a geometria, sendo a deformação final igual a  $3,323 \times 10^{-3}$  mm/mm. A tensão uniforme final igual a 168 MPa foi obtida. Na Figura 5.8 observa-se o campo de deslocamento linear na direção do carregamento, onde o deslocamento máximo foi de, aproximadamente, 2,00 mm.

Desta forma, acredita-se que a modelagem numérica desenvolvida foi capaz de obter resultados de coeficiente de fluência satisfatoriamente próximos dos descritos nas recomendações da AFGC/SETRA (2013). Entretanto, por serem valores baixos, os erros relativos observados foram altos, o que não se reflete na diferença em módulo dos valores.

## 5.2 Resultados da modelagem tridimensional do ensaio de fluência de Graybeal (2006)

Este modelo foi construído de maneira análoga ao modelo tridimensional dos ensaios apresentados nas recomendações francesas (2013). Entretanto, essa modelagem visa simular ensaio de fluência realizado por Graybeal (2006) utilizando o modelo de previsão da fluência da recomendação da AFGC/SETRA (2013). O espécime do ensaio escolhido recebeu tratamento de cura a vapor 24 horas após ser moldado, a uma temperatura de 90°C e umidade relativa de 95% durante 48 horas. Então, 4 dias após moldado, o espécime foi carregado. Os resultados obtidos na modelagem e no ensaio de Graybeal (2006) aos 360 dias estão apresentados na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5** – Deformação inicial e final dos resultados da modelagem e de Graybeal (2006).

| Resultados      | Tensão aplicada (MPa) | Deformação elástica inicial ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) | Deformação final ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |
|-----------------|-----------------------|--|---|
| Modelo numérico | 77,0                  | 1466,7   | 1759,4                                      |
| Graybeal (2006) | 77,0                  | 1500,0   | 1940,0                                      |

Fonte: Autor (2020).

Ainda na Tabela 5.5, observa-se que o erro entre os resultados do modelo numérico em relação aos apresentados por Graybeal (2006) foi de 2,2% na deformação elástica inicial e de 9,3% para deformação final.

O coeficiente de fluência e a fluência específica do modelo numérico foram calculados e estão apresentados na Tabela 5.6, juntamente com os resultados do ensaio apresentados por Graybeal (2006). Para o modelo numérico foi adotado um módulo de elasticidade constante igual a 52 GPa, esse valor corresponde ao módulo de elasticidade obtido em espécimes ensaiados aos 28 dias.

**Tabela 5.6** – Coeficientes de fluência e fluência específicas aos 360 dias.

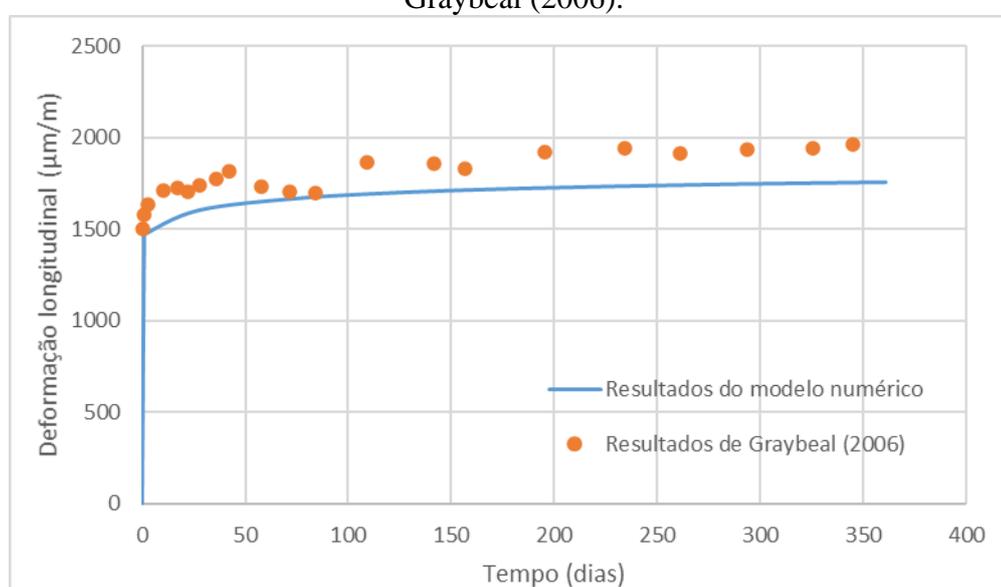
| Resultados      | Coeficiente de fluência $\varphi$ | Fluência específica $\varepsilon_{cu}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ ) |
|-----------------|-----------------------------------|--|
| Modelo numérico | 0,20                              | 3,84   |
| Graybeal (2006) | 0,29                              | 5,70   |

Fonte: Autor (2020).

Embora as deformações não tenham apresentado variações percentuais expressivas, isso não ocorreu com o coeficiente de fluência e fluência específica, que apresentam erro relativo de 31,0% e 32,6%, respectivamente.

A Figura 5.9 ilustra os resultados de deformação longitudinal ao longo do tempo obtido via o modelo numérico criado e ensaio experimental de Graybeal (2006) no período de 360 dias, que corresponde ao tempo de duração do ensaio. Existe uma aderência qualitativa e quantitativa onde foi observado um erro percentual de 9,3 % no final do ensaio.

**Figura 5.9** – Deformação longitudinal ao longo do tempo do modelo numérico e do ensaio de Graybeal (2006).



Fonte: Autor (2020).

A Tabela 5.7 confronta os resultados do coeficiente de fluência do modelo numérico e dos resultados apresentados por Graybeal (2006) com valores sugeridos nas recomendações da AFGC/SETRA (2013), da JSCE (2006) e da UNSW (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000). Os valores indicados nas recomendações internacionais foram obtidos de maneira empírica e indicados para UHPCs com cura a vapor.

**Tabela 5.7** – Coeficientes de fluência obtidos e sugeridos nas recomendações internacionais.

| Modelo numérico | Graybeal (2006) | AFGC/SETRA 2013 | JSCE 2006 | UNSW 2000 | Concreto Convencional |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------|
| 0,20            | 0,29            | 0,20            | 0,40      | 0,30      | 1,50 – 3,00           |

Fonte: Autor (2020).

Como pode-se observar, existe uma diferença entre os resultados da modelagem numérica e de Graybeal (2006), onde o coeficiente de fluência do modelo numérico foi um inferior ao encontrado por Graybeal (2006) em seus ensaios. A recomendação da AFGC/SETRA (2013) sugere que o coeficiente de fluência do UHPC com cura a vapor está entre 0,2 e 0,4, assim esses resultados foram considerados satisfatórios.

Os erros relativos dos coeficientes de fluência do modelo numérico e de Graybeal (2006) em comparação com os valores sugeridos nas recomendações supracitadas, encontram-se na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8** – Comparação dos erros relativos do modelo numérico e de Graybeal (2006) em relação às sugestões das recomendações internacionais.

| Resultados      | AFGC/SETRA<br>2013 | JSCE<br>2006 | UNSW<br>2000 |
|-----------------|--------------------|--------------|--------------|
| Modelo Numérico | 0,0%               | 50,0%        | 33,3%        |
| Graybeal (2006) | 45,0%              | 27,5%        | 3,3%         |

Fonte: Autor (2020).

Os menores erros obtidos foram entre o modelo numérico em relação a recomendação da AFGC/SETRA (2006), sendo igual a 0,0%, e entre os resultados apresentados por Graybeal (2006) em relação as recomendações da UNSW (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000) igual a 3,3%.

A Tabela 5.9 confronta os resultados de fluência específica obtidos no modelo numérico e nos ensaios Graybeal (2006) com valores estimados de acordo com as recomendações francesa (AFGC/SETRA, 2013) e japonesa (JSCE, 2006), utilizando o módulo de elasticidade igual a 50 GPa, valor indicado nas duas recomendações.

**Tabela 5.9** – Fluências específicas obtidas e estimados de acordo com as recomendações internacionais.

| Modelo numérico | Graybeal (2006)<br>( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ ) | AFGC/SETRA<br>2013 | JSCE<br>2006 |
|-----------------|--|--------------------|--------------|
| 3,84            | 5,70   | 4,0                | 8,0          |

Fonte: Autor (2020).

A estimativa realizada com os dados sugeridos pelas recomendações da AFGC/SETRA (2013) se mostrou boa, considerando a proximidade com o resultado obtido no modelo numérico. A Tabela 5.10 apresenta os erros relativos dos resultados de fluência específica.

**Tabela 5.10** – Erros relativos dos resultados de fluência específica do modelo numérico e de Graybeal (2006) em relação às estimativas criadas de acordo com as recomendações internacionais.

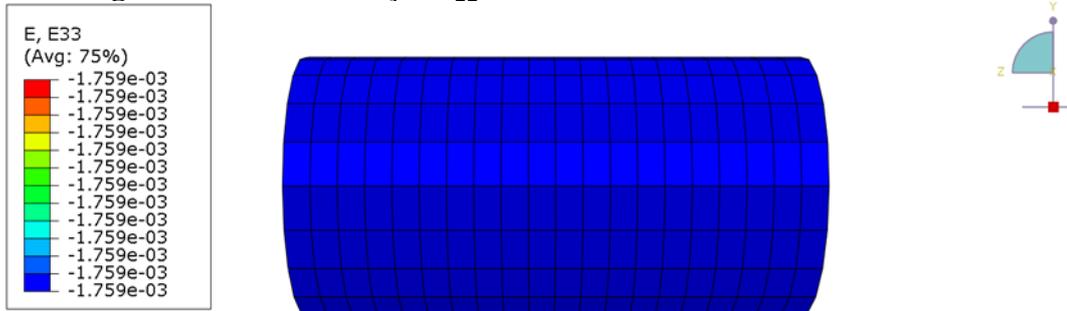
| Resultados      | AFGC/SETRA 2013 | JSCE 2006 |
|-----------------|-----------------|-----------|
| Modelo numérico | 4,0%            | 52,0%     |
| Graybeal (2006) | 42,5%           | 28,7%     |

Fonte: Autor (2020).

O menor erro relativo obtido foi o dos resultados do modelo numérico em relação à estimativa criada de acordo com a recomendações da AFGC/SETRA (2013), de 4,0%. Entretanto, o erro relativo entre os resultados de Graybeal (2006) e a estimativa adotada para a AFGC/SETRA (2013) foi de 42,5%, isso se deve aos valores do coeficiente de fluência utilizados.

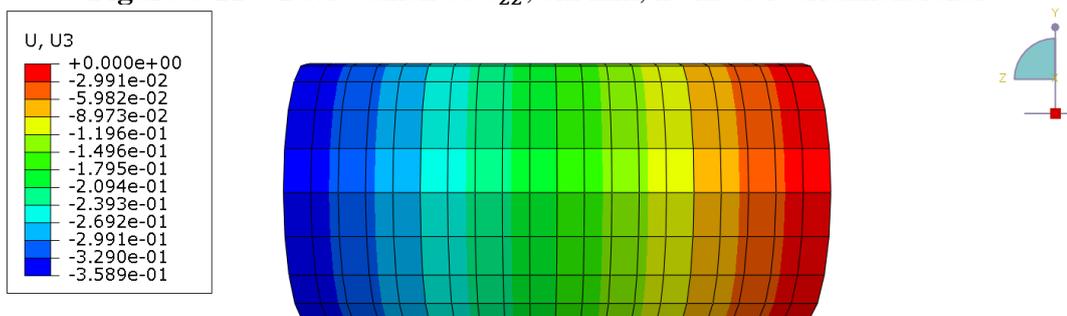
As respostas do espécime modelado no final do ensaio de fluência estão ilustradas da Figura 5.10 e 5.11, onde a Figura 5.10 apresenta o campo de deformação ( $\epsilon_{zz}$ ), e a Figura 5.11 o campo de deslocamentos ( $\delta_{zz}$ ), ambos na direção do carregamento.

**Figura 5.10** – Deformação  $\epsilon_{zz}$ , em mm/mm, no modelo tridimensional



Fonte: Autor (2020).

**Figura 5.11** – Deslocamentos  $\delta_{zz}$ , em mm, no modelo tridimensional.



Fonte: Autor (2020).

Conforme esperado para um corpo elástico linear isotrópico e sujeito a um carregamento axial constante, a deformação  $\varepsilon_{zz}$  foi uniforme como observado na Figura 5.10, sendo igual a  $1,76 \times 10^{-3}$  mm/mm. A tensão  $\sigma_{zz}$  também apresentou um comportamento uniforme e obteve o valor de 77 MPa. O deslocamento máximo obtido foi de 0,36 mm, apresentado na Figura 5.11. Deste modo, a modelagem desse exemplo obteve um comportamento satisfatório, mesmo não tendo apresentado resultados mais próximos do esperado.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizado um levantamento do estado da arte de concretos de ultra-alto desempenho, onde foi constatado que o UHPC é um material construtivo avançado, constituído de materiais cimentícios finos, entre seus princípios estão a homogeneidade da matriz cimentícia devido à eliminação de grãos graúdos e compacidade do material devido à otimização das dimensões dos grãos, a baixa relação água/cimento, a boa trabalhabilidade e alta resistência à compressão, frequentemente superior a 150 MPa.

Em relação à fluência do UHPC, foram identificadas três recomendações internacionais, a recomendação francesa da AFGC/SETRA (2013), a australiana da UNSW (GOWRIPALAN e GILBERT, 2000) e a japonesa da JSCE (2006). Entretanto, apenas as recomendações da AFGC/SETRA (2013) propõem um modelo matemático de previsão da fluência do UHPC, que foi o modelo utilizado neste trabalho.

O *software* de simulação utilizado permite a criação de diversas análises, gerações automáticas de malhas estruturadas e análises viscoelásticas, entretanto não possui modelos de previsão da fluência preestabelecidos para concretos. Por isso, o modelo de previsão da fluência apresentado na AFGC/SETRA (2013) foi implementado no software por meio de uma sub-rotina.

No desenvolvimento do trabalho foi identificada a dificuldade de obter o incremento de deformação por fluência de modelos como o do fib MC2010 e da NBR6118:2014. Isso se deve a existência de parâmetros escalares independentes do tempo nesses modelos, que ocasionam erros de exatidão no processo de cálculo da derivada em função do tempo. Constituindo-se numa limitação identificada para a implementação desses modelos de previsão da fluência do concreto no *software*.

Nos estudos realizados, os modelos numéricos criados apresentaram resultados com uma devida aderência ao modelo de previsão da fluência descrito na recomendação AFGC/SETRA (2013) e obtiveram resultados de coeficiente de fluência e fluência específica satisfatórios. O modelo unidimensional e o tridimensional obtiveram resultados semelhantes, o refinamento da malha de elementos finitos não implicou em mudanças significativas nos resultados, isto já era esperado em função da geometria do modelo, do tipo de carregamento e do modelo constitutivo adotado.

Observou-se que os coeficientes de fluência obtidos nos modelos numéricos criados foram inferiores às sugestões das recomendações da AFGC/SETRA (2013), JSCE (2006) e UNSW (2000) para concretos de ultra-alto desempenho com cura a vapor.

No entanto, acredita-se que o modelo de previsão da fluência utilizado e apresentado na recomendação da AFGC/SETRA (2013), na forma atual, não contempla parâmetros suficientes para determinar com exatidão os resultados de fluência obtidos por Graybeal (2006) em seus ensaios. É pressuposto que quanto maior a quantidade de dados na entrada do modelo melhor a aproximação com os resultados experimentais. Dados tais como tipo de cimento, temperatura, umidade relativa do ar, geometria dos corpos de prova, condições de cura e carregamento.

Tendo em vista os resultados obtidos nesse trabalho, alguns aprimoramentos podem ser sugeridos para o desenvolvimento em trabalhos futuros, como: realizar a implementação de outros modelos de previsão da fluência do concreto, possivelmente em outro *software*; realizar análises considerando diferentes regimes de cura; a aplicação de modelos com geometrias diferentes, buscando analisar o efeito da fluência em vigas ou pilares; desenvolvimentos de trabalhos a respeito da retração do UHPC, com identificação e implementação de modelos matemáticos; e o desenvolvimento de trabalhos que envolvam ensaios experimentais com UHPC.

## REFERÊNCIAS

3DS DASSAULT SYSTEMES. **Simulia platforms & configuration support**. Disponível em: <<https://www.3ds.com/support/hardware-and-software/simulia-system-information/>>. Acesso em 10 de janeiro de 2020.

ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. **Ultra-High Performance Concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges**. International Journal of Concrete Structures and Materials. Vol. 10, No. 3, Setembro 2016, p. 271 – 295.

AHLBORN, T. M.; MISSON, D. L.; PEUSE, E. J.; GILBERTSON, C. G. **Durability and strength characterization of ultra-high performance concrete under variable curing regimes**. Proceeding of 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, University of Kassel, Alemanha, 2008, p. 197 – 204.

AİTCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. Abingdon: Taylor & Francis, Modern Concrete Technology, 2008.

ALKAYSI, M. M. **Strength and durability of ultra-high performance concrete materials and structures**. University of Michigan, Estados Unidos da América, 2016.

ALMEIDA, A. F. D.; COSTA, H. S. S. **Formulação e análise de desempenho de UHPC reforçado com fibras não metálicas**. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Portugal, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209R-92**: Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM C502**: Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. ASTM International. West Conshohocken, Pensilvânia, Estados Unidos da América, 2010.

ARAÚJO, J. M. Pilares esbeltos de concreto armado Parte 2: verificação dos métodos simplificados da NBR 6118. Teoria e Prática na Engenharia Civil. n 9, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8224**: Concreto endurecido – Determinação da fluência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL - SERVICE D'ÉTUDE DES TRANSPORTS, DES ROUTES ET DE LEURS AMÉNAGEMENT - AFGC/SETRA. Bétons fibrés à ultra-hautes performances (ultra high performance fibre-reinforced concretes), recommandations provisoires, interim recommendations. Groupe de travail BFUP, Paris, França, 2013.

BLAISE, P. Y.; COUTURE, M. Precast, prestressed pedestrian bridge – World's first reactive powder concrete structure. PCI Journal, Vol. 44, 1999.

BONNEAU, O.; LACHEMI, M., DALLAIRE, E., DUGAT, J., AÏTCIN, P. C. **Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes**. ACI Materials Journal, Vol. 94. 1997.

BURKART, I.; MÜLLER, H. S. **Creep and shrinkage characteristics of ultra high strength concrete (UHPC)**. Proceeding of 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, University of Kassel, Alemanha, 2008, p. 469 – 476.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A.; BITTENCOURT, T. N. **Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures**. Ibracon Structures and Materials Journal. Vol 10. 957- 971. 2017.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Caparica, Portugal, 2010.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON – International Federation for Structural Concrete. **Structural concrete: textbook on behavior, design and performance**. Vol 1. novembro, 2009.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. Tese de Doutorado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, 2019.

CHRIST, R.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Aplicação do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) em sistema construtivo habitacional no Brasil. *CONCRETO & Construções*, Vol 96. IBRACON, 2019.

CWIRZEN, A.; HABEMEHL-CWIRZEN, K.; PENTTALA, V. **The effect of heat treatment on the salt freeze-thaw durability of UHSC**. Proceeding of 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, University of Kassel, Alemanha, 2008, p. 221 – 230.

FEHLING, E.; LEUTBECHER, T.; RODER, F. K.; STURWALD, S. **Structural behavior of UHPC under biaxial loading**. Proceeding of 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, University of Kassel, Alemanha, 2008, p. 569 – 576.

FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; WALRAVEN, J.; LEUTBECHER, T.; FROHLICH, S. **Ultra-High Performance Concrete UHPC: fundamentals, design, examples**. Ernst & Sohn. 2014.

FÉDÉRATIN INTENATIONALE DU BÉTON/INTENACIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **Fib Model code for concrete structures 2010**. Ernest & Sohn. 2013.

FLIETSTRA, J. C. **Creep and shrinkage behavior of ultra high-performance concrete under compressive loading with varying curing regimes.** Master's thesis, Michigan Technological University, 2011.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concreto de altíssimo desempenho.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, 2005.

FRANCISCO, P.; BENBOUDJEMA, F.; ROUGEAU, P.; TORRENTI, J. **Creep and shrinkage prediction for a heat-treated ultra high performance fibre-reinforced concrete.** Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., Glotzbach, C., Fröhlich, S., and Piotrowski, S., Kassel University Press, Kassel, Alemanha, 2012, p. 325 – 331.

GARAS, V. Y.; KAHN, L. F.; KURTIS, K. E. **Preliminary investigation of the effect of steel fibers on the tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete.** School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Estados Unidos da América. Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, Tanabe *et al.* Taylor & Francis Group, Londres, 2009.

GOEL, R.; KUMAR, R.; PAUL, D. K. **Comparative study of various creep and shrinkage prediction models for concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering © ASCE. Março 2007, p. 249 – 260.

GOWRIPALAN, N.; GILBERT, R. I. **Design guidelines for ductal prestressed concrete beams.** VSL AUSTRALIA. Sidney, Australia, 2000.

GRAYBEAL, B. A. **Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete.** U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. FHWA-HRT-06-103. Washington DC, Estados Unidos da América, 2006.

GRAYBEAL, B. A. **Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete.** ACI Materials Journal, 2007.

GRAYBEAL, B. A. **Construction of field-cast Ultra-High Performance Concrete connections**. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. FHWA-HRT-12-038. Estados Unidos da América, 2012.

GRAYBEAL, B.; BABY, F.; MARCHAND, P.; TOUTLEMONDE, F. **Direct and flexural tension test methods for determination of the tensile stress-strain response of UHPFRC**. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., Glotzbach, C., Fröhlich, S., and Piotrowski, S., Kassel University Press, Kassel, Alemanha, 2012, p. 395 – 402.

HABEL, K.; VIVIANI, M.; DENARIE, E.; BRUHWILLER, E. **Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)**. Cement and Concrete Research, Vol. 36, Issue 7, 2006, p. 1362 – 1370.

HABER, Z. B.; VARGA, I. D. L.; GRAYBEAL, B. A.; NAKASHOJI, B.; EL-HELOU, R. **Properties and behavior of UHPC-Class materials**. FHWA-HRT-18-036. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Estados Unidos da América, 2018.

HEROLD, G.; MÜLLER, H. S. **Measurement of porosity of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete**. Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Alemanha, 2004, p. 685 – 694.

LEONHARDT, F. **Construções de Concreto**. Vol. 5. Interciência, Rio de Janeiro, 1983.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (draft). JSCE Guidelines for Concrete No. 9, 2006.

JOH, C.; HWANG, H.; CHOI, E.; PARK, J.; KIM, B. **Punching shear strength estimation of uhpc slabs**. Proceeding of 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, University of Kassel, Alemanha, 2008, p.197 – 204.

KALINTZIS, C. A. A. e KUPERMAN, S. C. **Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho**. 2000. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KANG, S. T.; LEE, Y.; PARK, Y. D.; KIM, J. K. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Composite Structures*, Vol. 92, Issue 1, 2010, p. 61 – 71.

KATAOKA, L. T. **Análise da deformabilidade por fluência e retração e sua utilização na monitoração de pilares de concreto**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP – SP), São Paulo, Brasil, 2010.

LI, P.; YU, Q.; CHUNG, C. P.; BROUWERS, H. J. H. **Mix design and performance evaluation of ultra-high performance concrete (UHPC) with basalt aggregate**. 6<sup>th</sup> International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete, República Tcheca. Junho, 2019. p. 202 – 209.

LOUKILI, A.; RICHARD, P, LAMIRAULT J. **A study on delayed deformations of an ultra high strength cementitious material**. In: Institute AC, editor. Fourth CANMET/ACI/JCI International Conference; 1998; Tokushima, Japan. p. 929 – 949.

MCDONAGH, M. D.; FODEN, A. J. **Benefits of ultra-high performance concrete for the rehabilitation of the Pulaski Skyway**. First International Interactive Symposium on UHPC, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestruturas, propriedades de materiais**. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MELO, A. A.; MARTINS, V. C.; REPETTE, W. L. **Estudo de compatibilidade cimento x aditivo fluidificante**. *Revista Eletrônica de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil – eMAT*. 2004.

MOREIRA, T. N. DA C.; FORMAGINI, S.; TOLEDO FILHO, R. D. Dosagem, caracterização e autocicatrização de compósitos cimentícios de altíssimo desempenho

reforçados com fibras de aço (UHPRFC). *CONCRETO & Construções*, Vol 91. IBRACON, 2018.

MULLER, R. M.; KOELLE, P.; ALMEIDA, C. N. **A utilização de UHPC em obras no Brasil**. *CONCRETO & Construções*, Vol 87. IBRACON0, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo. Pini, 1997.

ORGASS, M.; KLUG, Y. **Fibre reinforced ultra-high strenght concretes**. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Alemanha, 2004, p. 637 – 648.

PEUSE, E. J. Impact of age at thermal treatment on the mechanical properties of an ultra-high performance concrete. Michigan Technological University. Estados Unidos da América, 2008, p. 150.

REDA, M. M.; SHRIVE, N. G.; GILLOTT, J. E. **Microstructural investigation of innovative UHPC**. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, p. 323 – 329.

ROUGEAU, P.; BORYS, B. **Ultra high performance concrete with ultrafine particles other than silica fume**. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Alemanha, 2004, p. 213 – 225.

RUSSELL, H. G.; GRAYBEAL, B. A. **Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art**. Report for the Bridge Community. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Estados Unidos da América, 2013.

SANTOS, A., TUTIKIAN, B. F. **Concreto de pós reativos rende prêmio à Unisinos**. Massa Cinzenta, janeiro de 2015. Disponível em <<https://www.cimentoitambe.com.br/concreto-de-pos-reativos-unisinos/>>. Acesso em: 7 de fevereiro de 2020.

SBIA, L. A.; PEYVANDI, A.; LU, J.; ABIDEEN, S.; WEERASIRI, R. R.; BALACHANDRA, A. M.; SOROUSHIAN, P. **Production methods for reliable construction of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) structures**. *Materials and Structures*, 2016.

SCHACHINGER, I.; HILBIG, H; STENGEL, T. **Effect of curing temperature at an early age on the long-term strength development of UHPC**. 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, University of Kassel, Alemanha, 2008, p. 719 – 726.

SCHMIDT, M. **Sustainable building with ultra-high-performance concrete (uhpc)— coordinated research program in germany**. *Proceedings of Hipermat 2012. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*. Kassel University Press, Kassel, Alemanha, 2012, p. 17 – 25.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. **A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design**. *College of Civil Engineering, Hunan University, China. Construction and Building Materials* 101, 2015, p.741 – 751.

SOUTSOS, M. N.; MILLAR, S. G.; KARAIKOS, K. **Mix design, mechanical properties, and impact resistance of reactive powder concrete (RPC)**. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, Honolulu, Estados Unidos da América, 2005.

SOLIMAN, N. A. **Development of ultra-high-performance concrete (UHPC) using waste glass materials – towards innovative eco-friendly concrete**. *Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada*, 2016.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. **Study of rheological and mechanical performance of ultra-high-performance glass concrete**. 2<sup>nd</sup> FRC Joint ACI-fib International Workshop, Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications. Montreal, Canada, 2014.

STAQUET, S.; ESPION, B. **Early-age autogenous shrinkage of UHPC incorporating very fine fly ash or metakaolin in replacement of silica fume.** Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Alemanha, 2004, p. 587 – 599.

TANAKA, Y.; MUSYA, H.; OOTAKE, A. *et al.* **Design and construction of sakata-mirai footbridge using reactive powder concrete.** fib Congress Concrete Structures in the 21st Century, Osaka, Japão, 2002.

TOUTLEMONDE, F.; RESPLENDINO, J. **Designing and building with UHPFRC: State of the Art and Development.** ISTE Ltd. Grã-Bretanha e Estados Unidos da América, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. Concreto: ciência e tecnologia.** IBRACON. São Paulo, 2011.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete: mechanics and design.** 6<sup>a</sup> ed. Pearson, 2012.

VANDE VOORT, T; SULEIMAN, M.; SRITHARAN, V. **Design and performance verification of UHPC piles for deep foundations (Final report of project entitled use of Ultra-High Performance Concrete in geotechnical and substructure applications.** IHRB Project TR-558. Center for Transportation Research and Education Iowa State University. Estados Unidos da América, 2008.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC – SP), São Carlos, Brasil, 2004.

XU, Y.; LIU, J.; LIU, J.; ZHANG, P.; ZHANG, Q.; JIANG, L. **Experimental studies and modeling of creep of UHPC.** Construction and Building Materials, vol. 175. Elsevier, 2018.

YANG, S. L.; MILARD, S. G.; SOUTSOS, M. N.; BARNETT, S. J.; LE, T. T. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*, vol. 23. Elsevier, 2008.

YANNI, V. Y. G. Multi-scale investigation of tensile creep of ultra-high performance concrete for bridge applications. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Estados Unidos da América, 2009.

YOO, D. Y.; KIM, S.; PARK, G. J.; PARK, J. J.; KIM, S. W. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*, vol 174. Elsevier, 2017.

YOO, D. Y.; KIM, S. W.; PARK, J. J. Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. *Construction and Building Materials*, vol. 132. Elsevier, 2016.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. **Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)**. *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, 2014, p. 29 – 39.

ZHU, L.; WANG, J. J.; LI, X.; ZHAO, G. Y.; HUO, X. J. **Experimental and numerical study on creep and shrinkage effects of ultra high-performance concrete beam**. *Composites Part B*, vol 184. Elsevier, 2020.

## **APÊNDICE A**

---

### **Configuração de sub-rotinas no ABAQUS®**

O objetivo desse apêndice é apresentar como o autor realizou as configurações necessárias para o ABAQUS® aceitar sub-rotinas em FORTRAN nesse trabalho. Essa configuração foi realizada em um computador do Laboratório de Computação Científica e Visualização. A versão do *software* utilizada foi a 2019.

Inicialmente, os pré-requisitos para a customização do *software* foram verificados no endereço <https://www.3ds.com/support/hardware-and-software/simulia-system-information/>. Nesse endereço, encontra-se as versões do Abaqus® disponíveis para consulta, foi selecionado a versão 2019 e em seguida *System Requirements*. Para essa configuração, os pré-requisitos de sistema foram Windows 10 Pro 64 Bits, o compilador FORTRAN Intel 16.0 e o Microsoft Visual Studio C++ 14.0.

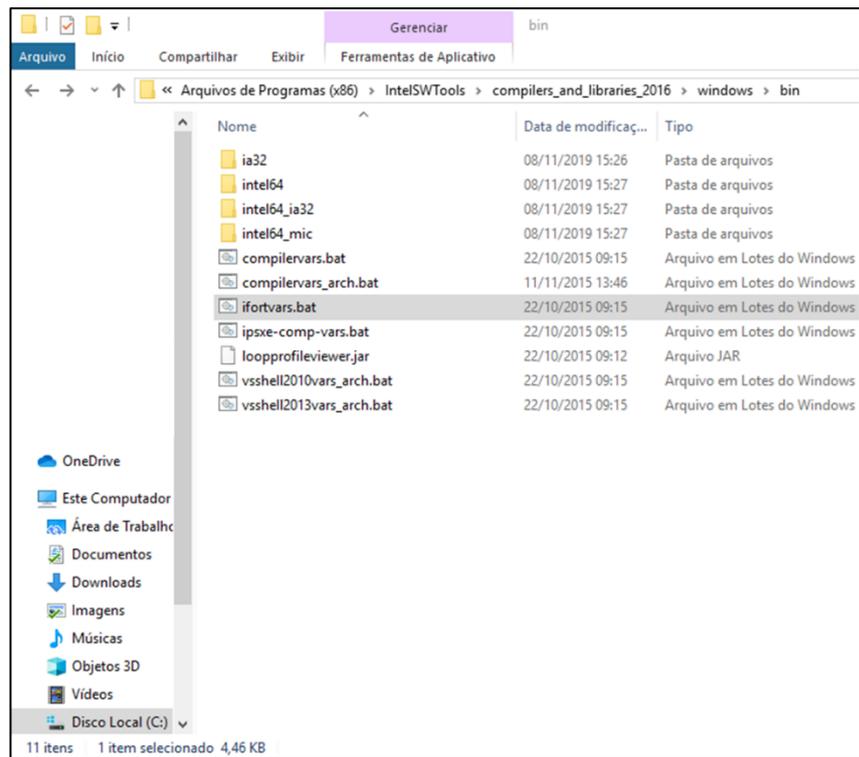
De acordo com o manual do ABAQUS® existe duas maneiras de executar as instalações, de forma automática e manual. A forma automática requer a instalação do Visual Studio, seguida do compilador FORTRAN e, por último, a instalação do ABAQUS®. Como a instalação do Visual Studio e do compilador FORTRAN foram realizadas após a instalação do ABAQUS®, fez-se necessário a configuração manual dos arquivos “.bat”. Caso, ainda assim, não funcione, faz-se necessário configurar variáveis ambiente do Windows.

Procura-se, no diretório de instalação do compilador FORTRAN, o arquivo “ifortvars\_intel64.bat”. Geralmente encontrado no caminho: C:\Arquivos de programas (x86)\Intel\Compiler\windows\bin\intel64. Este arquivo é responsável pela execução do FORTRAN. Esse tutorial irá usar o caminho desse arquivo nos próximos passos. Este arquivo pode mudar de nome dependendo da versão do Visual Studio, como ilustrado na Figura A.1 com o nome de “ifortvars.bat”.

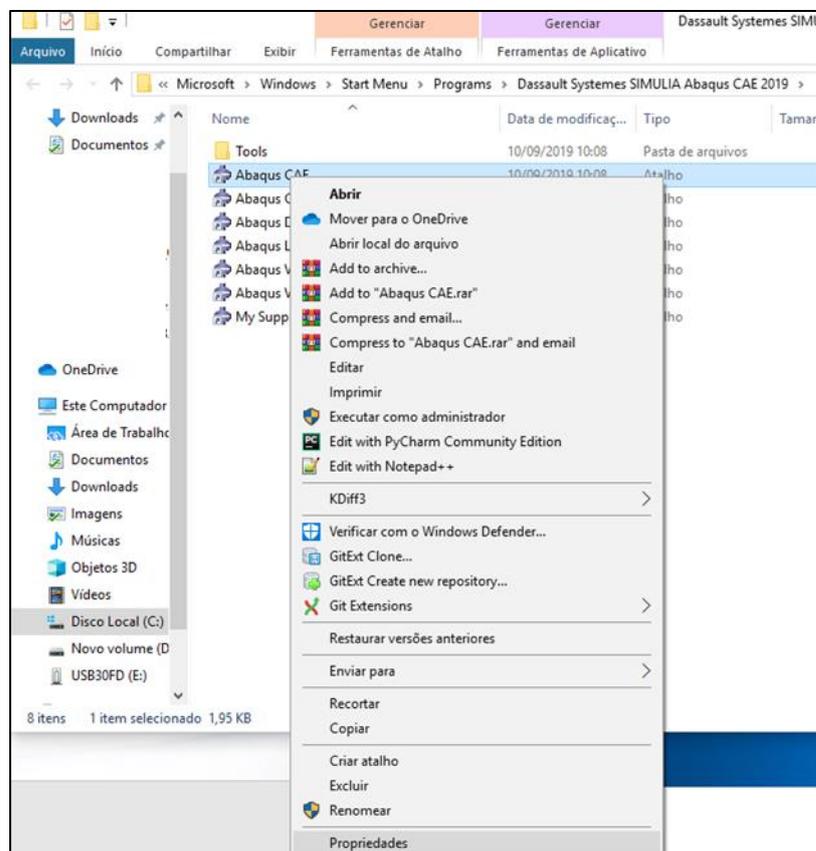
Em seguida, no atalho que abre o Abaqus/CAE, clicar com o botão direito do mouse e selecionar propriedades, conforme a Figura A.2. No componente “Atalho” da janela “Propriedades do Abaqus CAE”, é necessário alterar o “Destino”. Coloca-se entre aspas o caminho do arquivo “ifortvars.bat”, é necessário dar espaço, dois “&” e mais um espaço antes do caminho do atalho original. O destino completo, representado na Figura A.3, é semelhante a "C:\Arquivos de programas (x86)\Intel\Compiler\windows\bin\intel64\ifortvars.bat" && C:\SIMULIA\Abaqus\Commands\abq692.bat cae || pause.

De maneira análoga, configura-se o Abaqus Command. Nesse “Destino”, apenas um espaço e em seguida o caminho para o “ifortvars.bat” entre aspas é necessário, como ilustrado na Figura A.4.

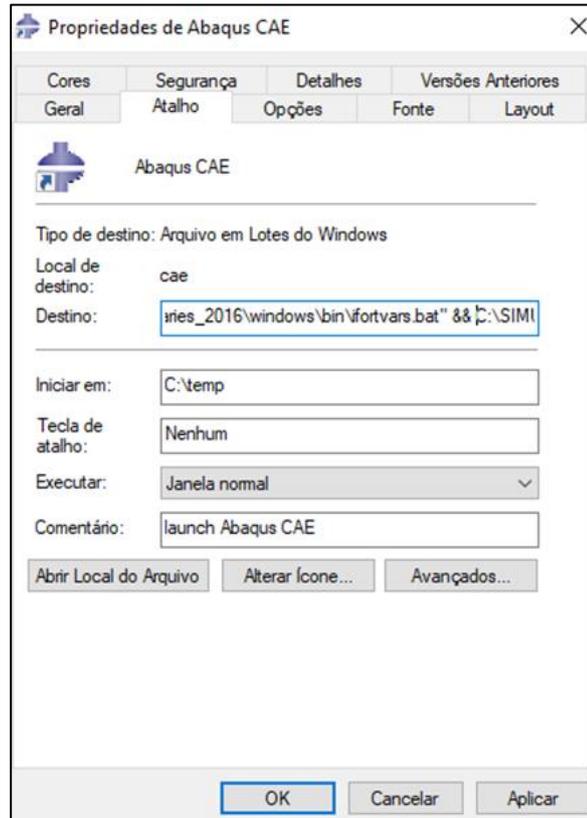
**Figura A.1** – Diretório do arquivo “ifortvars.bat”.



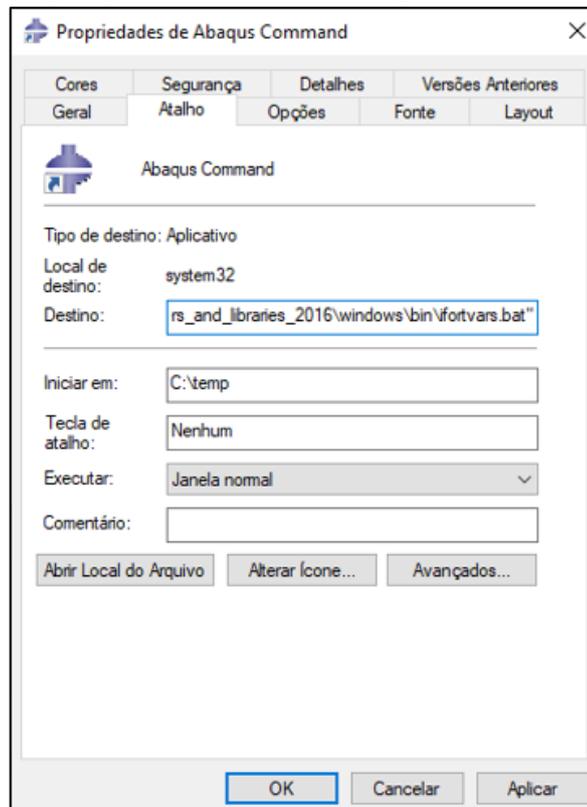
**Figura A.2** – Propriedades do Abaqus CAE.



**Figura A.3** – Configuração do Destino das Propriedades do Abaqus CAE.

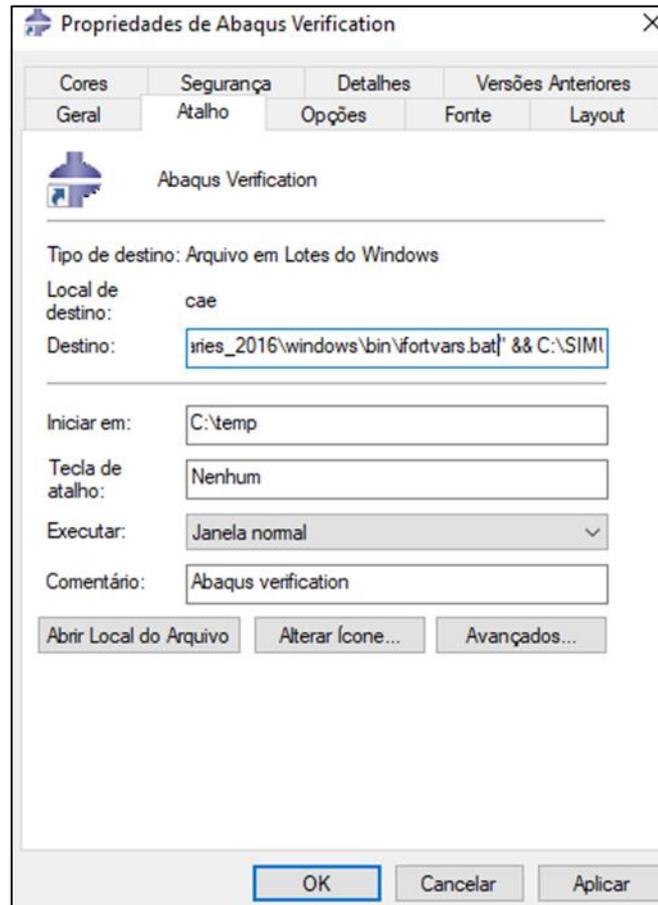


**Figura A.4** – Configuração do Destino das Propriedades do Abaqus Command.



Para o Abaqus Verification o procedimento é similar ao Abaqus/CAE. Antes do caminho original, coloca-se o caminho do “ifortvars.bat” entre aspas, dando espaço, dois & e mais um espaço. A Figura A.5 ilustra essa configuração.

**Figura A.5** – Configuração do Destino das Propriedades do Abaqus Verification.

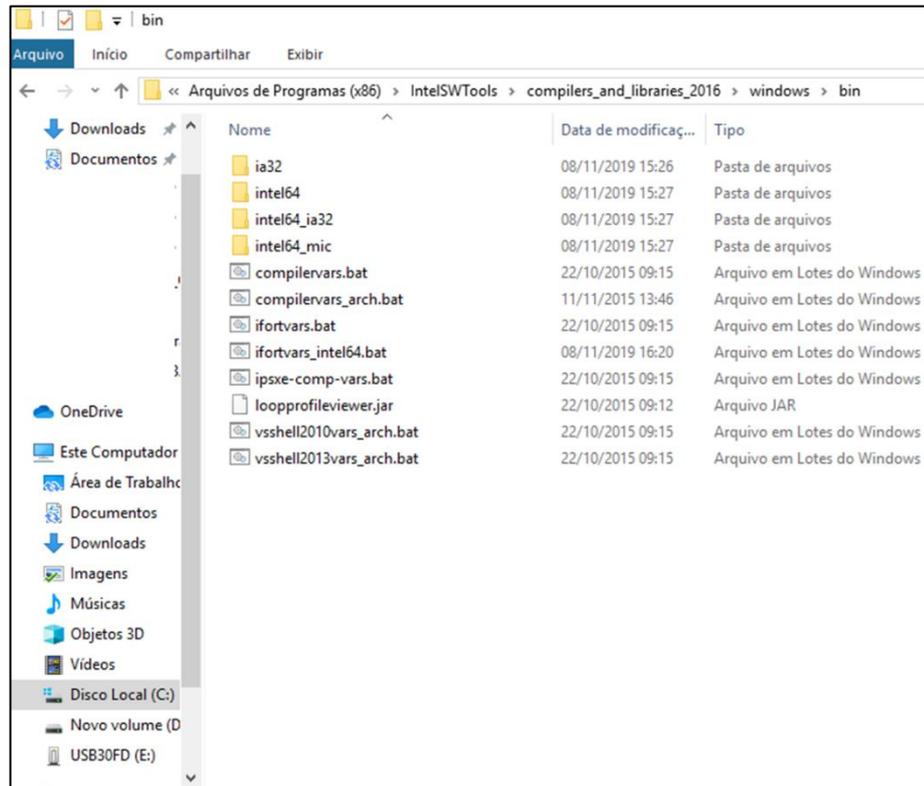


Assim, as configurações dos atalhos foram finalizadas. Abra o Abaqus/CAE, se o *software* inicializar normalmente a configuração está finalizada. Caso contrário é necessário configurar o FORTRAN e o C++ para atuarem junto com o Abaqus®. Foi necessário apontar o caminho do “ifortvars.bat” dentro de um arquivo criado com o nome de “ifortvars\_intel64.bat”, como na Figura A.6 e A.7.

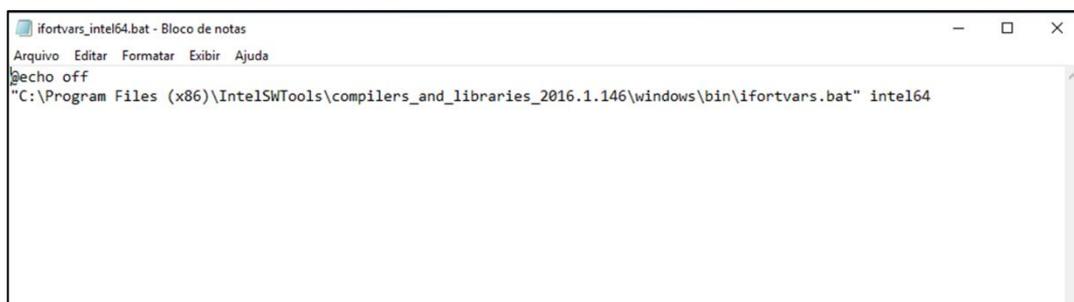
Para realizar uma verificação das configurações, digita-se “abaqus verify -std” no Abaqus Command e a mensagem ilustrada na Figura A.8 deve aparecer. Para realizar uma verificação completa abra o Abaqus Verification, ao fim de todas as verificações, abra o arquivo “verify.log” e a mensagem de “PASS” para *user subrotines* deverá aparecer como na Figura A.9.

Entretanto, se o Abaqus ainda não reconhecer o Visual Studio e o compilador FORTRAN, é necessário configurar as variáveis de ambiente do Windows. Caso isso aconteça, é indicado desinstalar o *software* e começar novamente.

**Figura A.6** – Criando um arquivo de texto com o nome de “ifortvars\_intel64.bat”.



**Figura A.7** – Indicação do caminho para o “ifortvars.bat” no arquivo “ifortvars\_intel69.bat”.



**Figura A.8** – Verificação “Abaqus verify -std” no Abaqus Command.

```

Intel Compiler 16.0 Update 1 Intel(R) 64
Copyright (C) 2007-2015 Intel Corporation. All rights reserved.
Copyright (C) 1985-2015 Intel Corporation. All rights reserved.
Intel(R) Compiler 16.0 Update 1 (package 146)

C:\temp>abaqus verify -std

Abaqus Product Install Verification...
Fri Nov 8 17:04:45 2019
Making C:\temp\verify. All verification files will reside in this directory.
-----
Abaqus/Standard

    ...PASS

    Continuing...
-----
Clean-up...
Verification directory C:\temp\verify has been deleted.

C:\temp>

```

**Figura A.9** – Arquivo verify.log.

```

verify.log - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda

    ...PASS

    Continuing...
-----
Abaqus/Explicit (double precision)

    ...PASS

    Continuing...
-----
Abaqus/Explicit with user subroutines (single precision)

    ...PASS

    Continuing...
-----
Abaqus/Explicit with user subroutines (double precision)

    ...PASS

    Continuing...
-----

```