

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS / FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**ANÁLISE E VALIDAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO DO  
CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELEVADAS**

**THAÍS ROSSI LOPES SOARES**

JUIZ DE FORA

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**ANÁLISE E VALIDAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO DO  
CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELEVADAS**

**THAÍS ROSSI LOPES SOARES**

JUIZ DE FORA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS / FACULDADE DE ENGENHARIA

2018

# ANÁLISE E VALIDAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO DO CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELEVADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional.

Orientadora: Prof. Dra. Michèle Cristina Resende Farage

Coorientadora: Prof. Dra. Flávia de Souza Bastos

JUIZ DE FORA

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS / FACULDADE DE ENGENHARIA

2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Soares, Thaís Rossi Lopes.

Análise e validação de um modelo termo-hídrico do concreto sob temperaturas elevadas / Thaís Rossi Lopes Soares. -- 2018.

93 f. : il.

Orientadora: Michèle Cristina Resende Farage

Coorientadora: Flávia de Souza Bastos

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, ICE/Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, 2018.

1. Concreto. 2. Altas temperaturas. 3. Comportamento. 4. Fenômenos de transporte. I. Farage, Michèle Cristina Resende, orient. II. Bastos, Flávia de Souza, coorient. III. Título.

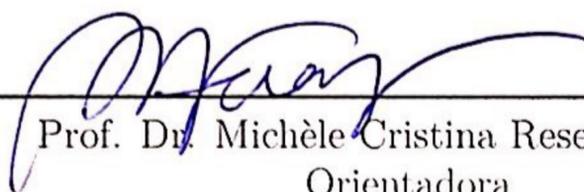
THAÍS ROSSI LOPES SOARES

ANÁLISE E VALIDAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO DO  
CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELEVADAS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PRO-  
GRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MO-  
DELAGEM COMPUTACIONAL DA UNI-  
VERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE  
FORA, COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MES-  
TRE EM MODELAGEM COMPUTACIO-  
NAL.

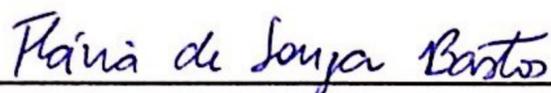
Aprovada em: 26/02/2018

BANCA EXAMINADORA



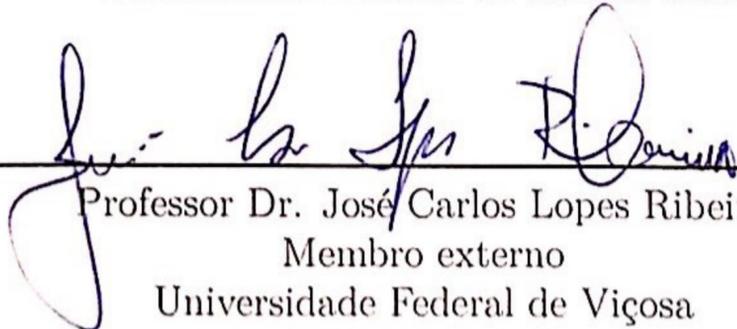
---

Prof. Dr. Michèle Cristina Resende Farage  
Orientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora



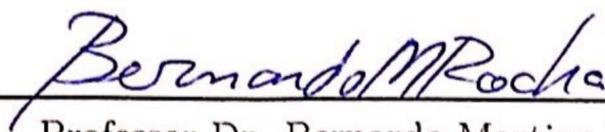
---

Professor Dr. Flávia de Souza Bastos  
Coorientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Professor Dr. José Carlos Lopes Ribeiro  
Membro externo  
Universidade Federal de Viçosa



---

Professor Dr. Bernardo Martins Rocha  
Membro interno  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valderis e Núbia, e ao meu irmão Pedro, por todo o amor, incentivo e força.

À minha família, avô, tios, tias e primos, pelo carinho, incentivo e compreensão.

À Michèle e Flávia por essa orientação valiosa, pela dedicação e confiança. Obrigada por acreditarem e embarcarem comigo nessa jornada.

Aos amigos sempre presentes para escutar e dividir todos os momentos, apoiar e incentivar, sem vocês o caminho seria muito mais difícil.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, por tornarem essa jornada tão mais divertida, pelo encorajamento, apoio, pelos almoços e cafés compartilhados.

Aos professores e funcionários do PPGMC, pela disposição em ajudar e sempre fazer o melhor.

Às agências de fomento que apoiaram este e outros projetos.

À Norbert Renault, Albert Noumowé e todos os outros do L2MGC pelo apoio oferecido.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para essa trajetória, meu muito obrigado.

E finalmente, à Deus, por guiar todos os caminhos e escolhas.

## RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil. As três razões principais que justificam tamanha utilização são: a ótima resistência à água, a plasticidade do material quando fresco que facilita a sua moldagem e o preço e acessibilidade na maioria dos canteiros de obras. O concreto é um material heterogêneo e poroso cujo comportamento é extremamente complexo e cujas características não são totalmente compreendidas. Quando sujeito a condições ambientais extremas, como é o caso da exposição a temperaturas elevadas, esse material está suscetível a alterações físicas e químicas que podem influenciar no seu desempenho estrutural. Portanto, a previsão do comportamento deste material é complicada, pois o concreto, quando submetido a carregamentos térmicos, sofre alterações na sua estrutura porosa e nas propriedades do meio que podem influenciar seu desempenho macroestrutural térmico e mecânico. Dada a relevância do tema em estudo, o objetivo do presente trabalho é aprimorar o modelo em estudo, através da realização de análises paramétricas e da comparação entre os resultados obtidos e informações disponíveis na literatura. Especial atenção será dada aos resultados da saturação, uma vez que trabalhos anteriores denotaram a ocorrência de alguma discrepância relacionada a esta grandeza. O modelo estudado é um modelo termo-hídrico que descreve o comportamento do concreto submetido a carregamentos térmicos. Sua formulação matemática foi desenvolvida a partir do estudo acoplado das transferências de calor e massa no interior do concreto, quando exposto a altas temperaturas. O concreto é descrito como um sistema multifásico cujos vazios do esqueleto sólido são preenchidos com água no estado líquido e vapor de água. Quando exposto a temperaturas mais elevadas que a ambiente, diversos fenômenos, tais como condução de calor, difusão de vapor e fluxo de água no estado líquido, desidratação e evaporação são considerados. Esse modelo é discretizado utilizando o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos, e em seguida implementado no programa livre de cálculo por elementos finitos, o Cast3M – programa desenvolvido pelo DMT-CEA (Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Énergie Atomique). A sua aplicação gera resultados numéricos de temperatura, saturação e pressão de vapor, os quais são utilizados para avaliar o desempenho do modelo.

**Palavras-chave:** concreto; altas temperaturas; comportamento; fenômenos de transporte

## ABSTRACT

Concrete is one of the most used material in construction. The three main reasons for such are: its excellent water resistance; its plastic consistency when fresh, which facilitates molding; its price and accessibility at most construction sites. Concrete is a heterogeneous and porous material whose behavior is extremely complex and whose characteristics are not fully understood. When subjected to extreme environmental conditions, such as exposure to high temperatures, this material is susceptible to physical and chemical changes that may influence its structural performance. Therefore, the prediction of this material behavior is complicated, since the concrete, when submitted to thermal loads, undergoes changes in its porous structure and in the properties of the medium, which may influence its macro-structural thermal and mechanical performance. Given the relevance of the subject under study, the objective of the present research is to improve the studied model by performing parametric analyzes and comparisons with the results obtained with the information available in the literature. Special attention will be given to the saturation results, since previous work has indicated the occurrence of some discrepancy related to its magnitude. The model studied, is a thermohydric model that describes the behavior of the concrete submitted to thermal loads. Its mathematical formulation was developed applying the coupled study of heat and mass transfers in the interior of the concrete when exposed to high temperatures. The concrete is described as a multiphase system whose voids of the solid skeleton are filled with liquid water and water vapor. When exposed to higher temperatures than the environmental ones, several phenomena, such as heat, vapor diffusion and water flow in the liquid state, dehydration and evaporation are considered. The model is discretized using the finite difference method and the finite element method, and then implemented in the free finite element calculation program, Cast3M - a program developed by DMT-CEA (Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Energy Atomique). Its application generates numerical results of temperature, saturation and vapor pressure, which are used to evaluate the performance of the material.

**Key-words:** concrete; high temperatures; performance; transport phenomena;

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vista aérea de Itaipu Binacional (Mehta; Monteiro, 2006). . . . .	17
Figura 2 – Fountain of Time é uma escultura de $36 \times 5 \times 4m$ em concreto situada no campus da Universidade de Chicago (Mehta; Monteiro, 2006). . . . .	18
Figura 3 – Estruturas de concreto sob temperaturas elevadas. . . . .	19
Figura 4 – Saturação em função da temperatura de carregamento. Adaptado de Ferreira <i>et al.</i> (2014). . . . .	21
Figura 5 – Seção polida de um corpo de prova de concreto: é possível observar a macroestrutura do material (Mehta; Monteiro, 2006). . . . .	22
Figura 6 – Modelo de morfologia da fase de transição do concreto Diamond (1986) (Wei, 2013). . . . .	23
Figura 7 – Diagrama dos tipos de água associados ao silicato de cálcio hidratado (Baseado no modelo de Feldman e Sereda (1970)). Adaptado de Mehta e Monteiro (2006). . . . .	24
Figura 8 – Ilustração do mecanismo de <i>spalling</i> - processo termo-hídrico. . . . .	28
Figura 9 – Limites inferior e superior para a condutividade térmica de concretos normais, conforme definição do Eurocódigo (EN:1992-1-2, 2005). . . . .	29
Figura 10 – Calor específico do concreto segundo o Eurocódigo para o concreto seco e em função da temperatura (EN:1992-1-2, 2005). . . . .	30
Figura 11 – Evolução da estrutura dos poros com o aumento da temperatura em pastas de cimento (Alonso; Andrade; Khoury, 2003). . . . .	32
Figura 12 – Evolução da estrutura dos poros da pasta de cimento e da zona de transição de argamassas expostas a altas temperaturas (Alonso; Andrade; Khoury, 2003). . . . .	33
Figura 13 – Evolução da permeabilidade ao gás em função da temperatura, segundo Mindeguia (apud Lion <i>et al.</i> , 2005) à esquerda, e Mindeguia (apud Choinska <i>et al.</i> , 2007) à direita. Adaptado de Mindeguia (2009). . . . .	34
Figura 14 – Isoterma de adsorção e dessorção. Adaptado de Wei (2013). . . . .	36
Figura 15 – Repartição volumétrica das diferentes fases do concreto. Adaptado de Nguyen (2013). . . . .	37
Figura 16 – Balanço de energia no volume de controle . . . . .	43
Figura 17 – Evolução da massa volumétrica da fase líquida e de vapor em função da temperatura. . . . .	45
Figura 18 – Evolução da viscosidade dinâmica da fase líquida e de vapor em função da temperatura. . . . .	46
Figura 19 – Evolução da permeabilidade intrínseca a fase líquida e de vapor em função da temperatura. . . . .	47

Figura 20 – Evolução da permeabilidade relativa a fase líquida e de vapor em função da saturação. . . . .	48
Figura 21 – Evolução da pressão de vapor saturante em função da temperatura. . .	49
Figura 22 – Evolução do fenômeno da desidratação em função da temperatura. . .	50
Figura 23 – Evolução da porosidade em função da temperatura. . . . .	50
Figura 24 – Evolução da condutividade térmica em função da temperatura. . . . .	51
Figura 25 – Evolução do calor latente de vaporização em função da temperatura. .	52
Figura 26 – Calor específico do concreto segundo o Eurocódigo para o concreto seco e em função da temperatura. . . . .	53
Figura 27 – Variação da temperatura no intervalo de tempo $\Delta t$ (Ribeiro, 2004). . .	58
Figura 28 – Esquema do algoritmo implementado para solucionar o problema termo-hídrico. . . . .	61
Figura 29 – Fluxograma da função <b>THYD</b> . . . . .	63
Figura 30 – Diagrama pressão-temperatura para uma substância semelhante a água. Adaptado de (Wylen; Borgnakke; Sonntag, 2009). . . . .	67
Figura 31 – Saturação. . . . .	68
Figura 32 – Perfis de saturação no raio da geometria . . . . .	68
Figura 33 – Perfis de saturação em função da temperatura externa. . . . .	71
Figura 34 – Esquema da laje de concreto . . . . .	72
Figura 35 – M30 - Temperaturas . . . . .	73
Figura 36 – M30 - Pressão . . . . .	74
Figura 37 – Geometria do experimento . . . . .	75
Figura 38 – Perfis de temperatura no raio do corpo de prova . . . . .	76
Figura 39 – Perfis de pressão em função do tempo . . . . .	77
Figura 40 – Esquema do corpo de prova . . . . .	78
Figura 41 – Diagrama da distribuição dos sensores utilizados para medir a pressão de vapor e os termopares no elemento de teste cilíndrico. Adaptado de Mindeguia (2009). . . . .	79
Figura 42 – C40 - Temperaturas . . . . .	80
Figura 43 – C60 - Temperaturas . . . . .	80
Figura 44 – C40 - Pressão de vapor . . . . .	81
Figura 45 – C60 - Pressão de vapor . . . . .	81
Figura 46 – Discretização da seção do corpo de prova, malha de $25 \times 50$ elementos refinados nas bordas expostas ao aquecimento. . . . .	82
Figura 47 – Perda de massa em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros . . . . .	84

Figura 48 – Pressão de vapor em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros . . . . .	85
Figura 49 – Gradiente de temperatura em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros . . . . .	85
Figura 50 – Saturação em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do concreto . . . . .	62
Tabela 2 – Propriedades do concreto à temperatura ambiente . . . . .	62
Tabela 3 – Formulação do concreto - Pliya (2010) . . . . .	66
Tabela 4 – Condições iniciais. . . . .	67
Tabela 5 – Calor específico . . . . .	70
Tabela 6 – M30 - Formulação do concreto. . . . .	73
Tabela 7 – M30 - Condições iniciais. . . . .	73
Tabela 8 – M100 - Formulação do concreto. . . . .	75
Tabela 9 – M100 - Condições iniciais. . . . .	75
Tabela 10 – C40 e C60 - Formulação do concreto . . . . .	78
Tabela 11 – C40 e C60 - Porosidade . . . . .	78
Tabela 12 – C40 e C60 - Condutividade térmica . . . . .	78
Tabela 13 – C40 e C60 - Condições iniciais . . . . .	79
Tabela 14 – Traço do concreto utilizado no experimento. . . . .	83
Tabela 15 – Inclinação da curva de umidade relativa em função da saturação . . . . .	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c_p$	Calor específico
$C_u$	Calor específico da água ligada a matriz sólida
$C_l$	Calor específico da fase líquida
$C_s$	Calor específico da fase sólida
$L_{s \rightarrow l}$	Calor latente de desidratação
$L_{l \rightarrow v}(T)$	Calor latente de vaporização
$c$	Capacidade térmica
$D_h$	Condutividade hídrica
$\lambda$	Condutividade térmica
$R$	Constante universal dos gases perfeitos
$v$	Fase gasosa
$l$	Fase líquida
$g$	Fase sólida
$q_i$	Fluxo de calor em uma dimensão na direção $i$
$Q_i$	Fluxo de calor total na direção $i$
$\vec{J}_v$	Fluxo de massa na fase de vapor
$\vec{J}_l$	Fluxo de massa na fase líquida
$\phi_v$	Fração do volume poroso ocupado pela fase de vapor
$\phi_l$	Fração do volume poroso ocupado pela fase líquida
$m_v$	Massa da fase de vapor
$m_l$	Massa da fase líquida
$m_s$	Massa da fase sólida
$m_g$	Massa de agregados
$m_{bw}$	Massa de água ligada a matriz sólida

$d_0$	Massa de água ligada inicialmente
$d$	Massa de água livre proveniente da desidratação da matriz sólida
$m_c$	Massa de cimento
$\rho_v$	Massa volumétrica da fase de vapor
$\rho_l$	Massa volumétrica da fase líquida
$n$	Número de mols de uma amostra gasosa
$K_v$	Permeabilidade intrínseca da fase de vapor
$K_l$	Permeabilidade intrínseca da fase líquida
$k_{rv}$	Permeabilidade relativa à fase de vapor
$k_{rl}$	Permeabilidade relativa à fase líquida
$\phi$	Porosidade
$P_a$	Pressão de ar
$P_g$	Pressão de gás
$P_v$	Pressão de vapor
$P_{vs}$	Pressão de vapor saturante
$P_l$	Pressão líquida
$S_l$	Saturação
$\mu_{l \rightarrow v}$	Taxa de massa de água líquida vaporizada
$T$	Temperatura
$h_r$	Umidade relativa
$\vec{v}_v$	Velocidade da água na fase de vapor
$\vec{v}_l$	Velocidade da água na fase líquida
$\eta_v$	Viscosidade dinâmica da fase de vapor
$\eta_l$	Viscosidade dinâmica da fase líquida
$V_l$	Volume de líquido

$V_v$  Volume de vapor

$V_{vazios}$  Volume de vazios

$V_t$  Volume total

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>17</b>
1.1	GENERALIDADES . . . . .	17
1.2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS . . . . .	19
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO . . . . .	20
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CONCRETO . . . . .</b>	<b>22</b>
2.1	ESTRUTURA DO CONCRETO . . . . .	22
2.1.1	<b>Pasta de cimento hidratada . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1.2	<b>Agregados . . . . .</b>	<b>25</b>
2.2	COMPORTAMENTO DO CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELE- VADAS . . . . .	25
2.2.1	<b>Fenômenos físicos e químicos no concreto aquecido . . . . .</b>	<b>26</b>
2.2.2	<b><i>Spalling</i> . . . . .</b>	<b>27</b>
2.2.3	<b>Propriedades térmicas do concreto . . . . .</b>	<b>28</b>
2.2.3.1	<i>Condutividade térmica . . . . .</i>	28
2.2.3.2	<i>Calor específico . . . . .</i>	29
2.2.4	<b>Propriedades físicas do concreto . . . . .</b>	<b>30</b>
2.2.4.1	<i>Porosidade . . . . .</i>	30
2.2.4.2	<i>Permeabilidade . . . . .</i>	33
<b>3</b>	<b>MODELO FÍSICO E FORMULAÇÃO TERMO-HÍDRICA . . . . .</b>	<b>35</b>
3.1	HIPÓTESES . . . . .	35
3.2	BALANÇO DE MASSA . . . . .	36
3.2.1	Descrição das fases base para o balanço de massa . . . . .	37
3.2.2	Variação da massa de água líquida . . . . .	38
3.2.3	Variação da massa de vapor . . . . .	39
3.2.4	Conservação da massa de água total . . . . .	39
3.2.4.1	<i>Termo <math>\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v)</math> . . . . .</i>	40
3.2.4.2	<i>Termo <math>\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t}</math> . . . . .</i>	42
3.2.4.3	<i>Forma final da equação de conservação de massa . . . . .</i>	42
3.3	BALANÇO DE ENERGIA . . . . .	42
3.4	SISTEMA DE EQUAÇÕES DO MODELO . . . . .	44
3.5	APRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM . . . . .	44
3.5.1	Massa volumétrica da fase líquida . . . . .	45
3.5.2	Massa volumétrica da fase de vapor . . . . .	45

3.5.3	Viscosidade dinâmica da fase líquida . . . . .	46
3.5.4	Viscosidade dinâmica da fase de vapor . . . . .	46
3.5.5	Permeabilidade intrínseca da fase líquida . . . . .	46
3.5.6	Permeabilidade intrínseca da fase de vapor . . . . .	47
3.5.7	Permeabilidade relativa à fase líquida . . . . .	47
3.5.8	Permeabilidade relativa à fase de vapor . . . . .	47
3.5.9	Pressão de vapor saturante . . . . .	48
3.5.10	Cinética de desidratação . . . . .	48
3.5.11	Porosidade . . . . .	49
3.5.12	Condutividade térmica . . . . .	51
3.5.13	Calor latente de desidratação . . . . .	51
3.5.14	Calor latente de vaporização . . . . .	52
3.5.15	Calor específico da fase sólida . . . . .	52
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ÀS TRANSFERÊNCIAS DE CALOR E MASSA . . . . .</b>	<b>54</b>
4.1	MÉTODO DOS RESÍDUOS PONDERADOS . . . . .	54
4.2	EQUAÇÕES BÁSICAS DO MEF . . . . .	55
4.3	FORMULAÇÃO PARA O MEF . . . . .	56
4.4	DISCRETIZAÇÃO NO TEMPO . . . . .	57
4.5	DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DE MASSA . . . . .	59
<b>5</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL . . . . .</b>	<b>60</b>
5.1	CAST3M . . . . .	60
5.2	APRESENTAÇÃO DO ALGORITMO . . . . .	61
5.3	ORGANIZAÇÃO GERAL DO CÓDIGO . . . . .	62
5.3.1	<b>Dados de entrada . . . . .</b>	<b>62</b>
5.3.1.1	<i>Geometria e malha . . . . .</i>	<i>62</i>
5.3.1.2	<i>Dados do material . . . . .</i>	<i>62</i>
5.3.2	<b>Condições iniciais . . . . .</b>	<b>64</b>
5.3.2.1	<i>Temperatura inicial . . . . .</i>	<i>64</i>
5.3.2.2	<i>Saturação inicial . . . . .</i>	<i>64</i>
5.3.3	<b>Condições de contorno . . . . .</b>	<b>64</b>
5.3.3.1	<i>Térmica . . . . .</i>	<i>65</i>
5.3.3.2	<i>Hídrica . . . . .</i>	<i>65</i>
5.3.4	<b>Saída de dados . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDO DA SATURAÇÃO . . . . .</b>	<b>66</b>
6.1	APLICAÇÃO ESTUDADA . . . . .	66

6.2	PONTO CRÍTICO DA ÁGUA . . . . .	67
6.3	FENÔMENO DE DESIDRATAÇÃO DA FASE SÓLIDA . . . . .	68
6.4	EVOLUÇÃO DA POROSIDADE . . . . .	69
6.5	MUDANÇA DE FASE: LÍQUIDO - VAPOR . . . . .	69
6.6	CALOR ESPECÍFICO DA FASE SÓLIDA . . . . .	70
<b>7</b>	<b>APLICAÇÕES . . . . .</b>	<b>72</b>
7.1	INTRODUÇÃO . . . . .	72
7.2	EXPERIMENTO BASEADO EM Pont, Durand e Schrefler (2007) . . .	72
7.3	EXPERIMENTO BASEADO EM Pont e Ehrlacher (2004) . . . . .	74
7.4	EXPERIMENTO BASEADO EM Mindeguia (2009) . . . . .	76
7.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE . . . . .	82
7.5.1	<b>Geometria . . . . .</b>	<b>82</b>
7.5.2	<b>Condições iniciais e de contorno . . . . .</b>	<b>82</b>
7.5.3	<b>Composição do concreto . . . . .</b>	<b>83</b>
7.5.4	<b>Parâmetros considerados . . . . .</b>	<b>83</b>
7.5.5	<b>Análise dos resultados . . . . .</b>	<b>83</b>
7.6	DISCUSSÃO SOBRE O MODELO E OS RESULTADOS OBTIDOS . .	86
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>90</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GENERALIDADES

O concreto, é atualmente, o material mais utilizado na construção civil no mundo. Segundo Mehta e Monteiro (2006), existem três razões primárias que justificam tamanha disseminação. Primeiramente, o concreto possui ótima resistência à água. Diferentemente da madeira e do aço, a habilidade do concreto de resistir à ação da água sem graves deteriorações torna-o um material ideal para a construção de estruturas de controle, armazenamento e transporte de água, como ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Vista aérea de Itaipu Binacional (Mehta; Monteiro, 2006).

O segundo motivo é a facilidade com a qual elementos estruturais de concreto podem ser construídos em diversos formatos e tamanhos (Figura 2). Isso ocorre pois o material, quando fresco, possui consistência plástica, o que permite que ele flua sobre formas pré-fabricadas. Após um determinado número de horas, quando o concreto houver se solidificado e endurecido, as fôrmas podem ser retiradas e reutilizadas.

Finalmente, sua notoriedade reside também no fato deste ser, geralmente, o material mais barato e prontamente acessível em um canteiro de obras. Os principais componentes necessários para a fabricação do concreto são: areia, brita, água e cimento portland; materiais relativamente baratos e disponíveis na maior parte do mundo.

A popularidade desse material implica na sua vasta utilização em diversos cenários, e, conseqüentemente, em uma gama de estudos sobre seu comportamento. Ainda assim, trata-se de um campo de pesquisa que demanda dedicação. O concreto é um meio heterogêneo, poroso e multifásico, constituído de um esqueleto sólido, água líquida e uma mistura de gases: ar seco e vapor de água, o que dificulta a descrição e previsão do seu comportamento. Essa complexidade é acentuada quando ocorre exposição a ambientes



Figura 2 – Fountain of Time é uma escultura de  $36 \times 5 \times 4m$  em concreto situada no campus da Universidade de Chicago (Mehta; Monteiro, 2006).

agressivos, os quais podem apresentar: alta umidade, presença de substâncias corrosivas, poluição ou temperaturas elevadas; uma vez que essa exposição acarreta fenômenos físicos e químicos que alteram a estrutura porosa e as propriedades do meio.

Nesse contexto, o estudo do comportamento do concreto sob temperaturas elevadas é um tema que concerne à engenharia civil, e que pode ser dividido em duas categorias: situação normal de serviço ou carregamentos acidentais. A primeira delas engloba a gestão de rejeitos radioativos, tema que mobiliza pesquisadores do mundo inteiro desde o início da utilização da energia nuclear como matriz energética, e cujo estudo se intensificou após a tragédia ocorrida em Fukushima, no Japão, em 2010. No Brasil, onde existem três usinas nucleares, esse tema também é importante. Sendo assim, a busca por soluções seguras para a construção de componentes estruturais e repositórios de rejeitos radioativos é uma questão de grande relevância (Figura 3(a)).

Na outra categoria de problemas tem-se os incêndios - ação que segundo Ripani *et al.* (2014) é uma das mais destrutivas à qual o concreto pode ser exposto, uma vez que a elevação de temperatura ocorre drasticamente em um período curto de tempo. O aquecimento do concreto causado por incêndios tem maior risco para locais de difícil acesso como túneis, prédios muito altos e construções subterrâneas e está frequentemente conectado a perdas de vidas, além de prejuízos econômicos. Um exemplo de incêndio em estrutura de concreto de grande porte, foi o ocorrido na Usina Hidrelétrica de Santo Antônio (RO), localizada no Rio Madeira, no dia 16/10/2013. O fogo iniciou-se em um transformador de uma das unidade geradoras.

<sup>1</sup> <http://www.eletronuclear.gov.br>

<sup>2</sup> <http://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2013/10/explosao-e-registrada-em-turbina-da-usina-de-santo-antonio-em-rondonia.html>



(a) Usina angra 1. Página da Eletronuclear<sup>1</sup>.



(b) Incêndio na Usina de Santo Antônio. Página do G1<sup>3</sup>.

Figura 3 – Estruturas de concreto sob temperaturas elevadas.

Sob temperaturas elevadas, a composição química, a estrutura física e o teor de umidade do material se alteram (Gawin; Pesavento; Schrefler, 2003). Dentre os fenômenos que podem ocorrer estão a condução e convecção de calor, o transporte de água líquida e gases, a evaporação da água líquida nos poros, a desidratação da pasta de cimento e a expansão térmica do esqueleto sólido. Todos esses processos resultam na acumulação de pressão de vapor e tensões térmicas dentro dos elementos de concreto. Essas tensões, se elevadas o suficiente, podem levar à fratura e perda de material da superfície dos elementos de concreto, i.e. *spalling*. Por conseguinte, durante e após a exposição à temperaturas elevadas, as características mecânicas do concreto podem ser afetadas. Evidências experimentais demonstram alterações substanciais na coesão, resistência à tração e compressão (Guo; Shi, 2011; Tanyildizi; Coskun, 2008), módulo de Young e coeficiente de Poisson (Phan; Carino, 2002) do concreto, quando o material é exposto a temperaturas elevadas. Além de alteração em diversas outras propriedades, incluindo energia de fratura, condutividade térmica, permeabilidade, porosidade, etc.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Esse projeto está incluído em um quadro de pesquisas sobre o comportamento termo-hidro-mecânico do concreto. As pesquisas envolvidas nessa linha de estudo vem sendo desenvolvidas no *Departamento de Mecânica aplicada e computacional* (MAC) e no *Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional* (PGMC) da UFJF, em colaboração com o *L2MGC* (Laboratório de Mecânica e Materiais da Engenharia Civil da Universidade de Cergy-Pontoise).

O modelo utilizado foi desenvolvido no CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique, França) por Sercombe, Galle e Ranc (2001) e concluído no L2MGC por Morais *et al.*

(2006). Os cálculos térmicos e hídricos, foram discretizados e implementados no código para análise estrutural Cast3M (DMT/CEA – Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Énergie Atomique).

A colaboração entre a Universidade Federal de Juiz de Fora e a Universidade de Cergy-Pontoise na França, foi firmada em acordo de colaboração científica e acadêmica em Junho de 2008. Desde essa data, diversos trabalhos foram desenvolvidos nessa área: Ferreira (2011) fez um estudo do comportamento termo-hídrico de estruturas compostas por bicamadas de rocha-concreto; Amaral (2011) analisou a distribuição de temperaturas em estruturas de concreto submetidas a situações de incêndio; Amaral (2014) realizou um estudo termo-mecânico do concreto sob temperaturas elevadas; Soares (2016) propôs uma nova validação do modelo e uma análise da influência da velocidade de aquecimento na resposta da estrutura; Dias (2017) realizou uma comparação entre os resultados de temperaturas obtidos utilizando modelos distintos.

Além das pesquisas realizadas na UFJF, esse modelo também foi empregado com sucesso em outros trabalhos. Em Morais *et al.* (2006) o modelo numérico foi validado através de resultados experimentais de um concreto proposto por Kanema *et al.* (2005). Já em Morais *et al.* (2007), foram propostos dois modelos mecânicos inspirados no termo-hídrico. Em Nguyen (2013) o estudo foi realizado em espécimes de grandes dimensões, e mais uma vez foram feitos estudos experimentais e numéricos.

Dada a relevância do tema em estudo, o objetivo do presente trabalho é aprimorar o modelo em estudo, através da realização de análises paramétricas e da comparação entre os resultados obtidos e informações disponíveis na literatura. Especial atenção será dada aos resultados da saturação, uma vez que trabalhos anteriores relataram a ocorrência de alguma discrepância relacionada a esta grandeza. Como exemplo, tem-se a Figura 4, extraída de Ferreira *et al.* (2014), onde se observam valores de saturação superiores a 100%, contrariando a definição da grandeza.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho inclui uma revisão bibliográfica dos fenômenos envolvidos, transferência de calor e massa no concreto, além das características, a definição do modelo matemático, a discretização, a implementação computacional do mesmo, o estudo da saturação e algumas aplicações.

A dissertação é estruturada em 7 capítulos, além desta introdução, da seguinte maneira: os fundamentos teóricos apresentados no Capítulo 2 são empregados no Capítulo 3 para desenvolver o modelo matemático. No Capítulo 4 são apresentadas as ferramentas para a discretização do modelo, e no Capítulo 5 as informações necessárias para a implementação

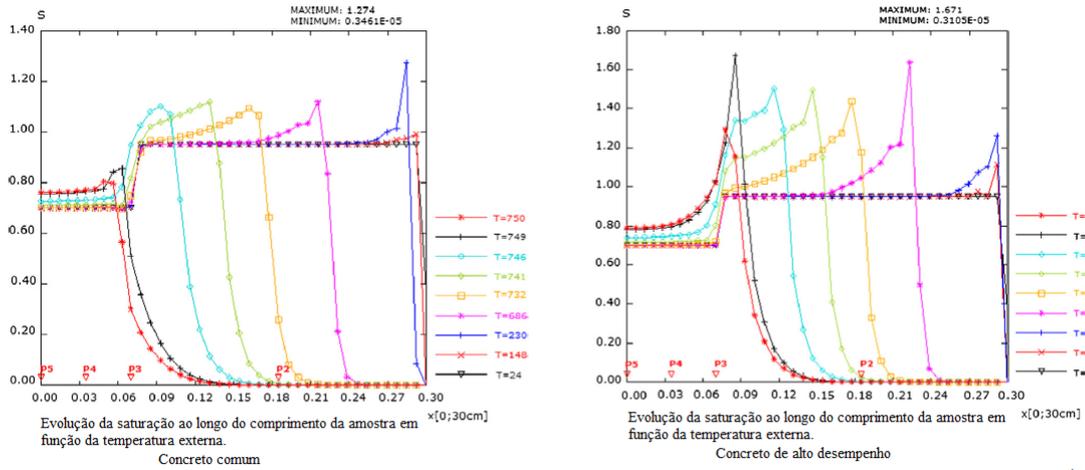


Figura 4 – Saturação em função da temperatura de carregamento. Adaptado de Ferreira *et al.* (2014).

do mesmo. No Capítulo 6 é apresentado um estudo sobre a saturação. No Capítulo 7, é realizada uma análise de sensibilidade e comparações dos resultados do modelo com outro modelo e experimentos realizados em laboratório. Por fim, no Capítulo 8, são apresentadas as conclusões e perspectivas futuras.

## 2 DESCRIÇÃO DO CONCRETO

Neste capítulo serão discutidos a composição do concreto e o comportamento de seus constituintes com relação à temperatura. Também serão apresentadas noções sobre os parâmetros térmicos e hídricos, como condutividade térmica, permeabilidade e porosidade.

### 2.1 ESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto é um material compósito, formado basicamente por uma mistura de cimento Portland com areia, brita e água. O cimento é o material que quando hidratado possui características coesivas. Já a areia e a brita são os agregados, materiais granulares cuja dosagem é variada para obter diferentes tipos de concreto, os quais são classificados de acordo com a sua resistência à compressão, podendo essa classificação variar de baixa a alta resistência, ou desempenho.

Macroscopicamente, o concreto é tratado como um material heterogêneo composto por duas fases, agregados e pasta de cimento, distribuídas irregularmente no espaço (Figura 5). Contudo, segundo Mehta e Monteiro (2006), para uma pasta de cimento bem hidratada, esta distribuição não homogênea pode ser ignorada na construção de um modelo de comportamento do material.

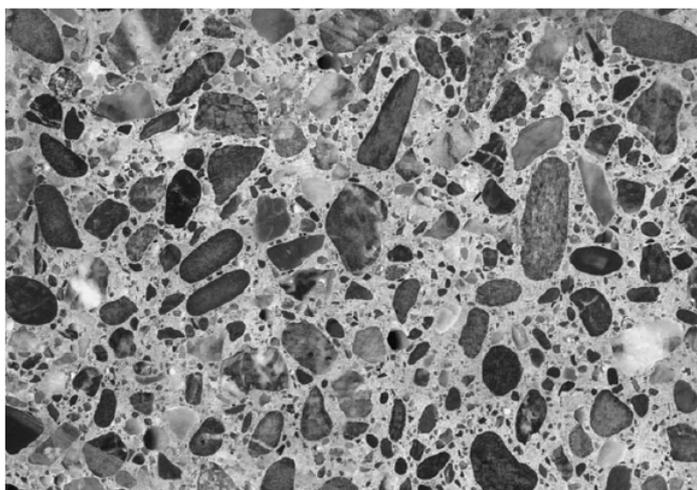


Figura 5 – Seção polida de um corpo de prova de concreto: é possível observar a macroestrutura do material (Mehta; Monteiro, 2006).

Microscopicamente, a complexidade do material é muito grande e não se deve generalizar essa simplificação. Isso porque costuma ser justamente na ligação entre o agregado e a pasta de cimento o ponto fraco do material quando solicitado por um carregamento. É por isso que, ainda segundo Mehta e Monteiro (2006), a interface, ou zona

de transição, entre os agregados graúdos e a pasta de cimento costuma ser considerada como a terceira fase da estrutura de concreto.

Na Figura 6 apresenta-se o modelo de Diamond (1986), no qual observa-se uma zona peculiar de pasta hidratada no entorno do agregado. Sua primeira camada é composta por cristais de portlandita orientados perpendicularmente aos granulados. A segunda camada, de espessura  $0,5\mu m$  é formada por empilhamento de folhas de silicato de cálcio hidratado (*CSH*). Depois da segunda camada, existe uma zona de alta porosidade com grãos de grande dimensão e baixa coesão. Trata-se da região do material que é menos resistente a solicitações mecânicas.

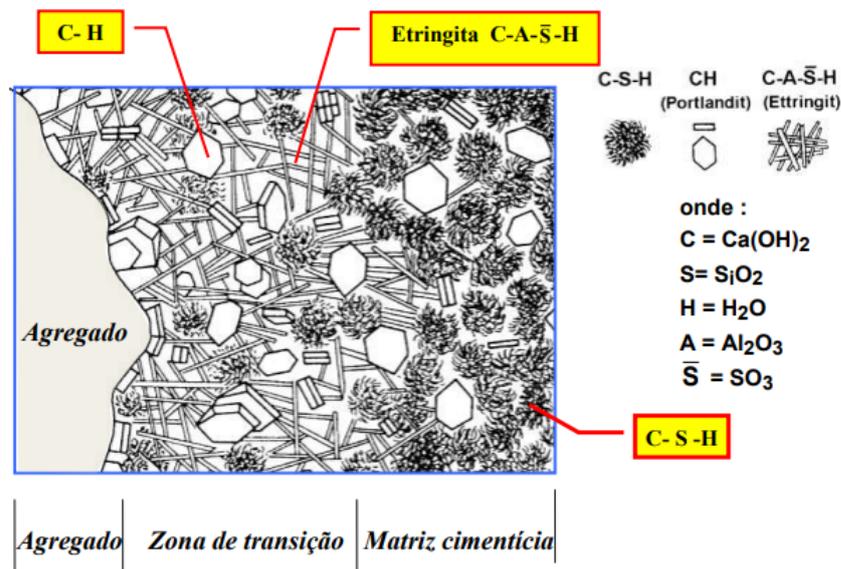


Figura 6 – Modelo de morfolgia da fase de transição do concreto Diamond (1986) (Wei, 2013).

### 2.1.1 Pasta de cimento hidratada

O cimento Portland é um pó cinza, composto principalmente por clínquer, que quando misturado à água forma uma pasta que adquire resistência mecânica através de reações químicas e do processo de hidratação. Essa pasta é formada, principalmente, por dois hidratos: o silicato de cálcio hidratado, *CSH*, ou  $(CaO.2SiO_2.3H_2O)$ , que é responsável pela resistência do concreto, e o hidróxido de cálcio, ou  $Ca(OH)_2$ , também chamado de portlandita. A desidratação pela elevação de temperatura atinge ambos os compostos, produzindo anidros e adicionando vapor de água à fase fluida.

A água pode estar presente no concreto em várias formas, sendo classificada de acordo com o grau de dificuldade para retirá-la da pasta de cimento hidratada. Quando a umidade relativa do ambiente é reduzida, ocorre perda de água nessa pasta, e por isso, os limites que definem as diferentes formas nas quais a água é classificada não são

rígidos. Apesar disso, essa classificação é útil para compreender as propriedades da pasta de cimento hidratada. Além da água no estado de vapor presente nos vazios, a água no concreto pode ser encontrada nas seguintes formas:

- **Água capilar.** É aquela que permanece nos vazios do concreto após o fim da hidratação de todo o cimento. É dividida em água livre quando presente nos vazios maiores ( $> 0,05\mu m$ ) e em água capilar quando mantida pela tensão capilar em vazios menores (vasos capilares entre  $0,005\mu m$  e  $0,05\mu m$ ). A perda de água livre não altera o volume de poros, já a de água sob tensão capilar causa retração do sistema.
- **Água absorvida.** Trata-se do tipo de água fisicamente ligada à superfícies sólidas. Sua perda é a principal causa de retração por secagem.
- **Água interlamelar.** Está associada ao silicato de cálcio hidratado (*CSH*). Só é perdida se o concreto passar por um forte processo de secagem, provocando intensa retração do concreto.
- **Água quimicamente ligada.** Faz parte da composição química dos hidratos da pasta de cimento. Sua perda não ocorre por secagem, apenas por decomposição dos hidratos quando aquecidos.

Baseado no modelo de Feldman e Sereda (1970), diferentes tipos de água associados ao *CSH* são ilustrados na Figura 7.

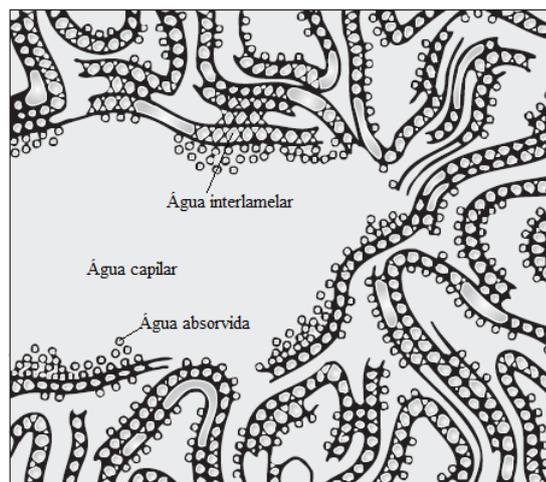


Figura 7 – Diagrama dos tipos de água associados ao silicato de cálcio hidratado (Baseado no modelo de Feldman e Sereda (1970)). Adaptado de Mehta e Monteiro (2006).

### 2.1.2 Agregados

Os agregados constituem o esqueleto sólido do concreto e representam entre 60–80% do volume desse material. Eles podem ser naturais (origem mineral, passam apenas por transformações mecânicas), artificiais (origem mineral, passam por transformações químicas e/ou físicas) ou reciclados. São exemplos de agregados: areia, brita, seixo rolado, escória de alto forno, e resíduos de construção e demolição. Eles influenciam nas características do concreto como a retração e a resistência à abrasão e, por isso, uma das finalidades do seu emprego é a melhoria de tais características. Além disso, são responsáveis predominantemente pelo peso e pelo módulo de elasticidade do concreto.

Os agregados em contato com a pasta de cimento podem ser reativos ou inertes: os reativos (calcários) possuem fortes ligações com a pasta de cimento devido às reações químicas que ocorrem ao longo do tempo; já os inertes (sílicos) não reagem com a pasta de cimento, logo, possuem ligações mais fracas. Entretanto, na maioria dos casos, os agregados utilizados são materiais inertes, fator que confere maior importância às suas características físicas do que às características químicas quando trata-se da sua atuação no concreto em condições normais.

Caso não seja feito um controle de qualidade adequado dos agregados, esses podem interferir negativamente na resistência final do compósito: se muito grandes, criam zonas fracas devido à tendência de a água se acumular na superfície do agregado e, se apresentarem alta porosidade, são menos resistentes.

Uma vez que fazem parte do esqueleto pelo qual os esforços são transmitidos, a integridade física dos agregados é extremamente importante na qualidade do concreto. Com o aumento da temperatura, as propriedades dos agregados podem evoluir, devendo-se então conhecer seus limites para atenuar os riscos de degradação do material (Tshimanga, 2007). Como os agregados constituem uma grande parcela do concreto, as expansões diferenciais do agregado em relação à pasta de cimento que ocorrem podem ser destrutivas para o material. Segundo Ferreira (2011), essas expansões podem causar microfissuras e contribuir para o deslocamento superficial, fenômeno chamado de *spalling*. A maneira como as microfissuras se propagam depende da intensidade das tensões geradas na interface entre o agregado e a pasta de cimento. Agregados com coeficientes de expansão térmica menores se dilatam menos e, conseqüentemente, amenizam a microfissuração.

## 2.2 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELEVADAS

Por ser um material compósito heterogêneo, o concreto, quando submetido a temperaturas elevadas, comporta-se de maneira complexa. Para descrever bem esse comportamento, é preciso que, além das propriedades térmicas, sejam considerados também

a fissuração e o fenômeno do *spalling*, ambos causados pelas tensões que a variação de temperatura gera na fase sólida e pela pressão exercida pela fase fluida nos poros.

Faz-se então necessário observar os fenômenos de transferência térmica, de escoamento das espécies fluidas (ar seco, água líquida, vapor de água), de hidratação e desidratação da matriz cimentícia, além dos efeitos termo-mecânicos, para que se possa compreender todas as modificações na microestrutura do concreto.

### 2.2.1 Fenômenos físicos e químicos no concreto aquecido

A exposição do concreto a elevações de temperatura pode resultar em fenômenos complexos nesse material. Sendo assim, prever o comportamento da estrutura pode se tornar ainda mais complicado. A simples consideração das propriedades térmicas (condutividade térmica, calor específico) não é suficiente para descrever satisfatoriamente o comportamento do concreto. Torna-se, então, necessário considerar o escoamento dos fluidos presentes no material, o transporte de energia e os fenômenos de hidratação e desidratação da matriz cimentícia. O aquecimento também provoca no concreto fortes alterações microestruturais, implicando em alteração nas propriedades térmicas e de transporte.

Durante o aquecimento, o concreto passa por diferentes fases caracterizadas por relações complexas entre seus componentes. Pont (2004) descreve os diversos fenômenos observados na pasta de cimento aquecida até a ocorrência do lascamento superficial (*spalling*):

1. No início do aquecimento, a temperatura aumenta na superfície exposta ao carregamento. A umidade no concreto, composta por água líquida e vapor, se desloca para a zona mais fria do concreto por difusão.
2. Quando a temperatura atinge  $100^{\circ}\text{C}$ , a água entra em ebulição. O vapor migra para zonas mais frias, e pode-se observar condensação. O calor latente necessário para a ebulição provoca a diminuição da velocidade com a qual a temperatura aumenta até que a ebulição da água na região do concreto atingida esteja completa.
3. Simultaneamente, o vapor que se condensa na zona fria pode se combinar com o cimento não-hidratado, gerando nova hidratação. Esse processo cria novas moléculas de silicato de cálcio hidratado (*CSH*), fato que resulta, em geral, na melhora das propriedades mecânicas do concreto.
4. A elevação de temperatura também causa o fenômeno de desidratação. As ligações químicas que formam o *CSH* começam a ser destruídas a partir de  $105^{\circ}\text{C}$ , transformando produtos hidratados em anidros e água, a qual é vaporizada após absorver

calor. O processo de desidratação envolve diversos produtos hidratados que formam o concreto: com o aumento da temperatura, mais água livre é gerada, e consequentemente evaporada. A evaporação, por tratar-se de uma reação endotérmica, afeta o aquecimento do concreto, retardando a propagação de calor.

5. A água livre existente tende a se deslocar em direção às zonas mais frias do concreto. Como esse possui baixa permeabilidade, a mistura de água líquida e vapor não penetra muito rapidamente na região fria do concreto. Além disso, a formação de água devido ao fenômeno de desidratação é mais rápida do que a saída da mistura entre vapor e água líquida. A combinação desses dois efeitos resulta no aumento da pressão nos poros, a qual pode atingir valores da ordem de algumas atmosferas. Também é observado que o pico de pressão move-se cada vez mais em direção à zona fria do concreto, aumentando gradualmente. Segundo Mindeguia *et al.* (2010) e Moraes *et al.* (2010), o aumento da pressão de vapor é um dos responsáveis pelo fenômeno do *spalling*.

### 2.2.2 *Spalling*

*Spalling* é o processo de esfacelamento de fragmentos da superfície do concreto em resposta à exposição a altas temperaturas ou pressões. Ele pode levar a uma grande degradação do material, podendo prejudicar de modo significativo sua capacidade estrutural. Esse fenômeno é atribuído a dois processos, (Mindeguia *et al.*, 2010):

- Processo termo-mecânico: caracterizado pelos altos gradientes de temperatura, principalmente nos primeiros centímetros da superfície exposta. Estes gradientes podem ser muito importantes nos casos de aquecimento rápido, como por exemplo em incêndios, e induzem à altas tensões de compressão próximo à superfície exposta. Estas tensões podem localmente ultrapassar a resistência do concreto e causar a ejeção de fragmentos do material.
- Processo termo-hídrico: é associado ao transporte de massa no meio poroso, o qual pode gerar altas pressões de vapor. Na Figura 8 mostra-se o mecanismo do *spalling* ligado à pressão de vapor: quando o concreto é exposto a uma alta temperatura, a água que se encontra nos poros como água capilar ou absorvida começa a evaporar. Uma parte dessa água vaporizada vai em direção à superfície aquecida e outra parte migra para as zonas mais frias no interior e depois se condensa. Como consequência, uma obstrução é gradualmente formada pelo acúmulo de umidade nessa região. Essa barreira é chamada *moisture clog* e é considerada uma região do concreto com grande teor de água, a qual impede o escoamento dos fluidos da zona mais quente para a

mais fria, fazendo com que a pressão nos poros da zona aquecida aumente. Estas pressões podem ultrapassar localmente a resistência à tração do concreto e iniciar o *spalling*.

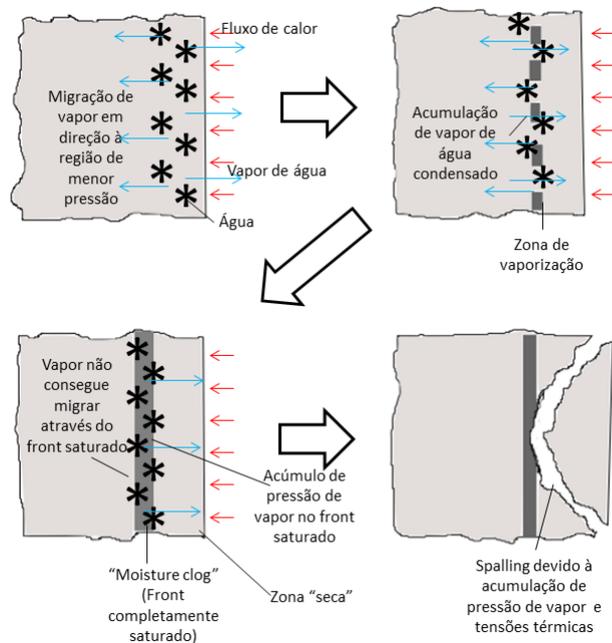


Figura 8 – Ilustração do mecanismo de *spalling* - processo termo-hídrico.

## 2.2.3 Propriedades térmicas do concreto

### 2.2.3.1 Condutividade térmica

Em um meio sólido, quando há um gradiente de temperatura, o calor flui através da condução. Tal evento é representado pela Lei de Fourier em que o fluxo de calor na direção  $x$  ( $q_x$ ) é proporcional ao gradiente de temperatura na direção ( $x$ ) multiplicada pela área através da qual o calor é transferido ( $A$ ). A Eq. (2.1) mostra essa relação, onde  $\lambda$  representa a propriedade do meio chamada condutividade térmica, que descreve a capacidade de um material de conduzir calor.

$$q_x = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

No concreto, essa capacidade depende principalmente da mineralogia dos agregados, do teor de umidade, da densidade e da temperatura do concreto. A condutividade térmica da pasta de cimento saturada é menor que a da maioria dos agregados, logo quanto mais agregado houver no concreto, maior será a sua condutividade (Bazant; Kaplan, 1996).

A quantidade de ar nos poros do concreto também interfere na sua resposta à condução térmica. Por se tratar de um material isolante, a tendência é que quanto maior

a quantidade de ar presente, menor será a capacidade de condução do material. Como a condutividade térmica do ar é muito menor do que a condutividade da água, com o processo de desidratação e da perda de umidade de um meio inicialmente saturado, a tendência é que a condutividade térmica do concreto diminua com o aumento da temperatura.

Existem diversas propostas de curvas que relacionam temperatura e condutividade térmica, entre elas Gawin *et al.* (1998), Ranc, Sercombe e Rodrigues (2003) e Nguyen (2013). O Eurocódigo para cálculo de estruturas em concreto fornece duas curvas técnicas, dadas pelas Eq. (2.2) e Eq. (2.3), que limitam a evolução da condutividade térmica em função da temperatura para concretos com densidade entre 2000 e 2600 kg/m<sup>3</sup> (EN:1992-1-2, 2005).

$$\lambda_{inf} = 1.36 - 0.36 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.0057 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$\lambda_{sup} = 2 - 0.2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (2.3)$$

Nessas equações  $\lambda_{inf}$  e  $\lambda_{sup}$  são os limites inferior e superior da condutividade térmica, em W/(mK), respectivamente. A temperatura é representada por  $T$  em °C. As equações são válidas para temperaturas entre 20°C e 1200°C. Na Figura 9 são representadas as curvas dos limites superior e inferior da condutividade térmica.

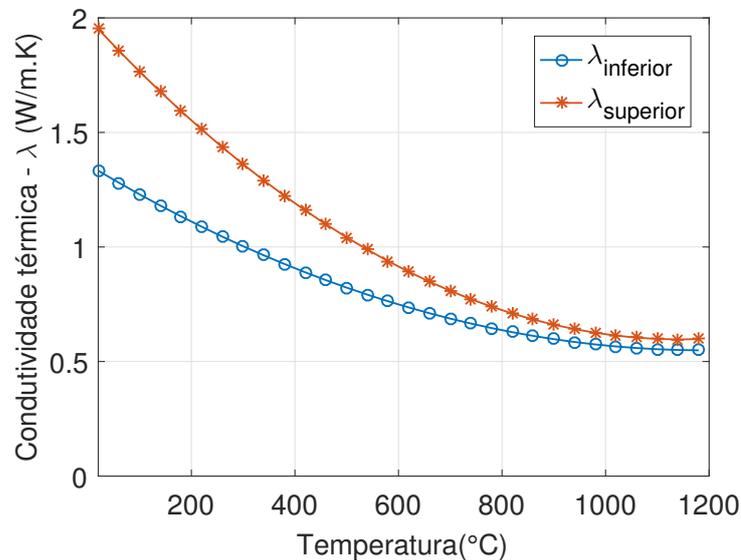


Figura 9 – Limites inferior e superior para a condutividade térmica de concretos normais, conforme definição do Eurocódigo (EN:1992-1-2, 2005).

### 2.2.3.2 Calor específico

O calor específico é uma grandeza característica de cada substância e é determinada pela quantidade de energia necessária para elevar em um grau a temperatura de uma

unidade de massa do material. Trata-se de uma propriedade que é pouco afetada pelo caráter mineralógico do agregado, mas que aumenta consideravelmente com a elevação do teor de umidade do concreto. O calor específico aumenta ainda com a elevação de temperatura e a diminuição da densidade do concreto. Para o concreto comum, essa propriedade varia entre  $840\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$  e  $1170\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$  (Neville, 2011).

Para o concreto seco de agregados sílico-calcários tem-se a seguinte variação em função da temperatura dada pelo Eurocódigo (EN:1992-1-2, 2005), Eq. (2.4):

$$c_p(T) = \begin{cases} 900, & T \in [20,100), \\ 900 + (T - 100), & T \in [100,200), \\ 1000 + \left(\frac{T - 200}{2}\right), & T \in [200,400), \\ 1100, & T \in [400,1200), \end{cases} \quad (2.4)$$

e ilustrada na Figura 10.

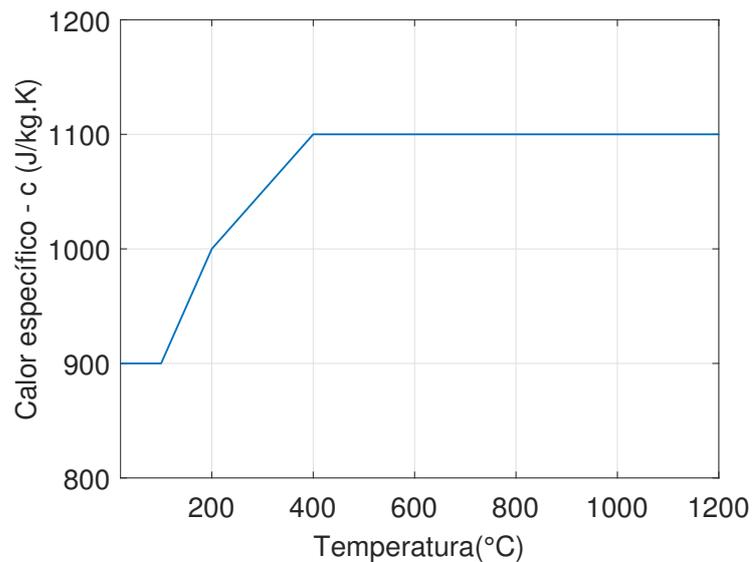


Figura 10 – Calor específico do concreto segundo o Eurocódigo para o concreto seco e em função da temperatura (EN:1992-1-2, 2005).

## 2.2.4 Propriedades físicas do concreto

### 2.2.4.1 Porosidade

O concreto é um material compósito que possui uma rede de poros com formas e tamanhos variados, distribuídos aleatoriamente em seu volume, sendo sua porosidade inicial função da composição do material (traço), do processo de adensamento e cura. A porosidade é definida como uma relação entre o volume de vazios e o volume total de um material.

O volume total da mistura de cimento e água não sofre mudanças significativas durante o processo de hidratação. Portanto, pode-se considerar que o espaço inicialmente ocupado pelo cimento e pela água é progressivamente substituído pelos produtos da hidratação do cimento, os espaços restantes constituem a estrutura de poros. Tal estrutura é relevante para o concreto, uma vez que influencia suas características mecânicas, além de permitir a interação do mesmo com o meio exterior através das conexões formadas entre estes poros. Além disso, esta rede de poros permite o transporte de água na fase líquida e/ou gasosa, tornando a porosidade do concreto um parâmetro importante para a completa caracterização do material (Filho, 1994).

Os poros estão presentes, principalmente, na pasta de cimento, mas também se encontram na zona de transição entre os agregados e as armaduras, quando se trata do concreto armado. A quantidade de água adicionada à mistura durante o processo de confecção do concreto influencia no tamanho e na forma dos poros. Além disso, a quantidade e o tipo de cimento também influenciam na microestrutura dos poros, juntamente com a quantidade, tamanho e distribuição dos agregados. A definição da forma de distribuição de poros na massa de concreto ocorre nas primeiras idades, já o tamanho da rede de poros se reduz com o passar do tempo, em consequência do processo de hidratação, o qual aumenta a compactidade do concreto (Lima, 2005).

É importante ainda, diferenciar porosidade aberta e fechada. A primeira corresponde aos poros que estão conectados entre si e permitem o transporte de líquidos e gases através do mesmo, sendo os poros capilares desta natureza. Já a porosidade fechada corresponde aos poros que não estão necessariamente conectados entre si, como é o caso dos poros gerados por incorporação de ar (Filho, 1994).

A distribuição do tamanho dos poros, e não a porosidade total, é que controla efetivamente a resistência, os mecanismos de transporte de fluidos e as variações de volume em uma pasta de cimento hidratada. Já a relação água/cimento e o grau de hidratação do cimento influenciam na distribuição do tamanho dos poros. Segundo Mehta e Monteiro (2006), os poros maiores que  $50\mu m$ , ditos macroporos, influenciam principalmente a resistência à compressão e a permeabilidade enquanto os poros menores que  $5\mu m$ , ditos microporos, impactam na retração por secagem e fluência.

A interligação dos poros é o principal fator responsável pela permeabilidade da pasta de cimento endurecida. Durante o processo de hidratação, ocorre um aumento no teor de sólidos (*CSH*, portlandita, etringita, etc) na pasta. Em pastas hidratadas e densas, os capilares podem ser bloqueados pelo gel e segmentados de forma a se tornarem poros capilares interligados somente pelos poros de gel (espaço interlamelar no *CSH*). A descontinuidade dos capilares está associada a uma baixa relação água/cimento e a um

período de cura extremamente longo (Filho, 1994).

Com relação à evolução da estrutura dos poros, segundo Ferreira (2011), a porosidade tende a aumentar com a elevação da temperatura. Essa variação ocorre devido à desidratação da pasta de cimento e aumento de poros na mesma, mas também pode ser causada pela evolução da microfissuração. Em casos de aquecimento ambos os fenômenos costumam acontecer juntos.

As alterações no volume da fase sólida influenciam as alterações na porosidade. De maneira geral, a fase sólida presente na pasta de cimento aquecida expande entre  $20^{\circ}\text{C}$  e  $200^{\circ}\text{C}$ , sendo que acima de  $200^{\circ}\text{C}$ , prevalecem retrações em diferentes intensidades. Já os agregados, normalmente, se expandem para todos os níveis de temperatura (Petrucci, 1972). Desta forma, a análise da porosidade deve considerar a porosidade da pasta cimento, da zona de transição e, também, a do agregado, que usualmente não é vista como tão relevante, em relação às demais.

A perda de água livre, capilar e quimicamente combinada na pasta de cimento devido ao aquecimento, provoca o aumento da porosidade capilar e da porosidade total, bem como o colapso da porosidade associada ao gel do *CSH*. Na Figura 11 mostra-se essa evolução. Pode-se verificar que, entre  $100^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$ , a evolução dos poros ocorre, principalmente, devido à perda da água quimicamente ligada ao gel de *CSH*. Em altas temperaturas, o tamanho dos poros na pasta de cimento desidratada cresce por causa do aparecimento de micro-fissuras.

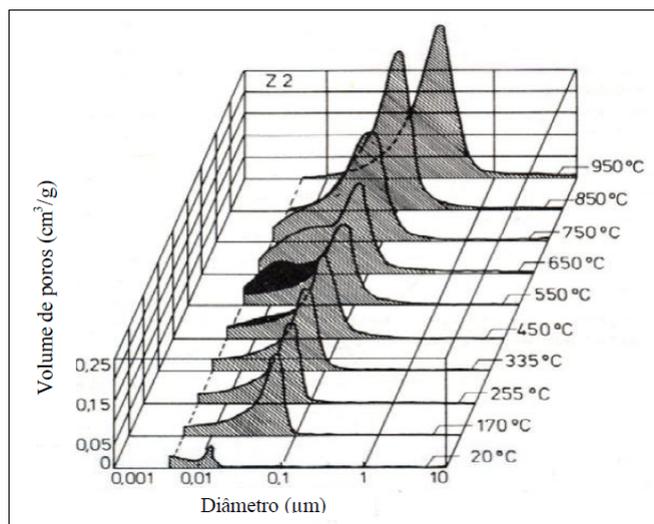


Figura 11 – Evolução da estrutura dos poros com o aumento da temperatura em pastas de cimento (Alonso; Andrade; Khoury, 2003).

O comportamento das argamassas e dos concretos aquecidos é similar, embora em alguns casos a presença das micro-fissuras nos últimos seja mais acentuada, devido a

incompatibilidade de esforços que ocorrem entre os agregados, que se expandem durante o aquecimento, e a pasta de cimento, que se contrai quando aquecida (Petrucci, 1972). Para ilustrar esse ponto, na Figura 12 apresenta-se a distribuição de poros sofridas tanto pela pasta quanto pela zona de transição de argamassas expostas a altas temperaturas. Até  $450^{\circ}\text{C}$ , a distribuição de poros na pasta evolui pouco. A partir dessa temperatura, o sistema de poros se desloca em direção a regiões de diâmetros de poros mais elevados. Em contrapartida, a porosidade da zona de transição sofre grandes alterações, e isso a partir de  $150^{\circ}\text{C}$ . Logo, o deslocamento da estrutura de poros está associada essencialmente a incompatibilidade entre as deformações na pasta de cimento e nos agregados (Alonso; Andrade; Khoury, 2003).

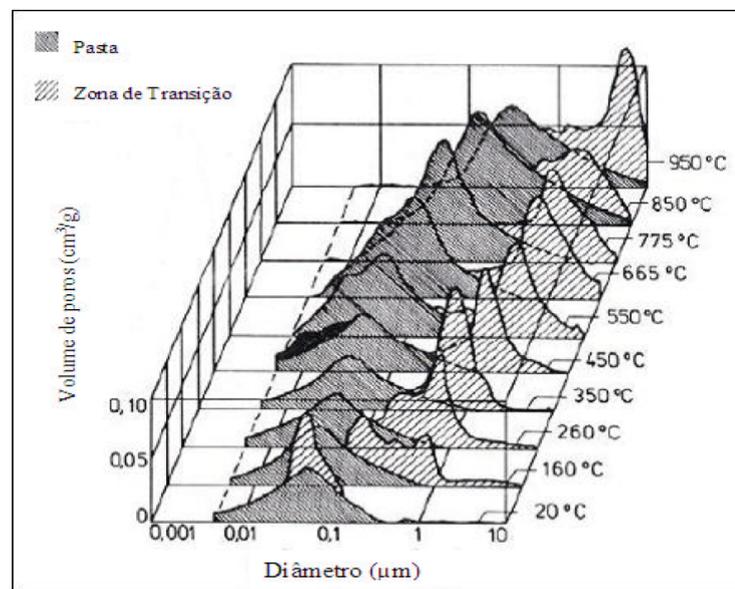


Figura 12 – Evolução da estrutura dos poros da pasta de cimento e da zona de transição de argamassas expostas a altas temperaturas (Alonso; Andrade; Khoury, 2003).

Neste trabalho, a formulação em estudo considera a porosidade dependente apenas da desidratação, como será detalhado adiante.

#### 2.2.4.2 Permeabilidade

A permeabilidade mensura a facilidade com a qual o meio poroso é capaz de transferir fluidos sob um gradiente de pressão, quando ocorre um fluxo de fluido por uma rede porosa que compreende a porosidade inicial do material e as fissuras que aparecem devido às solicitações termo-mecânicas (Rostasy; Weiβ; Wiedemann, 1980). Normalmente, a fissuração e o aumento da porosidade interconectam canais de fluxo, o que resulta no aumento da permeabilidade.

O concreto possui uma baixa permeabilidade em relação a outros materiais de construção, como tijolos e rochas. Para o concreto convencional, a permeabilidade intrínseca

é da ordem de  $1 \times 10^{-15} m^2$ , já para um concreto de alto desempenho, esse valor é em torno de  $1 \times 10^{-17} m^2$ . Sob o efeito do aquecimento e dos fenômenos envolvidos (transformações físico-químicas, dilatação térmica das fases) a permeabilidade do concreto evolui com a elevação da temperatura (Mindeguia, 2009).

Poucos dispositivos experimentais permitem mensurar a permeabilidade de materiais sob altas temperaturas. Na Figura 13, a título de ilustração, é apresentada a evolução da permeabilidade em uma argamassa e um concreto, nos quais a temperatura foi medida através de duas técnicas experimentais desenvolvidas por Lion *et al.* (2005) e Choinska *et al.* (2007).

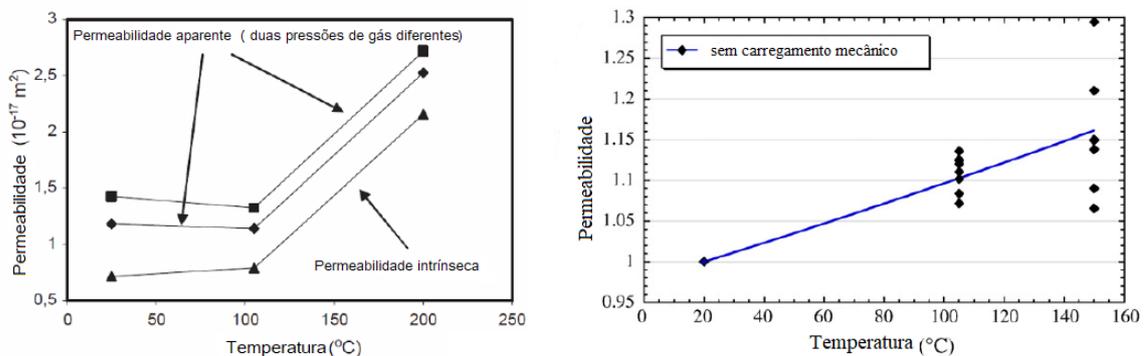


Figura 13 – Evolução da permeabilidade ao gás em função da temperatura, segundo Mindeguia (apud Lion *et al.*, 2005) à esquerda, e Mindeguia (apud Choinska *et al.*, 2007) à direita. Adaptado de Mindeguia (2009).

Na Figura 13 é possível observar que o aumento da permeabilidade do material com a evolução da temperatura é mais perceptível a partir de  $100^{\circ}C$ . Segundo Mindeguia (2009), esse aumento da permeabilidade pode ser atribuído:

- à liberação da água capilar através da secagem, liberando então a passagem do fluido percolante,
- ao aumento do diâmetro dos poros,
- à micro-fissuração da matriz cimentícia causada pela desidratação do *CSH*,
- e à incompatibilidade da deformação entre a pasta de cimento e os agregados.

### 3 MODELO FÍSICO E FORMULAÇÃO TERMO-HÍDRICA

O objetivo desse capítulo é apresentar o modelo desenvolvido no CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique, França) por Sercombe, Galle e Ranc (2001) e concluído no L2MGC por Morais *et al.* (2006), o qual descreve o transporte acoplado de umidade e calor no concreto submetido a elevações e, conseqüentemente, gradientes de temperatura.

Esse modelo se baseia na teoria dos meios porosos e em algumas hipóteses simplificadoras que são aplicadas ao concreto para descrever seu comportamento quando submetido a temperaturas elevadas. As equações governantes do modelo são obtidas a partir das equações de conservação de massa e energia, e as variáveis de estado adotadas são a temperatura e a saturação.

#### 3.1 HIPÓTESES

O concreto pode ser descrito como um sistema multifásico cujos vazios do esqueleto sólido são preenchidos com água no estado líquido e vapor de água. Quando exposto a temperaturas mais elevadas que a ambiente, diversos fenômenos, tais como condução de calor, difusão de vapor e fluxo de água no estado líquido, desidratação e evaporação ocorrem. As principais hipóteses do modelo são:

- *Hipótese 1.* O concreto é considerado um meio poroso, homogêneo não saturado e isotrópico de volume total  $V_t$ . Esse volume total é dividido em três fases:
  - A fase gasosa, formada apenas por vapor de água - representada por  $v$ ;
  - A fase líquida que contém apenas água pura - representada por  $l$ ;
  - A fase sólida - representada por  $s$ ;
- *Hipótese 2.* A evolução do sistema é muito lenta. Logo, as acelerações (termos de segunda ordem das equações diferenciais) serão desconsideradas e o estado do meio poroso será quase estático.
- *Hipótese 3.* Considerando a adsorção física de um gás em um sólido a uma temperatura fixa no equilíbrio termodinâmico, tem-se que a quantidade adsorvida é função da pressão parcial de vapor e da temperatura do gás e do sólido considerado. No caso em que o vapor de água é adsorvido, é preferível exprimir os resultados em função da umidade relativa. Para isso, é possível utilizar uma isoterma de adsorção e dessorção, curva que relaciona saturação e umidade relativa e é exemplificada na Figura 14.

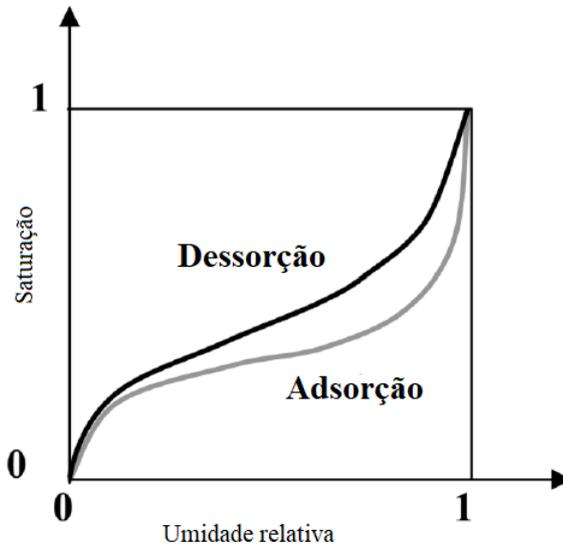


Figura 14 – Isoterma de adsorção e dessorção. Adaptado de Wei (2013).

Nesse modelo, o fenômeno de histerese das curvas de adsorção e dessorção não é considerado. A relação entre a saturação ( $S_l$ ) e a umidade relativa ( $h_r$ ) é dada por:

$$h_r = S_l. \quad (3.1)$$

- *Hipótese 4.* As transformações hídricas que ocorrem no concreto são ilustradas por duas mudanças de estado:
  - A transformação de fase de água ligada em água líquida, a qual é causada pela desidratação da fase sólida, representada por ① na Figura 15.
  - A transformação de fase de água líquida em vapor de água causada pela vaporização da água, representada por ② na Figura 15.
- *Hipótese 5.* As deformações do esqueleto sólido não são consideradas.
- *Hipótese 6.* As transformações ocorridas no esqueleto sólido são infinitesimais.
- *Hipótese 7.* A fase gasosa se comporta como um gás perfeito.
- *Hipótese 8.* As leis de condução de calor e massa fluida são desacopladas.

### 3.2 BALANÇO DE MASSA

Antes de realizar o balanço de massa fluída: água líquida e vapor de água, é preciso descrever essas massas. Para tal, são utilizadas informações da *Hipótese 1*, além das definições de alguns índices relativos a meios porosos e relações entre massa e volume.

### 3.2.1 Descrição das fases base para o balanço de massa

Na Figura 15 ilustra-se a repartição volumétrica como proposta na *Hipótese 1* e as transformações volumétricas da *Hipótese 4* para  $1m^3$  de concreto.

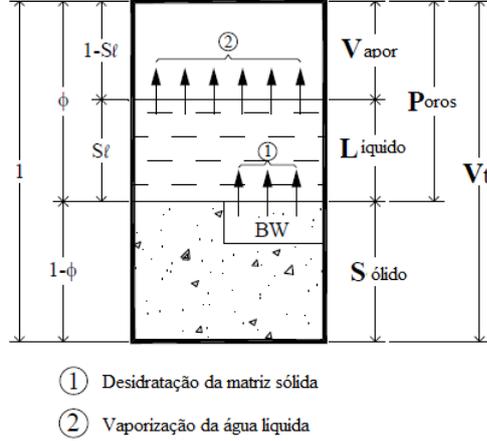


Figura 15 – Repartição volumétrica das diferentes fases do concreto. Adaptado de Nguyen (2013).

O volume de vazios ( $V_{vazios}$ ) é definido como a soma do volume de líquido ( $V_l$ ) com o volume de vapor ( $V_v$ ) :

$$V_{vazios} = V_v + V_l. \quad (3.2)$$

A porosidade ( $\phi$ ), é definida pela Eq. (3.3), a partir da relação entre o volume de vazios ( $V_{vazios}$ ) e o volume total ( $V_t$ ). Ela permite descrever globalmente o meio poroso sem considerar detalhes sobre a distribuição e conectividade dos poros.

$$\phi = \frac{V_{vazios}}{V_t} \quad (3.3)$$

A saturação ( $S_l$ ) é descrita a partir da relação entre o volume ocupado pela fase líquida ( $V_l$ ) e o volume de vazios ( $V_{vazios}$ ), e é dada pela Eq. (3.4).

$$S_l = \frac{V_l}{V_{vazios}} \quad (3.4)$$

Escrevendo o volume de vazios ( $V_{vazios}$ ) em função da porosidade ( $\phi$ ) que é definida de acordo com a Eq. (3.3), e substituindo na Eq. (3.4), obtém-se a fração de volume poroso ocupado pela fase líquida ( $\phi_l$ ):

$$\phi_l = \frac{V_l}{V_t} = \phi S_l. \quad (3.5)$$

Tomando a definição de volume de vazios, Eq. (3.2), é possível reescrever a porosidade ( $\phi$ ) como:

$$\phi = \frac{V_v + V_l}{V_t} = \frac{V_v}{V_t} + \frac{V_l}{V_t}, \quad (3.6)$$

substituindo a Eq. (3.5) na Eq. (3.6) e reorganizando, tem-se a fração de volume poroso ocupado pela fase gasosa ( $\phi_v$ ):

$$\phi_v = \frac{V_v}{V_t} = \phi(1 - S_l). \quad (3.7)$$

Utilizando as Eq. (3.5) e (3.7), deduzem-se as massas de cada fase fluida por unidade de volume do meio poroso (massa volumétrica aparente): a massa de água líquida ( $m_l$ ), a massa de vapor de água ( $m_v$ ).

$$m_l = \rho_l \phi S_l, \quad (3.8)$$

$$m_v = \rho_v \phi (1 - S_l), \quad (3.9)$$

E ainda a massa da fase sólida ( $m_s$ ):

$$m_s = m_c + m_g + m_{bw} \quad (3.10)$$

onde  $\rho_l$  e  $\rho_v$  são as massas volumétricas da fase líquida e de vapor, respectivamente. A massa de cimento é  $m_c$ , a de agregados  $m_g$  e  $m_{bw}$  é a massa de água ligada a matriz sólida. Ela pode ser calculada em função da massa de água ligada inicialmente ( $d_0$ ) e da massa de água livre proveniente da desidratação da fase sólida ( $d$ ),

$$m_{bw} = d_0 - d. \quad (3.11)$$

É importante ressaltar que a porosidade ( $\phi$ ) depende da desidratação, logo ela é função da perda de água ligada da matriz sólida para a fase fluida,  $\phi = \phi(d)$ . Já a massa de água proveniente da desidratação é função da temperatura.

### 3.2.2 Variação da massa de água líquida

A variação da quantidade de água líquida no volume de controle é descrita pela derivada temporal da integral da massa de água líquida no volume em questão. Essa derivada não é nula: é preciso considerar os fenômenos de evaporação, condensação e desidratação da matriz. Assim, para que a variação da massa do sistema seja respeitada, é necessário que a variação da massa líquida no volume seja igual aos fluxos de entrada e saída através da superfície acrescida das variações de massa geradas internamente ao volume devido as mudanças de fase. Dessa forma, a variação da quantidade de água líquida em função do tempo no volume  $V_t$  é descrita por  $\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t$ . Aplicando o Teorema de Transporte Reynolds é possível escrever:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t = \int_{V_t} \frac{\partial m_l}{\partial t} dV_t + \int_{\partial V_t} m_l \vec{v}_l \cdot d(\partial \vec{V}_t). \quad (3.12)$$

onde  $\vec{v}_l$  é a velocidade do fluido na fase líquida.

Aplicando o teorema de Green, o qual é definido como,

$$\int_{Superfície} \vec{a} \cdot \vec{n} dS = \int_{Volume} \nabla \cdot \vec{a} dV, \quad (3.13)$$

onde  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$ , definido em coordenadas cartesianas, é o operador diferencial que realiza operações diferenciais vetoriais. O operador  $\nabla$  não tem significado físico ou geométrico, o seu significado só ocorre quando ele é aplicado a uma função.

Fazendo

$$\begin{cases} \vec{a} = m_l \vec{v}_l \\ \vec{n} dS = d\vec{V}_t \end{cases} \quad (3.14)$$

tem-se:

$$\int_{\partial V_t} m_l \vec{v}_l \cdot d(\vec{V}_t) = \int_{V_t} \nabla \cdot m_l \vec{v}_l dV_t. \quad (3.15)$$

Substituindo na Eq. (3.12), obtém-se:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t = \int_{V_t} \left( \frac{\partial m_l}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_l \right) dV_t \quad \text{onde } \vec{J}_l = m_l \vec{v}_l. \quad (3.16)$$

A variação da massa de água líquida está relacionada ao acréscimo de massa ligado à desidratação da fase sólida  $\frac{\partial d}{\partial t}$  e à perda de massa relativa à taxa de vaporização da água líquida representada por  $\mu_{l \rightarrow v}$ . A equação da variação da massa de água líquida é dada abaixo:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t = \int_{V_t} \left( \frac{\partial d}{\partial t} - \mu_{l \rightarrow v} \right) dV_t. \quad (3.17)$$

Comparando as Eq. (3.16) e (3.17), concluí-se que:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_l = \frac{\partial d}{\partial t} - \mu_{l \rightarrow v} \quad (3.18)$$

### 3.2.3 Variação da massa de vapor

Através de um desenvolvimento análogo, obtém-se a equação da conservação da massa de vapor:

$$\frac{\partial m_v}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_v = \mu_{l \rightarrow v}, \quad (3.19)$$

onde  $\mu_{l \rightarrow v}$  define a taxa de massa inserida na fase gasosa pela vaporização da água líquida.

### 3.2.4 Conservação da massa de água total

Somando as Eq. (3.18) e (3.19), obtém-se a equação de conservação da massa de água total que é dada por:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) + \frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (3.20)$$

A partir de agora, cada termo da Eq. (3.20) será desenvolvido individualmente.

### 3.2.4.1 Termo $\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v)$

O movimento do gás e do líquido em um meio poroso, desprezando-se os efeitos gravitacionais e qualquer anisotropia do material, pode ser descrito pela Lei de Darcy:

$$\vec{J}_i = -\rho_i \frac{K_i k_{ri}(S_i)}{\eta_i} \nabla(P_i), \quad (3.21)$$

onde  $i = l, v$  representa a fase de líquido ou vapor,  $J_i$  representa o fluxo,  $K_i$  é a permeabilidade intrínseca da fase,  $k_{ri}$  é a permeabilidade relativa à fase considerada,  $\eta_i$  é a viscosidade dinâmica e  $P_i$  é a pressão.

Substituindo a Eq. (3.21) para o fluxo de líquido e de vapor no termo  $\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v)$  da Eq. (3.20), tem-se:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left( \rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} \nabla(P_l) + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_v)}{\eta_v} \nabla(P_v) \right). \quad (3.22)$$

A modelagem é baseada na existência de um equilíbrio entre água líquida e o vapor de água. Como trata-se de um meio parcialmente saturado onde os dois componentes coexistem, é adequado utilizar essa hipótese. Nos chamados poros capilares, o equilíbrio termodinâmico entre a água líquida e o vapor de água pode ser alterado pela presença de forças de superfície na interface entre as fases fluidas e a superfície dos poros. A diferença de pressão entre a água líquida  $P_l$ , e a pressão de vapor  $P_v$ , induzida pelas forças de superfície é chamada pressão capilar é definida como:

$$P_c = P_v - P_l. \quad (3.23)$$

Assumindo que o vapor pode ser tratado como um gás perfeito, uma relação geral entre a pressão da água líquida e a pressão de vapor pode ser obtida a partir da integração do potencial da água quimicamente ligada em comparação com um estado de referência. Escolhendo um estado de referência onde a água líquida e o vapor de água estão em equilíbrio com a pressão de vapor saturada, o equilíbrio líquido/vapor pode ser descrito pela equação Kelvin, descrita na Eq.(3.24) (Ranc; Sercombe; Rodrigues, 2003).

$$P_l = P_{vs}(T) + \frac{\rho_l RT}{M_v} \ln \frac{P_v}{P_{vs}(T)} \quad (3.24)$$

Onde  $P_{vs}$  é a pressão de vapor saturante,  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $M_v$  é a massa molar de vapor,  $\rho_l$  é a massa volumétrica da fase líquida e  $T$  é a temperatura.

Derivando a Eq. (3.24) em relação a  $P_v$ , pode-se deduzir que:

$$\frac{\partial P_l}{\partial P_v} = \rho_l \frac{RT}{M_v P_v}. \quad (3.25)$$

Aplicando a hipótese de que a fase de vapor é considerada como um gás perfeito, pode-se utilizar a Equação de Clapeyron:

$$PV = nRT, \quad (3.26)$$

onde  $P$  é a pressão,  $V$  é o volume e  $n$  é o número de mols da amostra gasosa. Reorganizando a equação, tem-se:

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{P}. \quad (3.27)$$

Substituindo  $V = m/\rho$ , tem-se:

$$\frac{m}{\rho n} = \frac{RT}{P} \quad (3.28)$$

onde  $M = m/n$ , e  $M$  é a massa molar. Reescrevendo essa relação para a fase de vapor:

$$\frac{1}{\rho_v} = \frac{RT}{P_v M_v}, \quad (3.29)$$

e substituindo a Eq. (3.29) na Eq. (3.25), tem-se:

$$\frac{\partial P_l}{\partial P_v} = \frac{\rho_l}{\rho_v}. \quad (3.30)$$

De maneira análoga:

$$\nabla(P_l) = \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} \nabla(P_v). \quad (3.31)$$

Finalmente, ao aplicar a Eq. (3.31) na Eq. (3.22), obtém-se que:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left( \rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_v)}{\eta_v} \right) \nabla(P_v). \quad (3.32)$$

A umidade relativa é definida como:

$$h_r = \frac{P_v}{P_{vs}}, \quad (3.33)$$

considerando a *Hipótese 3*, segundo a qual:

$$h_r = S_l, \quad (3.34)$$

é possível escrever:

$$h_r = S_l = \frac{P_v}{P_{vs}}, \quad (3.35)$$

e então:

$$\frac{\partial P_v}{\partial S_l} = P_{vs}. \quad (3.36)$$

Por fim, reescreve-se a Eq. (3.32) como:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left( \rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_l)}{\eta_v} \right) P_{vs} \nabla(S_l). \quad (3.37)$$

### 3.2.4.2 Termo $\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t}$

O primeiro passo para o desenvolvimento desse termo é substituir  $m_l$  e  $m_v$  na Eq. (3.20) pelas relações dadas pelas Eq. (3.8) e (3.9), obtendo-se:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \underbrace{\rho_l S_l \frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{Termo 1}} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}} + \underbrace{\phi \rho_l \frac{\partial S_l}{\partial t}}_{\text{Termo 3}} + \underbrace{\rho_v (1 - S_l) \frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{Termo 4}} + \underbrace{\phi (1 - S_l) \frac{\partial \rho_v}{\partial t}}_{\text{Termo 5}} - \underbrace{\phi \rho_v \frac{\partial S_l}{\partial t}}_{\text{Termo 6}} \quad (3.38)$$

Os termos (1) e (4) serão descartados seguindo a suposição de que  $\frac{\partial \phi}{\partial t}$  é muito pequeno em relação aos outros termos. O termo (5) será desconsiderado, pois é adotado que  $\rho_v$  é constante, logo  $\frac{\partial \rho_v}{\partial t}$  é nulo. O agrupamento dos termos (3) e (6) fazem aparecer à capacidade hídrica  $\phi(\rho_l - \rho_v)$ . Já o termo (2) será tratado durante a discretização da equação. Logo, tem-se:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}}. \quad (3.39)$$

### 3.2.4.3 Forma final da equação de conservação de massa

Substituindo as Equações (3.37) e (3.39), na Equação (3.20), obtém-se a seguinte forma da equação da conservação da massa:

$$\phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}} = \nabla \cdot [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l] + \frac{\partial d}{\partial t}, \quad (3.40)$$

onde  $D_h$  é a condutividade hídrica e é expressa por:

$$D_h(S_l, d, T) = \left[ \rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} \frac{\rho_l}{\rho_v} + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_v)}{\eta_v} \right] \cdot P_{vs}. \quad (3.41)$$

## 3.3 BALANÇO DE ENERGIA

Dado o volume de controle da Figura 16, a quantidade de calor total,  $Q$ , pode ser escrita para cada direção, por expansão de Taylor com os termos de ordem superior desprezados, como:

$$\begin{aligned} Q_{x+dx} &= Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx, \\ Q_{y+dy} &= Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy, \\ Q_{z+dz} &= Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz. \end{aligned} \quad (3.42)$$

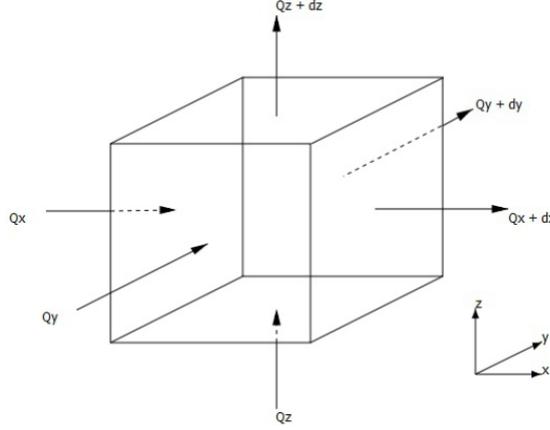


Figura 16 – Balanço de energia no volume de controle

O balanço de energia é definido como *energia que entra + energia gerada = variação de energia estocada + energia que sai*. Se o calor gerado dentro do volume de controle é dado por  $Gdxdydz$ , e a taxa de mudança da energia estocada é  $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz$ , tem-se a seguinte equação:

$$Q_x + Q_y + Q_z + Gdxdydz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz + Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz}. \quad (3.43)$$

Substituindo a Eq. (3.42) na Eq. (3.43), tem-se:

$$-\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz + Gdxdydz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (3.44)$$

O fluxo de calor em uma dimensão na direção  $x$  é dado por  $q_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}$ , escrevendo as equações para as outras direções de forma análoga, é possível escrever o fluxo total de calor total,  $Q$ , em cada direção como:

$$\begin{aligned} Q_x &= q_x dydz = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} dydz, \\ Q_y &= q_y dxdz = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} dxdz, \\ Q_z &= q_z dxdy = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} dxdy. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Ao substituir a Eq. (3.45) na Eq. (3.44), e dividir tudo por  $dxdydz$ , obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.46)$$

A Eq. (3.46), é a equação do balanço de energia que trata da condução de calor transiente em um sistema de coordenadas cartesianas.

A condutividade térmica,  $\lambda$ , pode ser expressa como um tensor. Considerando a *Hipótese 1*, o meio poroso é homogêneo, logo o tensor de condutividade é isotrópico para cada fase e pode-se escrever que  $\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ .

Neste modelo, as fontes geradoras de calor consideradas são as mudanças de estado endotérmicas da água, da água líquida para vapor e de água quimicamente ligada para líquida (desidratação da matriz sólida). Assim,  $G$  será escrito como:

$$G = -L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t}, \quad (3.47)$$

onde  $L_{l \rightarrow v}(T)$  e  $L_{s \rightarrow l}$  são os calores latentes de vaporização e desidratação ( $J/kg$ ),  $\mu_{l \rightarrow v}$  é a quantidade de água vaporizada por unidade de tempo ( $kg/m^3/s$ ) e  $\frac{\partial d}{\partial t}$  é a cinética de desidratação ( $kg/m^3/s$ ).

Por último, o termo  $\rho c_p$  da Eq. (3.46) é denominado capacidade térmica. Ele pode ser escrito como  $c = \rho c_p$ , que será função da saturação e da desidratação. Substituindo, tem-se a equação do balanço de energia do modelo:

$$c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t}. \quad (3.48)$$

O calor específico volumétrico é dado por:

$$c(S_l, d) = \rho_s C_s + \phi \rho_l(T) S_l C_l + (d_0 - d) C_u, \quad (3.49)$$

onde  $C_s$ ,  $C_l$  e  $C_u$  são os calores específicos da fase sólida, líquida e da água ligada, respectivamente, em ( $J/kg^\circ C$ ).

O calor transportado por convecção pelos fluidos é desprezado nessa formulação, fato que acontece quando o material é pouco permeável como o concreto. Além disso, a dissipação de calor associada à compressibilidade do vapor de água é desprezada, visto que esse é tratado como um gás perfeito.

### 3.4 SISTEMA DE EQUAÇÕES DO MODELO

As equações diferenciais Eq. (3.40) e Eq. (3.48) formam um sistema de duas equações e duas incógnitas, temperatura ( $T$ ) e saturação ( $S_l$ ), o qual descreve o fenômeno acoplado de transferência de calor e umidade.

$$\begin{cases} \phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}} = \nabla \cdot [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l] + \frac{\partial d}{\partial t} \\ c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \end{cases} \quad (3.50)$$

### 3.5 APRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM

Nessa seção serão apresentados todos os parâmetros envolvidos na aplicação do sistema de Eq. (3.50). Tratam-se de parâmetros em função da temperatura que são

associados aos fluidos, e de propriedades do material que dependem da saturação e da desidratação, a qual é função da temperatura.

### 3.5.1 Massa volumétrica da fase líquida

A massa volumétrica da fase líquida,  $\rho_l$  ( $kg/m^3$ ), pode ser aproximada pela Eq. (3.51), proposta por Raznjevic e Poadhorsky (1970), em termos da temperatura dada em  $^{\circ}C$ .

$$\rho_l = 314,4 + 685,6 \left[ 1 - \left( \frac{T}{374,14} \right)^{\frac{1}{0,55}} \right]^{0,55} \quad (3.51)$$

### 3.5.2 Massa volumétrica da fase de vapor

A massa volumétrica da fase de vapor,  $\rho_v$  ( $kg/m^3$ ), é definida pela Eq. (3.52), em termos da temperatura,  $T$ , dada em  $^{\circ}C$  e da pressão de vapor saturante dada em  $Pa$ .

$$\rho_v = \frac{P_{vs} M_v}{R(T + 273,15)} \quad (3.52)$$

$R = 8,314(J/mol/K)$  é a constante universal do gases perfeitos e  $M_v = 0,018(kg/mol)$  é a massa molar de vapor.

Na Figura 17 apresenta-se a evolução das massas volumétricas da fase líquida e de vapor.

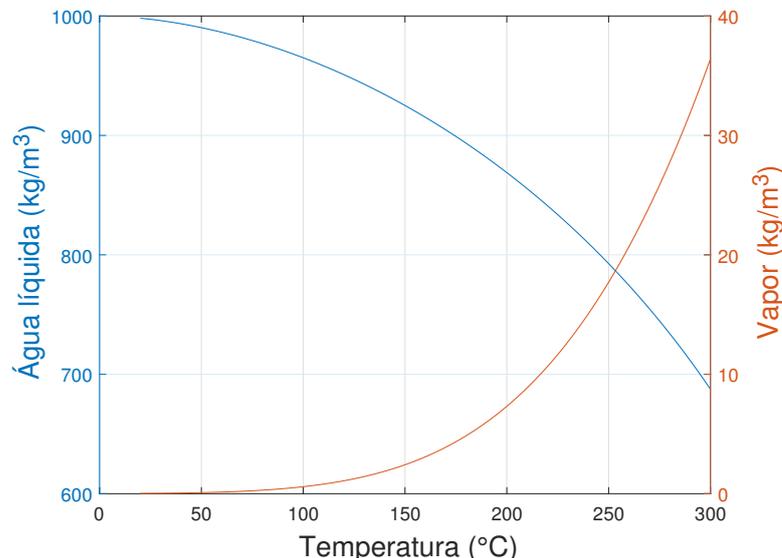


Figura 17 – Evolução da massa volumétrica da fase líquida e de vapor em função da temperatura.

### 3.5.3 Viscosidade dinâmica da fase líquida

A viscosidade dinâmica da fase líquida,  $\eta_l$  ( $Pa.s$ ), é definida pela Eq. (3.53), a qual é função da temperatura,  $T$ , dada em  $^{\circ}C$ , e foi proposta por PEZZANI (1992).

$$\eta_l = 2,414 \times 10^{-5} \times e^{\frac{570,58058}{T+133,15}} \quad (3.53)$$

### 3.5.4 Viscosidade dinâmica da fase de vapor

A viscosidade dinâmica da fase de vapor,  $\eta_v$  ( $Pa.s$ ), é definida pela Eq. (3.54), a qual é função da temperatura,  $T$ , dada em  $^{\circ}C$ , e foi proposta por PEZZANI (1992).

$$\eta_v = (3,85 \times 10^{-8} \times T) + 10^{-5} \quad (3.54)$$

Na Figura 18 apresenta-se a evolução das viscosidades dinâmicas da fase líquida e de vapor.

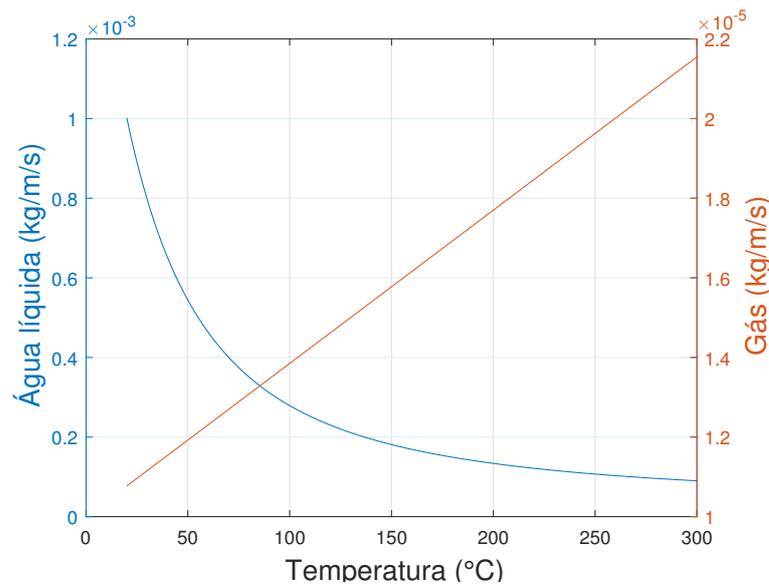


Figura 18 – Evolução da viscosidade dinâmica da fase líquida e de vapor em função da temperatura.

### 3.5.5 Permeabilidade intrínseca da fase líquida

A permeabilidade intrínseca da fase líquida,  $K_l$  ( $m^2$ ), é definida pela Eq. (3.55), a qual é função da massa de água livre proveniente da desidratação,  $d$ , dada em  $kg/m^3$ .

$$K_l = K_{l0} \times e^{0,126d} \quad (3.55)$$

$K_{l0}$  é a permeabilidade intrínseca inicial da fase líquida, a qual será definida e acordo com o tipo de concreto estudado.

### 3.5.6 Permeabilidade intrínseca da fase de vapor

A permeabilidade intrínseca da fase de vapor,  $K_v$  ( $m^2$ ), é definida pela Eq. (3.56), a qual é função da massa de água livre proveniente da desidratação,  $d$ , dada em  $kg/m^3$ .

$$K_v = K_{v0} \times e^{0,126d} \quad (3.56)$$

$K_{v0}$  é a permeabilidade intrínseca inicial da fase de vapor, a qual será definida e acordo com o tipo de concreto estudado.

Na Figura 19 apresenta-se a evolução da permeabilidade intrínseca da fase líquida e de vapor para determinados valores iniciais dessa propriedade, como as equações são similares as curvas ficaram sobrepostas.

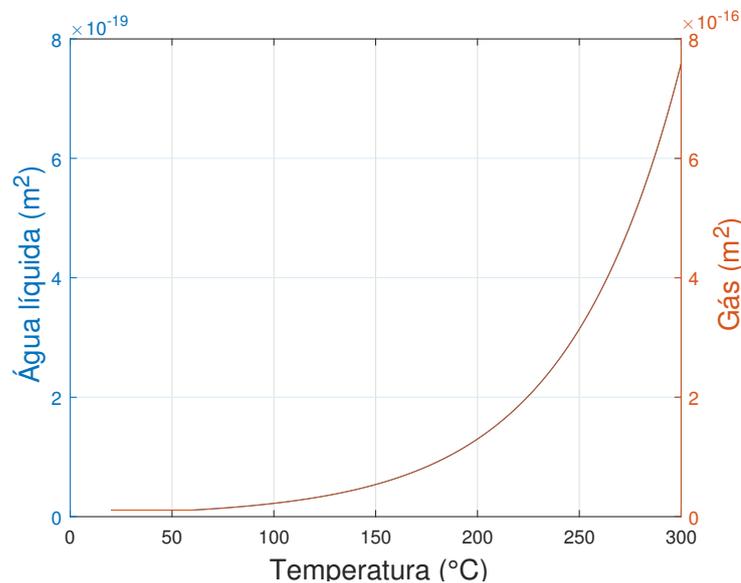


Figura 19 – Evolução da permeabilidade intrínseca a fase líquida e de vapor em função da temperatura.

### 3.5.7 Permeabilidade relativa à fase líquida

A permeabilidade relativa permite a consideração de que os poros estão parcialmente preenchidos por outra fase nos meios insaturados. A permeabilidade relativa à fase líquida,  $k_{rl}$ , é definida em função da saturação pela Eq. (3.57), proposta por Coussy (2004):

$$k_{rl}(S_l) = \sqrt{S_l} \times [1 - (1 - S_l^{1/m})^m]^2 \quad (3.57)$$

onde  $m = 0,5$  é um parâmetro definido experimentalmente.

### 3.5.8 Permeabilidade relativa à fase de vapor

A permeabilidade relativa permite a consideração de que os poros estão parcialmente preenchidos por outra fase nos meios insaturados. A permeabilidade relativa à fase de

vapor,  $k_{rv}$ , é definida em função da saturação pela Eq. (3.58), proposta por Coussy (2004):

$$k_{rv}(S_l) = \sqrt{1 - S_l} \times [1 - (1 - S_l)^m]^{2m} \quad (3.58)$$

onde  $m = 0,5$  é um parâmetro definido experimentalmente.

Na Figura 20 apresenta-se a evolução da permeabilidade relativa a fase líquida e de vapor.

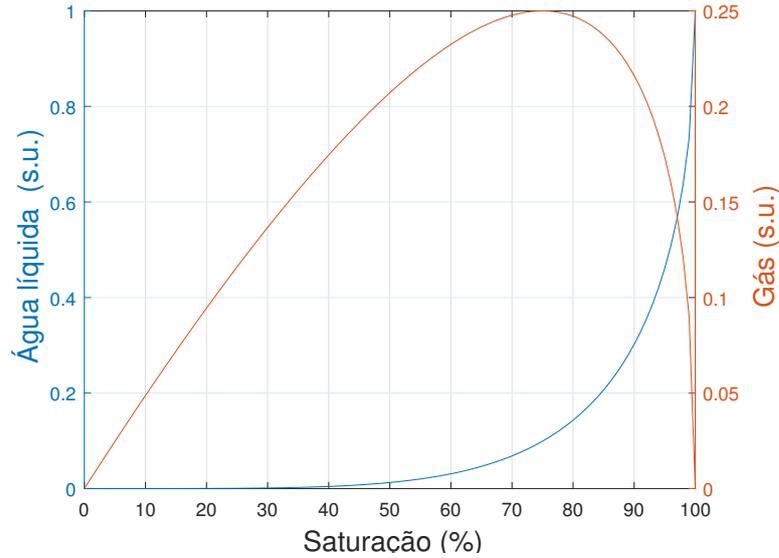


Figura 20 – Evolução da permeabilidade relativa a fase líquida e de vapor em função da saturação.

### 3.5.9 Pressão de vapor saturante

A pressão de vapor saturante,  $P_{vs}$  ( $Pa$ ), é a pressão de vapor máxima, ou limite, a que uma substância é submetida antes de se condensar, e é dada em função de uma temperatura. Ela é definida pela equação de Clausius-Clapeyron, Eq. (3.59), em função da temperatura,  $T$ , dada em  $^{\circ}C$ .

$$P_{vs} = P_0 \times \exp \left[ \frac{40500}{R} \left( \frac{T - 100}{373,15(T + 273,15)} \right) \right] \quad (3.59)$$

$P_0 = 101325(Pa)$  é a pressão atmosférica e  $R = 8,314(J/mol/K)$  é a constante universal dos gases perfeitos.

Na Figura 21 apresenta-se a evolução da pressão de vapor saturante.

### 3.5.10 Cinética de desidratação

O processo de desidratação da pasta de cimento se traduz em perda de água por decomposição dos produtos resultantes da hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado ( $CSH$ ) e a portlandita ( $Ca(OH)_2$ ). A desidratação transforma os hidratos em

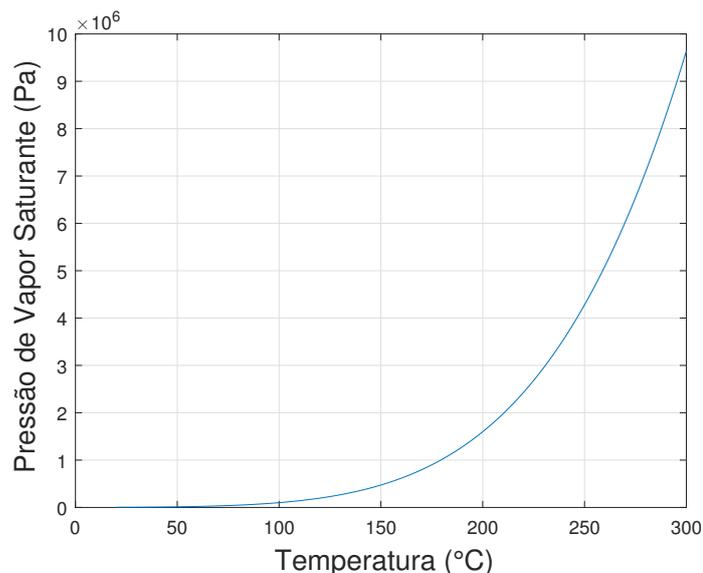


Figura 21 – Evolução da pressão de vapor saturante em função da temperatura.

anidros, os quais possuem um volume menor que o dos hidratos iniciais, implicando no aumento da porosidade. Outros efeitos da desidratação no concreto são a produção de água livre e o consumo de energia para a realização dessa mudança de fase.

Segundo Huang (2011), a decomposição do *CSH* se inicia a partir de  $105^{\circ}C$ . Entretanto, medidas efetuadas por Galle *et al.* (2000) em concretos comuns e de alto desempenho, mostram uma modificação significativa nos valores de porosidade a partir de  $60^{\circ}C$ . Neste trabalho, considera-se que ocorre extração de água da matriz cimentícia já nesta temperatura. Sendo assim, a evolução da quantidade de água ligada desidratada,  $d$  ( $kg/m^3$ ), é dada pela Eq. (3.60) (Sercombe; Galle; Ranc, 2001) em função da temperatura,  $T$ , em  $^{\circ}C$ .

$$d = 0,136 (T - 60) \text{ para } T > 60 \quad (3.60)$$

Na Figura 22 apresenta-se a evolução da quantidade de água ligada a matriz sólida que é desidratada e a velocidade com a qual esse fenômeno ocorre.

### 3.5.11 Porosidade

A porosidade do concreto evolui em função do crescimento do volume de poros. Considerando as hipóteses e restrições do modelo, esse aumento é considerado como função apenas da desidratação, a qual é função da desidratação. A Eq. (3.61) (Sercombe; Galle; Ranc, 2001) descreve o comportamento dessa propriedade:

$$\phi(d) = \phi_0 + \frac{d}{\rho_{hid}}, \quad (3.61)$$

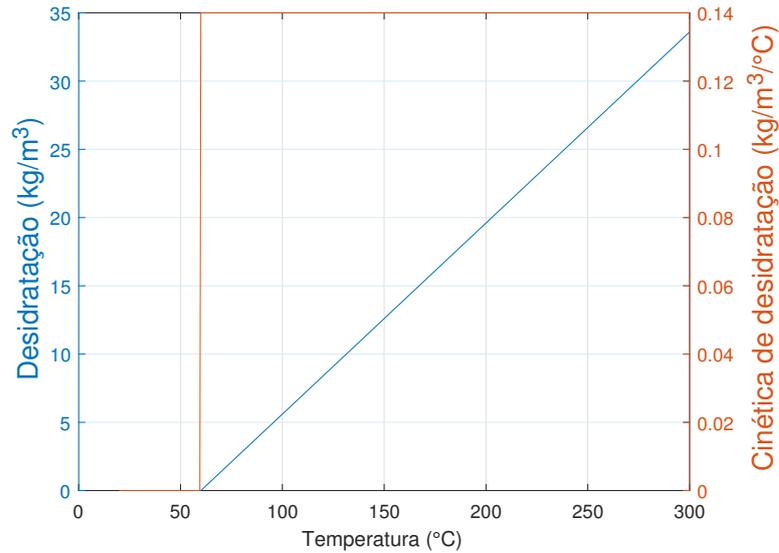


Figura 22 – Evolução do fenômeno da desidratação em função da temperatura.

onde  $\phi_0$  é a porosidade inicial,  $d$  a massa de água ligada desidratada e  $\rho_{hid}$  representa a massa específica volumétrica dos hidratos da pasta de cimento, cujo valor utilizado é  $\rho_{hid} = 2280 \text{ kg/m}^3$ .

O  $\rho_{hid}$  é a massa volumétrica relativa aos hidratos da pasta de cimento, pois é justamente a desidratação desses elementos que causará o aumento de volume de poros, responsável pela alteração da porosidade.

Na Figura 23 apresenta-se a evolução da porosidade do material.

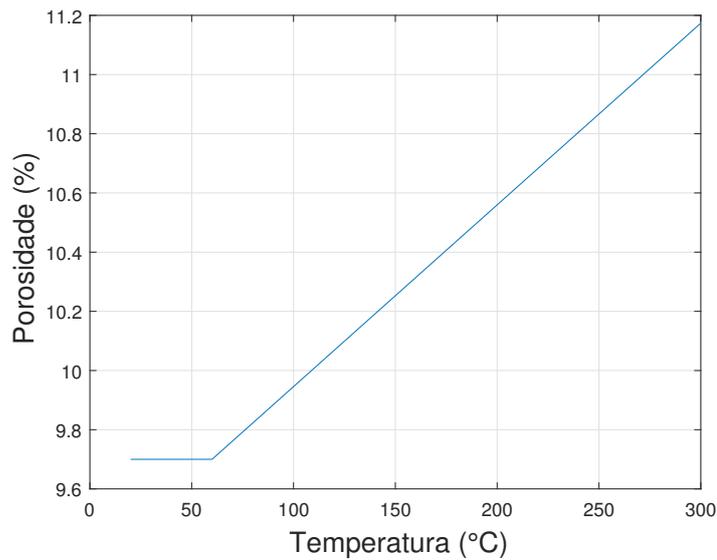


Figura 23 – Evolução da porosidade em função da temperatura.

### 3.5.12 Condutividade térmica

A condutividade térmica,  $\lambda$  ( $W/mK$ ), é definida pela Eq. (3.62), em termos da temperatura,  $T$ , dada em  $^{\circ}C$ , de acordo com a curva proposta pela Norma europeia (EN:1992-1-2, 2005).

$$\lambda = 1,36 - 0,136 \left( \frac{T}{100} \right) + 0,0057 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (3.62)$$

Na Figura 24 apresenta-se a evolução da condutividade térmica do concreto com a temperatura.

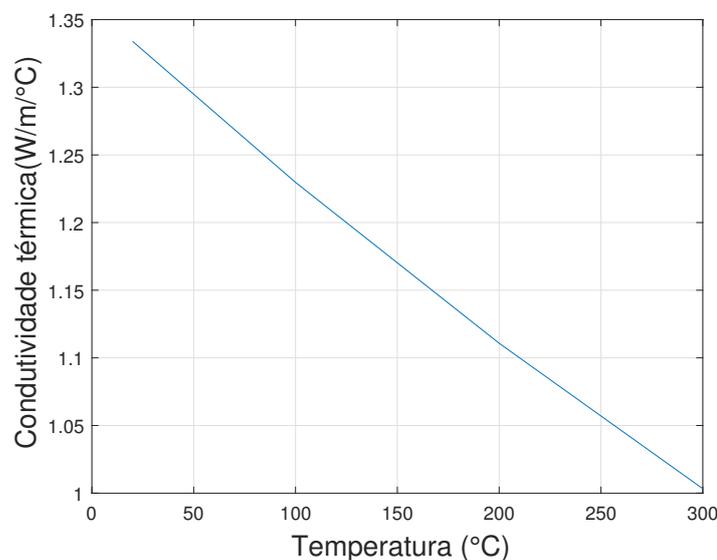


Figura 24 – Evolução da condutividade térmica em função da temperatura.

### 3.5.13 Calor latente de desidratação

O calor latente de desidratação,  $L_{s \rightarrow l}$  ( $kJ/kg$ ), é a quantidade de calor fornecida ao material necessária para extrair da matriz hidratada uma unidade de massa de água ligada. De acordo com Sercombe, Galle e Ranc (2001), não existem métodos diretos para determinar o calor latente de desidratação. É possível, entretanto, através da utilização de algumas hipóteses, deduzir qual é a quantidade de calor liberada durante a hidratação da pasta de cimento. A hidratação de  $1kg$  de cimento requer em torno de  $0,2kg$  de água e gera aproximadamente  $500kJ$  de calor. Supondo que o calor liberado durante o processo de hidratação de  $1kg$  de cimento é igual a quantidade de calor necessária para extrair  $0,2kg$  de água ligada da matriz cimentícia, é possível estimar que o calor necessário para extrair  $1kg$  de água ligada é:

$$L_{s \rightarrow l} = 2500. \quad (3.63)$$

### 3.5.14 Calor latente de vaporização

O calor latente de vaporização,  $L_{l \rightarrow v}$  ( $kJ/kg$ ) é definido em função da temperatura,  $T$ , dada em  $^{\circ}C$ , pela Eq. (3.64) proposta por Raznjevic e Poadhorsky (1970).

$$L_{l \rightarrow v} = \frac{2450,2502 - 6,433949 \times T}{1 - 0,0019057413 \times T - 7,0023846 \times 10^{-7} \times T^2} \quad (3.64)$$

Na Figura 25 apresenta-se a evolução do calor latente de vaporização.

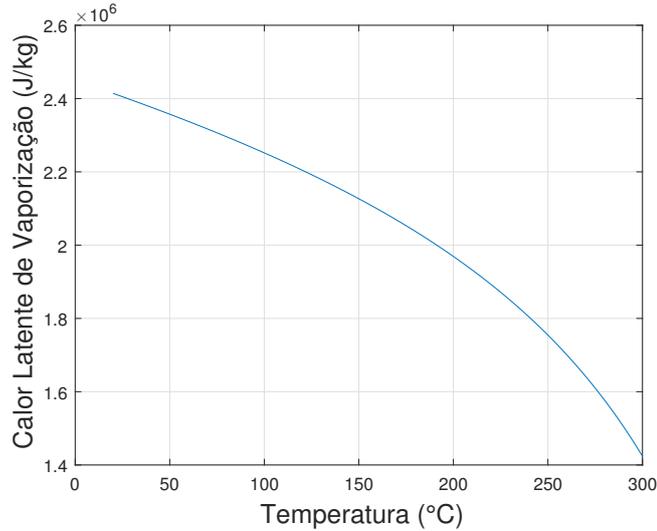


Figura 25 – Evolução do calor latente de vaporização em função da temperatura.

### 3.5.15 Calor específico da fase sólida

O calor específico da fase sólida do concreto é definido de acordo com a Eq. (2.4), a qual é apresentada aqui novamente:

$$c_p(T) = \begin{cases} 900, & T \in [20,100), \\ 900 + (T - 100), & T \in [100,200), \\ 1000 + \left(\frac{T - 200}{2}\right), & T \in [200,400), \\ 1100, & T \in [400,1200), \end{cases} \quad (2.4)$$

e ilustrada na Figura 26.

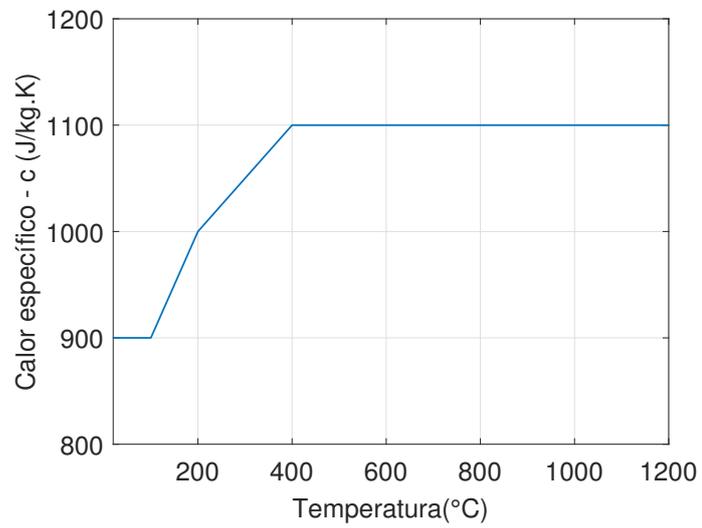


Figura 26 – Calor específico do concreto segundo o Eurocódigo para o concreto seco e em função da temperatura.

## 4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ÀS TRANSFERÊNCIAS DE CALOR E MASSA

### 4.1 MÉTODO DOS RESÍDUOS PONDERADOS

O desenvolvimento aqui apresentado foi adaptado de Ribeiro (2004).

Diversos problemas de engenharia são modelados através de uma equação diferencial válida em um domínio  $\Omega$ , sujeita a condições de contorno em  $\Gamma$ . Contudo, de maneira geral, as soluções analíticas, só são conhecidas para alguns casos mais simples dessas equações diferenciais. Por isso, a determinação da função desconhecida  $u$  (solução do problema) é feita utilizando-se métodos numéricos.

Nesse tipo de solução, o domínio  $\Omega$  é discretizado, associando-se a cada ponto da discretização uma variável  $a_j$  que terá de ser calculada. Essas variáveis, juntamente com funções de forma apropriadas  $N_j$ , definem  $\hat{u}$  como uma aproximação desconhecida de  $u$  no domínio  $\Omega$  por:

$$u \approx \hat{u} = \sum_{j=1}^m N_j a_j = \mathbf{N}\mathbf{a}. \quad (4.1)$$

Sendo  $\hat{u}$  considerada uma boa aproximação se o resíduo:

$$R_\Omega = A(\hat{u}) = A\left(\sum_{j=1}^m N_j a_j\right) \quad (4.2)$$

for pequeno no domínio  $\Omega$  para um operador diferencial  $A$ .

No método dos resíduos ponderados, os parâmetros  $a_j$  são escolhidos a fim de tornar nulas certas médias ponderadas, não o valor do resíduo  $R_\Omega$ . Considerando-se  $W_i$  um conjunto de funções de peso independentes, tem-se:

$$\int_{\Omega} W_i R_\Omega d\Omega = 0. \quad (4.3)$$

A escolha das funções de peso  $W_i$  pode ser definida para diferentes métodos. No método de Galerkin, as funções de peso  $W_i$  são escolhidas de modo a serem iguais às funções de forma utilizadas na aproximação  $u$ . Assim:

$$\int_{\Omega} N_i R_\Omega d\Omega = 0. \quad (4.4)$$

Se  $A$  é um operador diferencial simétrico, então o método de Galerkin gera matrizes simétricas, o que na prática é desejado para o uso do método dos elementos finitos.

Aplicando ainda o conceito do método dos resíduos ponderados às condições de contorno, é necessário considerar um novo resíduo no contorno  $\Gamma$ :

$$R_\Gamma = B(\hat{u}) = B\left(\sum_{j=1}^m N_j a_j\right). \quad (4.5)$$

Aplicando, então, o conceito de nulidade das médias ponderadas utilizado no método dos resíduos ponderados e adotando um conjunto de funções de peso independentes para o contorno, tem-se:

$$\int_{\Gamma} W_i R_{\Gamma} d\Gamma = 0. \quad (4.6)$$

## 4.2 EQUAÇÕES BÁSICAS DO MEF

No presente trabalho, a Eq. (3.50) será discretizada no espaço através do método dos elementos finitos. Como ambas as equações que compõem o sistema possuem uma estrutura semelhante, nessa seção será exemplificada apenas o processo de discretização para a Eq. (3.48), oriunda do balanço de energia definida em um domínio  $\Omega$ .

$$c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \text{ em } \Omega \quad (3.48)$$

O problema de domínio sólido pode estar sujeito às seguintes condições de contorno:

- Condição de Dirichlet, a qual fixa a temperatura  $T$  a um valor previamente conhecido sobre um determinado contorno:

$$T - \bar{T} = 0 \text{ em } \Gamma_T, \quad (4.7)$$

onde  $\bar{T}$  é a temperatura com valor conhecido no contorno; e  $T$  é a temperatura na superfície do sólido.

- Condição de Neumann, a qual fixa o gradiente de temperatura normal à superfície.

$$-\mathbf{n}q + \bar{q} = 0 \text{ em } \Gamma_q \quad (4.8)$$

onde  $\bar{q}$  é o fluxo de calor com valor conhecido no contorno, normal ao mesmo;  $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$  é o vetor de normais ao contorno; e por fim,  $\mathbf{q}_n = \mathbf{n}q [q_x \ q_y \ q_z]^T$  é o vetor gradiente de temperatura normal a  $\Gamma_q$ .

De acordo com os valores dos parâmetros da Eq. (4.8), tem-se os seguintes tipos de contorno:

– *Contorno isolado*

Representa um fluxo de calor nulo na interface do domínio com o meio externo:

$$\mathbf{n}q = 0, \text{ pois } \bar{q} = 0, \quad (4.9)$$

– *Contorno com entrada ou saída de calor*

Representa um fluxo de calor de valor conhecido no contorno:

$$\mathbf{n}q = \bar{q} = -\lambda(T) \nabla T \quad (4.10)$$

### 4.3 FORMULAÇÃO PARA O MEF

O domínio  $\Omega$  é dividido em elementos finitos conectados nos nós. As equações globais para o domínio podem ser montadas a partir das equações para os elementos finitos levando em conta as informações sobre a conectividade dos nós.

As funções de forma  $N_i$  são usadas para interpolar os valores de temperatura dentro de um elemento finito:

$$\begin{aligned} T &= [N] \{T\} \\ [N] &= [N_1 \quad N_2 \quad \dots] \\ \{T\} &= [T_1 \quad T_2 \quad \dots] \end{aligned} \quad (4.11)$$

Ao derivar a equação de interpolação da temperatura, obtém-se a seguinte relação para os gradientes de temperatura:

$$\begin{Bmatrix} \partial T / \partial x \\ \partial T / \partial y \\ \partial T / \partial z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial N_1 / \partial x & \partial N_2 / \partial x & \dots \\ \partial N_1 / \partial y & \partial N_2 / \partial y & \dots \\ \partial N_1 / \partial z & \partial N_2 / \partial z & \dots \end{bmatrix} \{T\} = [B] \{T\} \quad (4.12)$$

onde  $\{T\}$  é o vetor de temperatura nodal;  $[N]$  é a matriz de funções de forma e  $[B]$  é a matriz para a interpolação dos gradientes de temperatura.

Aplicando o método dos resíduos ponderados aliado ao método de Galerkin, é possível reescrever a equação diferencial do problema (Eq. (3.48)) da seguinte forma:

$$\int_{\Omega} \left( \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} - c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i d\Omega = 0 \quad (4.13)$$

Aplicando o Teorema de Green para o primeiro termo, tem-se:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega + \int_{\Omega} [\partial N_i / \partial x \quad \partial N_i / \partial y \quad \partial N_i / \partial z] \lambda(T) [B] \{T\} = \\ \int_{\Omega} \left( -L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \right) N_i d\Omega - \int_{\Gamma} \{q\}^T \{n\} N_i d\Gamma \end{aligned} \quad (4.14)$$

onde  $\{q\}$  é o vetor de fluxo de calor que pode ser calculado em função dos valores nodais de temperatura através da expressão  $\{q\} = -\lambda[B] \{T\}$ . Já  $\{n\}$  é o vetor normal a superfície do corpo, sendo  $\{n\}^T = [n_x \quad n_y \quad n_z]$ . Inserindo as condições de contorno na Eq. (4.14), a equação discretizada será:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega + \int_{\Omega} [\partial N_i / \partial x \quad \partial N_i / \partial y \quad \partial N_i / \partial z] \lambda(T) [B] \{T\} = \\ \int_{\Omega} \left( -L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \right) N_i d\Omega - \int_{\Gamma_T} \{q\}^T \{n\} N_i d\Gamma_T + \int_{\Gamma_q} \bar{q} N_i d\Gamma_q \end{aligned} \quad (4.15)$$

Vale ressaltar que a integral  $\int_{\Gamma_T} \{q\}^T \{n\} N_i d\Gamma_T$  pode ser desprezada, dado que a mesma ocorre no contorno de temperaturas prescritas ( $\Gamma_T$ ), sendo essas impostas no momento da resolução do sistema de equações. Assim, a Eq. (3.48) discretizada por elementos finitos tem a forma matricial apresentada abaixo:

$$[M]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{f\}, \quad (4.16)$$

onde:

$[M]$  - matriz de massa;

$[K]$  - matriz de rigidez;

$\{f\}$  - vetor de fluxos nodais equivalentes;

$\{T\}$  - vetor de incógnitas contendo a temperatura em todos os nós da malha.

Para cada elemento essas matrizes podem ser obtidas utilizando as seguintes expressões:

$$[M]^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} c(S_l, d) \mathbf{N}^T \mathbf{N} \partial\Omega^{(e)} \quad (4.17)$$

$$[K]^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} [B]^T \lambda(T) [B] \partial\Omega \quad (4.18)$$

$$\{f\}^{(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} [N]^T \left( -L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \right) \partial\Omega^{(e)} - \int_{\Gamma_q^{(e)}} [N]^T \bar{q} \partial\Gamma_q^{(e)} \quad (4.19)$$

#### 4.4 DISCRETIZAÇÃO NO TEMPO

A Eq. (4.16) é resultante da discretização do espaço, representando um sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem. Na solução desse sistema de equações empregam-se métodos numéricos que demandam a discretização no domínio do tempo.

A discretização do tempo será feita através da aplicação do método das diferenças finitas, baseado nas seguintes hipóteses:

- a Eq. (4.16) é satisfeita apenas em pontos discretos ( $t_{n+\beta}$ ) de cada intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) em que se discretizou o domínio tempo (Figura 27);
- as temperaturas variam linearmente ao longo do intervalo de tempo  $\Delta t$ , desde o instante  $t_n$  até  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ .

Desta forma, as temperaturas  $\{T\}_{n+\beta}$  no instante  $t_{n+\beta} = t_n + \beta\Delta t$  podem ser dadas por:

$$\{T\}_{n+\beta} = \{T\}_n + \beta\Delta t(\{T\}_{n+1} - \{T\}_n)/\Delta t \text{ com } \begin{cases} \beta \in (0,1) \\ n \in (0,1,\dots,N-1) \end{cases} \quad (4.20)$$

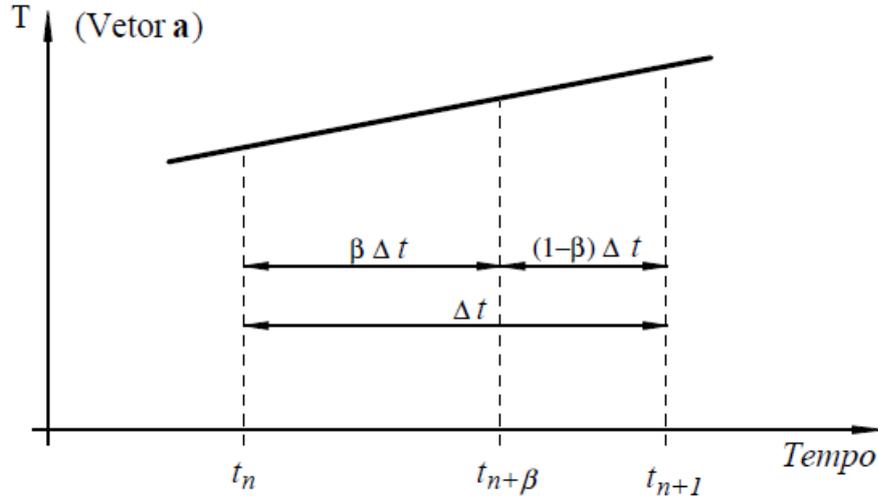


Figura 27 – Variação da temperatura no intervalo de tempo  $\Delta t$  (Ribeiro, 2004).

onde  $N$  é o número total de intervalos de tempo e  $\beta$  é um parâmetro que define dentro de cada intervalo de tempo o instante em que a Eq. (4.17) é satisfeita.

Pela segunda hipótese, a derivada da temperatura em relação ao tempo é constante dentro de cada intervalo, e é dada por:

$$\frac{\partial \{T\}_{n+\beta}}{\partial t} = \frac{\{T\}_{n+1} - \{T\}_n}{\Delta t}. \quad (4.21)$$

Substituindo-se a Eq. (4.20) e Eq. (4.21) na Eq. (4.16) obtém-se à seguinte fórmula de recorrência:

$$\left( \frac{[M]_{n+\beta}}{\beta \Delta t} + [K]_{n+\beta} \right) \{T\}_{n+\beta} = \{f\}_{n+\beta} + \frac{[M]_{n+\beta}}{\beta \Delta t} \{T\}_n \quad (4.22)$$

As matrizes  $[M]_{n+\beta}$ ,  $[K]_{n+\beta}$  e  $\{f\}_{n+\beta}$  são avaliadas no instante  $t_{n+\beta}$ . Reescrevendo a fórmula de recorrência, obtém-se:

$$\begin{aligned} [\hat{K}]_{n+\beta} \{T\}_{n+\beta} &= \{\hat{f}\}_{n+\beta} \text{ onde} \\ [\hat{K}]_{n+\beta} &= \frac{[M]_{n+\beta}}{\beta \Delta t} + [K]_{n+\beta} \\ \{\hat{f}\}_{n+\beta} &= \{f\}_{n+\beta} + \frac{[M]_{n+\beta}}{\beta \Delta t} \{T\}_n \end{aligned} \quad (4.23)$$

Resolvido o sistema de equações Eq. (4.23) para  $\{T\}_{n+\beta}$ , as temperaturas no final do intervalo de tempo  $\mathbf{a}_{n+1}$  são dadas por:

$$\{T\}_{n+1} = \frac{1}{\beta} \{T\}_{n+\beta} + \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) \{T\}_n \quad (4.24)$$

sendo essas as temperaturas iniciais  $\{T\}_n$  quando se avança para o intervalo de tempo seguinte.

Em função do valor do parâmetro  $\beta$  na Eq. (4.22) obtém-se vários esquemas de integração no tempo:

- esquema explícito de Euler:  $\beta = 0$ ,
- esquema implícito de Crank-Nicolson:  $\beta = 1/2$ ,
- esquema implícito de Galerkin:  $\beta = 2/3$ ,
- esquema implícito de Euler-Backward:  $\beta = 1$ ,

O algoritmo mostrado acima tem os mesmos critérios de estabilidade tanto para problemas lineares quanto para problemas não-lineares. Segundo Hogge (1981), para  $\beta > 1/2$  os esquemas de integração são *condicionalmente estáveis* enquanto que para  $1/2 \leq \beta \leq 1$  são designados de *incondicionalmente estáveis*, mesmo que tal convergência processe com oscilações.

A medida que  $\beta$  se aproxima da unidade, as oscilações na resolução do problema diminuem e para o esquema de Euler-Backward, não há oscilações, sendo, de modo geral, a solução obtida com esse esquema subestimada.

Para a resolução do modelo estudado, será utilizado o esquema explícito de Euler para a integração numérica no tempo.

#### 4.5 DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DE MASSA

A discretização através dos métodos dos elementos finitos para a Eq. (3.48) foi apresentada na Seção 4.3. Para repetir o processo para a Eq. (3.40), é preciso utilizar um artifício matemático aliado a discretização temporal para reescrever o *termo (2)*. O processo é o seguinte: tomando  $t_i = i\Delta t$ ,  $i \in [0,1,2,\dots,n]$  onde  $n = \frac{t_{max}}{\Delta t} + 1$ , é possível reescrever o *termo(2)* como:

$$\begin{aligned}
 \text{termo}(2) &= \frac{\partial \rho_l}{\partial t} \phi \cdot S_l = \frac{[(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i]}{\Delta t} \cdot \phi \cdot (S_l)_{i+1} \\
 \text{termo}(2) &= \frac{[(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i]}{\Delta t} \cdot \phi \cdot (S_l)_{i+1} - \frac{[(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i]}{\Delta t} \cdot \phi \cdot (S_l)_i + \frac{[(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i]}{\Delta t} \cdot \phi \cdot (S_l)_i \\
 \text{termo}(2) &= [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi \cdot \underbrace{\frac{(S_l)_{i+1} - (S_l)_i}{\Delta t}}_{\partial S_l / \partial t} + [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi \cdot \frac{(S_l)_i}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Substituindo a Eq. (4.25) na Eq. (3.40), obtém-se:

$$\phi((\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1} + (\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i) \frac{\partial S_l}{\partial t} - \nabla [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l] = \frac{\partial d}{\partial t} - [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi \cdot \frac{(S_l)_i}{\Delta t} \tag{4.26}$$

A Eq. (4.26), nesse formato, será discretizada de forma análoga à Eq. (3.48).

## 5 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

### 5.1 CAST3M

O Cast3M é um código de cálculo gratuito que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para realizar análise de estruturas e modelar situações de mecânica dos fluidos, entre outros problemas. Esse código foi criado pelo DM2S/CEA (Département de modélisation des systèmes et structures/Commissariat français à l'Energie Atomique) na França, como uma atividade de pesquisa da área de mecânica, com o objetivo de disponibilizar um instrumento de pesquisa de alto nível, o qual servisse como uma base para a concepção, o dimensionamento e a análise de estruturas e seus componentes, tanto no domínio nuclear como no setor industrial clássico.

Dessa forma, o Cast3M possui um sistema completo, que integra além das funções de cálculo, as ferramentas para a construção do modelo (pré-processamento) e para o tratamento dos resultados (pós-processamento). Suas principais aplicações são a resolução de problemas mecânicos, elásticos lineares, nos domínios estáticos e dinâmicos, não lineares (grandes deslocamentos, grandes deformações, atrito, etc), dinâmicos (tipo de cálculo denominado PASAPAS) através de um esquema implícito. Outras aplicações incluem análises térmicas, hidráulicas e eletromagnéticas.

O Cast3M compreende um conjunto de processos elementares (biblioteca de operadores), que o usuário pode encadear para definir e resolver seus problemas. A linguagem de comando utilizada é a GIBIANE. Ela é constituída de uma série de operadores permitindo que o usuário manipule os dados e os resultados como objetos. Além disso, possui todas as características de uma linguagem de programação orientada a objeto, como a atribuição dinâmica de dados, a existência de expressões condicionais e repetitivas, o tratamento de exceções, a recursividade e possibilidade de escrever funções. Tem-se ainda, além dos objetos clássicos de programação (inteiro, real, tabela, ...), uma biblioteca de objetos proposta especificamente para a modelagem por elementos finitos. São eles: malha, modelo, rigidez, entre outros. É essa característica, que permite que a GIBIANE seja uma linguagem de programação e de modelagem.

Na prática, basta incluir um operador, juntamente com a sua instrução apropriada, para que o comando seja executado. Assim, o usuário, pode adaptar a sequência de resolução à necessidade do problema. GIBIANE é, desta forma, uma linguagem de alto nível, que facilita em particular, a comunicação entre o programador e o código. A flexibilidade oferecida, entretanto, não dispensa o programador de implementar o programa seguindo o método proposto pelo código. Consequentemente, é importante compreender como funciona e se organiza uma análise por elementos finitos para poder sincronizar a

operação que se deseja realizar com os operadores que devem ser utilizados. É importante, ainda, ressaltar que o Cast3M não possui ambiente gráfico para o desenvolvimento dos modelos, adicionando mais dificuldade à tarefa já complexa do programador.

## 5.2 APRESENTAÇÃO DO ALGORITMO

O programa completo é dividido em três blocos, conforme ilustrado na Figura 28. São eles:

- Definição dos dados de entrada e da geometria do problema;
- Cálculo global das duas variáveis,  $T$  e  $S_l$ , assim como o cálculo da pressão de vapor e da perda de massa;
- Pós-processamento dos resultados, o qual permite traçar as diferentes curvas de interesse que serão utilizadas para analisar os resultados.

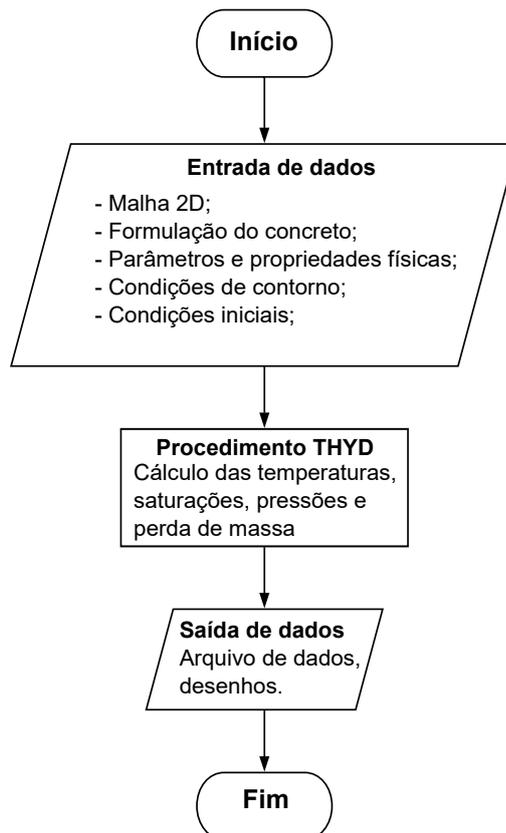


Figura 28 – Esquema do algoritmo implementado para solucionar o problema termo-hídrico.

O segundo bloco contendo todo o núcleo de cálculo, é definido dentro da função chamada **THYD**. O funcionamento dessa função é descrito na Figura 29. A função **THYD** é chamada com a passagem de todos os parâmetros inicialmente definidos. No laço

**THYD** é calculado o incremento de tempo, na sequência, tem-se o laço **BOUPIC** onde ocorre a resolução iterativa do problema termo-hídrico em duas etapas: primeiramente, é realizado o cálculo térmico e a análise de convergência local no bloco **NITER**; seguido do cálculo hídrico e a análise de convergência subsequente no bloco **HYDITER**. Por fim, são verificados os critérios térmicos e hídricos de convergência de Picard, e o cálculo das pressões e perda de massa.

### 5.3 ORGANIZAÇÃO GERAL DO CÓDIGO

#### 5.3.1 Dados de entrada

Para executar o algoritmo a fim de resolver o problema modelado, é preciso inserir uma série de dados de entrada no programa.

##### 5.3.1.1 Geometria e malha

O código implementado resolve problemas em domínios bidimensionais. O usuário deve definir os pontos que determinam as formas da geometria e a partir deles definir as linhas do contorno e a superfície da geometria.

##### 5.3.1.2 Dados do material

É necessário definir a composição do concreto que será estudado. Para isso, devem ser inseridas as informações sobre o traço do material referentes a  $1m^3$ , conforme ilustrado na Tabela (1).

Tabela 1 – Composição do concreto

Material ( $kg/m^3$ )
Cimento
Agregados
Água de mistura

É importante ainda definir, dados do material obtidos através de estudos de caracterização desse. A Tabela (2) apresenta essas informações.

Tabela 2 – Propriedades do concreto à temperatura ambiente

Propriedades
Porosidade inicial ( $\phi$ )
Quantidade inicial de água ligada a matriz cimentícia ( $d_0$ )
Permeabilidade intrínseca inicial da fase líquida ( $K_{l_0}$ )
Permeabilidade intrínseca inicial da fase gasosa ( $K_{v_0}$ )

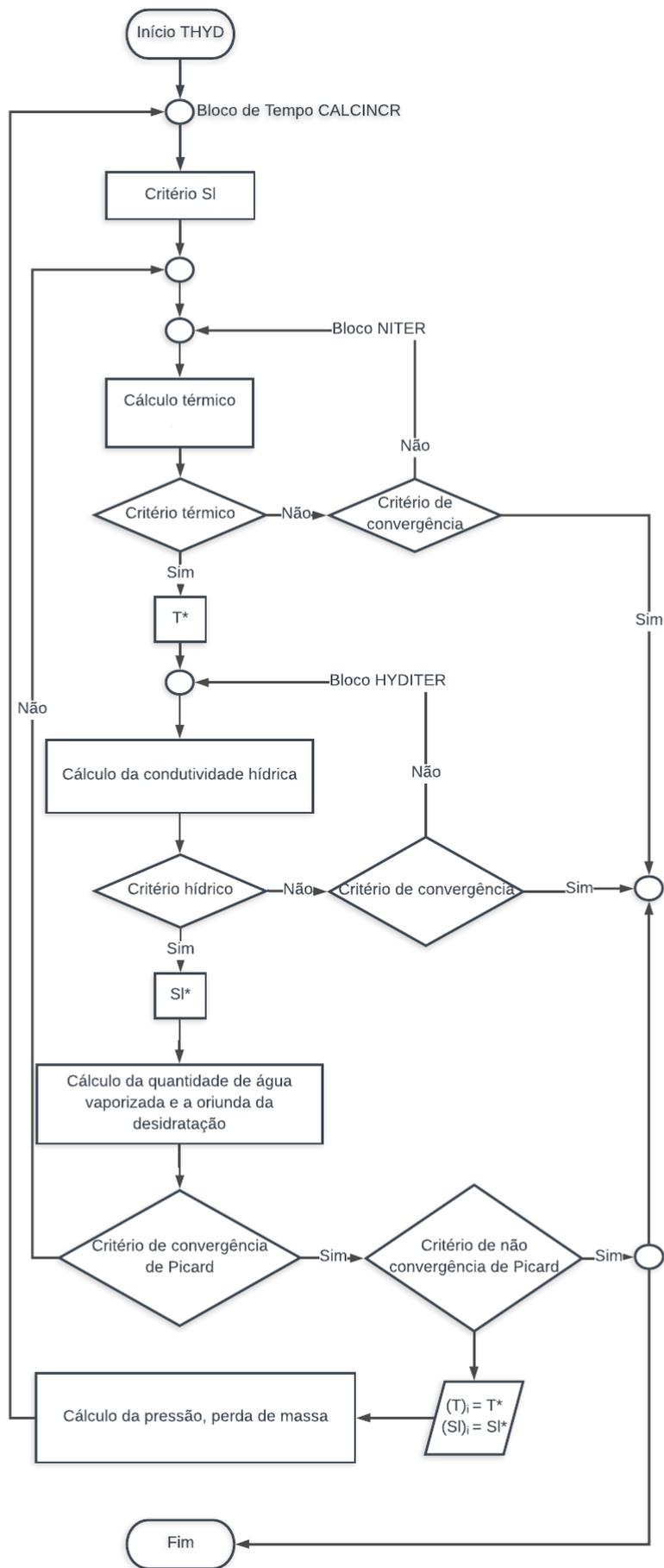


Figura 29 – Fluxograma da função **THYD**.

A evolução dessas propriedades é definida na Seção (3.5), esses valores podem ser substituídos se houver dados experimentais disponíveis.

### 5.3.2 Condições iniciais

Uma vez definida as características do material estudado e a evolução de suas propriedades, deve-se definir as condições iniciais relativas à temperatura e saturação.

#### 5.3.2.1 *Temperatura inicial*

A temperatura inicial deve ser imposta pelo usuário para o interior e o contorno da geometria. Geralmente, é definida uma temperatura ambiente.

#### 5.3.2.2 *Saturação inicial*

A saturação inicial, pode ser definida diretamente pelo usuário para o interior e o contorno da geometria. Essa abordagem equivale experimentalmente a fixar uma saturação através da imersão do corpo de prova em água, até que ele atinja um determinado valor de saturação. Posteriormente, o corpo de prova pode ter sua superfície ligeiramente seca, alterando o valor da propriedade no contorno.

Outro modo de fazer isso, é considerando uma amostra de concreto que foi submetida a uma técnica de cura e logo após utilizada em um processo de aquecimento, como o proposto no modelo estudado, nesse caso, a saturação inicial deve ser calculada utilizando a massa líquida de água presente no corpo de prova. Relembrando a definição de saturação, Eq. (3.4), pode-se escrever a saturação inicial como:

$$S_{l0} = \frac{V_{l0}}{V_{v0}} \quad (5.1)$$

Da definição de porosidade, Eq. (3.3), é possível reescrever o  $V_{v0} = \phi_0 \cdot V_{total}$ , e da definição de massa volumétrica específica, tem-se  $V_l = m_l / \rho_l$ . Substituindo na Eq. (5.1), obtém-se:

$$S_{l0} = \frac{(m_{l0} / \rho_{l0})}{\phi_0 \cdot V_{total}} \quad (5.2)$$

### 5.3.3 Condições de contorno

A definição das condições de contorno térmicas e hídricas requer uma análise preliminar do experimento que se deseja replicar.

### 5.3.3.1 *Térmica*

Para o problema da transferência de calor, é preciso identificar as faces da geometria que serão aquecidas e definir para elas uma evolução de temperatura. Para as outras faces, deve-se definir o fluxo nulo.

### 5.3.3.2 *Hídrica*

Como condições de contorno hídricas, é possível impor valores de pressão de vapor, umidade relativa ou saturação. Elas são determinadas de acordo com as condições de exposição do corpo estudado ao ambiente externo. São situações possíveis:

- A superfície do corpo encontra-se isolada do meio exterior, logo supõe-se que não há transferência de umidade entre o contorno e o ambiente, ou seja, trata-se de uma condição de fluxo nulo.
- A superfície do corpo encontra-se aberta ao ambiente, sendo assim é possível assumir que a pressão na superfície de contorno é igual a pressão do ambiente. Nesse caso, é possível impor valores de saturação ou pressão de vapor, o que implica ainda na prescrição da umidade relativa da fronteira, uma vez que é possível relacionar umidade relativa, pressão de vapor e pressão de vapor saturante através da Eq. (3.33). Levando em conta também a *Hipótese 3*, é possível relacionar pressão de vapor e saturação.

### 5.3.4 **Saída de dados**

Os resultados diretos são temperatura e saturação. A partir desses valores, são calculados as pressões de vapor (Eq. (3.33)), as pressões líquidas (Eq. (3.24)), as pressões capilares (Eq. (3.23)), e a perda de massa (Eq. (3.8)).

## 6 ESTUDO DA SATURAÇÃO

Como foi descrito na Seção 1.2, existem resultados de saturação, como ilustrado na Figura 4, para determinadas temperaturas e pontos do domínio, nos quais ocorrem situações em que  $S_l > 1$ , cenário inactivável fisicamente. Considerando a definição de saturação apresentada na Eq. (3.4) e dada pela equação:

$$S_l = \frac{V_l}{V_{vazios}}, \quad (3.4)$$

obter  $S_l > 1$  significa que o volume líquido é maior que o volume de vazios, contudo isso não pode ocorrer, visto que o volume de vazios é dado pela soma do volume de líquido com o de vapor, Eq. (3.2).

Logo, pode-se afirmar que o resultado de saturação representa bem o comportamento do fenômeno, apresentando uma curva bem característica, porém com valores que possuem um certo desvio. Em alguns casos, o erro é baixo, entretanto, o significado físico desse índice torna-o passível de preocupação.

Neste capítulo, certos aspectos do modelo serão discutidos mais detalhadamente para analisar sua possível influência nos resultados de saturação.

### 6.1 APLICAÇÃO ESTUDADA

Para realizar o estudo sobre o comportamento da saturação, foram utilizados dados de um estudo proposto por Pliya (2010). Trata-se do aquecimento de um corpo de prova cilíndrico, por se tratar de uma estrutura cilíndrica, foi utilizada a opção de cálculo axissimétrica. Um carregamento térmico de  $1^\circ C/min$  é aplicado nos lados externos da figura, representadas em vermelho. A temperatura inicial do material é de  $20^\circ C$  e temperatura final será de  $600^\circ C$ . Os dados do material são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Formulação do concreto - Pliya (2010)

Constituinte	
Cimento ( $kg/m^3$ )	400
Agregados ( $kg/m^3$ )	1773
Água de mistura ( $kg/m^3$ )	181

Já as condições iniciais do problema são exibidas na Tabela 4. Os parâmetros e propriedades que não foram expostos nessa seção, foram utilizados de acordo com o definido na Seção 3.5.

Tabela 4 – Condições iniciais.

Dado	Valor
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	20
Saturação	0,95
Porosidade	0,139
Permeabilidade intrínseca ( $m^2$ )	$3.5 \times 10^{-16}$

## 6.2 PONTO CRÍTICO DA ÁGUA

O ponto crítico de uma substância representa um ponto específico a uma determinada pressão e temperatura, a partir da qual não é possível distinguir as fases líquida e gasosa (Figura 30). Quando a substância se aproxima da temperatura crítica, as propriedades das duas fases envolvidas convergem e passam a ser definidas unicamente. Isso implica em mudança na forma com a qual as propriedades do fluido são descritas.

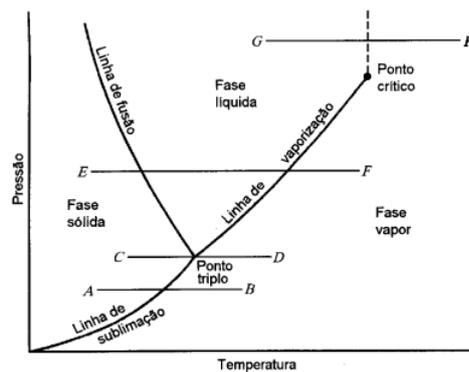


Figura 30 – Diagrama pressão-temperatura para uma substância semelhante a água. Adaptado de (Wyllen; Borgnakke; Sonntag, 2009).

Segundo Wylen, Borgnakke e Sonntag (2009), a água possui temperatura crítica de  $374,14^{\circ}C$ . Por isso, a primeira eventualidade a ser investigada foi a possibilidade da saturação exceder um para temperaturas ao redor da  $T_{\text{crítica}}$ . Todavia, essa suposição se provou equivocada, pois  $S_l$  ultrapassou 1 para temperaturas acima de  $100^{\circ}C$ . Isso pode ser melhor observado na Fig. (31), que apresenta os perfis de saturação para diversas temperaturas na superfície.

A partir dessa análise, percebe-se que o fato da temperatura ultrapassar a  $T_{\text{crítica}}$  não influencia diretamente nos resultados de saturação. Mas independentemente disso, o modelo é mais adequado para carregamentos com valores máximos inferiores à  $374,15^{\circ}C$ .

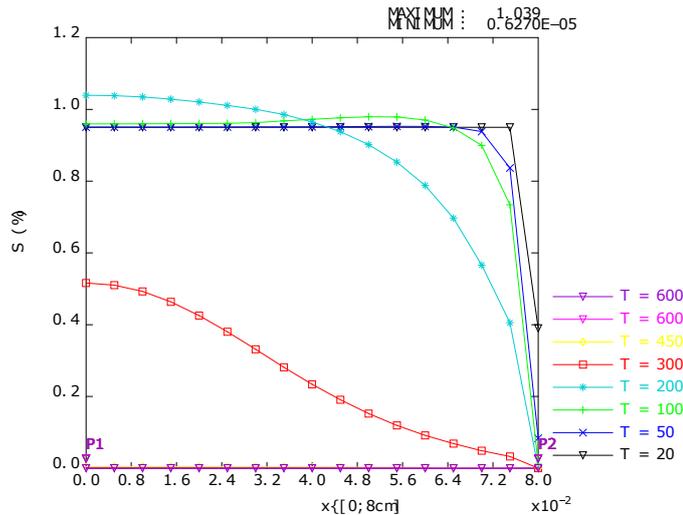


Figura 31 – Saturação.

### 6.3 FENÔMENO DE DESIDRATAÇÃO DA FASE SÓLIDA

De acordo com a definição de saturação proposta pela Eq. (3.4), o valor desse índice relaciona-se com o volume de líquido ( $V_l$ ) existente no meio. No modelo estudado, o volume de líquido é alterado através do acréscimo de água líquida proveniente da desidratação ( $d$ ). Essa evolução é dada pela Eq. (3.60) e ilustrada pela Figura 22. A Eq. (3.60), está inserida no algoritmo e é utilizada para definir a massa de água vinda da desidratação da fase sólida, e consequentemente estabelecer a evolução de porosidade.

Um teste realizado foi fixar um caso em que não ocorreria a desidratação. Isso gera uma situação em que a saturação apenas decai, como ilustrado na Fig. (32):

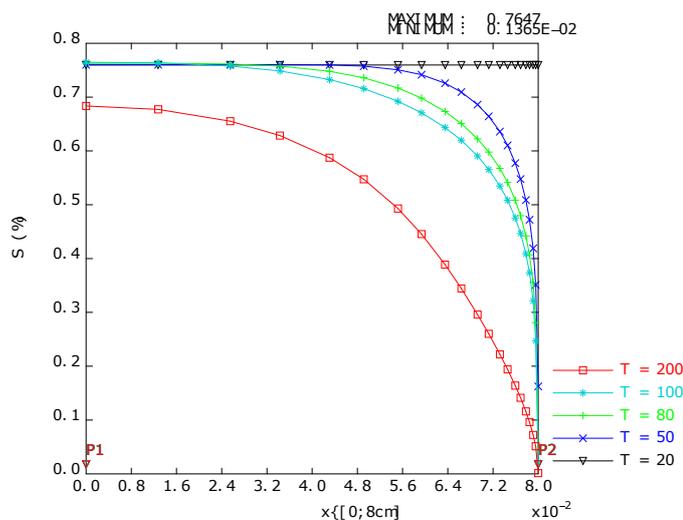


Figura 32 – Perfis de saturação no raio da geometria

Nota-se que se não há desidratação, não ocorre inserção de água líquida no sistema, como consequência não há nenhuma região onde ocorre o aumento da saturação, como é

esperado. Logo, concluiu-se que o modelo responde como o esperado com a anulação desse parâmetro.

#### 6.4 EVOLUÇÃO DA POROSIDADE

Valores de  $S_l > 1$  implicam na existência de um volume de líquido maior que o volume de vazios. Como o volume de vazios está diretamente relacionado com a porosidade, faz sentido analisar a influência dessa nos resultados de saturação. No modelo estudado, o volume de vazios aumenta de acordo com a criação de poros pela desidratação do silicato de cálcio hidratado e da portlandita, e é descrita de acordo com a Eq. (3.61), sendo ilustrada pela Figura 23. Um termo importante dessa equação é a massa específica volumétrica dos hidratos da pasta de cimento ( $\rho_{hid}$ ). Em Nguyen (2013) é utilizado  $\rho_{hid}^* = 800 \text{ kg/m}^3$ , densidade relativa à água em gel presente nos hidratos. A utilização desse valor implica em uma evolução mais rápida de porosidade, e assim gera um crescimento mais acelerado do volume de vazios, porém isso não ameniza o problema com os resultados de saturação.

#### 6.5 MUDANÇA DE FASE: LÍQUIDO - VAPOR

De acordo com a *Hipótese 4*, o evento em estudo envolve duas mudanças de estado. A perda de água por desidratação da fase sólida implica na inserção de água líquida no sistema, o que implica no aumento da saturação. Já a mudança de água líquida para vapor de água, implica na diminuição da saturação. Na Seção 6.3 foi investigada uma dessas mudanças de fases: o fenômeno de desidratação da fase sólida, por isso, esse tópico tratará exclusivamente da transformação de fase de água líquida para vapor de água.

A mudança de estado representada pela vaporização pode ocorrer de três formas distintas, definidas de acordo com a velocidade com a qual a transformação ocorre e com a quantidade de energia fornecida ao sistema, sendo elas a evaporação, a ebulição e calefação. No estudo realizado, considera-se que a mudança de fase ocorre apenas por evaporação e ebulição.

A energia envolvida na mudança de líquido para vapor é representada na Eq. (3.48) pelo termo  $(-L_{l \rightarrow v}(T)\mu_{l \rightarrow v})$ , onde  $L_{l \rightarrow v}(T)$  representa o calor latente de vaporização ( $J/kg$ ) e  $\mu_{l \rightarrow v}$  é a quantidade de água vaporizada por unidade de tempo ( $kg/m^3/s$ ). O calor latente é expresso pela Eq. (3.64) e ilustrado na Figura 25. Assim, a questão se torna como definir a quantidade de água vaporizada em cada instante de tempo. Para isso, é preciso retornar a Eq. (3.18), e reescrevê-la isolando o termo desejado.

$$\mu_{l \rightarrow v} = \frac{\partial d}{\partial t} - \frac{\partial m_l}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{J}_l \quad (6.1)$$

A Eq. (6.1), é discretizada e aplicada antes da resolução do sistema de Eq. (3.50). Logo, conclui-se que esse termo foi bem definido e não ocasiona erros relativos a quantidade de massa líquida que passará pela mudança de fase, entretanto ainda é preciso analisar a frequência ou a taxa com a qual essa transformação física ocorre é condizente com o que ocorre no processo real.

## 6.6 CALOR ESPECÍFICO DA FASE SÓLIDA

Para calcular o calor específico do concreto, é utilizada a Eq. (6.2).

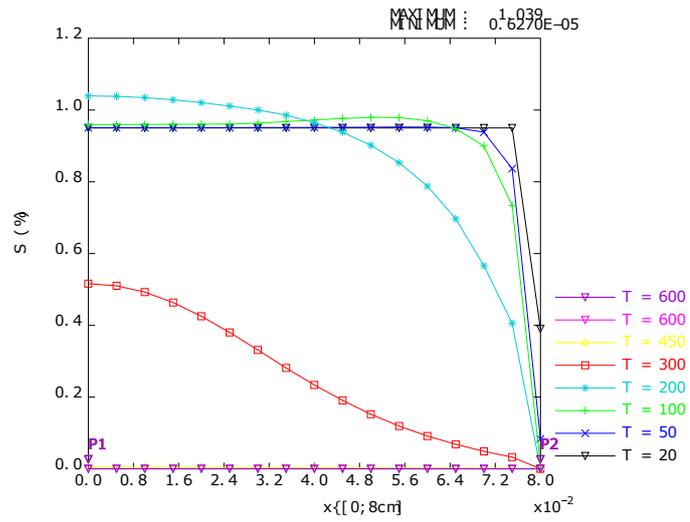
$$c(S_l, d) = \rho_s C_s + \phi \rho_l(T) S_l C_l + (d_0 - d) C_u, \quad (6.2)$$

Nela são utilizados  $C_s$ ,  $C_l$  e  $C_u$ : os calores específicos da fase sólida, líquida e da água ligada, respectivamente, em  $(J/kg^\circ C)$ . O calor específico da fase sólida ( $C_s$ ) representa uma parcela importante nesse cálculo e, no modelo utilizado, era descrito através de uma média ponderada entre os valores dos calores específicos e as massas dos constituintes secos do concreto - cimento e agregados, como definido na Tabela 5.

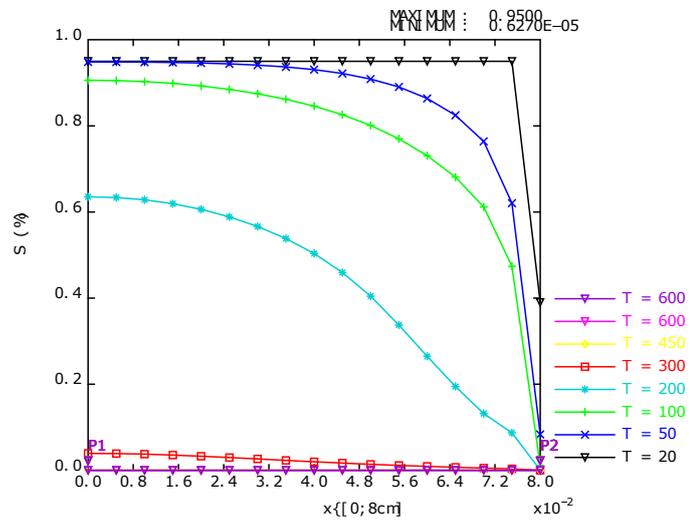
Tabela 5 – Calor específico

Calor específico	$(J/kg^\circ C)$
Cimento ( $C_c$ )	750
Agregado ( $C_g$ )	800
Água líquida ( $C_l$ )	4184
Água ligada ( $C_u$ )	3760
Fase sólida ( $C_s$ )	$\frac{C_c m_c + C_g m_g}{m_c + m_g}$

Para estudar como se comporta esse valor, foi considerada a formulação de concreto utilizada por Pliya (2010), definida na Tabela 3. Realizando os cálculos para esse exemplo, obtém-se  $C_s = 788 J/^\circ C/kg$  que é considerado constante durante todo o processo de aquecimento. Esse valor é consideravelmente inferior aos sugeridos por Neville (2011) e o proposto pelo Eurocódigo (EN:1992-1-2, 2005) e definido na Seção 3.5.15. Adotando essa curva, os resultados de saturação melhoraram, como pode ser observado na Figura 33. Sendo assim, desse ponto em diante, o calor específico da fase sólida será descrita de acordo com o proposto na Seção 3.5.15.



(a) Calor específico proposto por Sercombe, Galle e Ranc (2001)



(b) Calor específico proposto por EN:1992-1-2 (2005)

Figura 33 – Perfis de saturação em função da temperatura externa.

## 7 APLICAÇÕES

### 7.1 INTRODUÇÃO

O objetivo das aplicações desenvolvidas neste capítulo é analisar o comportamento do modelo e utilizá-lo para calcular a distribuição de temperaturas, saturação e pressão em estruturas de concreto quando expostas a elevações de temperatura.

Em situações práticas, as análises realizadas servem para, por meio de estimativas feitas, fornecer subsídios para a elaboração de mecanismos de prevenção e minimização dos efeitos deletérios do fogo sobre um elemento estrutural.

Este capítulo descreve as aplicações desenvolvidas ao longo do trabalho, com base nos conceitos e técnicas numéricas estudados. Inicialmente, são escolhidos três problemas obtidos na literatura para comparar resultados com o modelo aqui estudado. Em seguida, é realizada uma análise paramétrica para analisar o comportamento do modelo quando algumas modificações são feitas. Todas as análises foram desenvolvidas empregando o modelo termo-hídrico implementado no Cast3M.

### 7.2 EXPERIMENTO BASEADO EM Pont, Durand e Schrefler (2007)

Em Pont, Durand e Schrefler (2007), foi realizado um estudo sobre o comportamento termo-hídrico do concreto quando submetido a condições de carregamentos severos, como os típicos de repositórios de rejeitos nucleares. Tal estudo foi feito por meio de um modelo termo-hidro-mecânico para a descrição do concreto sob altas temperaturas implementado no Cast3M. O modelo foi validado para alguns casos de teste utilizando os resultados do código Hitecosp (HITECO, 1999), o qual é usado como referência área, .

Um dos experimentos utilizado por Pont, Durand e Schrefler (2007) foi reproduzido no presente trabalho. Trata-se do aquecimento de uma das bordas de uma laje de concreto, modelada como ilustrado na Figura 34. O aquecimento é imposto na face lateral esquerda: a temperatura sai de  $25^{\circ}C$  e é elevada até  $85^{\circ}C$  com uma velocidade constante de  $0,217^{\circ}C/s$ . O passo de tempo adotado foi de  $23,04s$ .

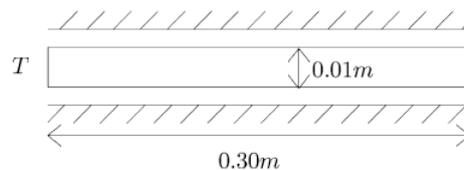


Figura 34 – Esquema da laje de concreto

O concreto utilizado no experimento é um concreto comum (M30 - resistência à

compressão 30MPa), cuja formulação é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – M30 - Formulação do concreto.

Constituinte	( $kg/m^3$ )
Cimento	350
Agregados	1950
Água de mistura	150

Já as condições iniciais do problema são exibidas na Tabela 7. Os parâmetros e propriedades que não foram expostos nessa seção, foram utilizados de acordo com o definido na Seção 3.5.

Tabela 7 – M30 - Condições iniciais.

Dado	Valor
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	25
Saturação	0.48
Porosidade	0.1368
Permeabilidade intrínseca ( $m^2$ )	$3.2 \times 10^{-18}$
Condutividade térmica ( $W/mK$ )	2.0
Calor latente de desidratação ( $kJ/kg$ )	2500

Os resultados de temperatura para o final do período de análise são ilustrados na Figura 35. Pode-se observar que a correlação entre os resultados é boa, logo o modelo utilizado nesse trabalho é capaz de reproduzir o fenômeno estudado adequadamente.

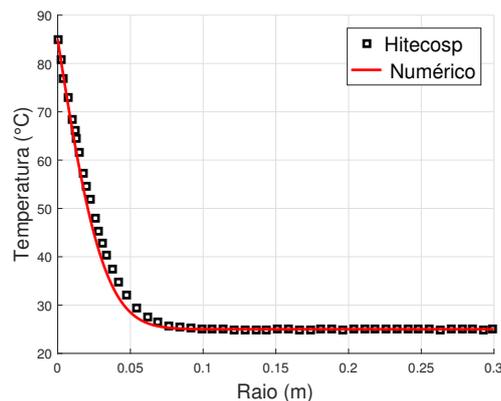


Figura 35 – M30 - Temperaturas

Em relação aos resultados de pressão, o modelo proposto por Pont, Durand e Schrefler (2007) trabalha com pressão de gás ( $P_g$ ), e essa é definida como  $P_g = P_v + P_a$ . Já no modelo adotado nesse trabalho, tem-se apenas pressão de vapor  $P_v$ . Como com as informações existentes em Pont, Durand e Schrefler (2007) não é possível calcular os valores dessas pressões separadamente, optou-se por comparar os resultados de pressão

normalizados, pois independentemente dos valores máximos atingidos, os formatos das curvas devem ser semelhantes. Observando os resultados ilustrados na Figura 36, é possível ver que no modelo proposto por Sercombe, Galle e Ranc (2001) e estudado nesse trabalho, ocorre um pico de pressão na superfície e esse valor decai rapidamente, sem que pressões elevadas atinjam uma área maior da geometria, já a curva de Hitecosp (HITECO, 1999) decai mais suavemente e uma maior região é atingida por valores mais altos de pressão.

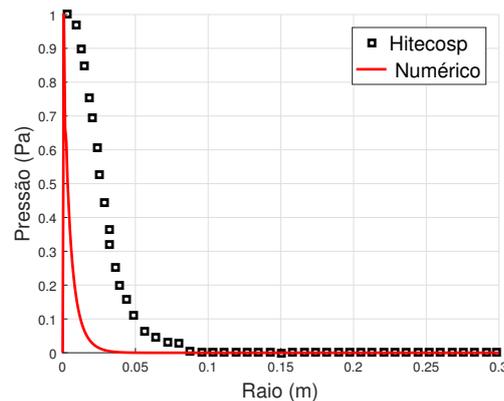


Figura 36 – M30 - Pressão

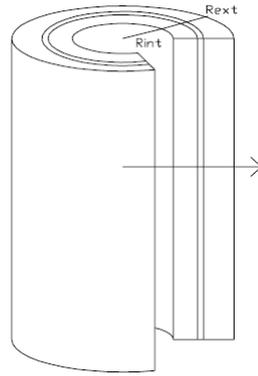
### 7.3 EXPERIMENTO BASEADO EM Pont e Ehlacher (2004)

Em Pont e Ehlacher (2004), é apresentado um modelo termo-hidro-químico para concreto sob altas temperaturas, além disso são realizadas simulações experimentais e numéricas. Um cilindro oco é aquecido na face interna e submetido a ensaios para a medição de temperatura e pressão de gás. Neste trabalho, esse experimento é reproduzido numericamente com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os experimentais.

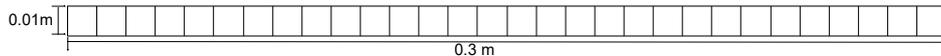
O cilindro ensaiado possui raio externo de  $0,55m$  e raio interno de  $0,25m$ , devido a simetria da geometria e a característica unidirecional do carregamento aplicado, foi possível simplificar a estrutura analisada pelo algoritmo (Figura 37). O aquecimento é imposto na face lateral esquerda: a temperatura é elevada de  $20^{\circ}C$  até  $250^{\circ}C$  com uma velocidade constante de  $5^{\circ}C/h$ . O passo de tempo adotado foi de  $100s$ .

O concreto utilizado no experimento é um concreto de alto desempenho (M100 - resistência à compressão  $100MPa$ ), cuja formulação é apresentada na Tabela 8. As condições iniciais e as propriedades impostas ao problema, são apresentadas na Tabela 9.

Serão apresentados os perfis de temperatura no raio do corpo de prova para as seguintes temperaturas externas:  $120^{\circ}C$ ,  $220^{\circ}C$  e  $250^{\circ}C$  (Figura 38). É possível observar que as evoluções de temperatura se assemelham aos valores experimentais, sendo que as maiores diferenças no interior do raio ocorreram para temperaturas baixas, até  $120^{\circ}C$ . Entretanto, mesmo que a distribuição de temperaturas para esse caso tenha sido a mais



(a) Esquema do cilindro



(b) Malha implementada

Figura 37 – Geometria do experimento

Tabela 8 – M100 - Formulação do concreto.

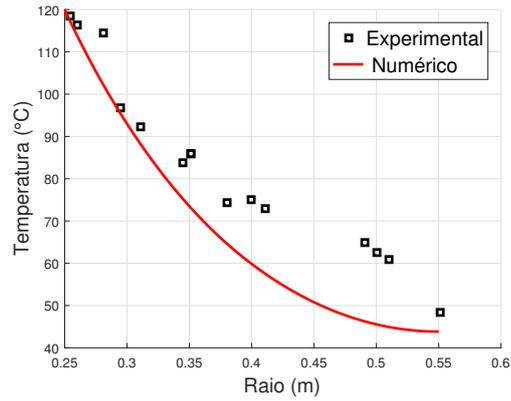
Constituinte	( $kg/m^3$ )
Cimento	377
Agregados	1920
Água de mistura	124

Tabela 9 – M100 - Condições iniciais.

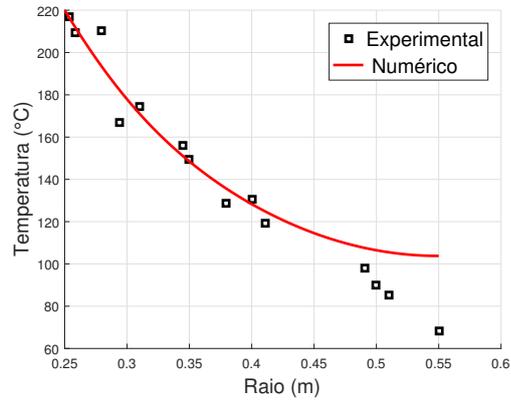
Dado	Valor
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	20
Saturação	0.48
Porosidade	0.1
Permeabilidade intrínseca ( $m^2$ )	$2.0 \times 10^{-17}$
Condutividade térmica ( $W/mK$ )	2.0
Calor latente de desidratação ( $kJ/kg$ )	2500

divergente em relação aos resultados experimentais, foi a evolução que mais se aproximou do resultado esperado para a face interna da geometria. As curvas cujas temperaturas de carregamento eram de  $220^{\circ}C$  e  $250^{\circ}C$  apresentaram temperaturas centrais com erros um pouco maiores.

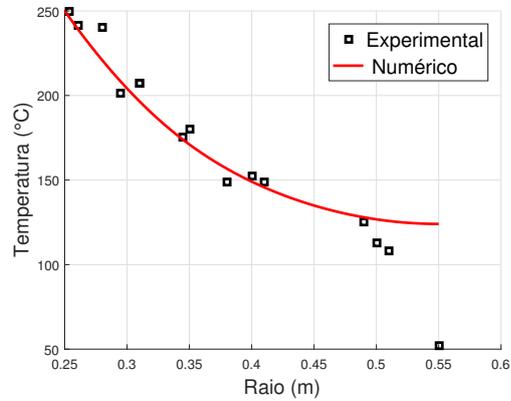
Os resultados de pressão para um ponto a  $3cm$  da face aquecida e outro à  $16cm$ , são apresentados em função do tempo que durou o ensaio (Figura 39). Mais uma vez, o modelo proposto por Pont e Ehrlicher (2004) utiliza pressão de gás ( $P_g$ ), definida como  $P_g = P_v + P_a$ . Por isso, para poder comparar os resultados de pressão serão usadas as curvas normalizadas. Ensaio que medem pressões de gás são relativamente complicados e seus resultados não muito uniformes, o que pode ser observado nas curvas experimentais apresentadas. Comparando-as com as curvas obtidas numericamente, observa-se que essas



(a)  $T_{carr} = 120^\circ C$



(b)  $T_{carr} = 220^\circ C$



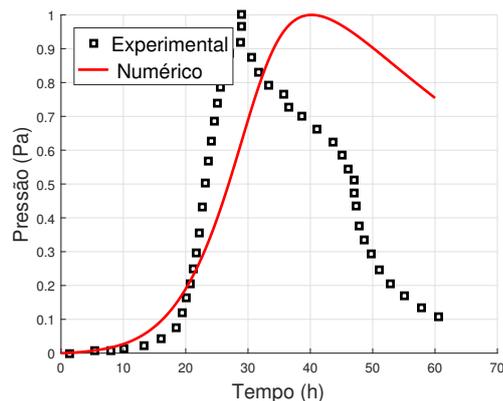
(c)  $T_{carr} = 250^\circ C$

Figura 38 – Perfis de temperatura no raio do corpo de prova

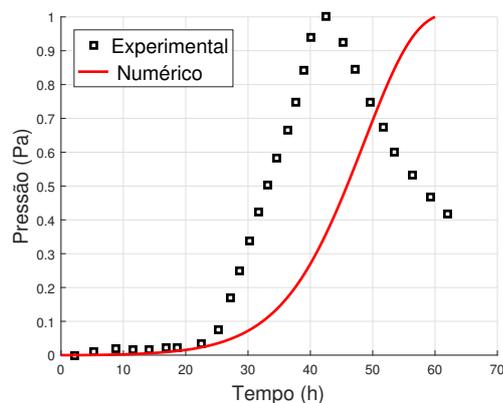
possuem inclinações maiores, tanto durante o aumento quanto no decrescimento dos valores de pressão, fazendo com que essas curvas sejam mais suaves e que o pico máximo de pressão ocorra com um certo atraso.

#### 7.4 EXPERIMENTO BASEADO EM Mindeguia (2009)

Mindeguia (2009) propôs um estudo sobre o fenômeno do *spalling* no concreto. Para isso, foi realizado um estudo experimental utilizando um concreto comum (resistência à



(a) Ponto à 3cm da face aquecida



(b) Ponto à 16cm da face aquecida

Figura 39 – Perfis de pressão em função do tempo

compressão  $40MPa$ ) e um concreto de alto desempenho (resistência à compressão  $60MPa$ ). Foram avaliadas as evoluções de diversas propriedades em função da temperatura, entre elas permeabilidade intrínseca ao gás, porosidade e propriedades térmicas. Além disso, foram medidas as evoluções de temperatura e pressão.

No presente trabalho, foram realizadas duas simulações computacionais de corpos de prova cilíndricos ( $\phi 160 \times h 320 mm$ ), um deles com as características do concreto comum ( $C40$ ) e o outro do concreto de alto desempenho ( $C60$ ). Para a simulação, foram impostas condições semelhantes àsquelas as quais o material foi exposto durante os ensaios em laboratório, a fim de comparar os resultados numéricos obtidos com a utilização do modelo termo-hídrico com os resultados experimentais.

Dada a geometria da estrutura ensaiada, um cilindro, foi utilizada a opção de cálculo axissimétrica do Cast3M, e a geometria adotada para a execução do modelo foi a face de um quarto do corpo de prova, como ilustrado na Figura 40.

Um carregamento térmico na forma de aumento de temperatura foi aplicado nas bordas externas da geometria (representados em vermelho na Figura 40). A temperatura inicial para todo o domínio foi considerada como  $20^{\circ}C$ , a velocidade de aquecimento foi

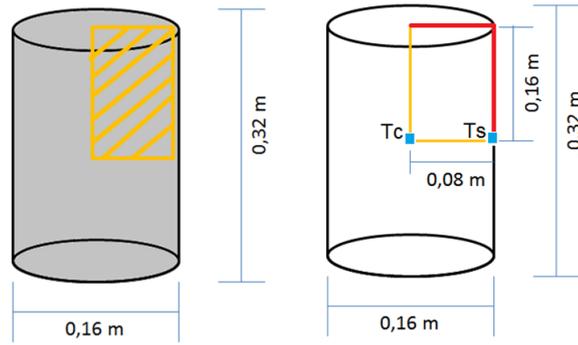


Figura 40 – Esquema do corpo de prova

de  $1^{\circ}C/min$ , e a temperatura final considerada foi  $600^{\circ}C$ . O passo de tempo adotado no modelo numérico foi de  $50s$ . De acordo com condição de simetria da geometria, nas bordas internas (em amarelo na Figura 40) foi considerado fluxo nulo. A formulação dos concretos considerados é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – C40 e C60 - Formulação do concreto

Constituinte	C40	C60
Cimento ( $kg/m^3$ )	350	550
Agregados ( $kg/m^3$ )	1895	1895
Água de mistura ( $kg/m^3$ )	188	165

Nessa aplicação, foram usados os valores experimentais de porosidade e condutividade térmica para interpolar as curvas dessas propriedades, ao invés de utilizar as curvas propostas na Seção 3.5. Os dados experimentais de porosidade e condutividade térmica adotados são apresentados na Tabela 11 e Tabela 12. Já as condições iniciais impostas estão ilustradas na Tabela 13.

Tabela 11 – C40 e C60 - Porosidade

Porosidade	$20^{\circ}C$	$80^{\circ}C$	$120^{\circ}C$	$250^{\circ}C$	$400^{\circ}C$
B40	13.85%	13.85%	13.00%	14.30%	15.95%
B60	10.55%	10.55%	11.50%	13.15%	14.05%

Tabela 12 – C40 e C60 - Condutividade térmica

Condutividade térmica ( $W/mK$ )	$20^{\circ}C$	$150^{\circ}C$	$300^{\circ}C$	$600^{\circ}C$
C40	2.55	1.97	1.45	1.21
C60	2.42	1.81	1.38	0.89

O algoritmo foi executado e seus resultados comparados com os dados experimentais relativo aos pontos ilustrados na Figura 41. Os resultados de temperatura são apresentados na Figura 42 e na Figura 43. Para ambas as formulações de concreto, C40 e C60, é possível observar que a curva obtida numericamente segue a tendência de evolução da experimental.

Tabela 13 – C40 e C60 - Condições iniciais

Dado	C40	C60
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	20	20
Saturação	0.48	0.48
Porosidade	0.1385	0.1055
Permeabilidade intrínseca ( $m^2$ )	$5.53 \times 10^{-16}$	$1.67 \times 10^{-16}$
Condutividade térmica ( $W/mK$ )	2.55	2.42

Existem, entretanto, regiões nas quais os resultados variam mais. Tais perturbações são justificadas pela variação da taxa de aquecimento devido aos processos endotérmicos, consequência das transformações físicas e químicas que a água sofre durante o processo de aquecimento.

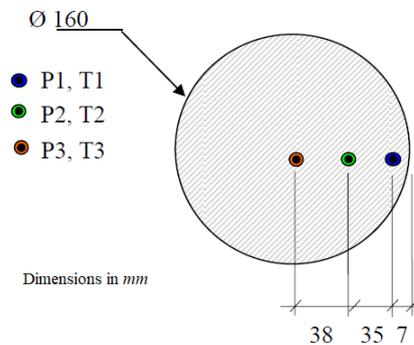
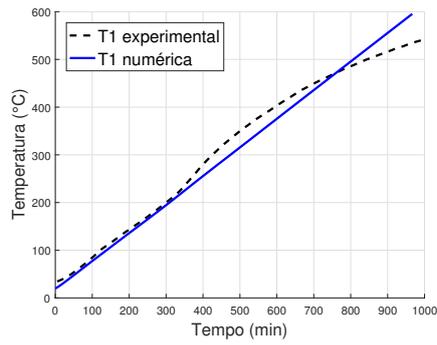
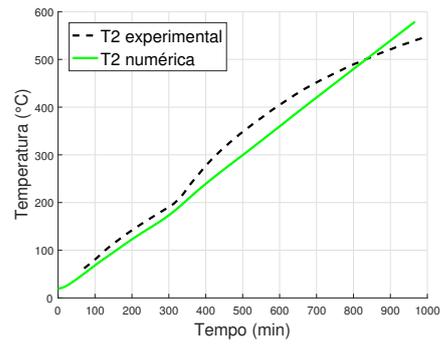


Figura 41 – Diagrama da distribuição dos sensores utilizados para medir a pressão de vapor e os termopares no elemento de teste cilíndrico. Adaptado de Mindeguia (2009).

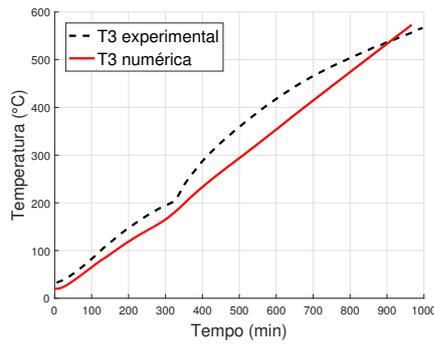
Os resultados de pressão de vapor são mostrados na Figura 44 e na Figura 45. Para ambas as formulações de concreto, C40 e C60, é possível observar que a curva obtida numericamente se assemelha a experimental. Contudo, os valores numéricos são bem menores que os obtidos experimentalmente para os pontos P2 e P3. Já para o ponto P1, os valores numéricos são maiores que os experimentais. Segundo Nguyen (2013), essa diferença pode ser justificada pela superestimação da permeabilidade adotada, o que facilitaria o movimento dos fluidos no interior do esqueleto sólido, diminuindo conseqüentemente os valores de pressão de vapor. Globalmente, a pressão de vapor do concreto de alto desempenho é mais alta que a do concreto comum. Isso ocorre, pois o concreto de alto desempenho, em relação ao concreto comum, possui fator água cimento, permeabilidade e porosidade mais baixas, como pode ser verificado na Tabela 13. Essas características levam a ocorrência de pressões mais altas, pois o escoamento dos fluidos nos poros é dificultado.



(a) P1

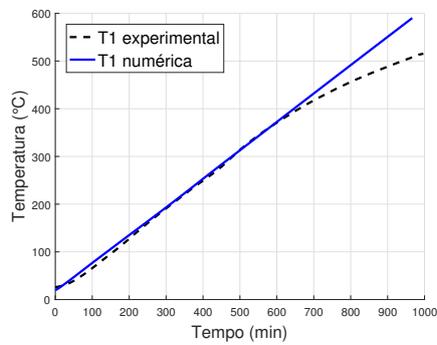


(b) P2

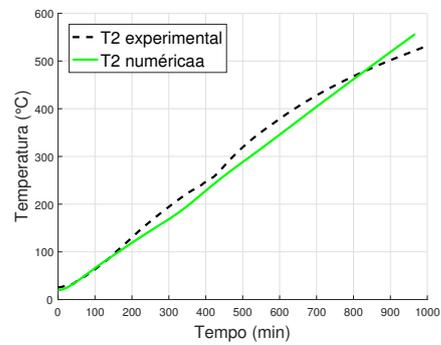


(c) P3

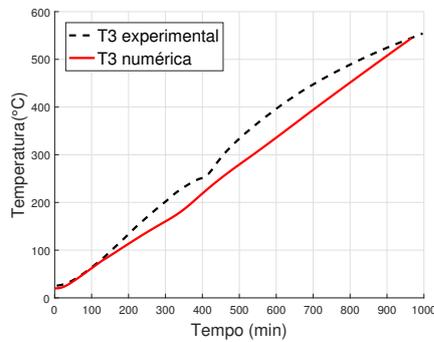
Figura 42 – C40 - Temperaturas



(a) P1

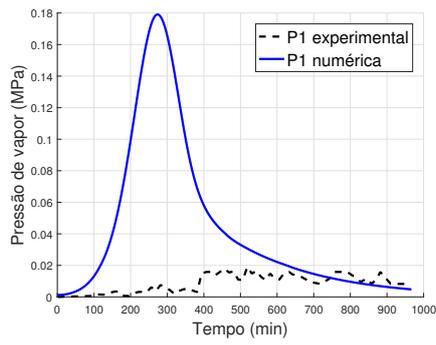


(b) P2

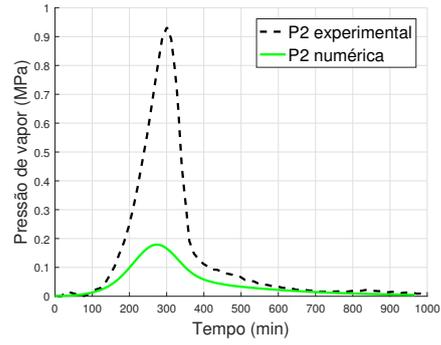


(c) P3

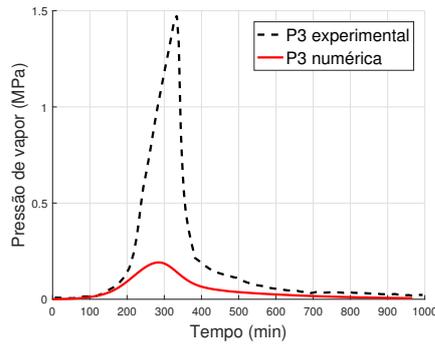
Figura 43 – C60 - Temperaturas



(a) P1

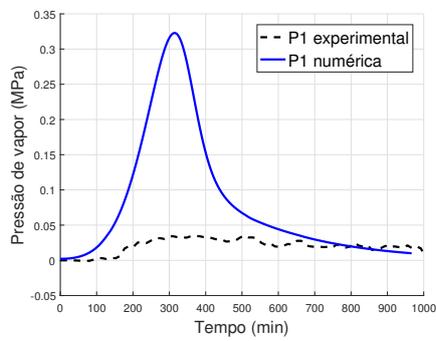


(b) P2

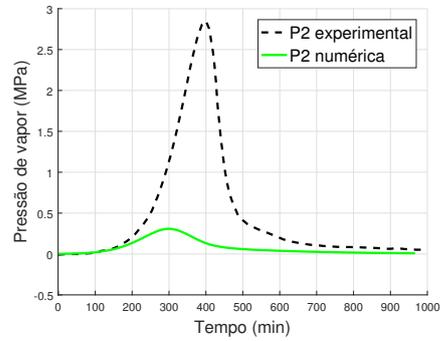


(c) P3

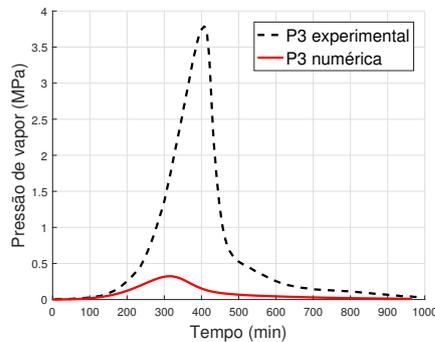
Figura 44 – C40 - Pressão de vapor



(a) P1



(b) P2



(c) P3

Figura 45 – C60 - Pressão de vapor

## 7.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O estudo paramétrico realizado possui o objetivo de determinar até que ponto a variação dos parâmetros característicos influenciam na evolução dos principais campos: temperatura, saturação, pressão de vapor e perda de massa. Serão observados os seguintes parâmetros: condutividade térmica, a relação entre saturação e umidade relativa, a permeabilidade intrínseca à água líquida, e a permeabilidade relativa à água líquida.

### 7.5.1 Geometria

O estudo paramétrico é realizado em um exemplo que consiste em simular o aquecimento de um corpo de prova cilíndrico ( $\phi 110 \times h 220 \text{ mm}$ ). Devido à simetria da geometria escolhida, o problema será tratado na face de 1/4 do corpo de prova, essa é discretizada de acordo com a malha ilustrada na Figura 46.

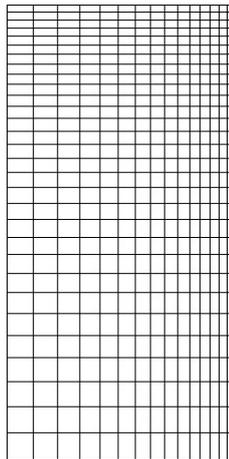


Figura 46 – Discretização da seção do corpo de prova, malha de  $25 \times 50$  elementos refinados nas bordas expostas ao aquecimento.

### 7.5.2 Condições iniciais e de contorno

O corpo de prova que estava inicialmente a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , foi submetido a um aumento de temperatura com velocidade constante de  $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$  até atingir uma temperatura de  $380^\circ\text{C}$ . Essa evolução de temperatura é imposta a face superior e lateral direita, já nas outras duas faces é considerado um fluxo nulo. A saturação inicial é igual a 46% em toda a geometria. A condição de contorno de saturação é calculada de forma a manter a pressão de vapor constante e igual a pressão ambiente nas faces expostas ao carregamento. A porosidade inicial é  $\phi_0 = 9,97\%$ , e a permeabilidade intrínseca inicial é  $K_0 = 2,4 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ .

### 7.5.3 Composição do concreto

O concreto utilizado possui a seguinte composição, apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Traço do concreto utilizado no experimento.

Constituinte	( $kg/m^3$ )
Cimento	350
Agregados	1950
Água de mistura	150

### 7.5.4 Parâmetros considerados

O modelo é executado para cinco casos distintos: o caso padrão que considera a situação em que todas as propriedades evoluem normalmente, e os outros casos, nos quais uma propriedade é fixada ou tem sua evolução alterada.

- Situação normal, todas as evoluções são consideradas de acordo com o proposto na Seção 3.5.
- Condutividade térmica constante e igual àquela obtida após aquecimento até  $60^\circ C$  ( $\lambda_{60} = 1,28W/mK$ ).
- Permeabilidade intrínseca constante e igual à  $K_0 = 2,4 \times 10^{-17}m^2$ .
- Porosidade constante e igual à porosidade inicial ( $\phi_0 = 9,97\%$ ).
- Curva de saturação líquida - umidade relativa experimental extraída de Baroghel-Bouny (1994). A derivada  $\partial h_r / \partial S_l$  influencia no cálculo da condutividade hídrica ( $D_h(S_l, d, T)$ ), Eq. (3.41) e é calculada através de uma aproximação linear por partes da curva experimental. A evolução dessa derivada é dada na Tabela (15) e é comparada com o caso normal que trabalha com a Hipótese 3 do modelo que considera  $h_r = S_l$ , e conseqüentemente,  $\partial h_r / \partial S_l = 1$ .

Tabela 15 – Inclinação da curva de umidade relativa em função da saturação

$S_l$	0,08	0,17	0,22	0,3	0,4	0,5	0,61	0,72	0,83	0,9	0,95
$\partial h_r / \partial S_l$	0,6	2,6	2,2	1	1	0,8	0,8	0,7	1,1	1,2	0,8

### 7.5.5 Análise dos resultados

A análise das curvas de perda de massa, ilustrada na Figura 47, mostra que as variações de condutividade térmica (curva  $\lambda = \lambda_{60}$ ), da relação saturação-umidade (curva  $S_l = S_l(Hr)$ ) e porosidade ( $\phi = \phi_0$ ) não possuem quase nenhum efeito sobre a cinética

da curva de perda de massa. Apenas a variação dos parâmetros de transferência de massa levam a variações significativas, do menos para o mais influente tem-se: a ausência de transferência hídrica na forma líquida (curva  $k_{rl} = 0$ ) e a ausência da variação da permeabilidade intrínseca ao gás (curva  $K = K_0$ ), a qual induz a uma situação na qual a perda de massa é menor durante toda a duração do ensaio.

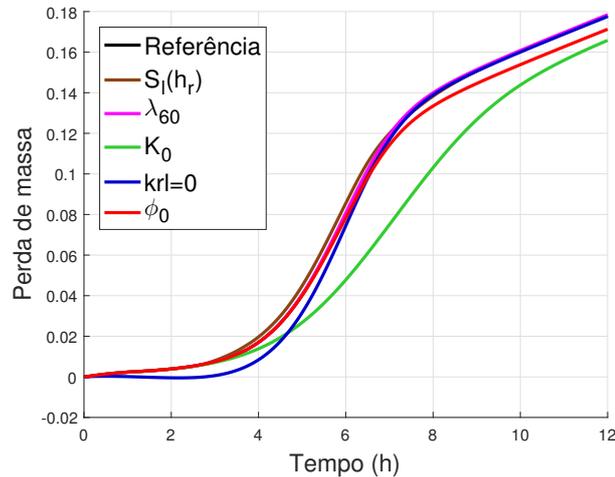


Figura 47 – Perda de massa em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros

Desde que apenas as transferências hídricas na forma líquida não sejam consideradas (curva  $k_{rl} = 0$ ), a evolução da cinética de evolução da perda de massa, apresenta duas fases: para temperaturas inferiores à  $100 - 150^\circ C$ , na qual a velocidade é mais baixa que para a simulação normal, e para temperaturas acima de  $150^\circ C$ , em que a cinética é mais rápida. Isso demonstra a importância da transferência hídrica na forma líquida para baixas temperaturas. Já para situações em que os efeitos capilares são considerados, uma evolução apresentando três fases é obtida: na primeira fase existe uma cinética mais rápida associada ao movimento da água líquida, na segunda fase a cinética é mais lenta e na terceira fase, a velocidade volta a aumentar.

A análise das curvas de pressão de vapor, ilustradas na Figura 48, mostra que a variação da porosidade, a condutividade térmica constante e a permeabilidade relativa líquida constante, resultam em situações nas quais quase não há alteração nos resultados de pressão. Os parâmetros que causam mais alterações são relativos à ausência da permeabilidade intrínseca ao gás e à forma da curva saturação-umidade relativa. No primeiro caso, o pico da pressão de vapor é atrasado em relação à situação normal e possui maior amplitude. Já em relação à influência da curva  $Sl(Hr)$ , é observado ainda uma divergência no formato da curva, a qual apresenta um pico e em seguida um pequeno patamar antes de seguir a tendência normal.

Para a pressão de vapor, os parâmetros que deveriam ser mais influentes são a permeabilidade ao gás e a permeabilidade relativa ao líquido, quanto menor  $k_{rl}$ , mais

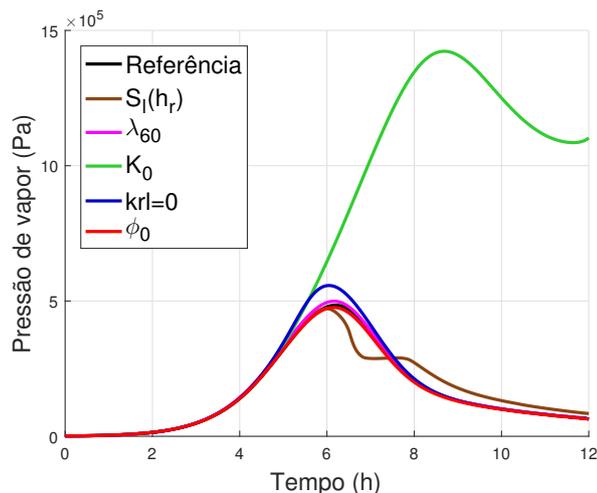


Figura 48 – Pressão de vapor em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros

delimitado é a frente de desidratação, e maior é o pico da pressão de vapor. Pode-se dizer também que apenas os dados de permeabilidade intrínseca ao gás não são suficientes para estimar precisamente as sobrepressões de vapor durante as transferências térmicas. Um limite superior pode ser avaliado, negligenciando as transferências de água sob a forma líquida. Nesse último caso, retorna-se ao modelo de Bazant e Kaplan (1996), para o qual o coeficiente de difusão de água sob todas as suas formas ganha duas ordens de grandeza entre  $95^{\circ}C$  e  $105^{\circ}C$ , o que conduz ao aparecimento de frentes de desidratação e saturação superiores à 1 (devido à desidratação nas zonas saturadas).

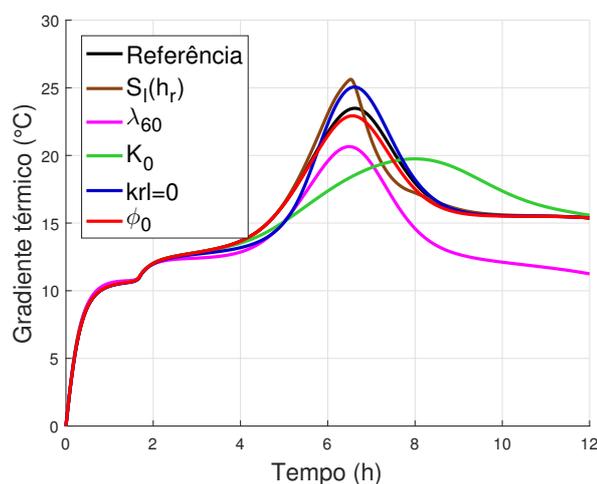


Figura 49 – Gradiente de temperatura em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros

Um comportamento similar é observado na Figura 49: os picos de gradiente térmico são mais marcados quanto menor for a relação entre a permeabilidade a água líquida e ao gás. Isso se explica pela vaporização de uma quantidade de água maior no centro, a qual migrou pouco ou não migrou devido ao efeito do gradiente de pressão de água

líquida. O acoplamento termo-hídrico resultante (calor latente de vaporização) é ainda mais demarcado (amplitude e pico maiores). A constância da permeabilidade intrínseca ao gás leva, como para os outros parâmetros (perda de massa, pressão de vapor), a uma diferença temporal da curva de gradiente térmico. Além disso, o pico do gradiente térmico é ainda mais baixo. Isso se explica por uma maior uniformidade no campo de saturação no raio do corpo de prova (conduz a uma perda de massa mais lenta) durante o aumento da temperatura e, assim, a uma vaporização menos demarcada. Esse resultado mostra que a amplitude dos gradientes térmicos não é necessariamente relacionada ao gradiente das pressões de vapor durante as transições térmicas.

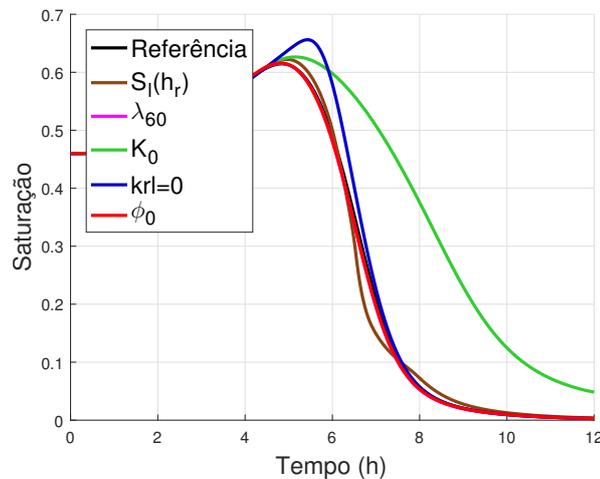


Figura 50 – Saturação em relação ao tempo para diversas combinações de parâmetros

Em relação a Figura 50, novamente as curvas que se destacam são as relativas à permeabilidade relativa ao líquido e a permeabilidade intrínseca ao gás, ambas as quais interferem diretamente nos fenômenos de transporte hídrico.

## 7.6 DISCUSSÃO SOBRE O MODELO E OS RESULTADOS OBTIDOS

Após descrever os fenômenos envolvidos no estudo do comportamento termo-hídrico do concreto e modelo matemático originado a partir deles, fica evidente a complexidade do estudo em questão. Tem-se um modelo no regime transiente que é altamente não-linear, definido através de um sistema de duas equações diferenciais escritas em função de duas variáveis: temperatura e saturação, variáveis que se relacionam entre si. Além disso, os termos das equações envolvem inúmeros parâmetros, como porosidade, massa de água oriunda da desidratação da fase sólida, calor latente de desidratação e vaporização, massa volumétrica, condutividade térmica, permeabilidade e viscosidade. E esses parâmetros são na maioria dos casos definidos em função da saturação e da temperatura.

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos mostra que o modelo

empregado é capaz de reproduzir bem as transferências acopladas de calor e massa que ocorrem no concreto durante o aquecimento entre  $20^{\circ}C$  e  $600^{\circ}C$ . As curvas numéricas de temperatura e pressão de vapor possuem formato semelhante às curvas experimentais. A diferença entre os resultados de pressão de vapor experimentais e numéricos são atribuídos aos valores de permeabilidade aplicados na análise e isso permite observar a influência das propriedades físicas no desempenho do modelo aplicado para descrever o comportamento do concreto sob temperaturas elevadas.

Por isso, trata-se de um modelo delicado, que requer uma calibração cuidadosa dos dados de entrada e das evoluções dos parâmetros utilizados. As divergências que surgem em alguns resultados numéricos podem ser provenientes de alguma incompatibilidade entre as propriedades, mas também podem ser causadas por restrições impostas pelas hipóteses simplificadoras do modelo. Na Eq. (3.38) por exemplo, são descartados os termos que envolvem a derivada da porosidade no tempo, entretanto a evolução da porosidade é descrita pela Eq. (3.61), então mesmo que seja um valor pequeno em relação aos outros termos a variação existe. Assim, ainda é necessário avaliar a veracidade dessa hipótese.

Ainda discorrendo sobre a porosidade, quando essa propriedade foi apresentada na Seção 2.2.4.1, é dito que a microestrutura dos poros depende do tipo e da quantidade de cimento empregado na fabricação do concreto, além da quantidade de água utilizada na mistura e dos agregados utilizados. Os poros são classificados de acordo com a sua interconexão - como abertos, quando estão interligados e permitem o transporte de fluidos; ou como fechados, quando estão isolados. Além disso, o tamanho e a distribuição dos poros influencia na resistência do material. Entretanto, o modelo de porosidade utilizado nesse estudo, é simples, depende apenas da desidratação. A fissuração não é considerada no modelo, logo os poros gerados por ela também não. A distribuição, o tamanho e a interconexão dos poros também não são levados em conta. Consequentemente, a permeabilidade também não engloba essa propriedade.

Essa discussão tem como objetivo mostrar como os eventos estão interligados e influenciam diretamente uns nos outros. Aprimorar o modelo, implica em ajustar equações que o regem e todas as propriedades envolvidas. Um ponto importante é a inclusão dos efeitos mecânicos: a deformação do esqueleto sólido, as tensões envolvidas, o efeito da fissuração na porosidade, por exemplo.

Além disso, tem-se a questão do método numérico empregado. As equações do sistema são tratadas de forma independente e resolvidas de maneira explícita através do algoritmo de Euler. Sabemos que trata-se de um modelo acoplado, então surge a seguinte dúvida: será que essa estratégia de resolução é adequada? A resolução desacoplada facilita a solução das equações, mas talvez implique em erros numéricos que prejudicam a qualidade

dos resultados.

Outra questão que vale ser ressaltada é a relativa às variáveis de estado adotadas. No momento, tem-se a temperatura e a saturação. A temperatura é uma escolha acertada como variável do problema térmico. Já para o problema hídrico, existem diversas quantidades como o teor de umidade, umidade relativa, pressão de vapor e pressão capilar, que podem ser utilizadas. Cada uma delas tem um significado mais adequado em uma dada situação e faixa de temperatura, por isso uma escolha consciente é necessária para facilitar os cálculos e produzir resultados coerentes.

## 8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este trabalho consistiu no estudo do modelo termo-hídrico proposto por Sercombe, Galle e Ranc (2001) para a análise do comportamento do concreto sob situações de temperatura elevada.

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos mostra que o modelo empregado é capaz de reproduzir bem as transferências acopladas de calor e massa que ocorrem no concreto durante o aquecimento entre  $20^{\circ}C$  e  $600^{\circ}C$ . As curvas numéricas de temperatura e pressão de vapor possuem formato semelhante às curvas experimentais. A diferença entre os resultados de pressão de vapor experimentais e numéricos são atribuídos aos valores de permeabilidade aplicados na análise e isso permite observar a influência das propriedades físicas como a permeabilidade, porosidade, condutividade térmica e desidratação no desempenho do modelo aplicado para descrever o comportamento do concreto sob temperaturas elevadas.

O modelo foi capaz de caracterizar o fenômeno do *spalling* através dos picos de pressões de vapor, principalmente para os concretos de alto desempenho. Entretanto, é importante reconhecer as limitações do modelo. Os valores de pressões de vapor inferiores aos medidos experimentalmente sugere que o modelo termo-hídrico necessita de calibrações acuradas dos parâmetros e propriedades utilizados.

É preciso fazer considerações sobre as hipóteses do modelo, sendo a indeformabilidade da fase sólida uma delas. Sabe-se que os gradientes de temperatura e pressão geram tensões internas que influenciam em aspectos relativos aos danos da estrutura. Pode-se definir por dano tanto as fissuras de origem termo-mecânicas quanto a porosidade inicial e a porosidade desenvolvida devido aos fenômenos de desidratação.

Como trabalhos futuros, propõe-se a revisão do método numérico empregado, a utilização de modelos mais refinados para descrever o fenômeno da desidratação, a porosidade e a permeabilidade. Por fim, os danos presentes nos materiais afetam a propagação do calor e, conseqüentemente, o fluxo de massa. Por isso, propõe-se também incluir o acoplamento mecânico, incluindo a fissuração do material.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO, C; ANDRADE, C; KHOURY, GA. Porosity & microcracking. **Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy**, p. 9–13, 2003.
- AMARAL, Rafaela de Oliveira. **Análise computacional termo-mecânica de estruturas de concreto sujeitas a temperaturas elevadas**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.
- AMARAL, Rafaela de Oliveira. **Simulação do comportamento de estruturas de concreto submetidas a incêndios**. 2011. Monografia (Bacharel Engenharia Civil) Universidade Federal de Juiz de Fora.
- BAROGHEL-BOUNY, V. **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons-méthodes, analyse, interprétation [Characterization of cement pastes and concretes-methods, analysis, interpretations]**. [S.l.], 1994.
- BAZANT, Zdenek P; KAPLAN, Maurice F. **Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models**. [S.l.]: Longman, 1996.
- CHOINSKA, Marta; KHELIDJ, Abdelhafid; CHATZIGEORGIOU, George; PIJAUDIER-CABOT, Gilles. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 79–88, 2007.
- COUSSY, Olivier. **Poromechanics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- DIAMOND, S. The microstructure of cement paste in concrete. In: **VIII International Cong. Chem. Cem.** Rio de Janeiro - RJ, Brazil: [s.n.], 1986. v.1, p. 113–121.
- DIAS, Júlia Pavel. **Simulação Termo-hídrica de Estruturas de Concreto via Cast3M**. 2017. Monografia (Bacharel Engenharia Civil) Universidade Federal de Juiz de Fora.
- EN:1992-1-2. **Eurocode2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design**. 2005.
- FELDMAN, R.F.; SEREDA, P.J. A new model for hydrated portland cement and its practical implications. **Engineering Journal**, v. 53, p. 53–59, 1970.
- FERREIRA, Anna Paula. **Modelagem dos fenômenos de transporte termo-hídricos em meios porosos submetidos a temperaturas elevadas: aplicação a uma bicamada rocha-concreto**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.
- FERREIRA, Anna Paula G.; FARAGE, Michèle C.R.; BARBOSA, Flávio S.; NOUMOWÉ, Albert; RENAULT, Norbert. Thermo-hydric analysis of concrete-rock bilayers under fire conditions. **Engineering Structures**, v. 59, p. 765–775, 2014.
- FILHO, Luiz Carlos Pinto da Silva. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

GALLE, C.; SERCOMBE, J.; PIN, M.; ARCIER, G.; BOUNIOL, P. Behavior of High Performance Concrete Under High Temperature (60-450 C) for Surface Long-Term Storage: Thermo-Hydro-Mechanical Residual Properties. **MRS Online Proceedings Library Archive**, v. 663, 2000.

GAWIN, Dariusz; MAJORANA, Carmelo E; PESAVENTO, Francesco; SCHREFLER, Bernhard A. A fully coupled multiphase fe model of hygro-thermo-mechanical behaviour of concrete at high temperature. In: **Computational Mechanics., Onate, E. & Idelsohn, SR (eds.), New Trends and Applications., Proc. of the 4th World Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires**. [S.l.: s.n.], 1998. p. 1–19.

GAWIN, D.; PESAVENTO, F.; SCHREFLER, B.A. Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 192, n. 13-14, p. 1731–1771, mar. 2003. ISSN 00457825.

GUO, Zhenhai; SHI, Xudong. **Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures**. [S.l.]: Elsevier, 2011.

HITECO, Brite Euram MII BRPR-CT95-0065. Understanding and industrial application of high performance concrete in high temperature environment. **Final Report**, 1999.

HOGGE, MA. A comparison of two-and three-level integration schemes for non-linear heat conduction. **Numerical Methods in Heat Transfer**, p. 75–90, 1981.

HUONG, LE Thi Thu. **Étude Multi- Échelle du Comportement Thermo-Hydro-Mécanique des Matériaux Cimentaires**. Tese (Doutorado) — Université Paris-Est, 2011.

KANEMA, M; NOUMOWÉ, A; GALLIAS, J-L; CABRILLAC, R. Influence of the mix parameters and microstructure on the behaviour of concrete at high temperature. In: **Proceedings of 18th international conference on structural mechanics in reactor technology**. [S.l.: s.n.], 2005.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

LION, Maxime; SKOCZYLAS, Frédéric; LAFHAJ, Zoubeir; SERSAR, M. Experimental study on a mortar. temperature effects on porosity and permeability. residual properties or direct measurements under temperature. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 35, n. 10, p. 1937–1942, 2005.

MEHTA, Kumar; MONTEIRO, Paulo. **Concrete Microstructure, Properties, and Materials**. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2006.

MINDEGUIA, Jean-Christophe. **Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons**. Tese (Doutorado) — Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.

MINDEGUIA, Jean-Christophe; PIMIENTA, Pierre; NOUMOWÉ, Albert; KANEMA, Mulumba. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 477–487, mar. 2010.

- MORAIS, Marcus VG de; BARY, Benoit; DURAND, Sabine; RANC, Guillaume; PONT, Stefano Dal. Numerical analysis of coupled thermo-hydro-mechanical models for concrete exposed to moderate temperatures. In: **XXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2007)**. [S.l.: s.n.], 2007.
- MORAIS, Marcus V.G. de; PLIYA, Prosper; NOUMOWÉ, Albert; BEAUCOUR, Anne-Lise; ORTOLA, Sophie. Contribution to the explanation of the spalling of small specimen without any mechanical restraint exposed to high temperature. **Nuclear Engineering and Design**, v. 240, n. 10, p. 2655–2663, out. 2010. ISSN 00295493.
- MORAIS, Marcus Vinicius G. de; NOUMOWÉ, Albert; KANEMA, Mulumba; GALLIAS, Jean-Louis; CABRILLAC, Richard. Transferts thermo-hydriques dans un élément en béton exposé à une température élevée: Approches numérique et expérimentale. **24ème Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC06)**, p. 1–10, 2006.
- NEVILLE, Adam M. **Properties of concrete**. [S.l.]: Pearson, 2011.
- NGUYEN, Van Thai. **Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température: application à des éprouvettes de grandes dimensions**. Tese (Doutorado) — Cergy-Pontoise, jul. 2013.
- PETRUCCI, E. G. R. A ação do fogo sobre as estruturas de concreto armado e protendido. In: **Colóquio sobre durabilidade do concreto**. São Paulo - SP, Brasil: [s.n.], 1972.
- PEZZANI, Pascal. Propriétés thermodynamiques de l'eau. **Techniques de l'ingénieur. Technologies de l'eau**, Techniques de l'ingénieur, v. 1, n. W120, 1992.
- PHAN, L.T.; CARINO, N.J. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 1, p. 54–66, 2002. Cited By 128.
- PLIYA, Prosper. **Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée**. Tese (Doutorado) — Université de Cergy-Pontoise, nov. 2010.
- PONT, S.Dal; EHRLACHER, A. Numerical and experimental analysis of chemical dehydration, heat and mass transfers in a concrete hollow cylinder submitted to high temperatures. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 1, p. 135–147, jan. 2004.
- PONT, Stefano Dal. **Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température**. Tese (Doutorado) — École Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- PONT, S. Dal; DURAND, S.; SCHREFLER, B.A. A multiphase thermo-hydro-mechanical model for concrete at high temperatures—Finite element implementation and validation under LOCA load. **Nuclear Engineering and Design**, v. 237, n. 22, p. 2137–2150, nov. 2007.
- RANC, Guillaume; SERCOMBE, Jérôme; RODRIGUES, Sylvain. Comportement à haute température du béton de structure: Impact de la fissuration sur les transferts hydriques. **Revue Française de Génie Civil**, v. 7, n. 4, p. 397–424, abr. 2003.

RAZNJEVIC, K.; POADHORSKY, R. **Tables Et Diagrammes Thermodynamique**. [S.l.]: Eyrolles, 1970.

RIBEIRO, José Carlos L. **Simulação Via Método dos Elementos Finitos da Distribuição Tridimensional de Temperatura em Estruturas em Situação de Incêndio**. Dissertação (Mestrado) — UFMG, mar. 2004.

RIPANI, Marianela; ETSE, Guillermo; VRECH, Sonia; MROGINSKI, Javier. Thermodynamic gradient-based poroplastic theory for concrete under high temperatures. **International Journal of Plasticity**, v. 61, p. 157–177, out. 2014.

ROSTASY, FS; WEI $\beta$ , R; WIEDEMANN, G. Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 157–164, 1980.

SERCOMBE, J; GALLE, C; RANC, G. Modélisation du comportement du béton à haute température: Transferts des fluides et de chaleur et déformations pendant les transitoires thermiques. **Note Technique SCCME**, v. 81, 2001.

SOARES, Thaís Rossi Lopes. **Análise paramétrica termo-hídrica do concreto submetido a altas temperaturas**. 2016. Monografia (Bacharel Engenharia Civil) Universidade Federal de Juiz de Fora.

TANYILDIZI, Harun; COSKUN, Ahmet. The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 11, p. 2269 – 2275, 2008.

TSHIMANGA, Mulumba Kanema. **Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons**. Tese (Doutorado) — Thèse de doctorat, université de Cergy-Pontoise, 2007.

WEI, Chen. **Etude experimentale de la permeabilite du beton sous conditions thermiques et hydriques variables**. Tese (Doutorado) — École Centrale de Lille, Lille, France, jan. 2013.

WYLEN, G.J. Van; BORGNACKE, C.; SONNTAG, R.E. **Fundamentos da termodinâmica**. [S.l.]: Edgard Blucher, 2009. (Série Van Wiley).