

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Marcelo Caetano Monteiro**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO PARA  
SIMULAR OS EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE ESTRUTURAS DE  
CONCRETO**

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Monteiro, Marcelo Caetano.

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO PARA  
SIMULAR OS EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE ESTRUTURAS  
DE CONCRETO / Marcelo Caetano Monteiro. – 2023.

88 f. : il.

Orientadora: Michèle Cristina Resende Farage

Coorientador: George Oliveira Ainsworth Junior

Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Universidade Federal de Juiz de  
Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil, 2023.

1. Simulações. 2. Temperatura. 3. Saturação. 4. Concreto. I. Farage,  
Michèle Cristina Resende, orient. II. Junior, George Oliveira Ainsworth,  
coorient. III. Título.

Marcelo Caetano Monteiro

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO PARA  
SIMULAR OS EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE ESTRUTURAS DE  
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. D.Sc. Michèle Cristina Resende Farage

Coorientador: Prof<sup>º</sup>. D.Sc. George Oliveira Ainsworth Junior

Juiz de Fora

2023

**Marcelo Caetano Monteiro**

**Implementação de um modelo termo-hídrico para simular os efeitos da temperatura sobre estruturas de concreto**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 24 de março de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

**Dr.ª Michele Cristina Resende Farage** - Orientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora

**Dr. George Ainsworth Junior** - Coorientador e Presidente da banca  
Universidade Federal de Juiz de Fora

**Dr.ª Flávia de Souza Bastos**  
Universidade Federal de Juiz de Fora

**Dr. Marcos Martinez Silvano**  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca**  
Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 14/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Goliatt da Fonseca, Professor(a)**, em 24/03/2023, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flavia de Souza Bastos, Professor(a)**, em 24/03/2023, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **George Oliveira Ainsworth Junior, Professor(a)**, em 24/03/2023, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARCOS MARTINEZ SILVOSO, Usuário Externo**, em 27/03/2023, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michele Cristina Resende Farage, Professor(a)**, em 28/03/2023, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1185155** e o código CRC **94F7C228**.

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter guiado meus passos e por ter me dado forças para jamais desistir. Aos meus familiares por todo o apoio e compreensão em todos os momentos. A minha esposa, Wânia, pela compreensão nos momentos ausentes e por todo o apoio e sugestões.

Agradeço a todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, pelo conhecimento compartilhado, em especial a minha orientadora Michèle Cristina Resende Farage e ao meu coorientador George Oliveira Ainsworth Junior, pela paciência perante as dúvidas e por toda a experiência e conhecimento compartilhados, pois sem o suporte dos mesmos, essa pesquisa não seria possível.

## RESUMO

A modelagem do comportamento de estruturas de concreto expostas a temperaturas elevadas permite estudar diversas condições que nem sempre são possíveis em estudos experimentais, tanto do ponto vista físico, quanto econômico, em um intervalo de tempo muito menor, além de propiciar a análise das principais propriedades constituintes do material. O intuito da pesquisa é aprimorar um modelo termo-hídrico buscando, por meio de simulações numéricas, reproduzir de modo adequado resultados experimentais encontrados na literatura. Foi realizada uma revisão sobre os principais aspectos relacionados ao tema, entre eles a descrição das propriedades térmicas do concreto e seu comportamento como meio poroso. Entre os principais aperfeiçoamentos aplicados ao modelo estudado está a alteração do esquema de marcha no tempo, a consideração dos termos de derivada no tempo da porosidade na equação de conservação de massa e a mudança na evolução do calor latente de vaporização, propriedade utilizada como fonte geradora de calor. O programa utilizado para as simulações numéricas foi o Cast3M, que é um código baseado no método dos elementos finitos para mecânica dos sólidos e dos fluidos. É um sistema completo que integra ao mesmo tempo funções de cálculo, construção do modelo (pré-processador) e processamento dos resultados (pós-processador). Os resultados numéricos possibilitam aferir a qualidade do modelo proposto e servem de apoio para futuros desenvolvimentos. A análise dos resultados se respalda na comparação com os resultados alcançados por Ferreira (2011) e Amaral (2014) para a bicamada rocha-concreto. Observa-se uma nítida similaridade entre os resultados numéricos e experimentais para a temperatura e uma evidente melhora nos resultados da saturação. Discrepâncias notadas apontam a demanda de estudos mais aprofundados a respeito da formulação das propriedades hídricas utilizadas.

Palavras-chave: Simulações. Temperatura. Saturação. Concreto.

## ABSTRACT

Modeling the behavior of concrete structures exposed to high temperatures allows the study of different conditions that are not always possible in experimental studies, both from a physical and economic point of view, in a much shorter time interval, in addition to providing the analysis of the main constituent properties of material. The purpose of the research is to improve a thermo-hydro model seeking, through numerical simulations, to adequately reproduce experimental results found in the literature. A review was carried out on the main aspects related to the subject, including the description of the thermal properties of concrete and its behavior as a porous medium. Among the main improvements applied to the studied model is the alteration of the time march scheme, the consideration of the porosity time derivative terms in the mass conservation equation and the change in the evolution of the latent heat of vaporization, a property used as a generating source of heat. The program used for numerical simulations was Cast3M, which is a code based on the finite element method for solid and fluid mechanics. It is a complete system that integrates calculation, model building (pre-processor) and result processing (post-processor) functions at the same time. Numerical results make it possible to assess the quality of the proposed model and serve as support for future developments. The analysis of the results is based on the comparison with the results achieved by Ferreira (2011) and Amaral (2014) for the rock-concrete bilayer. There is a clear similarity between the numerical and experimental results for temperature and an evident improvement in the saturation results. Noticed discrepancies point to the demand for more in-depth studies regarding the formulation of the water properties used.

Keywords: Simulations. Temperature. Saturation. Concrete.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da saturação do Concreto Convencional à 750°C . . . . .	17
Figura 2 – Modelo esquemático dos tipos de água associados ao hidrato de silicato de cálcio . . . . .	25
Figura 3 – Porosidade total da água em função da temperatura . . . . .	27
Figura 4 – Calor específico volumétrico $c_v(T)$ . . . . .	30
Figura 5 – Calor específico $c_p(T)$ . . . . .	30
Figura 6 – Condutividade térmica do concreto . . . . .	31
Figura 7 – Um volume de controle diferencial para análise de condução de calor	37
Figura 8 – Distribuição de volume das diferentes fases do concreto . . . . .	41
Figura 9 – Evolução da desidratação em função da temperatura . . . . .	48
Figura 10 – Evolução da permeabilidade intrínseca ao gás $K_v$ . . . . .	49
Figura 11 – Evolução da permeabilidade intrínseca à água $K_l$ . . . . .	49
Figura 12 – Evolução das permeabilidades relativas $k_{rv}$ e $k_{rl}$ . . . . .	50
Figura 13 – Evolução da porosidade $\phi$ . . . . .	50
Figura 14 – Evolução da pressão de vapor saturante . . . . .	51
Figura 15 – Evolução da massa volumétrica da água líquida . . . . .	52
Figura 16 – Evolução da massa volumétrica de vapor d'água . . . . .	53
Figura 17 – Evolução da viscosidade dinâmica da fase líquida $\eta_l$ . . . . .	53
Figura 18 – Evolução da viscosidade dinâmica da fase de vapor $\eta_v$ . . . . .	54
Figura 19 – Evolução da condutividade térmica do concreto . . . . .	55
Figura 20 – Evolução da condutividade térmica da rocha . . . . .	55
Figura 21 – Geometria e instrumentação . . . . .	58
Figura 22 – Evolução do Calor Latente de Vaporização até 800°C . . . . .	59
Figura 23 – Evolução do Calor Latente de Vaporização até 380°C . . . . .	59
Figura 24 – Geometria utilizada . . . . .	61
Figura 25 – Estrutura do modelo . . . . .	62
Figura 26 – Procedimento THYD . . . . .	63
Figura 27 – Evolução da temperatura nos termopares no concreto CC-600 e CC-750 . . . . .	65
Figura 28 – Distribuição de Temperaturas no concreto CC-750 . . . . .	66
Figura 29 – Evolução do Calor Latente de Vaporização até 750°C . . . . .	67
Figura 30 – Evolução da porosidade e saturação no concreto CC-600 . . . . .	68
Figura 31 – Evolução da porosidade no CC-600 e CC-750 . . . . .	69
Figura 32 – Evolução da saturação no concreto CC-600 . . . . .	69
Figura 33 – Evolução da saturação no concreto CC-750 . . . . .	70
Figura 34 – Geometria utilizada . . . . .	71
Figura 35 – Evolução da Saturação . . . . .	72

Figura 36 – Evolução da porosidade e saturação . . . . .	73
Figura 37 – Evolução da temperatura nos termopares no concreto CAD-600 e CAD-750 . . . . .	75
Figura 38 – Distribuição de Temperaturas no concreto CAD-750 . . . . .	76
Figura 39 – Evolução da porosidade no CAD-600 e CAD-750 . . . . .	77
Figura 40 – Evolução da saturação no concreto CAD-600 . . . . .	77
Figura 41 – Evolução da saturação no concreto CAD-750 . . . . .	78
Figura 42 – Evolução da porosidade e saturação . . . . .	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade térmica do concreto à temperatura ambiente . . .	32
Tabela 2 – Propriedades dos materiais medidas experimentalmente a temperatura ambiente . . . . .	56
Tabela 3 – Dados de entrada dos concretos no modelo . . . . .	56
Tabela 4 – Dados de entrada da rocha no modelo . . . . .	57
Tabela 5 – Calores específicos . . . . .	57
Tabela 6 – Condições iniciais em temperatura e saturação . . . . .	57
Tabela 7 – Formulação dos concretos em $kg/m^3$ . . . . .	57
Tabela 8 – Saturação . . . . .	70
Tabela 9 – Formulação do concreto de Pliya (2010) . . . . .	71
Tabela 10 – Condições iniciais de Pliya (2010) . . . . .	72
Tabela 11 – Formulação do concreto de Nguyen (2013) . . . . .	73
Tabela 12 – Condições iniciais de Nguyen (2013) . . . . .	73
Tabela 13 – Saturação . . . . .	79
Tabela 14 – Formulação do concreto de Nguyen (2013) . . . . .	79
Tabela 15 – Condições iniciais de Nguyen (2013) . . . . .	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Concreto de alto desempenho
CC	Concreto convencional
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DMT/CEA	Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Énergie Atomique
EN	Norma Européia
L2MGC	Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil
NBR	Norma Brasileira
PEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
TH	Termo-Hídrico
THM	Termo-Hidro-Mecânico
UCP	Université Cergy-Paris
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta L$	Alongamento
Å	Angstrom
$A$	Área
$c_p$	Calor específico
$c_v$	Calor específico volumétrico
$C_u$	Calor específico da água ligada
$C_l$	Calor específico da fase líquida
$C_s$	Calor específico da fase sólida
$L_{s \rightarrow l}$	Calor latente de desidratação
$L_{l \rightarrow v}$	Calor latente de vaporização
$cm$	Centímetro
$\alpha$	Coefficiente de expansão térmica
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$L$	Comprimento
$L_0$	Comprimento inicial
$D$	Condutividade hídrica
$\lambda$	Condutividade térmica
$\lambda_c$	Condutividade térmica do concreto
$\varepsilon$	Deformação térmica
$\rho_a$	Densidade aparente
$\rho_r$	Densidade real
$d$	Desidratação
$\Delta T$	Diferença de temperatura
$q_x$	Fluxo de calor na direção x
$Q_h$	Fluxo integrado nos nós
$G$	Fonte geradora de calor
$^{\circ}C$	Grau Celsius
$J$	Joule
$m_s$	Massa da fase sólida
$m_g$	Massa de agregados
$m_{bw}$	Massa de água ligada a matriz sólida
$d_0$	Massa de água ligada inicial
$m_l$	Massa de água líquida
$m_c$	Massa de cimento
$m_v$	Massa de vapor de água
$\rho$	Massa específica
$\rho_v$	Massa volumétrica da fase de vapor
$\rho_l$	Massa volumétrica da fase líquida
$C$	Matriz de capacidade
$D_h$	Matriz de condutividade hídrica

$MPa$	Megapascal
$\mu m$	Micrômetro
$mm$	Milímetro
$E$	Módulo de elasticidade
$nm$	Nanômetro
$K$	Permeabilidade
$K_v$	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
$p_v$	Pressão de vapor
$\mu_{l \rightarrow v}$	Quantidade de água vaporizada
$\Delta P$	Queda de pressão
$kg$	Quilograma
$fc$	Resistência à compressão
$ft$	Resistência à tração
$S_l$	Saturação em água líquida
$Q$	Taxa de descarga
$T$	Temperatura
$t$	Tempo
$u$	Umidade
$h_r$	Umidade relativa
$\eta$	Viscosidade dinâmica
$\eta_v$	Viscosidade dinâmica da fase de vapor
$\eta_l$	Viscosidade dinâmica da fase líquida
$\Omega$	Volume
$V_l$	Volume de líquido
$V_v$	Volume de vapor
$V_{vazios}$	Volume de vazios
$V_p$	Volume poroso
$V_s$	Volume sólido
$V_t$	Volume total
$V_0$	Volume total inicial
$W$	Watt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>15</b>
1.1	Linha do tempo do modelo em estudo . . . . .	16
1.2	Objetivo . . . . .	19
1.3	Estrutura do trabalho . . . . .	19
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO CONCRETO E DA ROCHA E A INFLUÊN- CIA DA TEMPERATURA . . . . .</b>	<b>20</b>
2.1	Descrição do concreto e a influência da temperatura . . . . .	20
2.1.1	Configuração do concreto . . . . .	20
2.1.1.1	Pasta de cimento hidratada . . . . .	20
2.1.1.1.1	Efeito da Alta Temperatura na Pasta de Cimento . . . . .	22
2.1.1.1.2	Vazios na pasta de cimento hidratada . . . . .	23
2.1.1.1.3	Água na pasta de cimento hidratada . . . . .	24
2.1.1.2	Agregados . . . . .	25
2.1.1.3	Propriedades do concreto como meio poroso . . . . .	26
2.1.1.3.1	Porosidade . . . . .	26
2.1.1.3.2	Permeabilidade . . . . .	27
2.1.2	Concreto sob temperaturas elevadas . . . . .	28
2.1.3	Fenômeno do “ <i>spalling</i> ” . . . . .	28
2.1.4	Propriedades térmicas do concreto . . . . .	29
2.1.4.1	Calor específico . . . . .	29
2.1.4.2	Condutividade térmica . . . . .	30
2.1.4.3	Massa específica . . . . .	32
2.1.4.4	Coefficiente de dilatação térmica do concreto . . . . .	33
2.2	DESCRIÇÃO DA ROCHA . . . . .	33
2.2.1	Estrutura das rochas sedimentares . . . . .	34
2.2.1.1	Rocha sedimentar e meio poroso . . . . .	34
<b>3</b>	<b>MODELO FÍSICO E FORMULAÇÃO TERMO-HÍDRICA . .</b>	<b>36</b>
3.1	Os modelos de Transferência de Calor . . . . .	36
3.2	Equação de Condução de Calor . . . . .	36
3.2.1	Fonte geradora de calor . . . . .	38
3.2.2	Capacidade térmica . . . . .	38
3.2.3	Equação do balanço de energia do modelo . . . . .	39
3.3	Formulação hídrica . . . . .	39
3.3.1	Suposições do modelo . . . . .	40
3.3.2	Leis de conservação de massa . . . . .	41
3.3.2.1	Conservação da massa de água líquida . . . . .	41
3.3.2.2	Conservação da massa de vapor . . . . .	42

3.3.3	Conservação da massa d'água total . . . . .	42
3.3.3.1	Desenvolvimento do termo $div(\vec{J}_v + \vec{J}_l)$ . . . . .	42
3.3.3.2	Desenvolvimento do termo $\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t}$ . . . . .	43
3.3.4	Equação do balanço de massa do modelo . . . . .	46
3.4	Formulação das propriedades . . . . .	47
3.4.1	Evolução da desidratação . . . . .	47
3.4.2	Evolução da permeabilidade intrínseca . . . . .	48
3.4.3	Evolução da permeabilidade relativa . . . . .	49
3.4.4	Evolução da porosidade . . . . .	50
3.4.5	Evolução da pressão de vapor saturante . . . . .	51
3.4.6	Evolução da massa volumétrica da água líquida . . . . .	51
3.4.7	Evolução da massa volumétrica de vapor d'água . . . . .	52
3.4.8	Evolução da viscosidade dinâmica . . . . .	53
3.4.9	Calor latente de desidratação . . . . .	54
3.4.10	Evolução da condutividade térmica . . . . .	54
<b>4</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b> . . . . .	<b>56</b>
4.1	Caracterização dos materiais concreto e rocha . . . . .	56
4.2	Geometria do modelo bicamada . . . . .	57
4.3	Calor latente de vaporização . . . . .	58
4.4	Modelo Adotado . . . . .	60
4.5	Implementação do modelo termo-hídrico no Cast3M . . . . .	61
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>64</b>
5.1	Concreto Convencional (CC) . . . . .	64
5.1.1	Temperatura . . . . .	64
5.1.2	Porosidade e Saturação . . . . .	67
5.1.3	Validação dos resultados da saturação para o concreto convencional (CC)	70
5.1.3.1	CC de Pliya (2010) . . . . .	71
5.1.3.2	CC de NGUYEN (2013) . . . . .	72
5.2	Concreto de Alto Desempenho (CAD) . . . . .	73
5.2.1	Temperatura . . . . .	74
5.2.2	Porosidade e Saturação . . . . .	76
5.2.3	Validação dos resultados da saturação para o concreto de alto desempenho (CAD) . . . . .	79
5.2.3.1	CAD de NGUYEN (2013) . . . . .	79
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>81</b>
6.1	Estudos futuros . . . . .	82
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de métodos numéricos para simulação do comportamento de estruturas expostas a diversos fenômenos, sejam eles naturais ou não, cresce a cada dia, além de ser extremamente importante para a evolução das construções visando medidas protetivas contra tais fenômenos.

Estudar o comportamento de uma estrutura exposta a temperaturas elevadas utilizando métodos numéricos, apresenta, além de vantagens econômicas, a possibilidade de se avaliar o comportamento de propriedades específicas com a evolução do tempo, aliando eficiência a eficácia. Muitas das vezes, não há condições de realizar o estudo experimental, ou, quando há, com limitações devido a dificuldades geradas pela demanda de infraestrutura física e recursos humanos, entre outros. Por isso, os modelos computacionais são criados e testados para fornecer resultados que se aproximam dos obtidos experimentalmente, tornando possível a realização de ajustes para melhorar a estrutura e diminuir o impacto causado pelo fenômeno ao qual foi exposta.

A modelagem computacional permite a análise de uma estrutura considerando cenários e parâmetros diversos. Pode-se variar as propriedades dos materiais, o tipo de carregamento aplicado, selecionar as solicitações externas e condições ambientais às quais se quer submeter a estrutura, o tempo de exposição e colher resultados que são muito difíceis de se obter de forma experimental, em um espaço de tempo muito menor em relação ao que se gastaria na prática. Maximiano (2018) relata que modelos numéricos e experimentais cada vez mais sofisticados, que permitem um melhor conhecimento e entendimento do comportamento dos materiais construtivos e estrutural em situação de incêndio, vêm sendo propostos constantemente no meio científico. O autor ainda enfatiza que grande parte das pesquisas no Brasil relacionadas à análise das estruturas em situação de incêndio tem sido de caráter essencialmente numérico, observando-se intensivos desenvolvimentos e avanços nos últimos anos.

A maioria das estruturas existentes são construídas à base de concreto, prova disso é que Pinheiro *et al.* (2010) diz que o concreto é o material estrutural mais utilizado no mundo. "Entre os materiais utilizados pelo homem, o concreto perde apenas para a água. Outros materiais como madeira, alvenaria e aço também são de uso comum e há situações em que são imbatíveis. Porém, suas aplicações são bem mais restritas"(PINHEIRO *et al.*, 2010).

Valin Jr *et al.* (2014) complementa que o concreto é um material amplamente disseminado devido à sua versatilidade, durabilidade e resistência, podendo ser encontrado nas casas, em rodovias, pontes, nos edifícios mais altos do mundo, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento e até em plataformas de extração petrolífera móveis. "Uma grande quantidade de mão de obra, equipamentos e recursos naturais (areia, pedra,

água, cimento, entre outros) é utilizada para a produção do concreto convencional, que também é responsável por uma grande produção de resíduos"(VALIN JR *et al.*, 2014).

### 1.1 Linha do tempo do modelo em estudo

A análise de estruturas de concreto expostas a altas temperaturas é um dos temas da linha de pesquisa Mecânica das Estruturas, da área de concentração Estruturas e Materiais, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Os estudos realizados pelo grupo de pesquisa, no entanto, iniciaram-se antes mesmo da criação do PEC, contando com a colaboração do *Laboratoire de Mécanique et Matériaux de Génie Civil* (L2MGC), da *Université Cergy-Paris* (UCP), França.

Em 2011, Ferreira, acompanhou o desenvolvimento de um programa experimental<sup>1</sup> na UCP que consistiu em análises térmicas de blocos em bicamada rocha-concreto, feitos com concreto convencional e de alto desempenho, submetidos a temperaturas de até 750°C. Tais ensaios forneceram dados para a validação de um modelo<sup>2</sup> Termo-Hídrico (TH), implementado no programa livre Cast3M - que foi empregado para reproduzir os mesmos experimentos desenvolvidos em laboratório. Os resultados experimentais foram adotados para fins de ajuste e de validação do modelo numérico, tendo sido observadas algumas discrepâncias em relação aos resultados computacionais obtidos. Um aspecto importante foi o fato de que as análises geraram resultados incoerentes para a saturação do meio, com valores superiores a 100%, conforme ilustra a figura 1. A autora considerou que o problema poderia estar relacionado ao modelo adotar o meio como indeformável.

Visando aprimorar o modelo, Amaral (2014) propôs incorporar à formulação o acoplamento mecânico, representando a degradação do meio através do modelo de dano de Mazars (1984), que é válido para situações de carregamento continuamente crescente. Os resultados obtidos por Amaral (2014) usando o modelo Termo-Hidro-Mecânico (THM) tanto para a variação de temperatura na bicamada rocha-concreto e para o concreto convencional apresentaram, ainda, discordâncias consideráveis, quando comparados aos dados experimentais. Para o concreto de alto desempenho, os resultados obtidos foram praticamente coincidentes com os encontrados por Ferreira (2011). Amaral (2014) também encontrou valores da saturação maiores que 100%.

Já em 2018, Soares buscou aprimorar o modelo termo-hídrico em estudo, realizando análises paramétricas e confrontando os resultados obtidos e informações disponíveis na literatura, com atenção especial aos resultados da saturação.

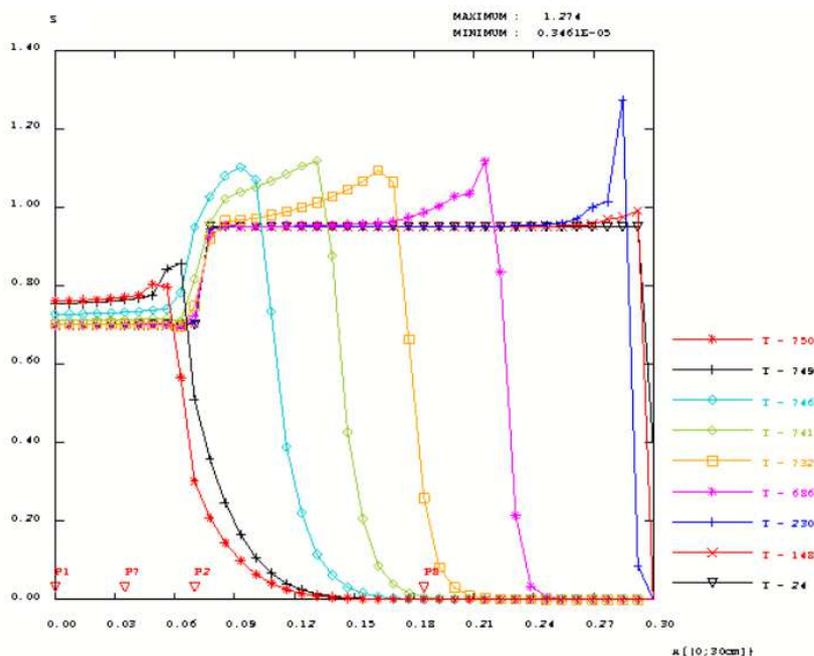
Outros autores pertencentes aos Programas de Pós-Graduação em Engenharia

---

<sup>1</sup> XING (2011).

<sup>2</sup> O modelo aplicado foi elaborado no *Commissariat à l'Énergie Atomique* (CEA), localizado na França, por Sercombe, Galle e Ranc (2001).

Figura 1 – Evolução da saturação do Concreto Convencional à 750°C



Fonte: FERREIRA, 2011.

Civil e Modelagem Computacional estudaram a influência do concreto em temperaturas elevadas, como por exemplo, Assis (2019), que estudou o comportamento termomecânico e a influência da granulometria dos agregados no concreto exposto a elevados gradientes de temperaturas, e Dal-Sasso (2021), que avaliou a evolução do dano, utilizando problemas inversos para obtenção de parâmetros e propriedades desconhecidas, desenvolvendo três modelos, sendo um elástico, um térmico e um termomecânico.

Além dos autores supracitados, diversos trabalhos foram desenvolvidos sobre o tema. Dotreppe e Franssen (1985) estudaram o comportamento de estruturas de concreto armado e mistos sob condições de incêndio através de métodos numéricos baseados no método dos elementos finitos usando elementos de viga com subdivisão da seção transversal em uma malha retangular. A estrutura foi submetida a temperaturas crescentes e analisada passo a passo usando o procedimento de Newton-Raphson. Uma comparação entre resultados numéricos e experimentais para um concreto armado e uma viga mista foi realizada. Em ambos os casos houve uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Os autores ainda ressaltaram que, embora o mesmo tipo de modelo possa ser utilizado tanto para estruturas de concreto armado quanto para estruturas mistas, a dificuldade de análise aumenta substancialmente quando se passa do concreto armado para estruturas mistas.

Ichikawa e England (2004) exibiram um modelo matemático e computacional para prever mudanças na temperatura, teor de umidade e pressão dos poros no concreto em temperaturas elevadas. Um par de equações diferenciais para transferência unidimensional

de calor e umidade no concreto é derivada da conservação de energia e massa e leva em consideração a liberação dependente da temperatura de água em gel e água ligada quimicamente devido à desidratação. Estas equações são resolvidas numericamente pelo método das diferenças finitas. Na análise numérica, a pressão, a densidade e a viscosidade dinâmica da água nos poros do concreto são calculadas explicitamente a partir de um conjunto de equações formuladas. Os resultados da análise numérica são comparados com dois conjuntos diferentes de dados experimentais: (a) teste de migração de umidade de longo prazo sob uma temperatura de estado estacionário de 200°C e (b) pressão de curto prazo sob aquecimento transiente.

Com o objetivo de investigar e simular os mecanismos de dano do concreto em situação de incêndio Grondin *et al.* (2007) desenvolveu um modelo micro mecânico acoplando a abordagem de módulos efetivos com um modelo de elementos finitos baseado na representação da microestrutura aleatória de materiais heterogêneos. Simulações numéricas foram realizadas para analisar o comportamento efetivo de amostras de concreto confinado submetidas a altas temperaturas acopladas a carregamentos compressivos e localizar danos na escala da microestrutura. Essas simulações mostraram que a deformação térmica transitória, observada durante os testes experimentais, foi devido ao dano térmico do concreto.

Kodur, Dwaikat e Raut (2009) apresentaram um modelo macroscópico de elementos finitos para rastrear a resposta ao fogo de membros estruturais de concreto armado. O modelo considerou os fatores críticos que devem ser considerados para a avaliação da resistência ao fogo baseada no desempenho de membros estruturais. Lascamento induzido pelo fogo, vários componentes de deformação, propriedades de material de alta temperatura, efeitos de restrição, diferentes cenários de incêndio e critérios de falha são incorporados ao modelo. A validade do modelo numérico é estabelecida comparando as previsões do programa com os resultados dos testes de resistência ao fogo em escala real. Através dos resultados dos estudos de caso, mostrou-se que o cenário de incêndio tem um efeito significativo na resistência ao fogo de pilares e vigas de concreto armado. Também é mostrado que modelos macroscópicos de elementos finitos são capazes de prever a resposta ao fogo de membros estruturais com uma precisão adequada para aplicações práticas.

Alves (2014) desenvolveu um modelo numérico termo-hidrico, baseado no método dos elementos finitos com temperatura e pressão como incógnitas, com aplicações em estruturas de concreto. O modelo numérico consiste na solução, por elementos finitos, de um sistema de duas equações de convecção e difusão através de um programa de elementos finitos desenvolvido no Laboratório de Estruturas do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), capaz de resolver o sistema de equações diferenciais em duas dimensões.

Almeida (2018) apresentou uma metodologia simplificada que permite a avaliação

da distribuição de temperatura em pilares de concreto armado em altas temperaturas e Jansen (2022) realizou uma análise numérica do comportamento combinado termomecânico transiente, apresentado em um modelo tridimensional não linear, para pilares curtos em concreto armado em situação de incêndio.

## 1.2 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é aprimorar um modelo termo-hídrico para simular o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Considerando que a referência experimental para o modelo em estudo é o trabalho de Ferreira (2011), em que se apresentam os resultados de um programa experimental realizado em blocos feitos de rocha e concreto, apresenta-se no capítulo 2 uma revisão bibliográfica sobre o concreto e a rocha, destacando a configuração do concreto, as propriedades como meio poroso, sua atuação sob temperaturas elevadas, as propriedades térmicas do concreto e a estrutura das rochas sedimentares.

O capítulo 3 irá abordar o modelo físico e a formulação termo-hídrica adotados na modelagem, enfatizando as leis da transferência de calor e conservação de massa, a equação do balanço de massa do modelo e a evolução das propriedades utilizadas.

No capítulo 4, será apresentada a caracterização dos materiais, a geometria, o modelo adotado e a implementação no Cast3M.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos pelo autor e uma validação dos resultados por meio de comparações com resultados da literatura.

Por fim, no capítulo 6 serão comentadas as conclusões e as perspectivas futuras.

## 2 DESCRIÇÃO DO CONCRETO E DA ROCHA E A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

O presente trabalho visa reproduzir numericamente o comportamento da estrutura em bicamada de concreto e rocha exposta a altas temperaturas analisada por Ferreira (2011). Devido a isso, é importante expor o comportamento desses materiais como meio poroso e explanar suas principais propriedades térmicas e hídricas. Além disso, neste capítulo, ainda serão abordadas a composição do concreto e da rocha, suas constituições e a influência da temperatura.

### 2.1 Descrição do concreto e a influência da temperatura

Nesta seção, serão apresentados a descrição da composição do concreto, o comportamento de seus constituintes associados à temperatura e alguns parâmetros térmicos e hídricos, como porosidade, condutividade térmica e permeabilidade.

#### 2.1.1 Configuração do concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2006) o concreto é um material compósito que consiste essencialmente em um meio de ligação dentro do qual estão embutidas partículas ou fragmentos de agregado. No concreto de cimento hidráulico, o ligante é formado a partir de uma mistura de cimento hidráulico e água. Agregado é o material granular, como areia, cascalho, pedra britada, escória de alto-forno britada ou resíduos de construção e demolição que são usados como um meio de cimentação para produzir concreto ou argamassa.

Os autores também explicam que o cimento é um material seco e finamente pulverizado e que por si só não é um aglutinante, mas desenvolve a propriedade de ligação como resultado da hidratação (ou seja, das reações químicas entre os minerais do cimento e a água). Um cimento é chamado de hidráulico quando os produtos de hidratação são estáveis em meio aquoso. O cimento hidráulico mais utilizado para a fabricação de concreto é o cimento Portland, que consiste principalmente em silicatos de cálcio reativos; os hidratos de silicato de cálcio formados durante a hidratação do cimento Portland são os principais responsáveis por sua característica adesiva e são estáveis em meio aquoso.

##### 2.1.1.1 Pasta de cimento hidratada

A expressão pasta de cimento hidratado é referente às pastas feitas de cimento Portland, que é um pó cinza composto de partículas angulares caracteristicamente na faixa de tamanho de 1 a 50  $\mu m$ . Esse pó cinza é elaborado pela pulverização de um clínquer com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, sendo o clínquer uma mistura heterogênea de vários compostos produzidos por reações de alta temperatura entre óxido de cálcio,

sílica, alumina e óxido de ferro. Utiliza-se as seguintes abreviações:  $C = CaO$ ;  $S = SiO_2$ ;  $A = Al_2O_3$ ;  $F = Fe_2O_3$ ;  $\bar{S} = SO_3$ ;  $H = H_2O$ .

Segundo Mehta e Monteiro (2006), os tipos, quantidades e características das quatro principais fases sólidas na pasta de cimento hidratada que podem ser observadas por um microscópio eletrônico são as seguintes:

#### **Silicato de cálcio hidratado**

A fase de hidrato de silicato de cálcio, abreviada como C-S-H, compõe 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada e é, portanto, a fase mais importante que determina as propriedades da pasta. O fato de o termo C-S-H ser hifenizado significa que C-S-H não é um composto bem definido; a relação C/S varia entre 1,5 e 2,0 e o teor de água estrutural varia ainda mais. A morfologia de C-S-H também varia de fibras pouco cristalinas a rede reticular.

#### **Hidróxido de cálcio**

Os cristais de hidróxido de cálcio constituem 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Em contraste com o C-S-H, o hidróxido de cálcio é um composto com uma estequiometria definida:  $Ca(OH)_2$ . Ele tende a formar grandes cristais com uma morfologia de prisma hexagonal distinta. A morfologia geralmente varia de indefinida a pilhas de placas grandes e é afetada pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema.

#### **Sulfoaluminatos de cálcio hidratados**

Os hidratos de sulfoaluminato de cálcio ocupam de 15% a 20% do volume sólido na pasta hidratada e, portanto, desempenham apenas um papel menor nas relações microestrutura-propriedade. Já foi afirmado que, durante os estágios iniciais de hidratação, a razão iônica sulfato/alumina da fase de solução geralmente favorece à formação de trissulfato hidrato,  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ , também chamado de etringita, que forma cristais prismáticos em forma de agulha. Em pastas de cimento Portland comum, a etringita eventualmente se transforma no hidrato de monossulfato,  $C_4A\bar{S}H_{18}$ , que forma cristais de placas hexagonais. A presença do hidrato de monossulfato no concreto de cimento Portland torna o concreto vulnerável ao ataque de sulfato.

#### **Grãos de clínquer não hidratados**

Dependendo da distribuição granulométrica do cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratadas, mesmo muito tempo após a hidratação. Com o progresso do processo de hidratação, as partículas menores se dissolvem primeiro e desaparecem do sistema, depois as partículas maiores se tornam menores. Devido ao espaço limitado disponível entre as partículas, os produtos de hidratação tendem a cristalizar nas proximidades das partículas de clínquer hidratantes, o que dá a aparência de uma formação

de revestimento ao seu redor. Em idades posteriores, devido à falta de espaço disponível, a hidratação *in situ* das partículas de clínquer resulta na formação de um produto de hidratação muito denso, cuja morfologia pode assemelhar-se à partícula de clínquer original.

#### 2.1.1.1.1 Efeito da Alta Temperatura na Pasta de Cimento

O efeito do incremento de temperatura na pasta hidratada de cimento depende do grau de hidratação e da umidade. Uma pasta saturada possui uma volumosa quantidade de água livre e de água capilar, além da água adsorvida. Vale ressaltar que os diferentes tipos de água são rapidamente perdidos com a elevação da temperatura do concreto. Porém, em consequência do calor de vaporização exigido para a conversão da água em vapor, a temperatura do concreto não aumenta até que toda a água evaporável tenha sido removida (CARVALHO, 2001).

De acordo com Costa e Silva (2002), a partir de 100°C, a água adsorvida e a água quimicamente combinada começam a evaporar, desidratando os silicatos de cálcio hidratados, encarregados por grande parte da resistência do concreto. Aos 710°C, os silicatos estão completamente extintos. A decomposição dos hidróxidos de cálcio, resultando em óxido de cálcio puro e água vaporizada, começa perto dos 400°C. Em aproximadamente 535°C, a desidratação dos hidróxidos de cálcio está completa. Essas transformações químicas espelham na resistência mecânica do concreto. Ao longo de 300°C e 350°C o concreto silicoso de densidade normal reduz efetivamente a sua resistência; e aos 800°C, a resistência residual é da ordem de 20% da resistência inicial.

Souza (2016), fala que o desgaste químico da pasta de cimento hidratada se inicia após os 200°C com a redução das forças de Van der Waals. Depois dos 300°C, a água interlamelar integrada na formação do silicato de cálcio hidratado começa seu processo de evaporação e, ao chegar em 900°C, a água interlamelar total do C-S-H terá sido perdida, comprometendo consideravelmente a resistência do concreto.

Wendt (2006), expõe que os materiais cristalinos desidratam a determinadas temperaturas, ao mesmo tempo que materiais não-cristalinos, como o C-S-H gel, perdem água numa ampla faixa de temperaturas. O C-S-H aquecido até de 600°C por alguns minutos ou mantido a 400°C por algumas horas, perde praticamente o mesmo volume de água, por exemplo.

Lima (2005), afirma que quando uma amostra é aquecida em estágios maiores que 600°C e resfriada posteriormente, o CaO gerado se re-hidrata, gerando novamente o hidróxido de cálcio. Este secundário apresenta um arranjo cristalino de qualidade inferior e é suscetível a processos de decomposição em temperaturas mais baixas. Em temperaturas superiores que de 800°C, a pasta tem reações cerâmicas e, em 1100°C, ocorre o derretimento total dos cristais. Depois do resfriamento, todas as fases cimentícias são capazes de se

re- hidratar, produzindo assim variados géis ou componentes cristalinos. As partículas anidras não sofrem alterações ao transcorrer do processo.

#### 2.1.1.1.2 Vazios na pasta de cimento hidratada

Além dos sólidos, a pasta de cimento hidratada contém vários tipos de vazios que têm uma influência importante em suas propriedades. Os tipos de vazios, sua quantidade e significado são discutidos a seguir, consoante a Mehta e Monteiro (2006):

##### **Espaço interlamelar no C-S-H**

Powers (1962) assumiu que a largura do espaço entre camadas dentro da estrutura C-S-H era de 18 Å e determinou que ela representa 28% de porosidade em C-S-H sólido; entretanto, Feldman e Sereda (1970) sugeriram que o espaço pode variar de 5 a 25 Å. Este tamanho de vazio é muito pequeno para ter um efeito adverso na resistência e na permeabilidade da pasta de cimento hidratada. No entanto, a água nesses pequenos vazios pode ser retida por ligações de hidrogênio e sua remoção sob certas condições pode contribuir para a contração e fluência por secagem.

##### **Vazios capilares**

Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada. O volume total de uma mistura típica de cimento-água permanece essencialmente inalterado durante o processo de hidratação. A densidade aparente média dos produtos de hidratação é consideravelmente inferior à densidade do cimento Portland anidro; estima-se que 1 cm<sup>3</sup> de cimento, em hidratação completa, requer cerca de 2 cm<sup>3</sup> de espaço para acomodar os produtos da hidratação. Assim, a hidratação do cimento pode ser encarada como um processo durante o qual o espaço originalmente ocupado pelo cimento e pela água vai sendo substituído cada vez mais pelo espaço preenchido pelos produtos de hidratação. O espaço não ocupado pelo cimento ou pelos produtos de hidratação consiste em vazios capilares, sendo o volume e o tamanho dos vazios capilares determinados pela distância original entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento recém-misturada (ou seja, relação água-cimento), e o grau de hidratação do cimento. Um método de cálculo do volume total de vazios capilares em pastas de cimento Portland com diferentes relações água-cimento ou diferentes graus de hidratação é popularmente conhecido como porosidade.

##### **Vazios de ar**

Enquanto os vazios capilares são de forma irregular, os vazios de ar são geralmente esféricos. Uma pequena quantidade de ar geralmente fica presa na pasta de cimento durante a mistura do concreto. Por várias motivações, aditivos podem ser adicionados ao concreto para colocar vazios de ar minúsculos propositalmente. Os vazios de ar aprisionados podem ter até 3 mm; vazios de ar incorporados geralmente variam de 50 a 200  $\mu m$ . Portanto, tanto

os vazios de ar aprisionados quanto os incorporados na pasta de cimento hidratada são muito maiores que os vazios capilares e são capazes de afetar adversamente a resistência.

#### 2.1.1.1.3 Água na pasta de cimento hidratada

Segundo Mehta e Monteiro (2006), sob análise microscópica eletrônica, os poros da pasta de cimento hidratada parecem estar vazios. Isso ocorre porque a técnica de preparação da amostra exige a secagem sob alto vácuo. Na verdade, dependendo da umidade do ambiente e da porosidade da pasta, a pasta de cimento não tratada é capaz de reter uma grande quantidade de água. A água pode existir na pasta de cimento hidratada de várias formas. A classificação da água em vários tipos é baseada no grau de dificuldade ou facilidade com que ela pode ser removida da pasta de cimento hidratada. Como há uma perda contínua de água de uma pasta de cimento saturada quando a umidade relativa do ambiente é reduzida, a linha divisória entre os diferentes estados da água não é rígida. Apesar disso, a classificação é útil para o entendimento das propriedades da pasta de cimento hidratada. Por fim, os autores relatam que, além do vapor nos poros vazios não ocupados ou parcialmente preenchidos com água, existe água na pasta de cimento hidratada nos seguintes estados:

##### **Água capilar**

Água capilar é a água presente em vazios maiores que cerca de 50 Å. Pode ser retratado como a água a granel que está livre da influência das forças atrativas exercidas pela superfície sólida. Na verdade, do ponto de vista do comportamento da água capilar na pasta de cimento hidratada, é desejável dividir a água capilar em duas categorias: a água em grandes vazios da ordem de  $> 50 \text{ nm}$  ( $0,05 \mu\text{m}$ ), que pode ser chamada de água livre (pois sua retirada não causa alteração de volume) e a água retida por tensão capilar em pequenos capilares (5 a 50 nm), cuja retirada pode causar o encolhimento do sistema.

##### **Água adsorvida**

Água adsorvida é a água que está perto da superfície sólida. Sob a influência de forças atrativas, as moléculas de água são fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos na pasta de cimento hidratada. É encontrado na literatura que até seis camadas moleculares de água (15 Å) podem ser fisicamente mantidas por ligações de hidrogênio. Como as energias de ligação das moléculas de água individuais diminuem com a distância da superfície sólida, a maior parte da água adsorvida pode ser perdida quando a pasta de cimento hidratada é seca a 30% de umidade relativa. A perda de água adsorvida é responsável pela retração da pasta de cimento hidratada.

##### **Água interlamelar**

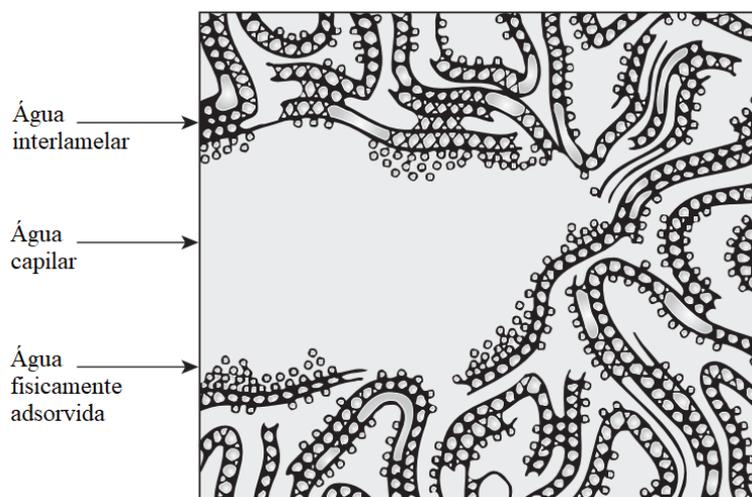
Água interlamelar é a água associada à estrutura C-S-H. Insinua-se que uma camada de água monomolecular entre as camadas de C-S-H é fortemente mantida por ligações

de hidrogênio. A água da camada intermediária é perdida apenas na secagem forte (ou seja, abaixo de 11% de umidade relativa). A estrutura C-S-H encolhe consideravelmente quando a água entre as camadas (interlamelar) é perdida.

### Água quimicamente combinada

Água quimicamente combinada é a água integrante de parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento. Esta água não se perde na secagem; ela é desenvolvida quando os hidratos se decompõem por aquecimento. Com base no modelo Feldman-Sereda (1970), os diferentes tipos de água associados ao C-S-H são ilustrados na figura 2.

Figura 2 – Modelo esquemático dos tipos de água associados ao hidrato de silicato de cálcio



Fonte: Adaptado de MEHTA E MONTEIRO (2006).

#### 2.1.1.2 Agregados

Segundo Resende (2021), os agregados são elementos granulares, sem fisionomia e volume definidos, de dimensões e características adequadas às obras de engenharia. Alguns exemplos são a pedra britada, a areia de rio ou cava, o pedrisco, o folheto expandido, entre outros. Eles são separados em duas classes, a saber: agregados graúdos, que têm granulometria entre 4,75 e 75 mm, e agregados miúdos, cujas partículas são menores do que 4,75 mm.

As características do agregado que são significativas para a fabricação de concreto incluem porosidade, classificação ou distribuição de tamanho, absorção de umidade, forma e textura da superfície, resistência ao esmagamento, módulo de elasticidade e o tipo de substâncias deletérias presentes. Essas características são derivadas da composição mineralógica da rocha-mãe (que é afetada pelos processos geológicos de formação da rocha), das condições de exposição a que a rocha foi submetida antes da mineração e do tipo de equipamento utilizado para a produção do agregado.

Os agregados usados na preparação do concreto estão propensos a transformações químicas com o aumento da temperatura. Os agregados calcários ( $CaCO_3$ ) nas temperaturas entre 800°C e 900°C, por exemplo, convertem-se em CaO, provocando retração, e, devido a isso, danos ao concreto. Nas temperaturas superiores a 430°C, os concretos com agregados silicosos perdem mais resistência em relação a concretos com agregados leves ou com calcários (WENDT, 2006).

A natureza do agregado afeta o comportamento do concreto a altas temperaturas. Os agregados se expandem constantemente até 573°C, por exemplo, os agregados com quartzo a essa temperatura passam por uma expansão brusca de 0,85%, influenciando na desagregação do concreto. Já nos agregados carbonáticos, essa expansão ocorre à temperatura de 700°C (CARVALHO, 2001).

### 2.1.1.3 Propriedades do concreto como meio poroso

A porosidade e a permeabilidade são as propriedades físicas do concreto que influenciam seu comportamento térmico.

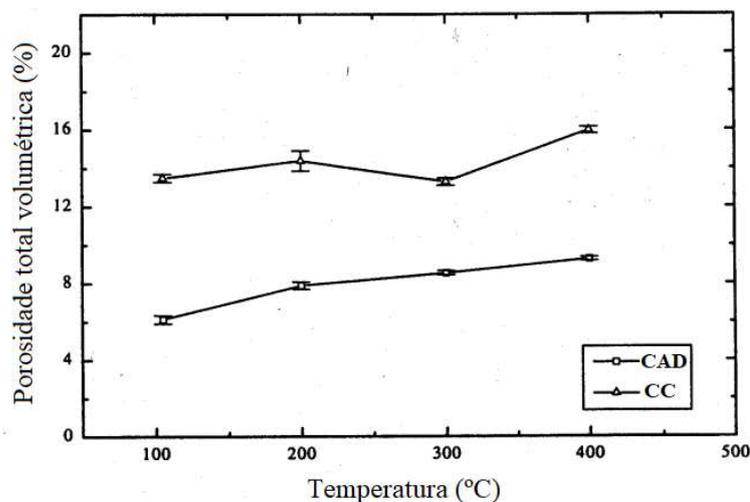
#### 2.1.1.3.1 Porosidade

De acordo com Menou (2004), o concreto é um material poroso bifásico, composto por uma fase sólida e uma fase porosa. A porosidade total pode ser medida por saturação de água e a porosidade capilar é geralmente medida por porosimetria de mercúrio. A porosidade aumenta de acordo com a temperatura e este aumento deve-se em parte ao aumento do volume total do tamanho dos poros, bem como à microfissuração causada pela expansão diferencial entre a pasta e os agregados.

A figura 3 mostra a variação da porosidade total de acordo com a temperatura de um concreto convencional (CC) e um de alto desempenho (CAD) medido pelo método de saturação de água. A porosidade do CC e do CAD tem características distintas, por exemplo, há menor interconexão entre poros do CAD.

Kalifa e Tsimbrovska (1998) *apud* Menou (2004) relata que entre 105°C e 400°C, a porosidade aumenta em 3%. Este crescimento está associado à saída de água, seja presente na rede ou quimicamente ligada. Ele ainda explica que a diminuição da porosidade no concreto convencional entre 200°C e 300°C está associada à densificação devido à hidratação adicional e carbonatação da portlandita em condições internas de autoclave, ou seja, sob pressão maior que a atmosférica. Por outro lado, esta densificação não é observável no concreto de alto desempenho que contém muito pouca portlandita graças à presença de sílica ativa. O autor conclui que a perda de massa do concreto convencional é menor que a perda de massa de um concreto de alto desempenho.

Figura 3 – Porosidade total da água em função da temperatura



Fonte: Adaptado de KALIFA e TSIMBROVSKA (1998) *apud* MENOUE (2004).

Neville (2011) afirma que o aspecto da estrutura da pasta de cimento endurecida relevante para a permeabilidade é a natureza do sistema de poros dentro da massa da pasta de cimento endurecida e também na zona próxima à interface entre a pasta de cimento e o agregado. A zona de interface ocupa de um terço a metade do volume total da pasta de cimento endurecida no concreto e é conhecida por ter uma microestrutura diferente da massa da pasta de cimento endurecida. A interface também é o *locus* de microtrincas iniciais. Por essas razões, pode-se esperar que a zona de interface contribua significativamente para a permeabilidade do concreto. No entanto, ele relata que, apesar da maior porosidade da zona de interface, a permeabilidade do concreto é controlada pelo volume da pasta de cimento endurecida, que é a única fase contínua no concreto.

#### 2.1.1.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade é definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido em um sólido poroso.

No concreto, o papel da água deve ser visto em uma perspectiva adequada, pois, como ingrediente necessário para as reações de hidratação do cimento e como agente facilitador da mistura dos componentes do concreto, a água está presente desde o início. Gradualmente, dependendo das condições ambientais e da espessura de um elemento de concreto, a maior parte da água evaporável no concreto (toda a água capilar e uma parte da água adsorvida) é perdida, deixando os poros vazios ou insaturados.

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), como é a água evaporável que é congelável e também livre para movimento interno, um concreto não será vulnerável a fenômenos destrutivos relacionados à água se houver pouca ou nenhuma água evaporável restante após a secagem e se a subsequente exposição desse concreto ao ambiente não causar

ressaturação dos poros. Este último, em grande medida, depende da condutividade hidráulica, que também é conhecida como coeficiente de permeabilidade ( $K$ ). Na tecnologia do concreto é uma prática comum abandonar o adjetivo e referir-se a  $K$  simplesmente como a permeabilidade.

### 2.1.2 Concreto sob temperaturas elevadas

De acordo com Machado (2019), a conduta do concreto frente a incêndios é, tradicionalmente, conhecida considerando a sua natureza incombustível e seu bom desempenho como isolante térmico, evitando propagação de calor e de fogo. Estudos sobre a influência do fogo nas estruturas de concreto têm sido realizados desde aproximadamente 1922.

Teixeira (2018) alega que o concreto apresenta uma variação de suas diversas propriedades físicas e mecânicas quando submetido ao incêndio. O aumento do gradiente de temperatura ao redor do elemento estrutural e em seu interior causa alterações na microestrutura e na macroestrutura do concreto. Tal aumento diminui sua resistência e sua rigidez, além de causar deformações térmicas nas seções das estruturas.

Quando submetido a altas temperaturas, o concreto experimenta três problemas principais: a deterioração das propriedades mecânicas, o dano causado pelas deformações térmicas e a possibilidade de ocorrência de deslocamento das camadas de concreto (*spalling*).

### 2.1.3 Fenômeno do “*spalling*”

O fenômeno do *spalling*, também chamado de deslocamento ou lascamento, pode advir de forma apartada ou simultânea, sendo classificado pela FIB (2007) *apud* Resende (2021) em diferentes tipos, entre eles: lascamento do agregado (*aggregatespalling*), lascamento explosivo (*explosivespalling*), lascamento superficial e violento durante o incêndio (*superficialspalling*), lascamento superficial e não violento (*sloughingoff*), lascamento de quina (*cornerspalling*) e lascamento pós-resfriamento (*post coolingspalling*).

Segundo Mindeguia *et al.* (2009), a fragmentação do concreto consiste no desprendimento de fragmentos da superfície exposta e pode comprometer gravemente a integridade de toda a estrutura (reforço de aço diretamente exposto ao fogo, aumento do risco de flambagem de elementos comprimidos, perda de propriedades isolantes, entre outros...).

Ferreira (2011) expõe que nos concretos de alto desempenho há mais riscos de acontecer o “*spalling*” explosivo por causa de sua menor permeabilidade e porosidade. Isso ocorre em virtude de pressões mais altas no interior dos poros. Costa e Silva (2002), complementam que é frequente o “*spalling*” explosivo nos concretos de alto desempenho e que são incomuns os experimentos nos quais os lascamentos instantâneos não acontecem.

## 2.1.4 Propriedades térmicas do concreto

### 2.1.4.1 Calor específico

O calor específico é determinado como a quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa de determinado material e é expresso em  $J/kg \text{ } ^\circ C$ .

Segundo o Anexo C.2 da norma ABNT NBR 15200:2012, o calor específico  $c_p(\theta)$  do concreto seco ( $u = 0 \%$ ) silicioso ou calcáreo pode ser determinado da seguinte maneira:

$$c_p(T) = 900 \text{ (} J/kg \text{ } ^\circ C \text{) para } 20^\circ C \leq T \leq 100^\circ C \quad (2.1)$$

$$c_p(T) = 900 + (T - 100) \text{ (} J/kg \text{ } ^\circ C \text{) para } 100^\circ C < T \leq 200^\circ C \quad (2.2)$$

$$c_p(T) = 1000 + \frac{(T - 200)}{2} \text{ (} J/kg \text{ } ^\circ C \text{) para } 200^\circ C < T \leq 400^\circ C \quad (2.3)$$

$$c_p(T) = 1100 \text{ (} J/kg \text{ } ^\circ C \text{) para } 400^\circ C < T \leq 1200^\circ C \quad (2.4)$$

onde  $T$  é a temperatura do concreto ( $^\circ C$ ).

Quando a umidade não for considerada explicitamente no método de cálculo, a função do calor específico do concreto calcáreo ou silicioso pode ser modelado por um valor constante  $c_{p,top}$ , situado entre  $100^\circ C$  e  $115^\circ C$ , com decréscimo linear entre  $115^\circ C$  e  $200^\circ C$ :

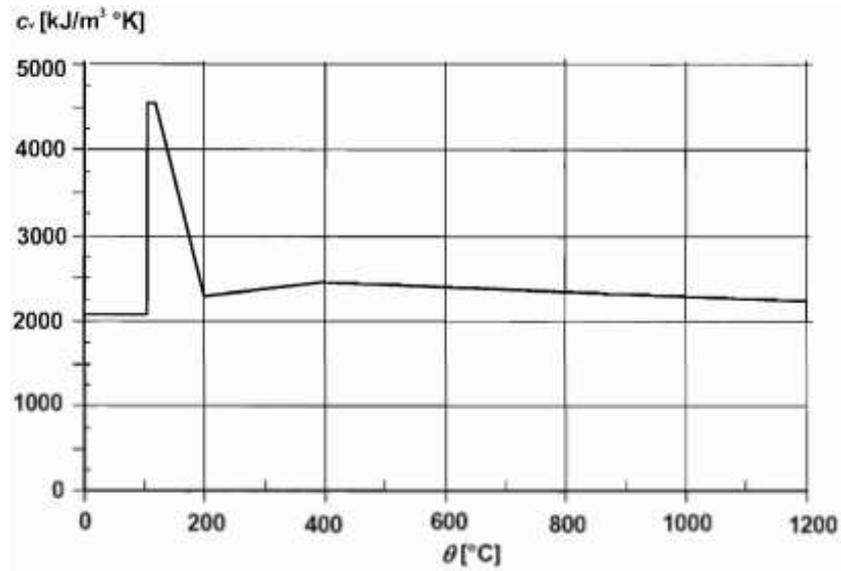
$$c_{p,top} = 900 \text{ } J/kg \text{ } ^\circ C \text{ para umidade de } 0 \text{ \% em peso} \quad (2.5)$$

$$c_{p,top} = 1470 \text{ } J/kg \text{ } ^\circ C \text{ para umidade de } 1,5 \text{ \% em peso} \quad (2.6)$$

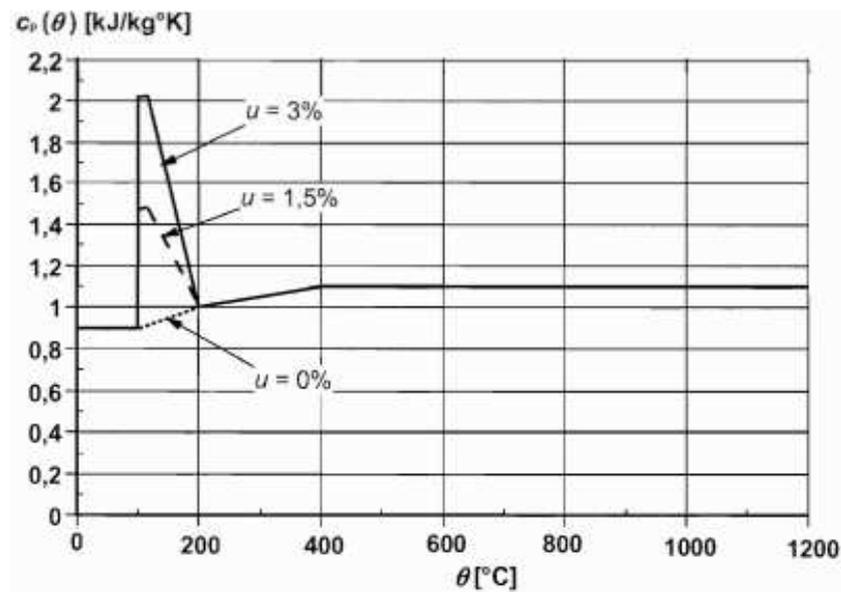
$$c_{p,top} = 2020 \text{ } J/kg \text{ } ^\circ C \text{ para umidade de } 3,0 \text{ \% em peso} \quad (2.7)$$

De forma simplificada, a relação entre o calor específico do concreto e a temperatura pode ser considerada constante. Nesse caso, pode ser considerada igual a  $1000 \text{ } J/kg^\circ C$ .

A variação do calor específico volumétrico  $c_v(T)$ , produto de  $\rho(T)$  e  $c_p(T)$ , é ilustrada na figura 4, para um concreto com teor de umidade de  $3\%$  em peso e densidade de  $2300 \text{ } kg/m^3$ . Os picos do calor específico,  $c_p(T)$ , em função da temperatura a três diferentes teores de umidade, ( $u = 0\%$ ,  $u = 1,5\%$  e  $u = 3\%$ ), em peso para um concreto silicioso, são ilustrados na figura 5.

Figura 4 – Calor específico volumétrico  $c_v(T)$ 

Fonte: EN 1992-1-2 (2004).

Figura 5 – Calor específico  $c_p(T)$ 

Fonte: EN 1992-1-2 (2004).

#### 2.1.4.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é a propriedade que determina a capacidade do material de conduzir calor, conseqüentemente, materiais que são apontados como isolantes apresentam condutividade térmica baixa, em contrapartida, os apontados como bons condutores portam uma condutividade térmica alta.

A norma europeia EN 1992-1-2 (2004) diz que a condutividade térmica  $\lambda_c$  do concreto pode ser determinada entre os valores limite inferior e superior, indicados nas equações 2.8 e 2.9.

O limite superior de condutividade térmica do concreto de peso normal pode ser determinado a partir de:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \left(\frac{T}{100}\right) + 0,0107 \left(\frac{T}{100}\right)^2 \text{ W/m K para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

onde  $T$  é a temperatura do concreto.

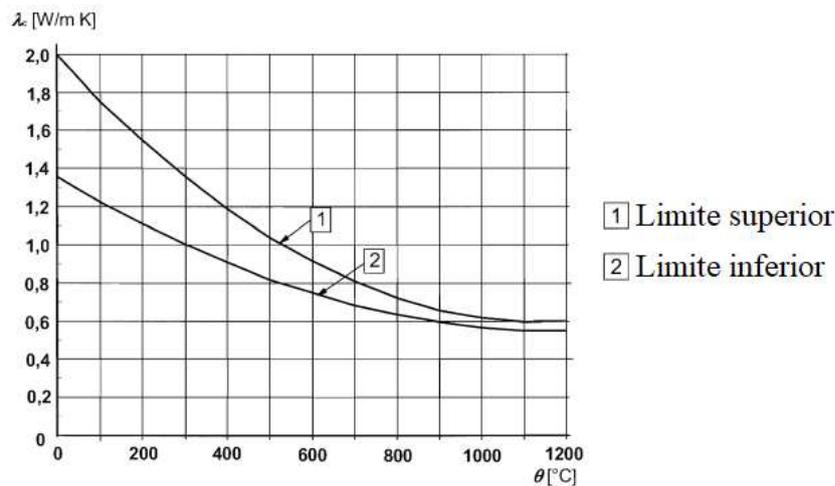
O limite inferior da condutividade térmica  $\lambda_c$  do concreto de peso normal pode ser determinado a partir de:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \left(\frac{T}{100}\right) + 0,0057 \left(\frac{T}{100}\right)^2 \text{ W/m K para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

onde  $T$  é a temperatura do concreto.

A variação do limite superior e do limite inferior da condutividade térmica com a temperatura está ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Condutividade térmica do concreto



Fonte: Adaptado de EN 1992-1-2 (2004).

Os valores indicados na figura 6 podem ser aplicados também para o concreto de alta resistência. A norma ainda preconiza que o valor da condutividade térmica para concreto de alta resistência para uso em cada país pode ser fornecida dentro da faixa definida pelo limite inferior e superior e complementa que a condutividade térmica do concreto de alta resistência pode ser maior que a do concreto de resistência normal.

A norma ainda enfatiza que o limite inferior de condutividade térmica foi derivado de comparações com temperaturas medidas em testes de fogo de diferentes tipos de estruturas de concreto. O limite inferior fornece temperaturas mais realistas para estruturas de concreto do que o limite superior, que foi derivado de testes para estruturas mistas de aço/concreto.

Em seu anexo C.3, a norma ABNT NBR 15200:2012 descreve a condutividade térmica conforme os valores dos limites inferiores da Eurocode EN 1992-1-2 (2004) e

relata que, de forma simplificada, a relação entre a condutividade térmica do concreto e a temperatura pode ser considerada constante. Neste caso, pode ser considerada igual a 1,3 W/m°C. A tabela 1 traz os valores da condutividade térmica do concreto à temperatura ambiente.

Tabela 1 – Condutividade térmica do concreto à temperatura ambiente

<b>Material</b>	<b><math>\lambda_{c,\theta}</math> [W/(m °C)]</b>
Agregados	0,7 – 4,2
Concretos Saturados	1,0 – 3,6
Pasta de cimento saturada endurecida	1,1 – 1,6
Água	0,515
Ar	0,0034

Fonte: ALMEIDA, 2018.

#### 2.1.4.3 Massa específica

Segundo o Anexo C.4 da norma ABNT NBR 15200:2012, a variação da massa específica com a temperatura é influenciada pela perda de água e pode ser determinada da seguinte maneira:

$$\rho(T) = \rho(20^\circ C) \text{ para } 20^\circ C \leq T \leq 115^\circ C$$

$$\rho(T) = \rho(20^\circ C) \times \left(1 - 0,02 \frac{(T - 115)}{85}\right) \text{ para } 115^\circ C < T \leq 200^\circ C$$

$$\rho(T) = \rho(20^\circ C) \times \left(0,98 - 0,03 \frac{(T - 200)}{200}\right) \text{ para } 200^\circ C < T \leq 400^\circ C$$

$$\rho(T) = \rho(20^\circ C) \times \left(0,95 - 0,07 \frac{(T - 400)}{800}\right) \text{ para } 400^\circ C < T \leq 1200^\circ C \quad (2.10)$$

O item 8.2.2 da norma ABNT NBR 6118:2014, se aplica aos concretos de massa específica normal, que são aqueles que, depois de secos em estufa, têm massa específica ( $\rho_c$ ) compreendida entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 2800 kg/m<sup>3</sup>.

Se a massa específica real não for conhecida, para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor 2400 kg/m<sup>3</sup> e para o concreto armado, 2500 kg/m<sup>3</sup>.

Quando se conhecer a massa específica do concreto utilizado, pode-se considerar para valor da massa específica do concreto armado aquela do concreto simples acrescida de 100 kg/m<sup>3</sup> a 150 kg/m<sup>3</sup>.

Logo, considerando  $\rho(20^{\circ}C) = 2400 \text{ kg/m}^3$ , podemos reescrever a equação 2.10 como sendo:

$$\begin{aligned}\rho(T) &= \rho(20^{\circ}C) = 2400 \text{ kg/m}^3 \text{ para } 20^{\circ}C \leq T \leq 115^{\circ}C \\ \rho(T) &= 2400 \times (1 - 0,02 \frac{(T - 115)}{85}) \text{ kg/m}^3 \text{ para } 115^{\circ}C < T \leq 200^{\circ}C \\ \rho(T) &= 2400 \times (0,98 - 0,03 \frac{(T - 200)}{200}) \text{ kg/m}^3 \text{ para } 200^{\circ}C < T \leq 400^{\circ}C \\ \rho(T) &= 2400 \times (0,95 - 0,07 \frac{(T - 400)}{800}) \text{ kg/m}^3 \text{ para } 400^{\circ}C < T \leq 1200^{\circ}C \quad (2.11)\end{aligned}$$

#### 2.1.4.4 Coeficiente de dilatação térmica do concreto

Uygunoğlu e Topçu (2009) relatam que a deformação térmica e o coeficiente de dilatação térmica podem ser determinados usando as equações 2.12 e 2.13, respectivamente:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.12)$$

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (2.13)$$

onde  $\varepsilon$  é a deformação térmica,  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica ( $1/^{\circ}C$ ),  $\Delta L$  é a variação do comprimento da unidade (mm),  $\Delta T$  é a diferença de temperatura ( $^{\circ}C$ ) e  $L_0$  é o comprimento inicial do corpo de prova .

O item 8.2.3 da norma ABNT NBR 6118:2014, informa que para efeito de análise estrutural, o coeficiente de dilatação térmica pode ser admitido como sendo igual a  $10^{-5}/^{\circ}C$ .

## 2.2 DESCRIÇÃO DA ROCHA

Cardoso (2013) relata que as rochas são agregados de minerais com apurado nível de coesão ou consolidação, que abarcam as massas sólidas da crosta e do manto terrestre. São os formantes basilares da litosfera e influem fatores naturais significativos para a vida humana, tais como as condições de fertilidade dos solos, a topografia e a flexibilidade de matérias primas. Com base nos processos e origem de suas composições, as rochas são geologicamente julgadas como magmáticas ou ígneas, metamórficas e sedimentares.

No estudo experimental descrito por Ferreira (2011), utilizou-se uma rocha do tipo sedimentar calcária. Por essa razão, serão descritos a estrutura e o comportamento sob temperatura elevada deste tipo de rocha.

## 2.2.1 Estrutura das rochas sedimentares

Os tópicos abordados nesta seção foram baseados em Nauroy (2011).

Embora as rochas magmáticas representem cerca de 95% da crosta terrestre (em volume), 75% da área dos continentes e praticamente todos os fundos oceânicos estão cobertos por rochas sedimentares resultantes da acumulação e compactação de detritos minerais – neste caso falamos de rocha detrítica (degradação de outras rochas), detritos orgânicos (restos de plantas ou animais, fósseis) – ou precipitação química.

### 2.2.1.1 Rocha sedimentar e meio poroso

As rochas sedimentares são meios porosos compostos por uma estrutura deformável e vazios intersticiais, de grande importância para as empresas petrolíferas. Em termos de geomecânica, esses vazios são as principais causas das diferenças de comportamento observadas entre os sólidos compactos (por exemplo, metais) e os meios porosos, onde a presença de líquidos, mesmo em pequenas quantidades, torna a rocha ainda mais complexa.

A porosidade total ( $\phi$ ) de uma determinada rocha é a razão entre o volume não sólido (volume de poros) e o volume total:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (2.14)$$

onde  $V_p$  é o volume poroso,  $V_s$  o volume sólido e  $V_t$  o volume total. Essa porosidade também é chamada de porosidade euleriana, para distingui-la da porosidade lagrangeana.

Existem várias maneiras de medir a porosidade, mas o resultado da medição pode depender do método usado. Essa quantidade petrofísica não fornece informações sobre as dimensões dos poros, distribuição ou grau de conexão.

A porosidade de um sedimento varia durante o soterramento. O sedimento muda progressivamente de um estado quase líquido para um estado sólido compacto. A porosidade intergranular inicial pode ser muito alta, 70% a 80% para um sedimento argiloso. Durante o soterramento do sedimento, a pressão confinante e a temperatura aumentam. Vários processos diagenéticos (mecânicos, químicos e bioquímicos) alteram a porosidade por consolidação e compactação da rocha, dissolução e recristalização dos minerais, entre outras propriedades.

Ainda de acordo com Nauroy (2011), amplos estudos teóricos e experimentais têm sido realizados sobre o escoamento de fluidos através do meio poroso. A permeabilidade de um meio poroso é uma propriedade que reflete a habilidade da rocha em permitir que um fluido flua através de seus poros. A permeabilidade absoluta é uma característica intrínseca do material, independente do fluido. Esta permeabilidade  $k$  foi definida por Darcy, demonstrando que a taxa de descarga  $Q$  através de um meio poroso de área de seção transversal  $A$  era proporcional à queda de pressão ( $\Delta P$ ), dividida pela viscosidade

dinâmica  $\eta$  do fluido saturante e o comprimento  $L$  sobre o qual a queda de pressão está ocorrendo:

$$Q = -A \frac{k \Delta P}{\eta L} \quad (2.15)$$

O sinal negativo é necessário, pois o escoamento ocorre em regiões de alta para baixa pressão.

Quando são utilizadas as seguintes unidades:  $Q$  em  $m^3 \cdot s^{-1}$ ,  $A$  em  $m^2$ ,  $\Delta P/L$  em  $Pa \cdot m^{-1}$  e  $\eta$  em Poises, a permeabilidade  $k$  é expressa em  $m^2$  e em Darcy, com  $1 \text{ Darcy} = 0,97 \cdot 10^{-12} m^2$ . O Darcy, denotado por  $D$ , é amplamente utilizado em engenharia de petróleo e petrofísica. O  $m^2$  é mais usado por físicos de materiais.

A condutividade hidráulica  $K$ , ou coeficiente de permeabilidade, é definida como a razão entre permeabilidade e viscosidade do fluido:

$$K = \frac{k}{\eta} \quad (2.16)$$

$K$  é expresso em  $m \cdot s^{-1}$ . Assim, enquanto a permeabilidade  $k$  é uma característica do material que é altamente dependente da porosidade, a condutividade hidráulica  $K$  é característica das condições de escoamento em um determinado material para um determinado fluido. Até certo ponto, a condutividade hidráulica  $K$  leva em consideração as interações físicas entre o fluido e a rocha. A permeabilidade depende da estrutura do meio poroso. Duas rochas com a mesma porosidade podem ter permeabilidades bastante diferentes. Quando o espaço poroso é preenchido por vários fluidos, os efeitos capilares atuam além das perdas de carga dinâmicas e, neste caso, podem ser determinadas as permeabilidades relativas ao fluido considerado.

### 3 MODELO FÍSICO E FORMULAÇÃO TERMO-HÍDRICA

Neste capítulo, serão apresentados os modelos físicos e a formulação termo-hídrica tomando por base os trabalhos de Nithiarasu, Lewis e Seetharamu (2016) e Nguyen (2013).

#### 3.1 Os modelos de Transferência de Calor

É importante quantificar a quantidade de energia que está sendo transferida por unidade de tempo. Para a condução de calor, a equação que modela esse fenômeno é conhecida como lei de Fourier (Fourier 1955) que é expressa para uma dimensão, como:

$$q_x = - \lambda \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

onde  $q_x$  é o fluxo de calor na direção  $x$  (W/m<sup>2</sup>);  $\lambda$  é a condutividade térmica (W/mK, uma propriedade do material) e  $dT/dx$  o gradiente de temperatura (K/m).

#### 3.2 Equação de Condução de Calor

A determinação da distribuição da temperatura e fluxos em um meio (sólido, líquido, gasoso ou combinação de fases) é o principal objetivo de uma análise de condução de calor. Uma vez que a distribuição de temperatura é conhecida, o fluxo de calor em qualquer ponto dentro do meio, ou em sua superfície, pode ser calculado a partir da lei de Fourier, dada pela equação 3.1.

Ao derivar a equação de condução de calor em coordenadas cartesianas e aplicando a lei de conservação de energia a um volume de controle diferencial, como mostrado na figura 7, a solução da equação diferencial resultante, com condições de contorno prescritas, fornece a distribuição de temperatura no meio.

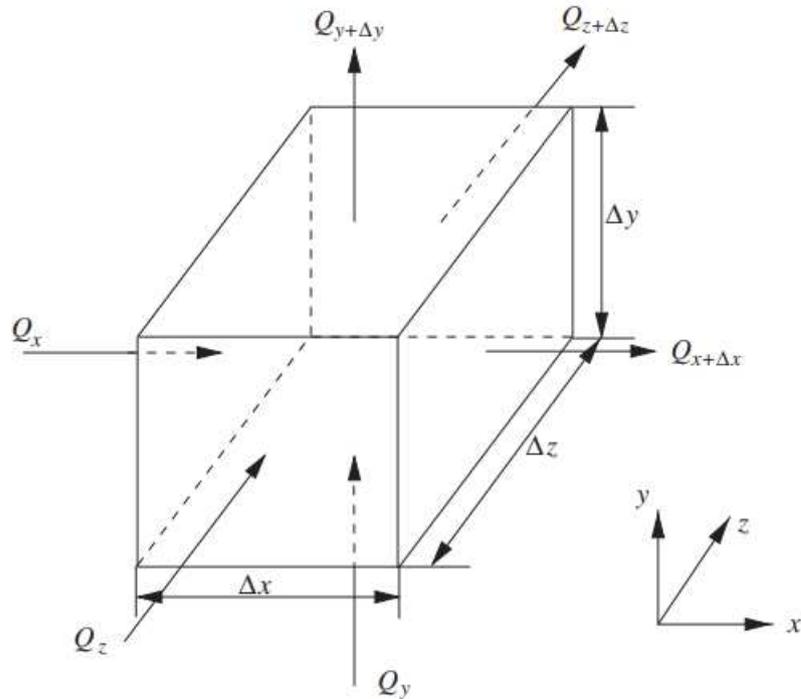
A expansão em série de Taylor da transferência de calor total  $Q$  desprezando os termos de segunda ordem e de ordem superior dá:

$$\begin{aligned} Q_{x+dx} &= Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} \Delta x \\ Q_{y+dy} &= Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \Delta y \\ Q_{z+dz} &= Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} \Delta z \end{aligned} \quad (3.2)$$

O calor gerado no volume de controle é  $G\Delta x\Delta y\Delta z$  e a taxa de variação no armazenamento de energia é dada como:

$$\rho c_p (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

Figura 7 – Um volume de controle diferencial para análise de condução de calor



Fonte: NITHIARASU, LEWIS e SEETHARAMU, 2016.

Agora, com referência à figura 7, podemos escrever o balanço de energia como:

"energia de entrada + energia gerada = energia armazenada + energia de saída"

isso é:

$$(Q_x + Q_y + Q_z) + G(\Delta x \Delta y \Delta z) = \rho c_p (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial t} + Q_{x+\Delta x} + Q_{y+\Delta y} + Q_{z+\Delta z} \quad (3.4)$$

Substituindo a equação 3.2 na equação 3.4 e reorganizando resulta em:

$$-\frac{\partial Q_x}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial Q_y}{\partial y} \Delta y - \frac{\partial Q_z}{\partial z} \Delta z + G(\Delta x \Delta y \Delta z) = \rho c_p (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

A transferência de calor total  $Q$  em cada direção pode ser expressa como (área perpendicular à direção do fluxo de calor  $\times$  fluxo de calor):

$$\begin{aligned} Q_x &= (\Delta y \Delta z) q_x = -\lambda_x (\Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial x} \\ Q_y &= (\Delta x \Delta z) q_y = -\lambda_y (\Delta x \Delta z) \frac{\partial T}{\partial y} \\ Q_z &= (\Delta x \Delta y) q_z = -\lambda_z (\Delta x \Delta y) \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Substituindo a equação 3.6 na equação 3.5 e dividindo pelo volume,  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , obtemos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + G = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

A equação 3.7 é a equação de difusão de calor transiente para um sistema estacionário expresso em coordenadas cartesianas. A condutividade térmica ( $\lambda$ ) na equação 3.7 é um vetor. Em sua forma mais geral, a condutividade térmica pode ser expressa como um tensor, ou seja:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

As equações anteriores 3.7 e 3.8 são válidas para resolver problemas de condução de calor em materiais anisotrópicos com variação direcional nas condutividades térmicas. Em muitas situações, no entanto, a condutividade térmica pode ser tomada como uma propriedade não direcional, ou seja, o material é de natureza isotrópica.

### 3.2.1 Fonte geradora de calor

As mudanças de estado endotérmicas da água em estado líquido para vapor de água e de água quimicamente ligada para água em estado líquido são as fontes geradoras de calor consideradas neste modelo. Dessa maneira, se escreve a fonte geradora de calor como G:

$$G = -L_{l \rightarrow v}(T) \frac{\partial \mu_{l \rightarrow v}}{\partial t} - L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (3.9)$$

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

### 3.2.2 Capacidade térmica

O termo  $\rho c_p$  da equação 3.7 é chamado de capacidade térmica ou calor específico volumétrico. Ele pode ser escrito em função da desidratação e da saturação, ou seja,  $c(S_l, d) = \rho c_p$  e é dado por:

$$c(S_l, d) = \rho_s C_s + \phi \rho_l(T) S_l C_l + (d_0 - d) C_u \quad (3.10)$$

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 por esta formulação, essa hipótese é perfeitamente aceitável para materiais pouco permeáveis como o concreto. Além disso, a dissipação de calor associada à compressibilidade do vapor de água também é desprezada, visto que este é considerado como um gás perfeito.

### 3.2.3 Equação do balanço de energia do modelo

Substituindo a equação 3.9 e  $\rho c_p$  por  $c(S_l, d)$  na equação 3.7 e reorganizando os termos, chegamos na equação do balanço de energia do modelo dada por:

$$c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \frac{\partial \mu_{l \rightarrow v}}{\partial t} - L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (3.11)$$

### 3.3 Formulação hídrica

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

$$V_{vazios} = V_l + V_v \quad (3.12)$$

A porosidade ( $\phi$ ), fundamentada pela relação entre o volume de vazios ( $V_{vazios}$ ) e o volume total ( $V_t$ ), é estabelecida pela equação 3.13 e possibilita caracterizar perfeitamente o meio poroso sem levar em conta detalhes sobre a distribuição e conectividade dos poros:

$$\phi = \frac{V_{vazios}}{V_t} \quad (3.13)$$

A equação 3.13 pode ser reescrita como:

$$\phi = \frac{V_l + V_v}{V_t} = \frac{V_l}{V_t} + \frac{V_v}{V_t} \quad (3.14)$$

A saturação ( $S_l$ ) é representada pela relação entre o volume ocupado pela fase líquida ( $V_l$ ) e o volume de vazios  $V_{vazios}$ :

$$S_l = \frac{V_l}{V_{vazios}} \quad (3.15)$$

Traçando o volume de vazios ( $V_{vazios}$ ) em função da porosidade ( $\phi$ ) que é determinada conforme a equação 3.13, e substituindo na equação 3.15, auferire-se a fração de volume poroso ocupado pela fase líquida ( $\phi_l$ ):

$$\begin{aligned} V_{vazios} &= \phi \cdot V_t \\ S_l &= \frac{V_l}{\phi \cdot V_t} \\ \phi_l &= \frac{V_l}{V_t} = S_l \phi \end{aligned} \quad (3.16)$$

A fração de volume poroso preenchido pela fase gasosa ( $\phi_v$ ) é obtido substituindo a equação 3.16 na equação 3.14 e reorganizando:

$$\begin{aligned}\phi &= S_l \phi + \frac{V_v}{V_t} \\ \phi(1 - S_l) &= \frac{V_v}{V_t} \\ \phi_v = \frac{V_v}{V_t} &= \phi(1 - S_l)\end{aligned}\tag{3.17}$$

### 3.3.1 Suposições do modelo

As principais premissas do modelo utilizado são as seguintes:

**Hipótese 1:** O concreto é considerado um meio poroso, homogêneo insaturado e isotrópico  $\Omega$ . Este meio poroso é composto por três fases (figura 8):

- A fase líquida - denotada por  $l$
- A fase sólida - denotada por  $s$
- A fase gasosa - denotada por  $v$

Manipulando as equações 3.16 e 3.17, inferem-se as massas de cada fase por unidade de volume do meio poroso (massa volumétrica aparente): massa de vapor de água ( $m_v$ ), massa de água líquida ( $m_l$ ), massa da fase sólida ( $m_s$ ) e massa de água ligada a matriz sólida ( $m_{bw}$ ):

$$m_v = \phi(1 - S_l)\rho_v\tag{3.18}$$

$$m_l = \phi S_l \rho_l\tag{3.19}$$

$$m_s = m_c + m_g + m_{bw} = m_{ds} + m_{bw}\tag{3.20}$$

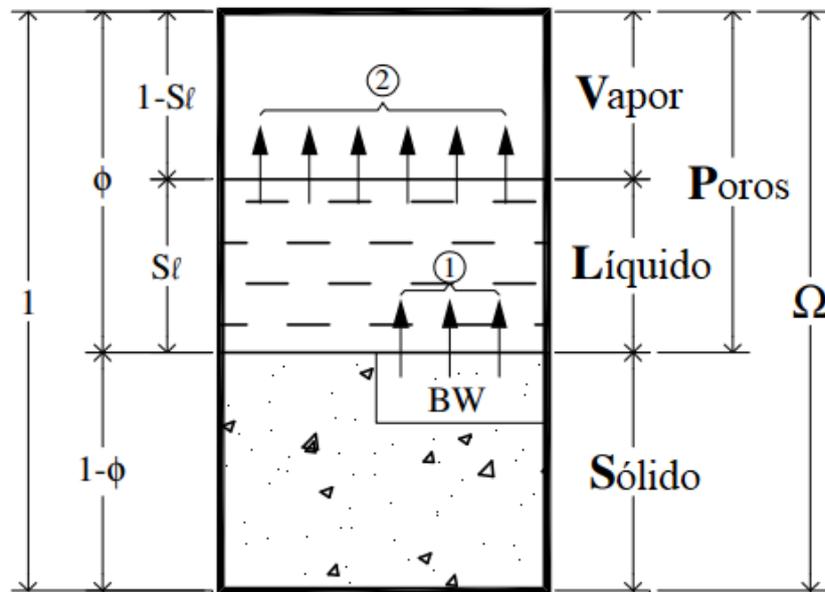
$$m_{bw} = d_0 - d\tag{3.21}$$

onde  $\rho_v$  e  $\rho_l$  são as massas volumétricas da fase de vapor e líquida, respectivamente. A massa de cimento é  $m_c$ , a de agregados  $m_g$ , a massa de água ligada inicialmente é  $d_0$  e a massa de água livre proveniente da desidratação da fase sólida é  $d$ .

**Hipótese 2:** O fenômeno de histerese das curvas de sorção não é levado em consideração. Essas curvas são simplificadas em uma linha de inclinação unitária:

$$\frac{\partial h_r}{\partial S_l} = 1\tag{3.22}$$

Figura 8 – Distribuição de volume das diferentes fases do concreto



① Desidratação da matriz sólida

② Vaporização da água líquida

Fonte: Adaptado de NGUYEN (2013).

onde  $h_r$  é a umidade relativa.

**Hipótese 3:** As transformações da água que ocorrem no concreto são ilustradas por duas mudanças de estado:

- A transformação de fase da água ligada em água líquida é causada pela desidratação da fase sólida (variação de  $d$ ).
- A transformação de fase da água líquida em vapor de água é causada pela vaporização da água (variação de  $S_l$ ).

### 3.3.2 Leis de conservação de massa

#### 3.3.2.1 Conservação da massa de água líquida

A variação da quantidade de água líquida em função do tempo no volume  $\Omega$  é descrita por:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} m_l d\Omega = \int_{\Omega} \left( \text{div}(\vec{J}_l) + \frac{\partial m_l}{\partial t} \right) d\Omega, \text{ com } \vec{J}_l = m_l \cdot \vec{V}_l \quad (3.23)$$

A variação de massa da água líquida está ligada por um lado à desidratação proveniente da fase sólida  $\frac{\partial d}{\partial t}$  e por outro à vaporização da água líquida  $\mu_{l \rightarrow v}$ . A equação

para a conservação da massa de água líquida é a seguinte:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} m_l d\Omega = \int_{\Omega} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \mu_{l \rightarrow v} \right) d\Omega, \text{ com } \vec{J}_l = m_l \cdot \vec{V}_l \quad (3.24)$$

Pela identificação entre os termos das equações 3.23 e 3.24, obtemos então:

$$\text{div}(\vec{J}_l) + \frac{\partial m_l}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} + \mu_{l \rightarrow v} \quad (3.25)$$

### 3.3.2.2 Conservação da massa de vapor

Equitativamente, obtemos a seguinte equação para a conservação da massa de vapor:

$$\text{div}(\vec{J}_v) + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \mu_{v \rightarrow l}, \text{ com } \vec{J}_v = m_v \cdot \vec{V}_v \quad (3.26)$$

em que  $\mu_{v \rightarrow l}$  denota a condensação de uma massa de vapor de água em líquido.

### 3.3.3 Conservação da massa d'água total

Como  $\mu_{v \rightarrow l} + \mu_{l \rightarrow v} = 0$ , somando as equações 3.25 e 3.26, a equação de conservação da massa total de água torna-se:

$$\text{div}(\vec{J}_v + \vec{J}_l) + \frac{\partial m_v}{\partial t} + \frac{\partial m_l}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (3.27)$$

Vamos desenvolver um a um os termos da equação 3.27.

#### 3.3.3.1 Desenvolvimento do termo $\text{div}(\vec{J}_v + \vec{J}_l)$

A lei de Darcy é aplicada para os fluxos de água que atravessam o meio poroso:

$$- \text{Caso de um líquido} : \vec{J}_l = -\rho_l \frac{K_l \cdot k_{rl}}{\eta_l} \vec{\nabla}(P_l) \quad (3.28)$$

$$- \text{Caso de um vapor} : \vec{J}_v = -\rho_v \frac{K_v \cdot k_{rv}}{\eta_v} \vec{\nabla}(P_v) \quad (3.29)$$

onde  $J$  exprime o fluxo,  $K$  a permeabilidade intrínseca,  $K_r$  a permeabilidade relativa,  $\eta$  a viscosidade dinâmica e  $P$  a pressão. Lembrando que os subíndices  $l$  e  $v$  indicam as fases líquidas e de vapor, respectivamente.

Substituindo, obtemos:

$$\text{div}(\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left( \rho_l \frac{k_l \cdot k_{rl}}{\eta_l} \vec{\nabla}(P_l) + \rho_v \frac{k_v \cdot k_{rv}}{\eta_v} \vec{\nabla}(P_v) \right) \quad (3.30)$$

Invocando a lei de Kelvin, que expressa o equilíbrio entre a fase líquida e vapor pela igualdade de seu potencial químico, descreve-se uma relação entre  $P_v$ ,  $P_l$  e a pressão de vapor de saturação  $P_{vsat}$ :

$$P_l = P_{vsat}(T) + \rho_l(T) \frac{RT}{M_v} \ln \left( \frac{P_v}{P_{vsat}(T)} \right) \quad (3.31)$$

Podemos concluir que:

$$\Rightarrow \frac{\partial P_l}{\partial P_v} = \rho_l(T) \frac{RT}{M_v \cdot P_v} = \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} \quad (3.32)$$

E temos:

$$\vec{\nabla} P_l = \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} \vec{\nabla} P_v \quad (3.33)$$

Nota: A fase vapor é considerada um gás ideal a partir do qual  $\frac{1}{\rho_v} = \frac{RT}{M_v \cdot P_v}$  de acordo com a equação de Clapeyron-Mendeleïev:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.34)$$

Podemos deduzir:

$$div(\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left[ \left( \rho_l \frac{k_l \cdot k_{rl}}{\eta_l} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v \frac{k_v \cdot k_{rv}}{\eta_v} \right) \vec{\nabla}(P_v) \right] \quad (3.35)$$

Ou:

$$\begin{aligned} div(\vec{J}_l + \vec{J}_v) &= -\nabla \cdot \left[ \left( \rho_l \frac{k_l \cdot k_{rl}}{\eta_l} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v \frac{k_v \cdot k_{rv}}{\eta_v} \right) P_{vsat} \vec{\nabla}(h_r) \right] \\ div(\vec{J}_l + \vec{J}_v) &= -\nabla \cdot \left[ \left( \rho_l \frac{k_l \cdot k_{rl}}{\eta_l} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v \frac{k_v \cdot k_{rv}}{\eta_v} \right) P_{vsat} \frac{\partial h_r}{\partial S_l} \vec{\nabla}(S_l) \right] \\ div(\vec{J}_l + \vec{J}_v) &= -\nabla \cdot \left[ \left( \rho_l \frac{k_l \cdot k_{rl}}{\eta_l} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v \frac{k_v \cdot k_{rv}}{\eta_v} \right) P_{vsat} \vec{\nabla}(S_l) \right] \end{aligned} \quad (3.36)$$

Essa última igualdade só é válida se considerarmos  $\frac{\partial h_r}{\partial S_l}$  constante e igual a 1, como proposto por Sercombe, Galle e Ranc (2001) e em conformidade com a hipótese 2.

### 3.3.3.2 Desenvolvimento do termo $\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t}$

Substituindo  $m_l$  e  $m_v$ , o termo  $\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t}$  pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \frac{\partial(\phi \cdot S_l \cdot \rho_l)}{\partial t} + \frac{\partial[\phi \cdot (1 - S_l) \cdot \rho_v]}{\partial t} \quad (3.37)$$

Derivando, temos que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} &= \overbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot S_l \cdot \rho_l}^{(1)} + \overbrace{\frac{\partial \rho_l}{\partial t} \cdot \phi \cdot S_l}^{(2)} + \overbrace{\frac{\partial S_l}{\partial t} \cdot \phi \cdot \rho_l}^{(3)} \\ &+ \underbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot (1 - S_l) \cdot \rho_v}_{(4)} + \underbrace{\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \cdot \phi \cdot (1 - S_l)}_{(5)} - \underbrace{\frac{\partial S_l}{\partial t} \cdot \phi \cdot \rho_v}_{(6)} \end{aligned} \quad (3.38)$$

O termo (5) é desconsiderado, pois é adotado que a  $\frac{\partial \rho_v}{\partial t}$  é nula. Os termos (3) e (6) permitem mostrar o termo de capacidade hídrica  $\phi(\rho_l - \rho_v)$ . Logo, podemos dizer que:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \overbrace{\phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t}}^{\text{Termos (3) e (6)}} + \overbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot S_l \cdot \rho_l}^{\text{Termo (1)}} + \overbrace{\frac{\partial \rho_l}{\partial t} \cdot \phi \cdot S_l}^{\text{Termo (2)}} + \overbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot (1 - S_l) \cdot \rho_v}^{\text{Termo (4)}} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} + \text{termo (1)} + \text{termo (2)} + \text{termo (4)} \quad (3.40)$$

Após discretização no tempo, empregando  $t_i = i\Delta T$ ,  $i \in [0, 1, 2, \dots, n]$  onde  $n = \frac{t_{max}}{\Delta t} + 1$ , os termos (1), (2) e (4) podem ser reescritos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{termo (1)} &= \frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot S_l \cdot \rho_l = \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta t} \cdot (S_l)_{i+1} \cdot (\rho_l)_{i+1} \\ &= \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (S_l)_{i+1} \cdot (\rho_l)_{i+1} \\ &\quad - \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (S_l)_i \cdot (\rho_l)_{i+1} + \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (S_l)_i \cdot (\rho_l)_{i+1} \\ \text{termo (1)} &= [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(S_l)_{i+1} - (S_l)_i}{2\Delta t} \cdot (\rho_l)_{i+1} + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot (\rho_l)_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \\ \text{termo (1)} &= [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \cdot (\rho_l)_{i+1} + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot (\rho_l)_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \quad (3.41) \\ \text{termo (2)} &= \frac{\partial \rho_l}{\partial t} \cdot \phi \cdot S_l = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i}{\Delta t} \cdot \phi_{i+1} \cdot (S_l)_{i+1} \\ &= \frac{(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i}{2\Delta t} \cdot \phi_{i+1} \cdot (S_l)_{i+1} \\ &\quad - \frac{(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i}{2\Delta t} \cdot \phi_{i+1} \cdot (S_l)_i + \frac{(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i}{2\Delta t} \cdot \phi_{i+1} \cdot (S_l)_i \\ \text{termo (2)} &= [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_{i+1} - (S_l)_i}{2\Delta t} + [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \\ \text{termo (2)} &= [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi_{i+1} \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} + [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \quad (3.42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{termo (4)} &= \frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot (1 - S_l) \cdot \rho_v = \frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot \rho_v - \frac{\partial \phi}{\partial t} \cdot S_l \cdot \rho_v \\
\text{termo (4)} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta t} \cdot (\rho_v)_{i+1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta t} \cdot (S_l)_{i+1} \cdot (\rho_v)_{i+1} \\
\text{termo (4)} &= \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (\rho_v)_{i+1} - \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (S_l)_{i+1} \cdot (\rho_v)_{i+1} \\
&\quad + \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (S_l)_i \cdot (\rho_v)_{i+1} - \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (S_l)_i \cdot (\rho_v)_{i+1} \\
\text{termo (4)} &= -[\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(S_l)_{i+1} - (S_l)_i}{2\Delta t} \cdot (\rho_v)_{i+1} - [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot (\rho_v)_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \\
&\quad + \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2\Delta t} \cdot (\rho_v)_{i+1} \\
\text{termo (4)} &= -[\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \cdot (\rho_v)_{i+1} - [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot (\rho_v)_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \\
&\quad + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t} \quad (3.43)
\end{aligned}$$

Substituindo os termos (1), (2) e (4) desenvolvidos nas equações 3.41, 3.42 e 3.43 na equação 3.40, temos que:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} &= \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1}] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \cdot (\rho_l)_{i+1} \\
&\quad + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot (\rho_l)_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} + [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi_{i+1} \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \\
&\quad + [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} - [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \cdot (\rho_v)_{i+1} \\
&\quad - [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot (\rho_v)_{i+1} \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t} \quad (3.44)
\end{aligned}$$

Reorganizando os termos:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} &= \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1}] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} + (\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \\
&\quad + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \\
&\quad + (\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \\
&\quad - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t} \quad (3.45)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} &= (\phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1}] + (\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] \\
&+ \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i]) \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \\
&+ ((\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \\
&- (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i]) \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.46}$$

### 3.3.4 Equação do balanço de massa do modelo

Chamando a equação 3.27 e substituindo as equações 3.36 e 3.46, a equação de conservação de massa torna-se:

$$\begin{aligned}
&div(\vec{J}_v + \vec{J}_l) + \frac{\partial m_v}{\partial t} + \frac{\partial m_l}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} \\
-\nabla \cdot \left[ \left( \rho_l \frac{k_l \cdot k_{rl}}{\eta_l} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v \frac{k_v \cdot k_{rv}}{\eta_v} \right) P_{vsat} \vec{\nabla}(S_l) \right] &+ (\phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1}] \\
&+ (\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i]) \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} \\
&+ ((\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i]) \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \\
&+ [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t} = \frac{\partial d}{\partial t}
\end{aligned} \tag{3.47}$$

Para compactar a equação 3.47, vamos chamar de  $C$  a matriz de capacidade e  $D_h(S_l, d, T)$  a matriz de condutividade hídrica, definidas a seguir:

$$C = (\phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1}] + (\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i]) \tag{3.48}$$

$$D_h(S_l, d, T) = \left( \rho_l(T) \frac{k_l(d) \cdot k_{rl}(S_l)}{\eta_l(T)} \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} + \rho_v(T) \frac{k_v(d) \cdot k_{rv}(S_l)}{\eta_v(T)} \right) \cdot P_{vsat} \tag{3.49}$$

Reescrevendo a equação 3.47, temos que:

$$\begin{aligned}
-\nabla \cdot [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla}(S_l)] + C \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} &+ ((\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \\
&- (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i]) \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} + [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t} = \frac{\partial d}{\partial t}
\end{aligned} \tag{3.50}$$

Reorganizando os termos:

$$C \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} - \nabla \cdot [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla}(S_l)] = \frac{\partial d}{\partial t} - [\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t} - \left( (\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] \right) \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \quad (3.51)$$

Chamando de  $Q_h$  o fluxo integrado nos nós, dado pela soma  $Q_{h_1} + Q_{h_2} + Q_{h_3}$ , onde  $Q_{h_1}$ ,  $Q_{h_2}$  e  $Q_{h_3}$  são definidos na equação 3.52, chegamos na equação 3.53 que traduz a equação final do balanço de massa deste modelo:

$$Q_{h_1} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

$$Q_{h_2} = -[\phi_{i+1} - \phi_i] \cdot \frac{(\rho_v)_{i+1}}{2\Delta t}$$

$$Q_{h_3} = - \left( (\rho_l)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] + \phi_{i+1} \cdot [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] - (\rho_v)_{i+1} \cdot [\phi_{i+1} - \phi_i] \right) \cdot \frac{(S_l)_i}{2\Delta t} \quad (3.52)$$

$$C \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} - \nabla \cdot [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla}(S_l)] = Q_h \quad (3.53)$$

A equação 3.53 descreve os movimentos da água líquida ou em vapor no material poroso.

### 3.4 Formulação das propriedades

Nas subseções a seguir serão descritas as evoluções das propriedades do concreto convencional, concreto de alto desempenho e da rocha. As propriedades que não forem descritas nesta subseção serão dadas no próximo capítulo.

#### 3.4.1 Evolução da desidratação

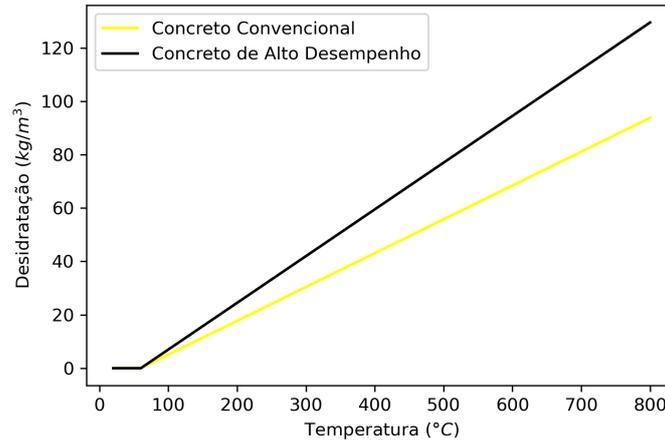
Medidas exercidas por Galle *et al.* (2001), a respeito dos concretos comuns e de alto desempenho, apontam uma mudança da porosidade a partir de 60°C. Conceitua-se que a partir desta temperatura já ocorre extração da água ligada à matriz. Galle (2001) identificou que a desidratação começa em 60°C e propôs que a evolução da quantidade de água ligada desidratada  $d$  é dada por:

$$d = \frac{d_0}{540}(T - 60) \text{ para } T > 60^\circ C \quad (3.54)$$

onde  $d_0$  é a quantidade de água ligada inicialmente e  $T$  a temperatura. A quantidade inicial de água ligada é dada em função da quantidade de cimento (tabela 3) e com base na constituição dos concretos estudados (tabela 7), podemos dizer que  $d_0 = 68.418 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$  para o concreto convencional e  $d_0 = 94.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$  para o concreto de alto desempenho.

A figura 9 ilustra a evolução da desidratação em função da temperatura para esses dois concretos. A formulação da rocha desconsidera a desidratação, ou seja, a desidratação na rocha é nula.

Figura 9 – Evolução da desidratação em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

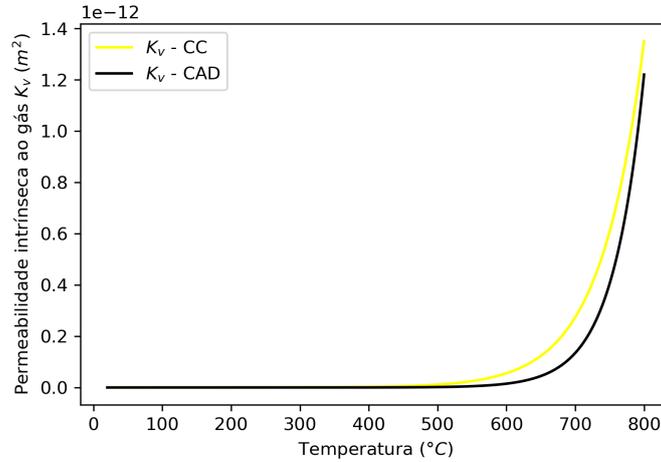
### 3.4.2 Evolução da permeabilidade intrínseca

A permeabilidade intrínseca ao gás  $K_v$  e à água  $K_l$  consoante a Sercombe, Galle e Ranc (2001), são dadas por:

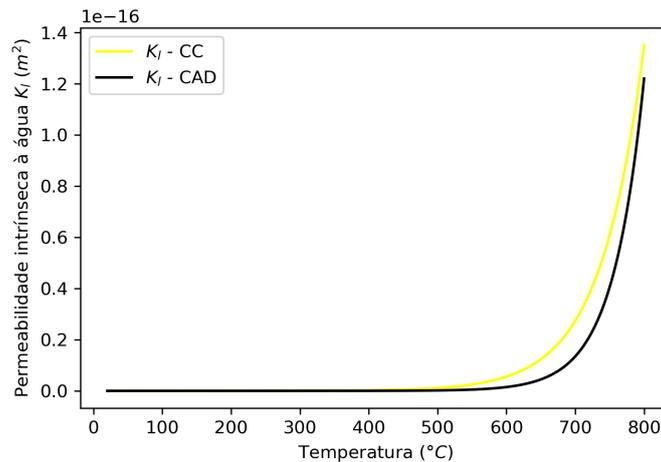
$$K_v(d) = K_{v0} \times e^{\alpha d} \quad (3.55)$$

$$K_l(d) = 10^{-4} \times K_{v0} \times e^{\alpha d} \quad (3.56)$$

sendo  $\alpha = 0.126$ ,  $d$  a massa de água desidratada e  $K_{v0}$  a permeabilidade intrínseca ao gás de referência. Para o concreto convencional adota-se  $K_{v0} = 1.0 \times 10^{-17}$  e para o concreto CAD  $K_{v0} = 1.0 \times 10^{-19}$ . As figuras 10 e 11 retratam a evolução da permeabilidade intrínseca ao gás  $K_v$  e à água  $K_l$  em função da desidratação, respectivamente.

Figura 10 – Evolução da permeabilidade intrínseca ao gás  $K_v$ 

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 11 – Evolução da permeabilidade intrínseca à água  $K_l$ 

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 3.4.3 Evolução da permeabilidade relativa

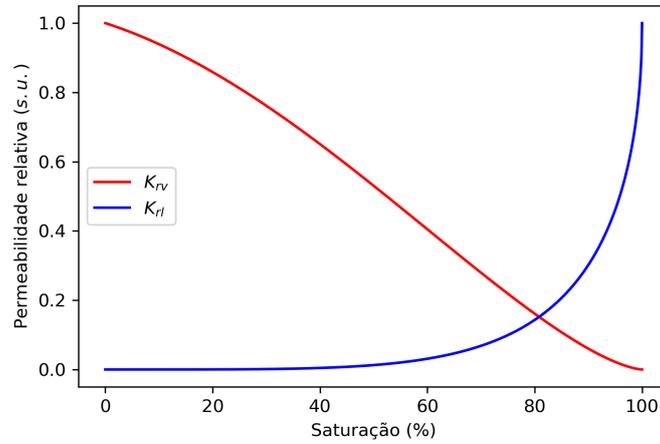
As permeabilidades relativas consentem a consideração de que os poros estão ligeiramente ocupados por outra fase nos meios insaturados. As expressões sugeridas por Luckner, Van Genuchten e Nielsen (1989) *apud* Coussy (2004) aplicadas no modelo para as permeabilidades relativas ao gás  $k_{rv}$  e à água  $k_{rl}$ , em função da saturação, são:

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

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

onde  $m = 0,5$  é um parâmetro definido experimentalmente. A figura 12 traz a evolução das permeabilidades relativas ao gás  $k_{rv}$  e à água  $k_{rl}$ , em função da saturação.

Figura 12 – Evolução das permeabilidades relativas  $k_{rv}$  e  $k_{rl}$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

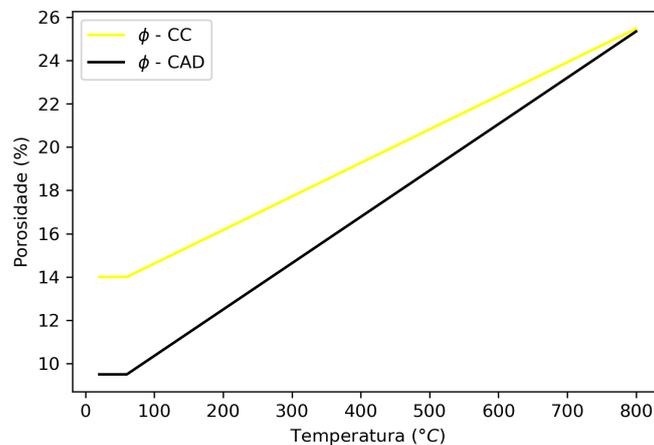
#### 3.4.4 Evolução da porosidade

A porosidade do concreto evolui em função do crescimento do volume de poros, desta forma a porosidade total  $\phi$  varia em função da desidratação, sendo dada por:

$$\phi = \phi_0 + \frac{d(T)}{\rho_{hyd}} \quad (3.59)$$

onde  $\phi_0$  é a porosidade inicial e  $\rho_{hyd}$  o valor médio para a densidade dos principais hidratos da pasta de cimento ( $CSH$  e  $Ca(OH)_2$ ). Neste trabalho, considera-se  $\rho_{hyd} = 817.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , conforme Amaral (2014). Nguyen (2013), por exemplo, considerou  $\rho_{hyd} = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . A figura 13 demonstra a evolução da porosidade em função da desidratação com a porosidade inicial do CC igual a 14% e a do CAD igual a 9.5%.

Figura 13 – Evolução da porosidade  $\phi$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

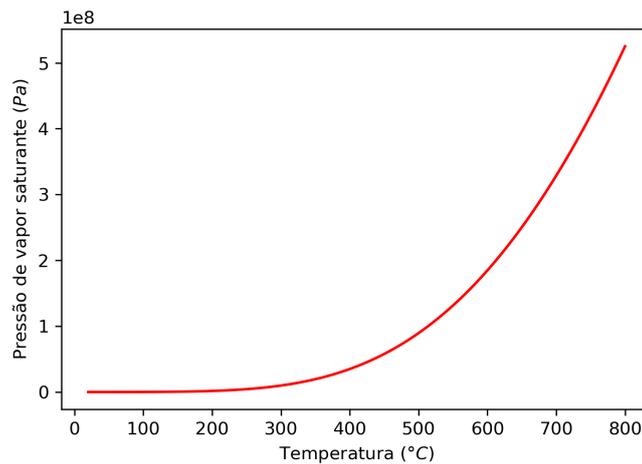
### 3.4.5 Evolução da pressão de vapor saturante

A pressão de vapor saturante é a pressão máxima, ou limite, a uma temperatura constante, em que uma substância é exposta antes de se condensar. Ela é dada pela equação de Clausius-Clapeyron em função da temperatura:

$$p_{vs} = p_{atm} \times \exp \left[ \frac{M_v \Delta H_v}{R} \left( \frac{T - 373.15}{373.15T} \right) \right] \quad (3.60)$$

onde a pressão atmosférica  $p_{atm} = 101325 \text{ Pa}$ ,  $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $M_v = 0.018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$  é a massa molar do vapor de água,  $\Delta H_v = 2.26 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  é a entalpia de vaporização da água e  $T$  é a temperatura em Kelvin ( $K$ ). A figura 14 apresenta a evolução da pressão de vapor saturante em função da temperatura.

Figura 14 – Evolução da pressão de vapor saturante



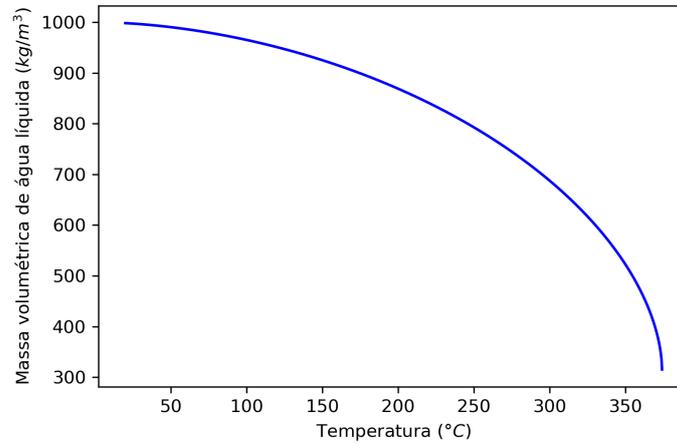
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 3.4.6 Evolução da massa volumétrica da água líquida

A massa volumétrica da água líquida  $\rho_l$ , supostamente incompressível, pode ser aproximada pela função proposta por Raznjevic e Poadhorsky (1970), a qual sua evolução é exibida pela figura 15. Ela diminui com a temperatura em virtude da dilatação volumétrica da água com o efeito do aquecimento:

$$\rho_l(T) = 314.4 + 685.6 \left[ 1 - \left( \frac{T}{374.4} \right)^{0.55} \right]^{0.55} \quad (3.61)$$

Figura 15 – Evolução da massa volumétrica da água líquida



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 3.4.7 Evolução da massa volumétrica de vapor d'água

Neste modelo, por simplificação, o vapor de água foi considerado como um gás perfeito. A fórmula que relaciona a pressão de vapor  $p_v$  e a sua massa específica  $\rho_v$  é a equação de Clapeyron para gases ideais:

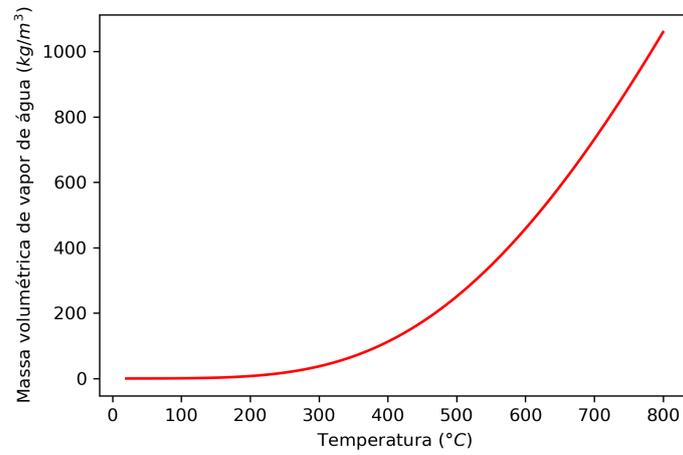
$$p_v = \rho_v \frac{RT}{M_v} \quad (3.62)$$

Portanto, podemos dizer que a massa volumétrica de vapor d'água  $\rho_v$  é dada por:

$$\rho_v = \frac{M_v p_{vs}}{R(T + 273.15)} \quad (3.63)$$

onde  $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $M_v = 0,018 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$  é a massa molar do vapor de água e  $T$  é a temperatura em °C. A figura 16 mostra a evolução da massa volumétrica de vapor d'água em função da temperatura.

Figura 16 – Evolução da massa volumétrica de vapor d'água



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 3.4.8 Evolução da viscosidade dinâmica

A viscosidades dinâmicas da fase líquida  $\eta_l$  e de vapor  $\eta_v$  recomendadas por Pezzani (1992) são dadas por:

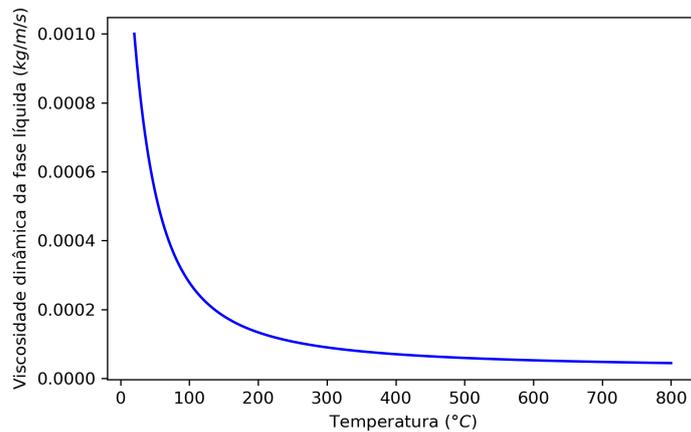
$$\eta_l(T) = 2.41 \times 10^{-5} \times \exp\left(\frac{570.58058}{T + 133.15}\right) \quad (3.64)$$

$$\eta_v(T) = 3.85 \times 10^{-8} \times T + 10^{-5} \quad (3.65)$$

sendo a temperatura  $T$  em  $^{\circ}C$  e a viscosidade dinâmica  $\eta$  descrita em  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ . As figuras 17 e 18 retratam a evolução das viscosidades dinâmicas da fase líquida  $\eta_l$  e de vapor  $\eta_v$  em função da temperatura, respectivamente.

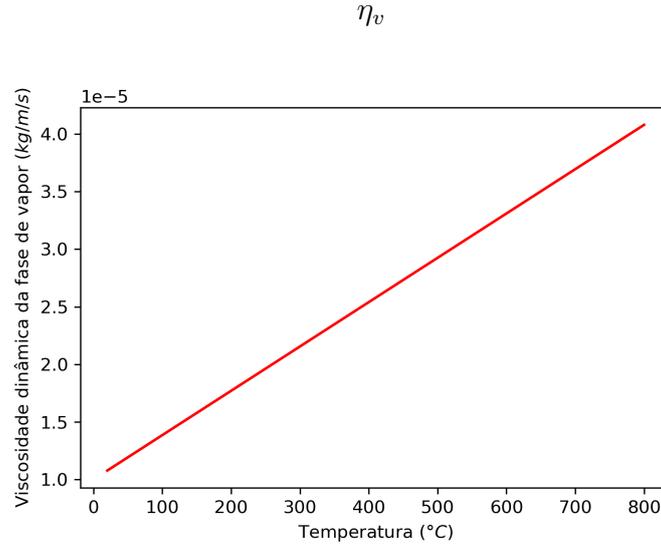
Figura 17 – Evolução da viscosidade dinâmica da fase líquida

$\eta_l$



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 18 – Evolução da viscosidade dinâmica da fase de vapor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 3.4.9 Calor latente de desidratação

O calor latente de desidratação,  $L_{s \rightarrow l}$ , é a quantidade de calor oferecida ao material fundamental para extrair da matriz hidratada uma unidade de massa de água ligada. Em concordância com Sercombe, Galle e Ranc (2001), não existem métodos diretos para determinar o calor latente de desidratação. Apesar disso, é possível, mediante utilização de algumas hipóteses, inferir qual é a quantidade de calor liberada durante a hidratação da pasta de cimento. A hidratação de 1 kg de cimento demanda em torno de 0.2 kg de água e gera aproximadamente 500 kJ de calor. Presumindo que o calor liberado durante o processo de hidratação de 1 kg de cimento é igual a quantidade de calor necessária para extrair 0.2 kg de água ligada da matriz cimentícia, é justificável estabelecer que o calor necessário para extrair 1 kg de água ligada é:

$$L_{s \rightarrow l} = 2.5 \times 10^6 \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (3.66)$$

### 3.4.10 Evolução da condutividade térmica

Entre as evoluções da condutividade térmica explanadas, foi adotada para o concreto convencional a seguinte relação (mesma equação 2.8):

$$\lambda_{cc} = 2 - 0.2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \text{ W/m K para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.67)$$

Os valores experimentais das condutividades térmicas do concreto de alto desempenho podem ser aproximados, por um deslocamento positivo, das condutividades do concreto convencional (FERREIRA, 2011). À vista disso, para aplicação de cálculo, foi adotada a evolução:

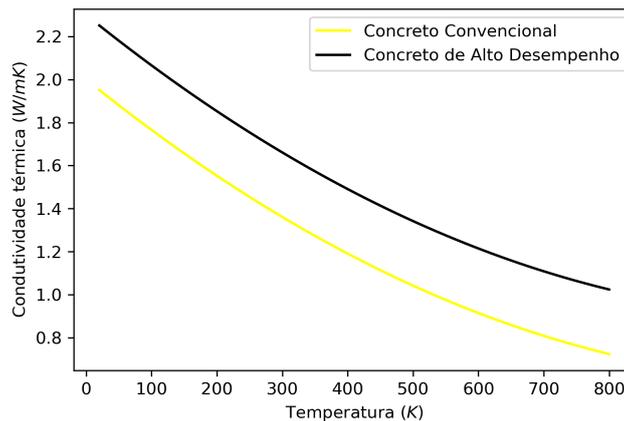
$$\lambda_{cad} = 2.3 - 0.2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \text{ W/m K para } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.68)$$

Para a rocha, foi considerada a evolução exposta por Aurangzeb, Khan e Maqsood (2007):

$$\frac{1}{\lambda_r} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{m\phi}{\lambda_f} \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (3.69)$$

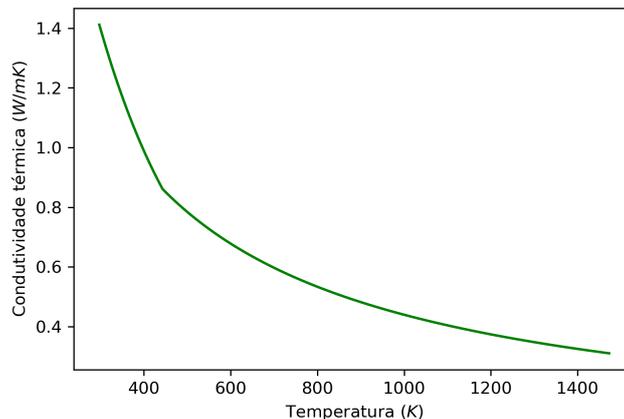
onde  $\lambda_r$  é a condutividade efetiva da rocha,  $\lambda_s$  é a condutividade da parte sólida e é tomada igual a  $3.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , que é basicamente a condutividade da calcita, e  $\lambda_f$  é a condutividade do ar nos poros, tomada igual a  $0.026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . O parâmetro  $m$  pode ser calculado através da condutividade medida experimentalmente para diversas amostras de rocha como salientado por Aurangzeb, Khan e Maqsood (2007), que encontrou os valores de 0.08 para a temperatura ambiente e 0.11 para temperaturas até  $443 \text{ K}$  ( $\approx 170^\circ\text{C}$ ). O parâmetro  $\phi$  é a porosidade da amostra e as temperaturas  $T$  e  $T_0$  são dadas em Kelvin. As figuras 19 e 20 trazem a evolução da condutividade térmica do concreto e da rocha em função da temperatura, respectivamente.

Figura 19 – Evolução da condutividade térmica do concreto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 20 – Evolução da condutividade térmica da rocha



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

## 4 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo, será apresentado o modelo numérico do problema exibido nos capítulos anteriores, abordando as características e a implementação no software Cast3M.

### 4.1 Caracterização dos materiais concreto e rocha

A Tabela 2 mostra um resumo de algumas propriedades dos concretos e da rocha, que são: resistência à compressão ( $f_c$ ), resistência à tração ( $f_t$ ), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), porosidade ( $\phi$ ), densidade aparente ( $\rho_a$ ), densidade real ( $\rho_r$ ) e condutividade térmica ( $\lambda$ ).

Tabela 2 – Propriedades dos materiais medidas experimentalmente a temperatura ambiente

Propriedade	Unidade	Concreto Convencional	Concreto CAD	Rocha
$f_c$	MPa	35,9	81,2	39,8
$f_t$	MPa	3,7	5,2	4,2
E	GPa	35,6	45,2	17,7
$\nu$		–	–	0,3
$\rho_a$	$kg/m^3$	2150	2330	2296
$\rho_r$	$kg/m^3$	–	–	2671
$\lambda$	W/m · K	1,86	2,06	–

Fonte: XING (2011) *apud* FERREIRA (2011).

Ambos os materiais são considerados isotrópicos, mas diferem um do outro no valor de suas propriedades. Os dados e propriedades iniciais a serem definidos no início do cálculo para cada tipo de concreto e para a rocha são listadas junto aos seus respectivos valores nas Tabelas 3 e 4. Os calores específicos são próprios para cada material, e são utilizados no cálculo do calor específico volumétrico total. Os valores são os mostrados na Tabela 5. A Tabela 6 mostra as condições iniciais em temperatura e saturação adotadas para os domínios.

Tabela 3 – Dados de entrada dos concretos no modelo

Dado	Unidade	CC	CAD
Quantidade de cimento, água e agregado	$kg \cdot m^3$	conforme Tabela 7	conforme Tabela 7
Água ligada	$kg \cdot m^3$	$0,9 \times \text{qtde. cimento} \times 0,21$	$0,9 \times \text{qtde. cimento} \times 0,21$
Densidade aparente	$kg \cdot m^3$	2150	2330
Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	1,86	2,06
Porosidade	%	14	9,5
Permeabilidade ao gás	$m^2$	$1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-19}$

Fonte: FERREIRA, 2011.

Tabela 4 – Dados de entrada da rocha no modelo

Dado	Unidade	Rocha
Densidade aparente	$\text{kg} \cdot \text{m}^3$	2296
Condutividade térmica	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$	1,5
Porosidade	%	14
Permeabilidade ao gás	$\text{m}^2$	$1 \times 10^{-19}$

Fonte: FERREIRA, 2011.

Tabela 5 – Calores específicos

	Calor específico ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Cimento	750
Agregados	800
Água ligada	3760
Água livre	4184
Rocha	674

Fonte: FERREIRA, 2011.

Tabela 6 – Condições iniciais em temperatura e saturação

	Concreto	Rocha
Temperatura	24°C	24°C
Saturação	39% na superfície e 95% no restante	70%

Fonte: FERREIRA, 2011.

## 4.2 Geometria do modelo bicamada

A geometria das amostras prismáticas em bicamada é mostrada na Figura 21. As composições dos concretos analisados, em quantidade do componente por volume unitário de concreto produzido, são mostradas na Tabela 7:

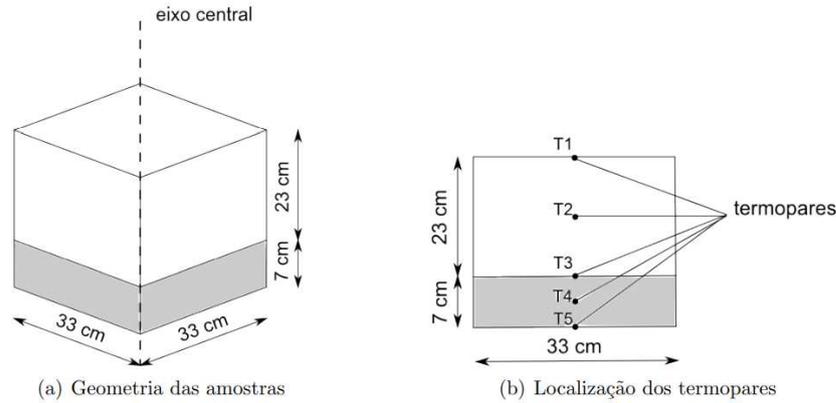
Tabela 7 – Formulação dos concretos em  $\text{kg}/\text{m}^3$ 

Constituinte	Concreto Convencional	Concreto CAD
Cimento CEM I 52,5	362	500
Brita 2 Silico-calcária	956	987
Areia média Silico-calcária	692	715
Água	217	150
Superplastificante	–	4,71

Fonte: XING (2011) *apud* FERREIRA (2011).

Os dados pertencentes aos concretos e a rocha, fornecidos nas tabelas 2 a 7, são valores que variam conforme o tipo de concreto e rocha a serem estudados e modelados.

Figura 21 – Geometria e instrumentação



Fonte: FERREIRA, 2011.

### 4.3 Calor latente de vaporização

O calor latente de vaporização  $L_{l \rightarrow v}$  (KJ/Kg) é aproximado em função da temperatura  $T$ , em  $^{\circ}\text{C}$ , pela seguinte relação dada por Raznjevic e Poadhorsky (1970):

$$L_{l \rightarrow v} = \frac{2450,2502 - 6,433949 \times T}{1 - 0,0019057413 \times T - 7,0023846 \times 10^{-7} \times T^2} \quad (4.1)$$

A equação 4.1 não é adequada para temperaturas entre  $380^{\circ}\text{C}$  e  $480^{\circ}\text{C}$ , pois apresenta valores fisicamente impossíveis chegando a uma singularidade para  $T = 380^{\circ}\text{C}$ . A partir disso, buscou-se propor uma nova evolução do calor latente de vaporização utilizando aproximações por polinômios através do método dos mínimos quadrados e por interpolações lineares. Essa evolução é dada na equação 4.2:

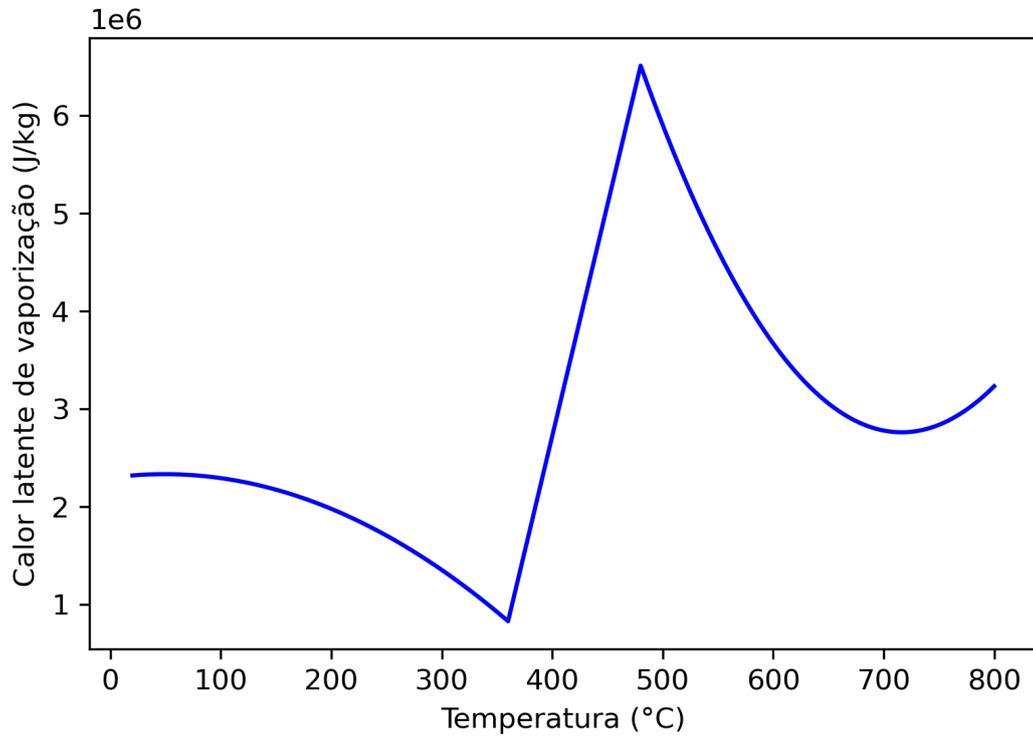
$$L_{l \rightarrow v} = 2295.738039 + 1.521225 \times T - 0.015545 \times T^2 \text{ (KJ/Kg) para } T < 360^{\circ}\text{C}$$

$$L_{l \rightarrow v} = 47.35886947 \times T - 16220.447659 \text{ (KJ/Kg) para } 360^{\circ}\text{C} \leq T \leq 480^{\circ}\text{C}$$

$$L_{l \rightarrow v} = 37224.384325 - 96.225164 \times T + 0.067168 \times T^2 \text{ (KJ/Kg) para } T > 480^{\circ}\text{C} \quad (4.2)$$

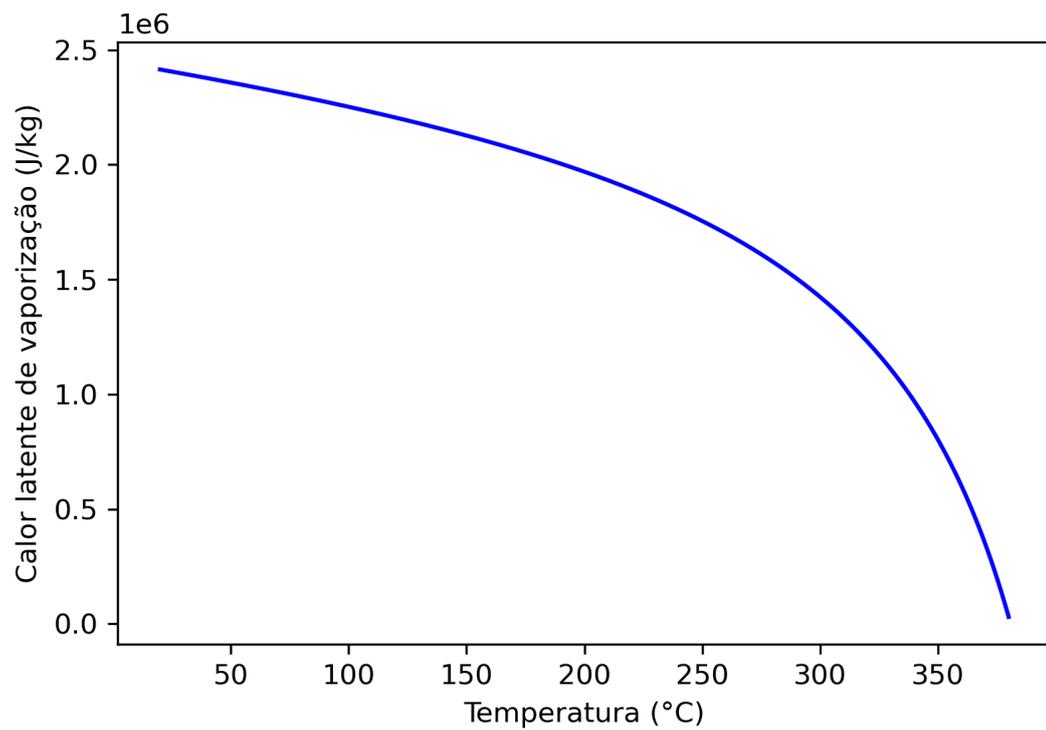
A figura 22 ilustra a evolução do calor latente de vaporização em função da temperatura obtida com a equação 4.2. Vale ressaltar que Ferreira (2011) e Soares (2018) utilizaram a equação 4.1 e permitiram que o  $L_{l \rightarrow v}$  variasse até a temperatura de  $380^{\circ}\text{C}$  e após essa faixa fosse mantido constante com valor  $30620 \text{ J/Kg}$  (valor referente a temperatura de  $380^{\circ}\text{C}$ ). O trecho da evolução até  $380^{\circ}\text{C}$  obtido pela equação 4.1 é ilustrado na figura 23.

Figura 22 – Evolução do Calor Latente de Vaporização até 800°C



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 23 – Evolução do Calor Latente de Vaporização até 380°C



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao adotar que  $L_{l \rightarrow v}$  variava apenas até a temperatura de 380°C, Ferreira (2011) e Soares (2018) evitaram o trecho de calores latentes negativos e positivos exorbitantes. Porém, o valor constante considerado para as demais temperaturas é muito pequeno comparado aos valores atingidos após a temperatura de 450°C. Devido a isso, esse parâmetro contribuiu para que as temperaturas calculadas fossem mais altas e se distanciassem dos resultados experimentais.

#### 4.4 Modelo Adotado

As equações diferenciais 3.11 e 3.53 descrevem o sistema acoplado de transferência de calor e umidade, com as duas incógnitas principais: temperatura ( $T$ ) e saturação em água líquida ( $S_l$ ) e formam o sistema de equações:

$$\begin{aligned} c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \frac{\partial \mu_{l \rightarrow v}}{\partial t} - L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \\ C \cdot \frac{\partial S_l}{\partial t} &= \nabla \cdot [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla}(S_l)] + Q_h \end{aligned} \quad (4.3)$$

Como condições de contorno térmicas temos a temperatura prescrita na superfície do concreto e o fluxo nulo nas demais arestas da geometria. Já para as condições de contorno hídricas consideramos a pressão de vapor imposta, que é deduzida do valor da saturação inicial imposta no contorno:

$$p_v = \text{constante} = S_l(t_0) p_{vs}(T_0) \text{ sobre } \partial\Omega \quad (4.4)$$

onde  $p_v$  é a pressão de vapor,  $S_l(t_0)$  a saturação inicial e  $p_{vs}(T_0)$  a pressão de vapor saturante inicial.

A relação entre a saturação ( $S_l$ ) e a umidade relativa ( $h_r$ ) é  $S_l = h_r$ . Como a umidade relativa é definida por  $h_r = \frac{p_v}{p_{vs}}$ , temos que  $p_v = h_r \cdot p_{vs} = S_l \cdot p_{vs}$ . Desta forma, a saturação é atualizada no contorno para se impor uma pressão constante:

$$S_l = \frac{S_l(t_0) p_{vs}(T_0)}{p_{vs}(T)} \text{ sobre } \partial\Omega \quad (4.5)$$

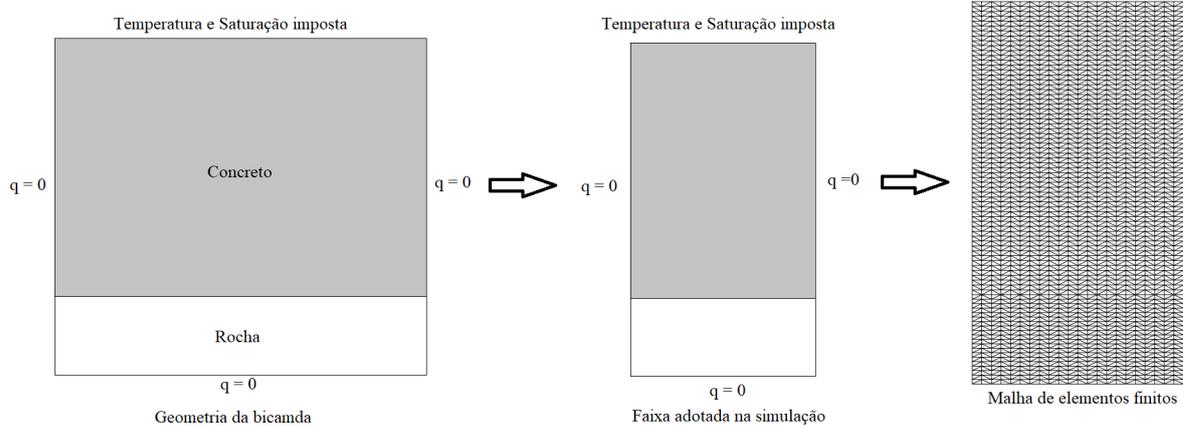
onde  $p_{vs}(T)$  é a pressão de vapor saturante em função da temperatura. As condições iniciais dos campos de temperatura e saturação para todos os nós da malha foram mostradas na tabela 6.

Esse problema de valor de contorno com problema de valor inicial foi modelado no Cast3M que é um programa de resolução de equações diferenciais parciais pelo método dos elementos finitos (CEA, 2021). Trata-se de um programa de código aberto e gratuito que permite a incorporação e adaptação de modelos por parte do usuário.

A discretização espacial foi feita por elementos triangulares lineares. Por uma questão de simetria, o modelo foi simplificado para uma região retangular de dimensões

16.5 cm  $\times$  30 cm como pode ser visto na figura 24. Os pontos de controle para acompanhar as variáveis serão chamados de termopares T1, T2, T3, T4 e T5, os quais foram colocados na face direita da geometria.

Figura 24 – Geometria utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

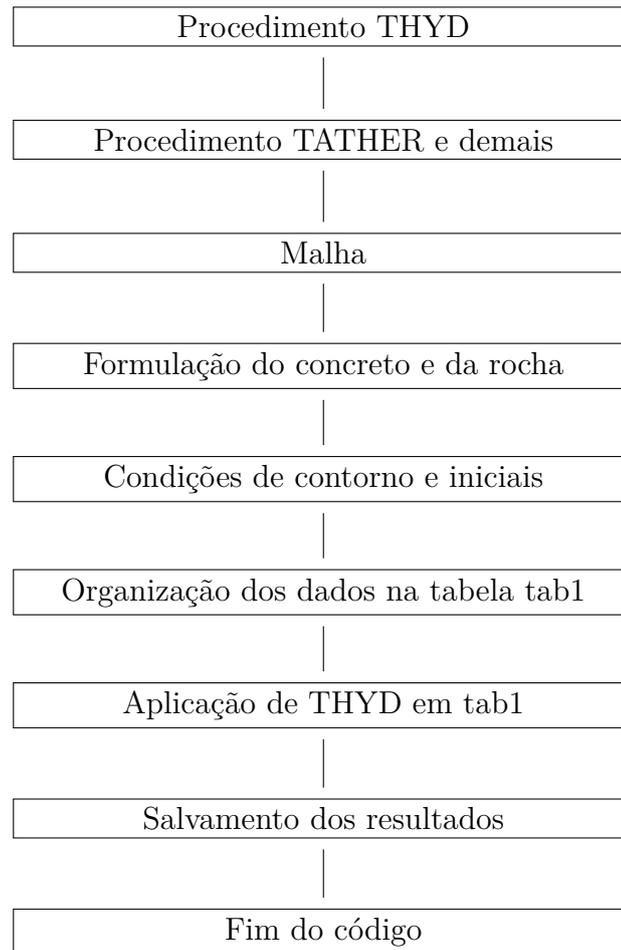
Por se tratar de um problema transiente, é necessário a adoção de esquemas de marcha no tempo para resolver as formas discretas do sistema de equações 4.3. Para o problema da difusão, adotou-se o esquema de Crank-Nicolson que é um método de segunda ordem no tempo. Na equação de conservação de massa, a marcha de tempo foi realizada com um esquema de diferenças centrais que também é um esquema de segunda ordem no tempo.

#### 4.5 Implementação do modelo termo-hídrico no Cast3M

Durante a execução de um código no Cast3M é possível chamar procedimentos. O usuário pode criar seus próprios procedimentos ou utilizar aqueles disponibilizados a ele na documentação do Cast3M. Os procedimentos existentes no programa são usados como operadores elementares e podem ser definidos no programa de execução ou em um arquivo externo. Um procedimento contém uma série de instruções, a primeira das quais é DEBP e a última FINP. O operador DEBP deve ser seguido do nome do procedimento e da lista de argumentos necessários para sua utilização (CEA, 2021).

Quando se cria um procedimento é necessário fornecer as informações que ele irá utilizar. Geralmente se cria o procedimento, armazena as informações que serão utilizadas em uma tabela e posteriormente aplica o procedimento a mesma. Nesse momento, as operações elementares definidas dentro do procedimento são executadas. O modelo em estudo possui a estrutura apresentada na figura 25.

Figura 25 – Estrutura do modelo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

É dentro do procedimento THYD que estão todos os cálculos termo-hídricos do modelo. Esses cálculos começam a ser realizados no momento em que THYD é aplicado na tabela tab1 que contém todas as informações do problema. A estrutura do procedimento THYD é descrita na figura 26.

Figura 26 – Procedimento THYD

Dados materiais do concreto e da rocha são recebidos  
 Criação das tabelas para as propriedades com seus valores iniciais  
 Laço **CALINCR**  
   Preenchimento da tabela de cálculo térmico THERM e hídrico SATU  
   Laço **BOUCPIC**  
     Incremento de tempo e condições iniciais de Picard  
     Laço **THERITER**  
       Cálculo das propriedades utilizadas no cálculo térmico  
       Preenchimento das informações restantes da tabela THERM  
       Aplicação de TATHER a THERM para o cálculo térmico  
       Verificação de convergência térmica  
     Fim do laço **THERITER**  
     Cálculo de algumas propriedades hídricas  
     Laço **HYDITER**  
       Cálculo de propriedades hídricas  
       Preenchimento das informações restantes da tabela SATU  
       Aplicação de TATHER a SATU para o cálculo hídrico  
       Verificação de convergência hídrica  
     Fim do laço **HYDITER**  
     Cálculo da água evaporada  
     Verificação de convergência de Picard  
   Fim do laço **BOUCPIC**  
   Cálculo da pressão de vapor, água líquida e pressão capilar  
   Preenchimento da tabela de resultados  
 Fim do laço **CALINCR**

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A precisão utilizada como critério de convergência térmica e hídrica é da ordem de  $1 \times 10^{-4}$ . Na convergência térmica a temperatura calculada na iteração térmica  $i$  é comparada com a da iteração térmica  $i - 1$ . Já na hídrica, a saturação calculada na iteração  $i$  é comparada com a da iteração hídrica  $i - 1$  para dado instante de tempo. Para verificar a convergência de Picard compara-se simultaneamente, a temperatura antes e após o laço térmico e a saturação antes e após o laço hídrico, com critério de convergência de  $1 \times 10^{-8}$  em dado instante de tempo. O número máximo de iterações térmicas e hídricas é 1000 e de Picard é 100.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo os resultados de temperatura, porosidade e saturação do modelo em estudo para o concreto convencional (CC) e o concreto de alto desempenho (CAD) na bicamada rocha-concreto serão exibidos e comparados com os encontrados na literatura.

### 5.1 Concreto Convencional (CC)

Serão aqui apresentados os resultados do modelo que foi aprimorado para o concreto convencional (CC). Foram reproduzidos três exemplos, o primeiro a bicamada rocha-concreto para os concretos CC-600 e CC-750 que serão comparados com as medições experimentais e numéricas de Ferreira (2011) e os resultados numéricos de Amaral (2014). No segundo exemplo o modelo será aplicado a um corpo de prova de concreto com as propriedades e condições iniciais propostas por Pliya (2010) e no terceiro serão reproduzidos os resultados supondo que o concreto convencional utilizado na bicamada rocha-concreto fosse o de Nguyen (2013). O segundo e terceiro exemplo são utilizados como validação do modelo.

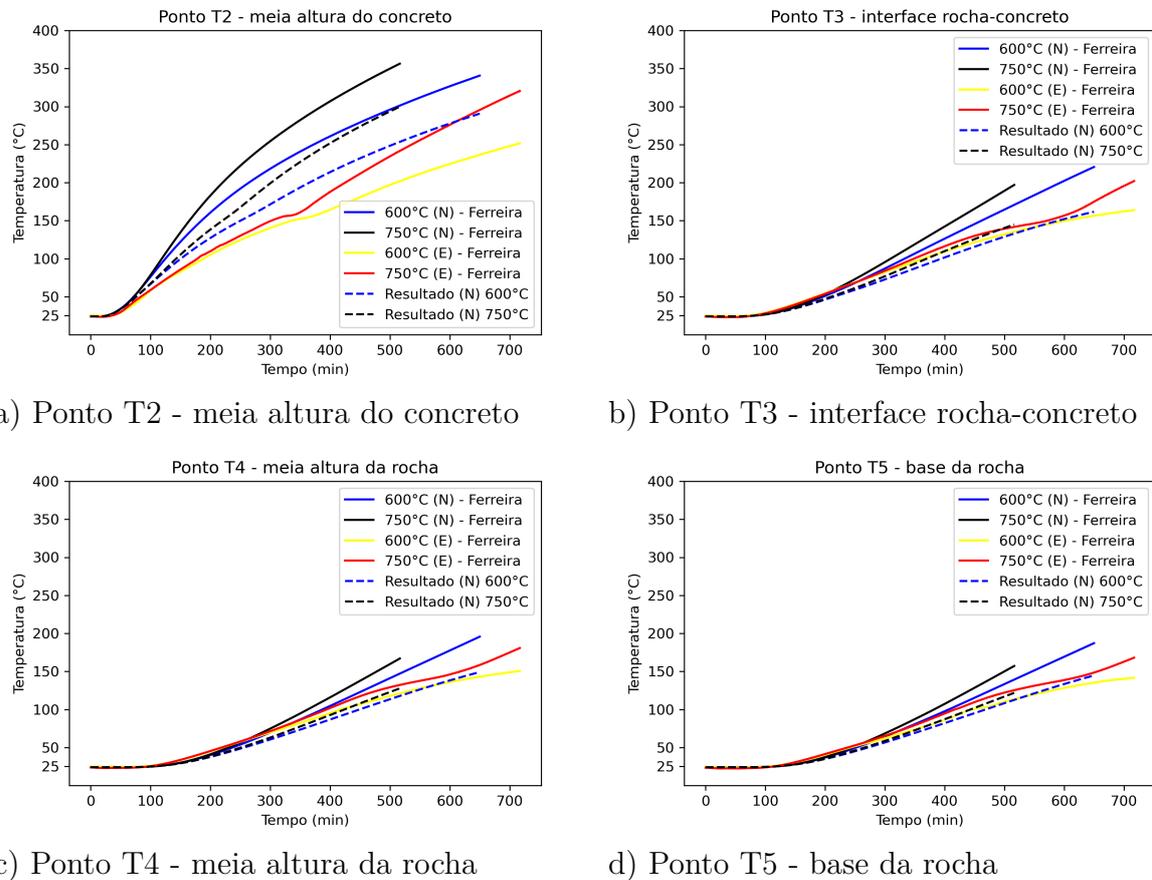
O objetivo do trabalho experimental acompanhado por Ferreira (2011) era submeter amostras de concreto comum e de alto desempenho a temperaturas de até 600°C e 750°C para medir a evolução da temperatura em alguns pontos e observar os diferentes efeitos da temperatura nos dois tipos de concreto e como esses efeitos chegam até a interface com a rocha sedimentar sobre a qual foram moldados.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios experimentais, Ferreira (2011) propôs a implementação de um modelo termo-hídrico desenvolvido no código Cast3M para simular os mesmos experimentos desenvolvidos em laboratório. Amaral (2014) propôs incorporar ao modelo o acoplamento mecânico, através do modelo de dano de Mazars, o qual é válido para situações de carregamento continuamente crescente.

#### 5.1.1 Temperatura

As curvas numéricas de temperatura  $\times$  tempo obtidas para o Concreto Convencional (CC) a 600°C e 750°C são comparadas com as experimentais e numéricas obtidas por Ferreira (2011) na figura 27. Na legenda da figura 27, a letra (E) indica experimental e (N) numérico. No ponto  $T_2$ , onde está localizado a meia altura do concreto, os resultados numéricos encontrados reproduziram a tendência da curva experimental com a faixa de temperatura acima das temperaturas experimentais. Porém, estes resultados comparados aos numéricos de Ferreira (2011), melhoraram e estão mais próximos da curva experimental. Nos termopares  $T_3$ ,  $T_4$  e  $T_5$ , que indicam a interface rocha-concreto, meia altura da rocha e base da rocha, respectivamente, os resultados reproduziram a tendência com a faixa de temperatura próxima das temperaturas experimentais.

Figura 27 – Evolução da temperatura nos termopares no concreto CC-600 e CC-750



Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

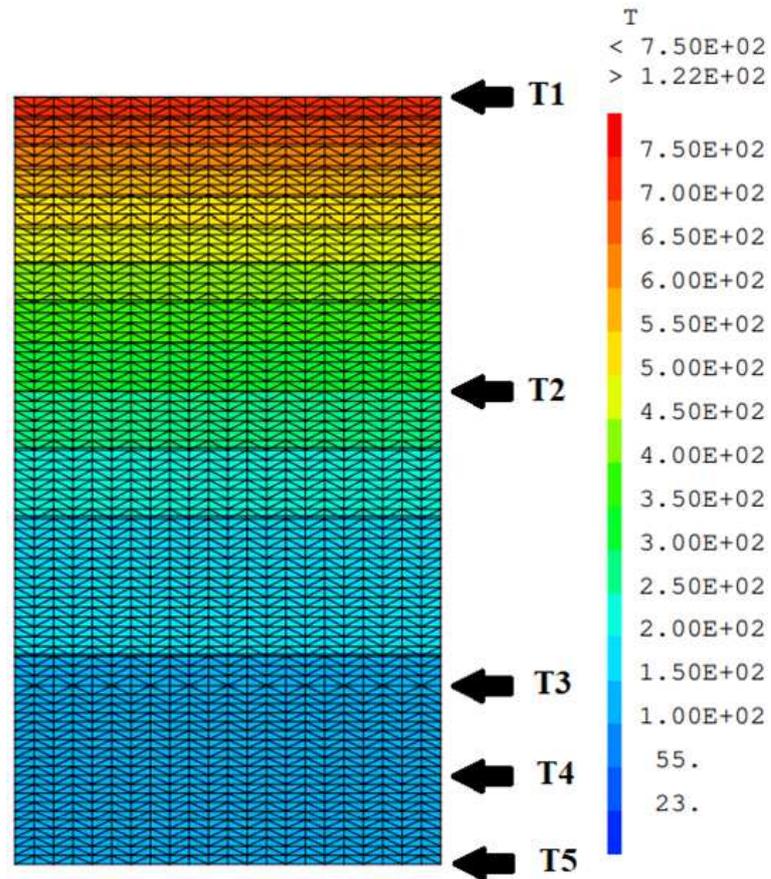
Ferreira (2011) relata que o estudo experimental envolve a precisão do sistema de aquecimento do forno, bem como a precisão do sistema de medição das temperaturas, e que, ao utilizar apenas um forno, os ensaios feitos com cada corpo de prova foram sequenciais, com intervalos de alguns dias entre eles, o que pode propiciar pequenas variações na condição inicial dos corpos de prova que ficaram acondicionados em cobertas plásticas por mais tempo.

É interessante destacar que o início do distanciamento entre os resultados experimentais e numéricos de Ferreira (2011), juntamente com os resultados numéricos aqui obtidos, surgiram aproximadamente após  $60^{\circ}\text{C}$ , temperatura na qual começa a ocorrer (numericamente) o fenômeno da desidratação. A formulação da rocha é mais simples e não considera a desidratação. Há a possibilidade dessa simplicidade nos eventos que decorrem na camada de rocha estar conexas com o erro sucessivamente menor à medida que o ponto observado está mais longe da superfície aquecida.

A distribuição de temperaturas no concreto convencional (CC) no momento em que  $T_1 = 750^{\circ}\text{C}$  é ilustrado na figura 28 e a evolução do calor latente de vaporização é ilustrado na figura 29. A melhora nos resultados da temperatura se deve a nova formulação

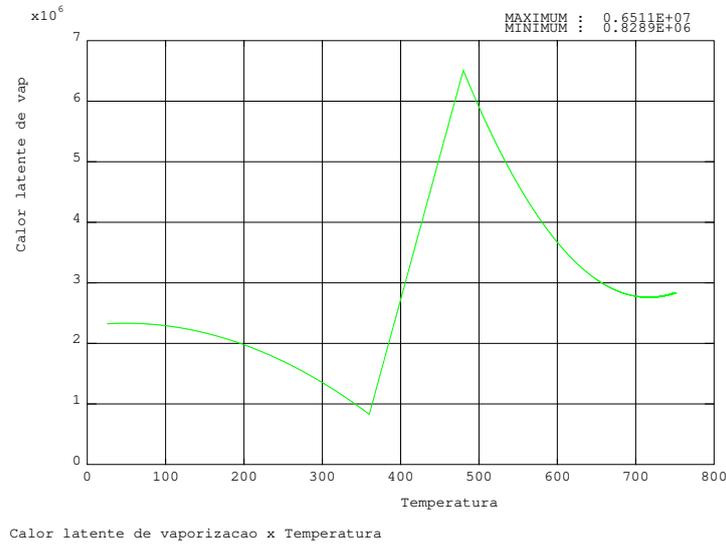
para o calor latente de vaporização e ao novo esquema de marcha no tempo adotado que cuidaram da singularidade e dos erros de aproximação.

Figura 28 – Distribuição de Temperaturas no concreto CC-750



Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Figura 29 – Evolução do Calor Latente de Vaporização até 750°C

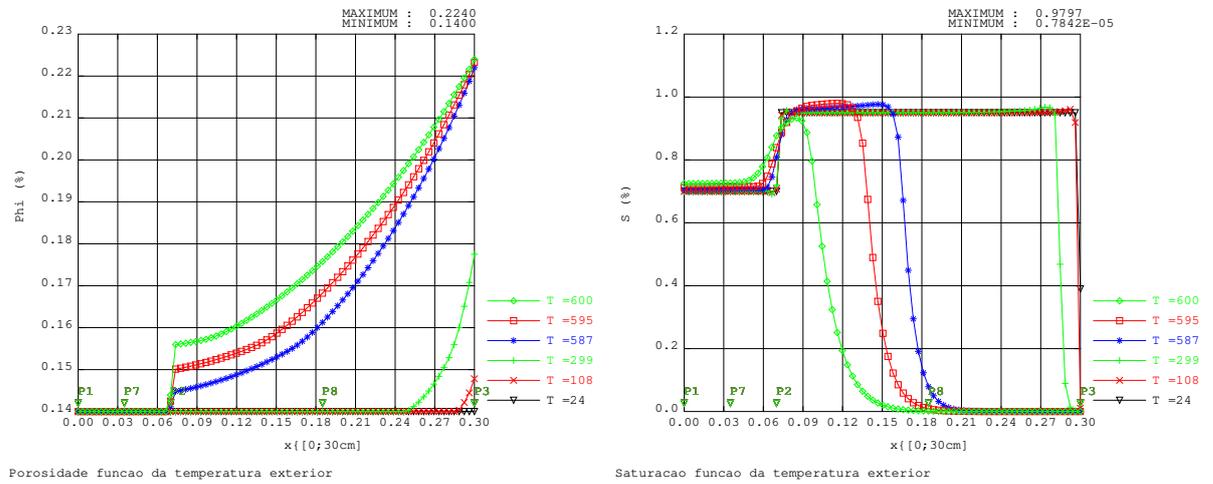


Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

### 5.1.2 Porosidade e Saturação

A porosidade e a saturação ao longo do eixo analisado do concreto convencional (CC) até 600°C são ilustradas na figura 30. As evoluções da saturação e porosidade na altura do corpo de prova possuem curvas obtidas para uma dada temperatura na superfície. Ou seja, o eixo das abscissas condiz as diferentes alturas no eixo em análise. Os pontos  $P1$ ,  $P7$ ,  $P2$ ,  $P8$  e  $P3$  espelhados no eixo das abscissas são, respectivamente, os pontos dos termopares intitulados  $T5$ ,  $T4$ ,  $T3$ ,  $T2$  e  $T1$ . Sendo a abscissa  $0.30\ m$  (ponto  $P3$ ) a superfície aquecida.

Figura 30 – Evolução da porosidade e saturação no concreto CC-600



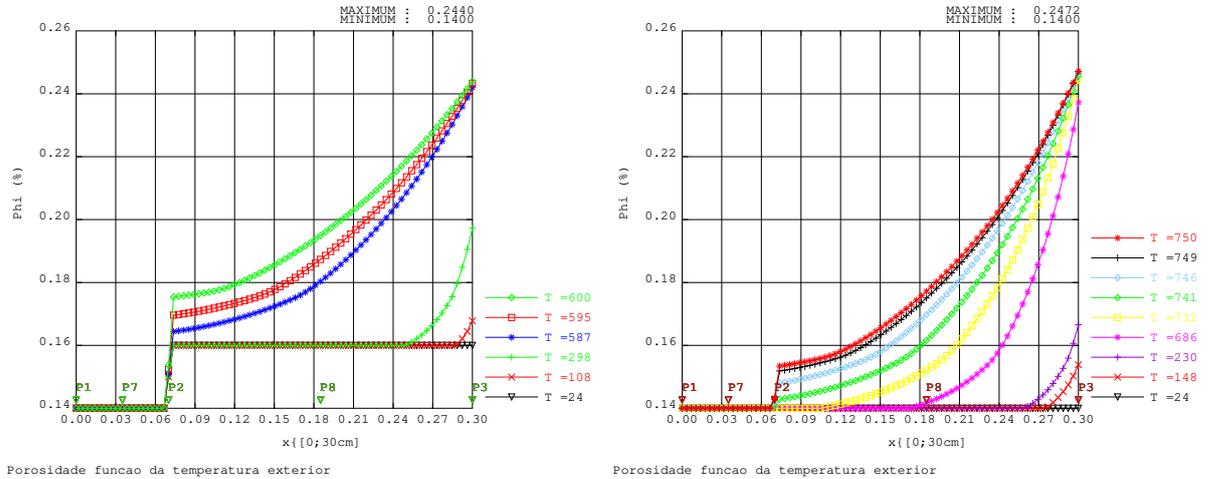
a) Porosidade

b) Saturação

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Em seu modelo Termo-Hidro-Mecânico, Amaral (2014) utilizou uma porosidade inicial para o concreto convencional igual a 16%. A evolução da porosidade para o concreto convencional com porosidade inicial igual a 16% e a evolução da porosidade do concreto convencional a 750°C com porosidade inicial igual a 14% são dadas na figura 31. A evolução da saturação encontrada por Amaral (2014) para o concreto convencional é comparada com a saturação calculada pelo modelo em estudo (considerando a porosidade inicial igual a 16%) na figura 32.

Figura 31 – Evolução da porosidade no CC-600 e CC-750

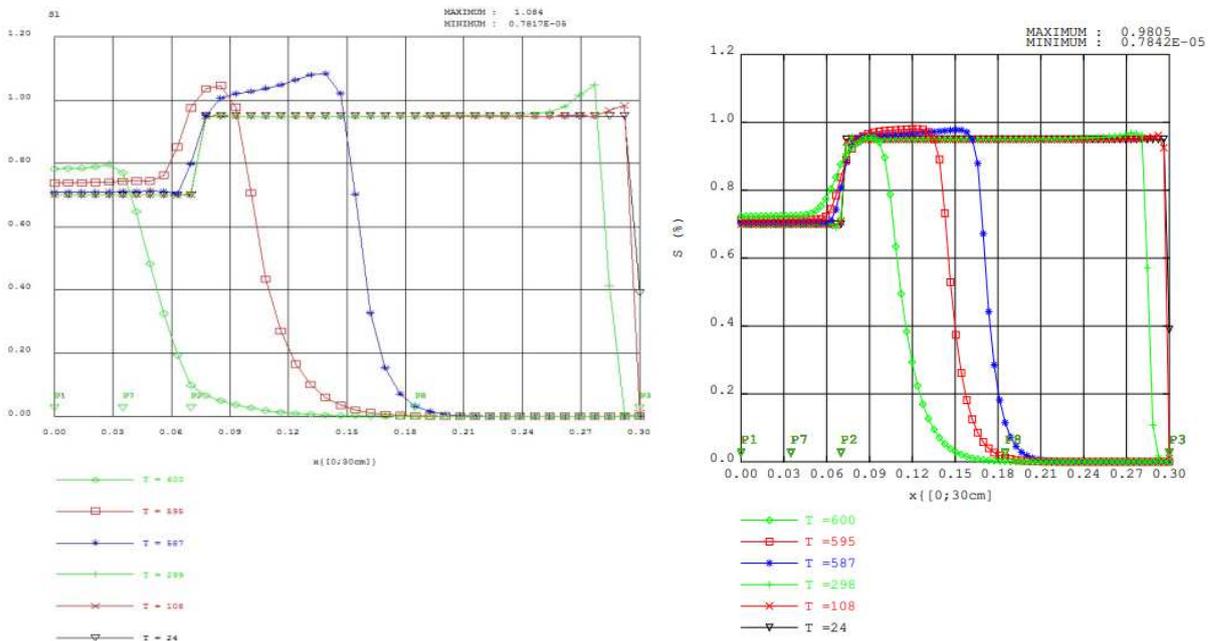


a) Porosidade CC-600 ( $\phi_0 = 16\%$ )

b) Porosidade CC-750 ( $\phi_0 = 14\%$ )

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Figura 32 – Evolução da saturação no concreto CC-600



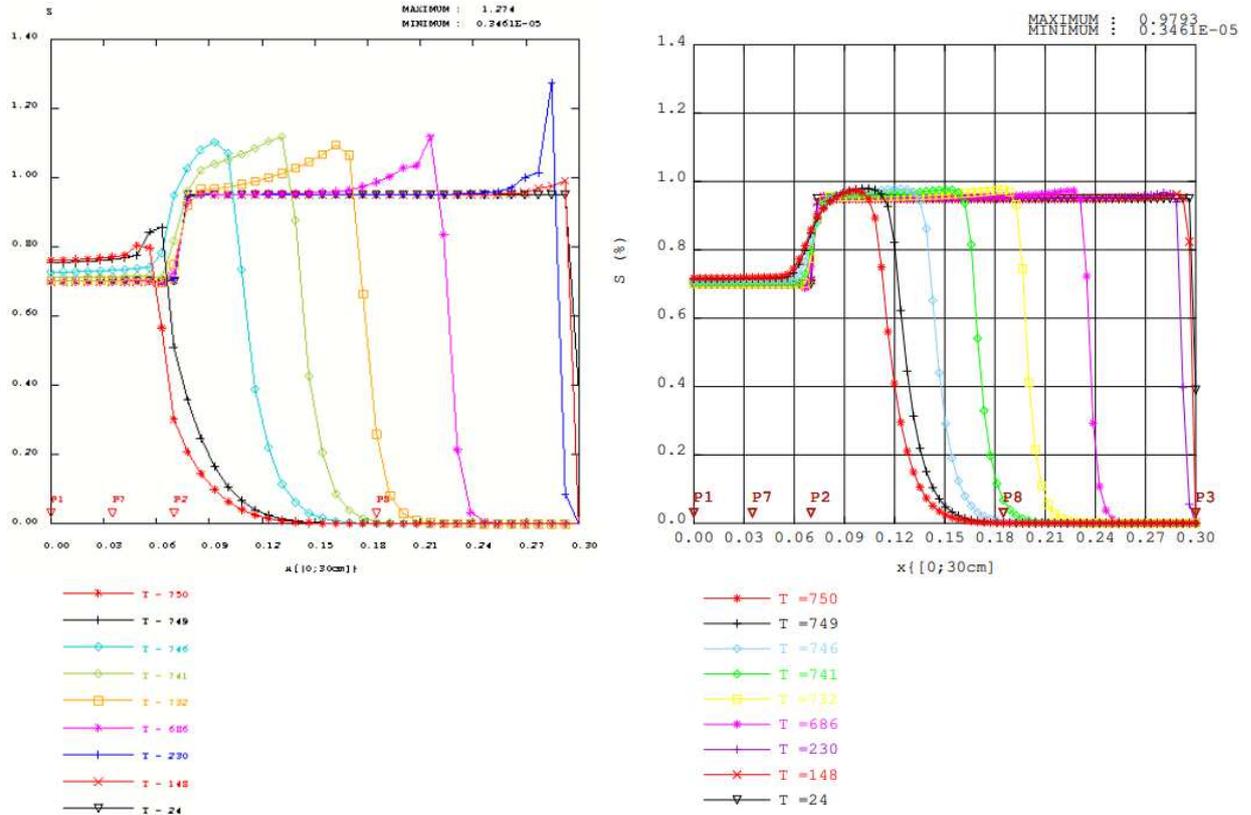
a) Fonte: Amaral, 2014.

b) Fonte: Resultados da Pesquisa, 2023.

Amaral (2014) encontrou picos de saturação de 108.4%, o que é fisicamente impossível considerando que a saturação é dada pela razão entre o volume de líquidos ( $V_l$ ) e o volume de vazios ( $V_{vazios}$ ). No presente trabalho, os resultados numéricos obtidos encontraram picos de saturação de 97.97% quando a porosidade inicial adotada é igual a 14% e 98.05% quando a porosidade inicial é 16%.

A saturação ao longo do eixo analisado do concreto convencional (CC) até 750°C é confrontada com a saturação obtida por Ferreira (2011) na figura 33.

Figura 33 – Evolução da saturação no concreto CC-750



a) Fonte: Ferreira, 2011.

b) Fonte: Resultados da Pesquisa, 2023.

Na tabela 8 organizamos os picos máximos encontrados para a saturação dos concretos CC-600 e CC-750.

Tabela 8 – Saturação

Referência	Saturação (%) CC-600	Saturação (%) CC-750
Ferreira (2011)	-	127.4
Amaral (2014)	108.4	-
Resultados	98.05	97.93

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

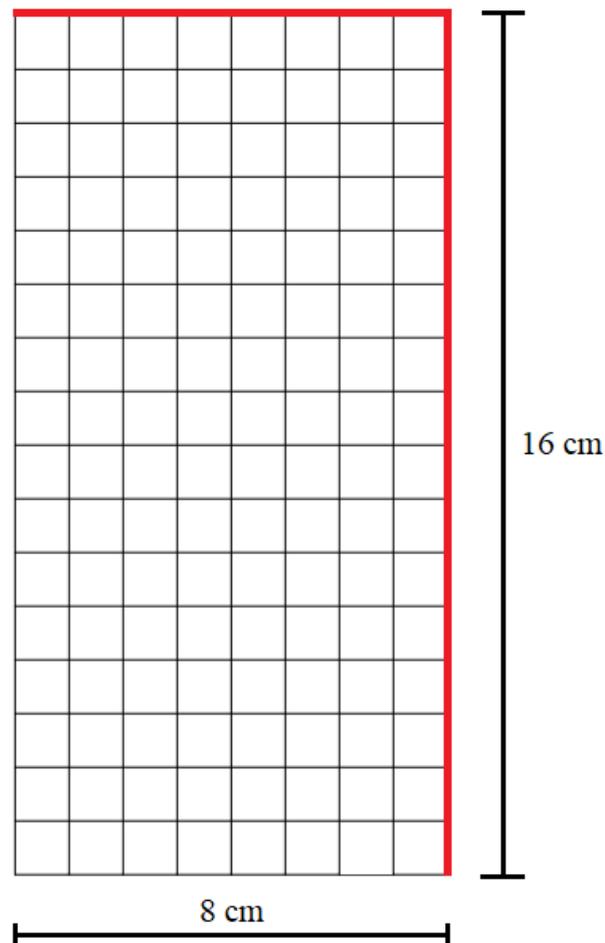
### 5.1.3 Validação dos resultados da saturação para o concreto convencional (CC)

Para validar os resultados da saturação do concreto convencional (CC) vamos aplicar o modelo instituído em outros dois concretos convencionais detalhados nas subseções a seguir.

### 5.1.3.1 CC de Pliya (2010)

Pliya (2010) utilizou um modelo axissimétrico com carregamento térmico de  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  aplicado nos lados externos do corpo de prova, representados em vermelho, na figura 34. A temperatura inicial do material é de  $20^{\circ}\text{C}$  e a temperatura final  $600^{\circ}\text{C}$ . A formulação do concreto e as condições iniciais do problema são dadas nas tabelas 9 e 10. Os demais parâmetros e propriedades seguem as definições do modelo em estudo.

Figura 34 – Geometria utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 9 – Formulação do concreto de Pliya (2010)

Constituinte	
Cimento	$400 \text{ kg}/\text{m}^3$
Agregados	$1773 \text{ kg}/\text{m}^3$
Água de mistura	$181 \text{ kg}/\text{m}^3$

Fonte: PLIYA, 2010.

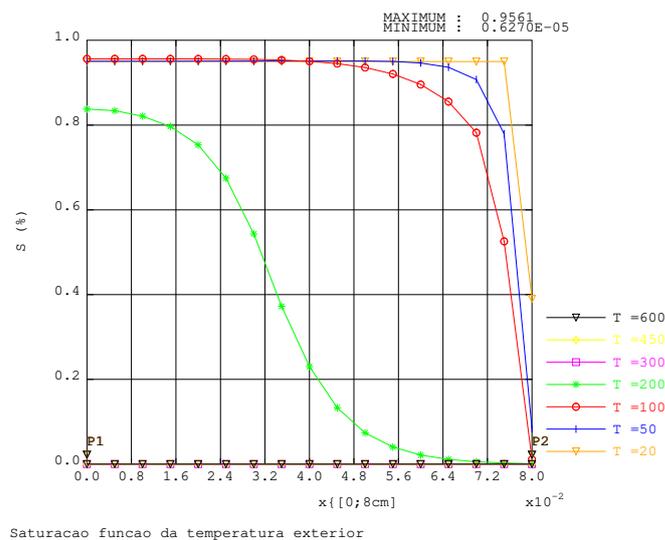
Tabela 10 – Condições iniciais de Pliya (2010)

Dado	Valor
Temperatura	20°C
Saturação	95%
Porosidade	13.9%
Permeabilidade intrínseca	$3.5 \times 10^{-16}$

Fonte: PLIYA, 2010.

Aplicando o modelo em estudo ao concreto e condições iniciais propostas por Pliya (2010) obtemos a evolução da saturação dada pela figura 35, a qual possui pico máximo de 95.61%, conforme esperado, validando o modelo.

Figura 35 – Evolução da Saturação



Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

### 5.1.3.2 CC de NGUYEN (2013)

Nesta subseção, supõe-se que o concreto convencional utilizado na bicamada rocha-concreto possui a mesma constituição e condições iniciais que o concreto convencional B1 de NGUYEN (2013) e analisa-se seus resultados. A formulação do concreto de NGUYEN (2013) e suas condições iniciais adotadas são ilustradas nas tabelas 11 e 12. A temperatura inicial do material é de 24°C e a temperatura final 600°C. Os outros parâmetros e propriedades seguem as definições do modelo em estudo.

Simulando a estrutura bicamada rocha-concreto com as formulações e condições das tabelas 11 e 12 temos a evolução da porosidade e saturação ilustradas na figura 36.

Tabela 11 – Formulação do concreto de Nguyen (2013)

Constituinte	
Cimento	327.5 $kg/m^3$
Agregados	1699.0 $kg/m^3$
Água de mistura	245.2 $kg/m^3$

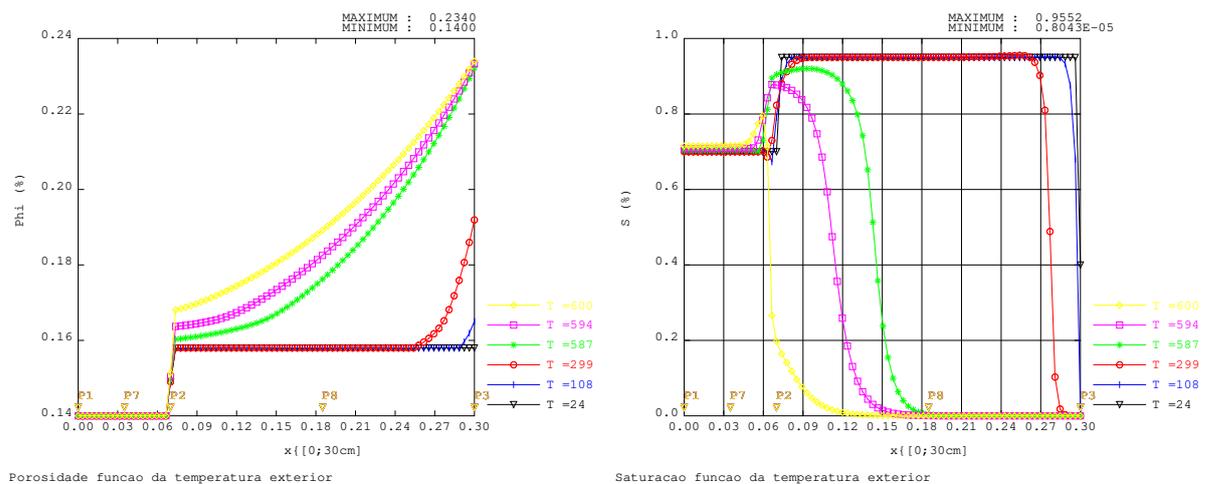
Fonte: NGUYEN, 2013.

Tabela 12 – Condições iniciais de Nguyen (2013)

Dado	Valor
Saturação	40% na superfície e 95% no restante
Porosidade	15.8%
Permeabilidade intrínseca	$4.697 \times 10^{-16}$

Fonte: NGUYEN, 2013.

Figura 36 – Evolução da porosidade e saturação



a) Porosidade

b) Saturação

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Os resultados mostram que o pico máximo da saturação encontrado é de 95.52%, um valor melhor que o encontrado para o concreto convencional de Ferreira (2011), validando a aplicação do modelo em estruturas de concreto convencional.

## 5.2 Concreto de Alto Desempenho (CAD)

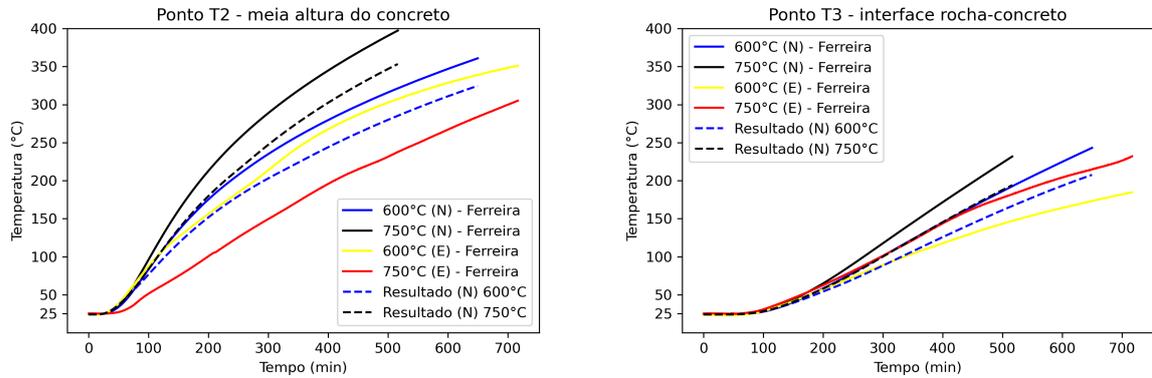
Serão aqui apresentados os resultados do modelo que foi aprimorado para o concreto de alto desempenho (CAD). Foram reproduzidos dois exemplos, o primeiro a bicamada rocha-concreto para os concretos CAD-600 e CAD-750 que serão comparados com as

medições experimentais e numéricas de Ferreira (2011) e os resultados numéricos de Amaral (2014). No segundo exemplo que é utilizado como validação do modelo serão reproduzidos os resultados supondo que o concreto de alto desempenho utilizado na bicamada rocha-concreto fosse o de Nguyen (2013).

### 5.2.1 Temperatura

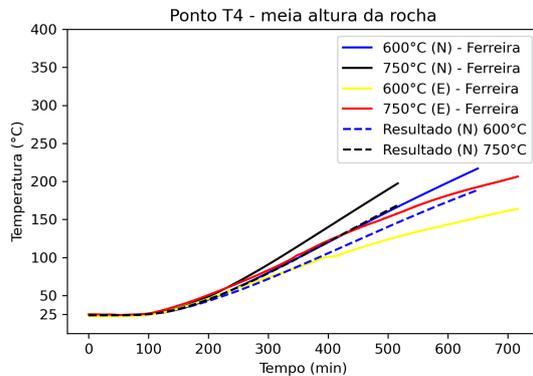
As curvas numéricas de temperatura  $\times$  tempo obtidas para o Concreto de Alto Desempenho (CAD) a  $600^{\circ}\text{C}$  e  $750^{\circ}\text{C}$  são comparadas com as experimentais e numéricas obtidas por Ferreira (2011) na figura 37. Na legenda da figura 37, a letra (E) indica experimental e (N) numérico. No ponto  $T2$ , onde está localizado a meia altura do concreto, os resultados numéricos encontrados reproduziram a tendência da curva experimental com a faixa de temperatura próxima das temperaturas experimentais até  $200^{\circ}\text{C}$  e se distanciaram parcialmente após esta temperatura. Nos termopares  $T3$ ,  $T4$  e  $T5$ , que indicam a interface rocha-concreto, meia altura da rocha e base da rocha, respectivamente, a faixa de temperatura tem comportamento semelhante ao termopar  $T2$ , porém o distanciamento começa um pouco antes na temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ . Vale ressaltar, que apesar de ser chamado de CAD-750 o CAD foi exposto a temperatura máxima de  $773^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. Ferreira (2011) e Amaral (2014) também utilizaram  $773^{\circ}\text{C}$  e o chamaram de CAD-750. Logo, o mesmo foi feito para manter o padrão de nomenclatura das referências.

Figura 37 – Evolução da temperatura nos termopares no concreto CAD-600 e CAD-750

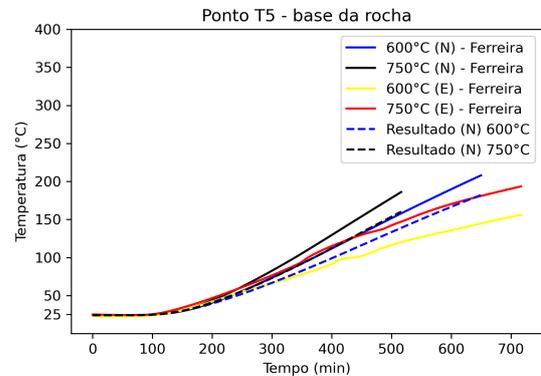


a) Ponto T2 - meia altura do concreto

b) Ponto T3 - interface rocha-concreto



c) Ponto T4 - meia altura da rocha

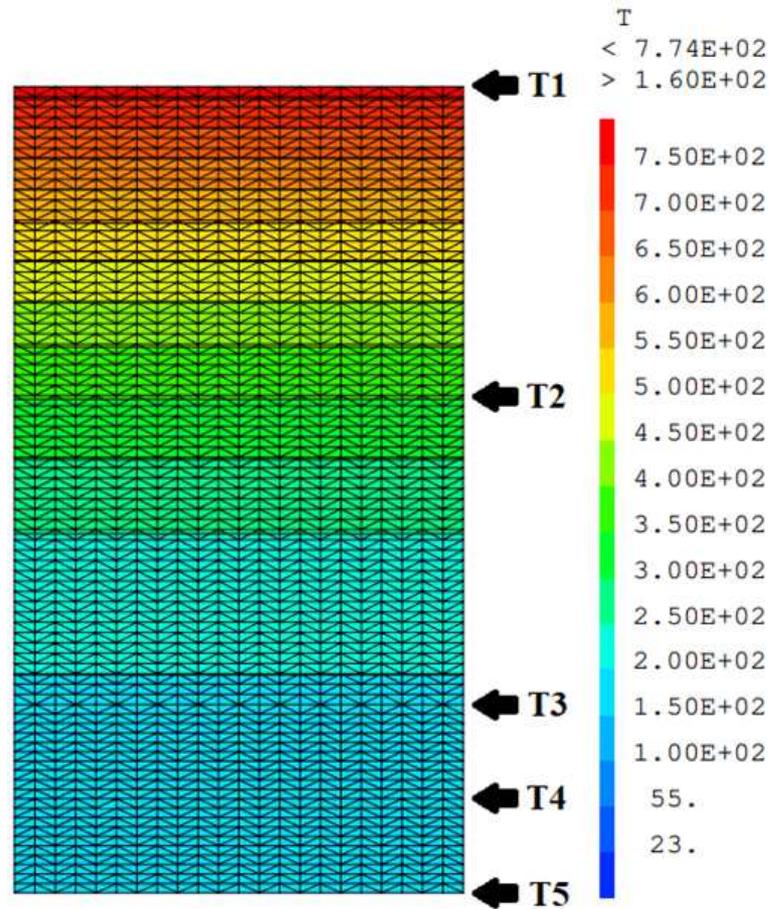


d) Ponto T5 - base da rocha

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

A distribuição de temperaturas no concreto de alto desempenho (CAD) no momento em que  $T_1 = 773^{\circ}\text{C}$  é ilustrado na figura 38.

Figura 38 – Distribuição de Temperaturas no concreto CAD-750

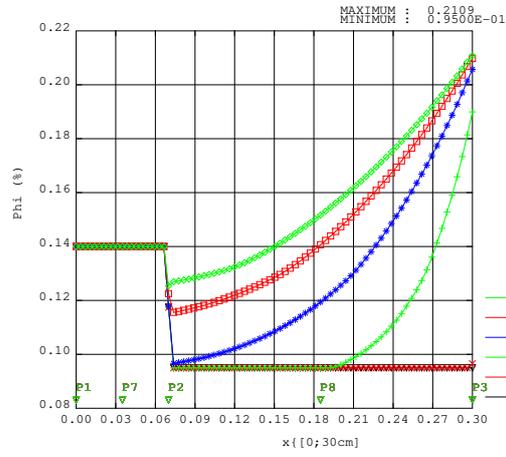


Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

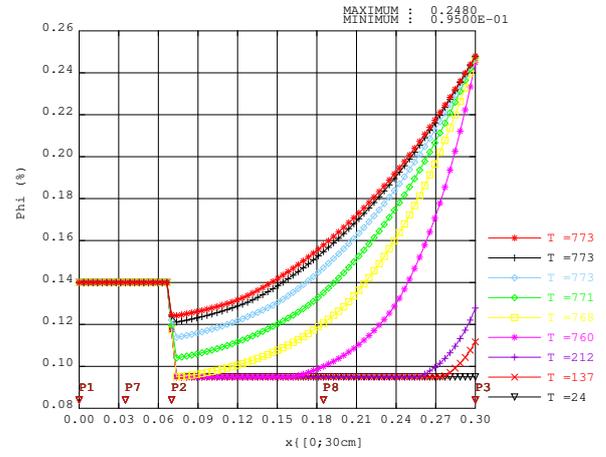
### 5.2.2 Porosidade e Saturação

A evolução da porosidade para o concreto de alto desempenho é apresentada na figura 39. A saturação ao longo do eixo analisado do concreto de alto desempenho CAD-600 é confrontada com a saturação de Amaral (2014) na figura 40 e a do CAD-750 com a de Ferreira (2011) na figura 41.

Figura 39 – Evolução da porosidade no CAD-600 e CAD-750



Porosidade funcao da temperatura exterior



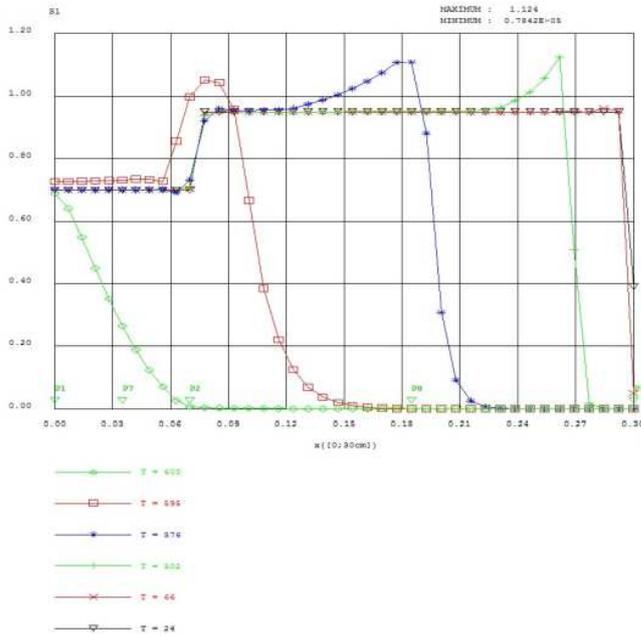
Porosidade funcao da temperatura exterior

a) Porosidade CAD-600

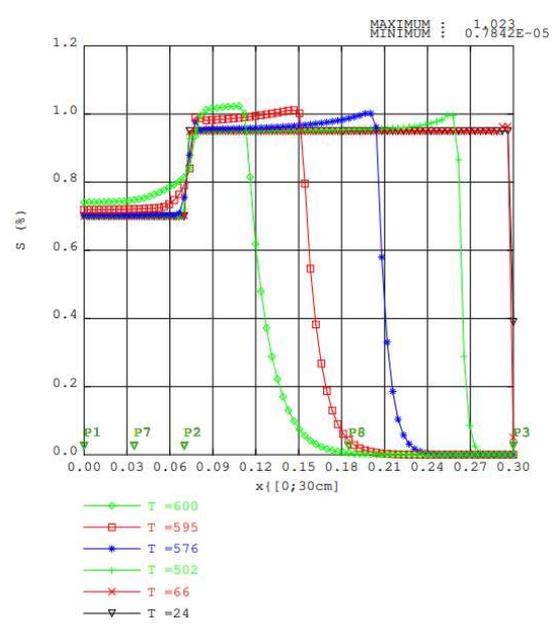
b) Porosidade CAD-750

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Figura 40 – Evolução da saturação no concreto CAD-600

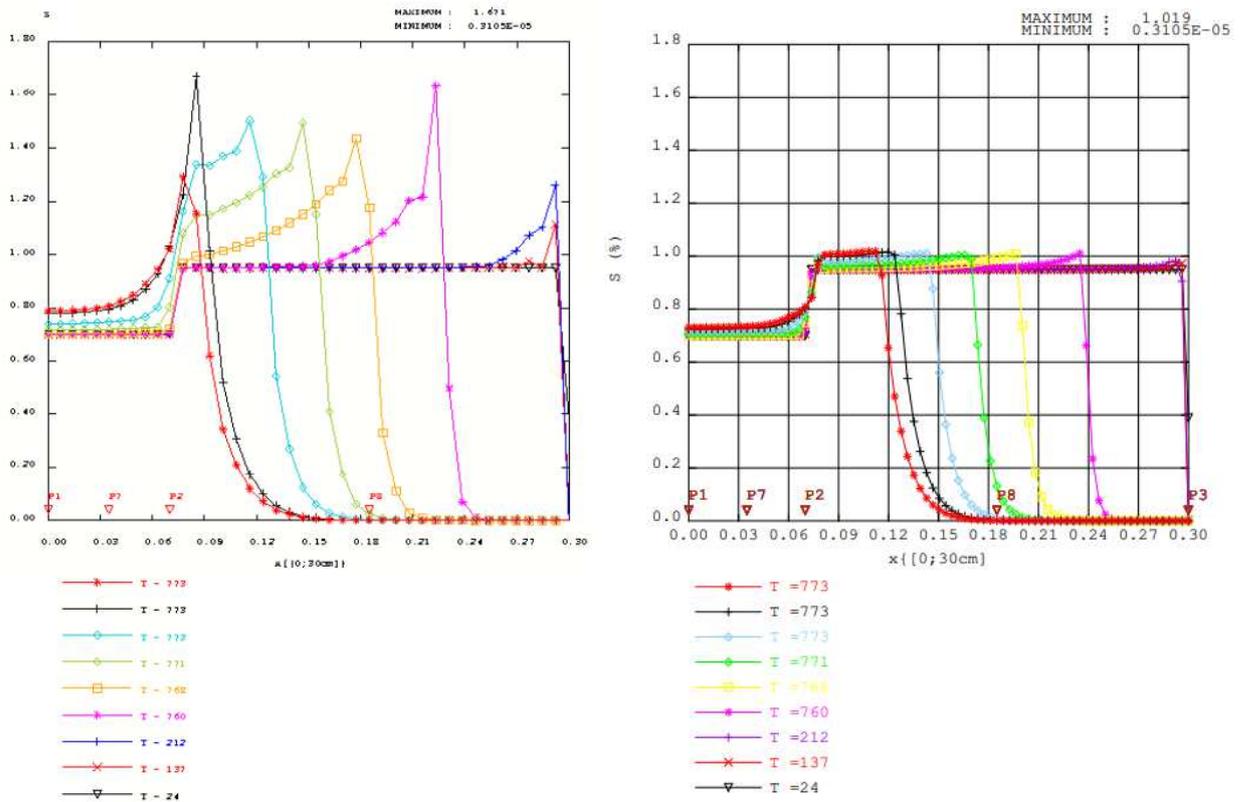


a) Fonte: Amaral, 2014.



b) Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Figura 41 – Evolução da saturação no concreto CAD-750



a) Fonte: Ferreira, 2011.

b) Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Ainda que os resultados tenham melhorado drasticamente, comparados aos de Amaral (2014) e Ferreira (2011), deparamos com picos de saturação acima de 100%. Esses valores maiores que 100% são significativos, visto que são fisicamente inadmissíveis. As curvas de saturação similarmente mostram a predisposição da migração da água para as zonas mais frias, notado o aumento da saturação próximo da camada rochosa.

Uma das hipóteses levantadas por Ferreira (2011) sobre os picos de saturação maiores que 100% foi a consideração do meio indeformável. Em alguns pontos críticos pertinentes a geração e destruição de massa líquida, o volume de água líquida na estrutura acaba superando o volume dos vazios existentes. Os valores acima de 100% são encontrados no concreto CAD, que contém mais baixa porosidade durante todo o ciclo de aquecimento, evidenciando que a hipótese adotada de indeformabilidade dos meios pode levar a resultados inconsistentes em certas situações. No entanto, Amaral (2014) descarta essa possibilidade, pois em seu modelo termo-hidro-mecânico o meio é considerado deformável e, ainda assim, a saturação supera os 100% em determinados pontos. Por fim, Amaral (2014) levanta a hipótese da porosidade ser considerada apenas em função dos aspectos químicos como a causa dos valores acima de 100% na saturação.

Na tabela 13 organizamos os picos máximos encontrados para a saturação dos concretos CAD-600 e CAD-750.

Tabela 13 – Saturação

Referência	Saturação (%) CAD-600	Saturação (%) CAD-750
Ferreira (2011)	-	167.1
Amaral (2014)	112.4	-
Resultados	102.3	101.9

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

### 5.2.3 Validação dos resultados da saturação para o concreto de alto desempenho (CAD)

Comparando os resultados obtidos para a saturação com os de Ferreira (2011) e de Amaral (2014), é notório uma grande melhoria nos resultados. Porém, ainda existem picos de saturação acima de 100%, ou seja,  $S_l > 1$  como no CAD-600 e no CAD-750. Para a validação do modelo instituído, analisa-se o comportamento da saturação, de forma a empregar o modelo em estudo em outro concreto de alto desempenho detalhado na subseção a seguir.

#### 5.2.3.1 CAD de NGUYEN (2013)

Nesta subseção, presume-se que o concreto de alto desempenho empregado na bicamada rocha-concreto possui a mesma constituição e condições iniciais que o concreto de alto desempenho B2 de NGUYEN (2013) e observa-se seus resultados. A formulação do concreto de NGUYEN (2013) e suas condições iniciais tomadas são demonstradas nas tabelas 14 e 15. A temperatura inicial do material é de 24°C e a temperatura final 600°C. Os outros parâmetros e propriedades seguem as definições do modelo em estudo.

Tabela 14 – Formulação do concreto de Nguyen (2013)

Constituinte	
Cimento	500.0 $kg/m^3$
Agregados	1730.0 $kg/m^3$
Água de mistura	174.0 $kg/m^3$

Fonte: NGUYEN, 2013.

Tabela 15 – Condições iniciais de Nguyen (2013)

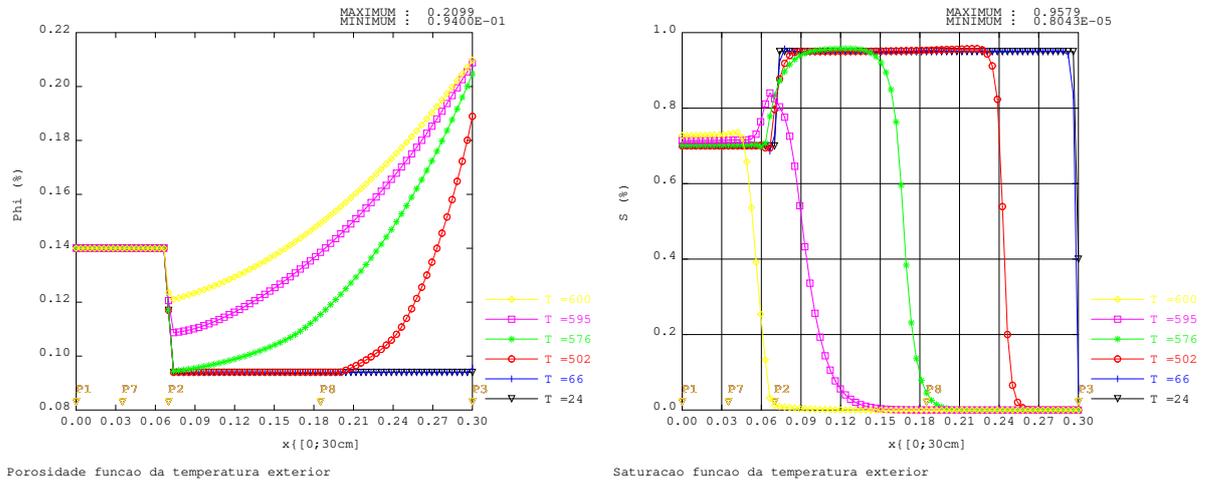
Dado	Valor
Saturação	40% na superfície e 95% no restante
Porosidade	9.4%
Permeabilidade intrínseca	$7.503 \times 10^{-17}$

Fonte: NGUYEN, 2013.

Simulando a estrutura bicamada rocha-concreto com as formulações e condições das tabelas 14 e 15 encontramos a evolução da porosidade e saturação representadas na

figura 42.

Figura 42 – Evolução da porosidade e saturação



a) Porosidade

b) Saturação

Fonte: Resultados da pesquisa, 2023.

Os resultados apontam que o pico máximo da saturação detectado foi de 95.79%, um valor dentro dos limites esperados para a saturação validando a aplicação do modelo em estruturas de concreto de alto desempenho.

## 6 CONCLUSÃO

Ao propor uma nova formulação para o calor latente de vaporização, que é uma das fontes geradoras de calor do problema, a singularidade existente foi corrigida. Os resultados da temperatura nos termopares analisados melhoraram muito em ambos os concretos, fazendo com que as curvas numéricas se aproximassem das experimentais.

Ao mudar o esquema de marcha no tempo, ou seja, mudar o método numérico utilizado para a integração no tempo, utilizando agora métodos de segunda ordem, o erro de aproximação diminuiu melhorando o resultado da saturação. Os termos de derivada no tempo da porosidade haviam sido descartados por serem considerados pequenos em relação aos demais, porém a implementação deles contribuiu para a melhora dos resultados. Cada alteração teve uma pequena contribuição, que juntas foram fundamentais para corrigir os picos de saturação acima de 100% no concreto convencional (CC) e melhorar os resultados do concreto de alto desempenho (CAD).

Ferreira (2011) levantou a hipótese dos picos de saturação maiores que 100% estarem relacionados à consideração do meio indeformável. Amaral (2014) contestou essa hipótese e relacionou os picos de saturação acima de 100% a porosidade ser considerada apenas em função dos aspectos químicos. No entanto, com base nos resultados obtidos, percebe-se que mesmo considerando o meio indeformável foram encontrados valores abaixo de 100% para o concreto convencional e no concreto de alto desempenho apesar dos valores estarem acima de 100%, houve uma grande melhoria, como por exemplo, no CAD-750 que o pico caiu de 167.1% para 101.9%, ou seja, uma queda de aproximadamente 39.02% em relação aos valores de Ferreira (2011).

Ao mudar a porosidade inicial de 14% para 16%, a porosidade máxima foi de 22.40% para 24.40%, ou seja, houve um aumento de 14.29% na porosidade inicial e 8.93% na porosidade máxima encontrada. Podemos dizer que o aumento médio na evolução da porosidade foi de 11.61%. Essa mudança fez com que o pico máximo de saturação mudasse de 97.97% para 98.05%, ou seja, um aumento de 0.082%. Nota-se que esse aumento na porosidade refletiu em um aumento pouco significativo na saturação. Por isso, relacionar a porosidade como causa dos picos de saturação acima de 100% não é suficiente como justificativa.

Uma hipótese a ser analisada é a respeito das propriedades utilizadas que não foram medidas experimentalmente estarem em desacordo com as demais, pois ao supor outro tipo de concreto no mesmo problema, os resultados foram muito melhores e os picos acima de 100% no concreto de alto desempenho (CAD) foram corrigidos. Algumas das propriedades, como por exemplo, a permeabilidade intrínseca ao gás de referência, que influencia diretamente na condutividade hídrica do material, é adotada com base em valores encontrados na literatura sem embasamento experimental.

## 6.1 Estudos futuros

Na sequência da pesquisa é recomendado que sejam estudadas e implementadas novas evoluções das propriedades do concreto e também um estudo aprofundado sobre os valores de referência adotados para algumas propriedades, como, por exemplo a permeabilidade intrínseca ao gás de referência.

## REFERÊNCIAS

- [1] ALMEIDA, Thamyrys Morgana Pontes de. **Análise térmica transiente de pilares de concreto armado expostos ao fogo**. 2018. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió.
- [2] ALVES, Lais Amaral. **ANÁLISE ACOPLADA DE TEMPERATURA E UMIDADE NO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS**. 2014. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [3] AMARAL, Rafaela de Oliveira. **ANÁLISE COMPUTACIONAL TERMO-MECÂNICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS**. 2014. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- [4] ASSIS, Lahis Souza de. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DANO DO CONCRETO VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL**. 2019. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- [5] ATEX. **CONHEÇA OS PRINCIPAIS TIPOS DE CONCRETOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2017. Disponível em: <https://www.atex.com.br/blog/materiais/conheca-os-principais-tipos-de-concreto-utilizado-na-construcao-civil/>. Acesso em 15 de janeiro.
- [6] AURANGZEB; KHAN, L. A.; MAQSOOD, A.. **Prediction of effective thermal conductivity of porous consolidated media as a function of temperature: a test example of limestones**. 2007. Journal of physics D: applied physics, v. 40, n. 16, pp. 4953–4958.
- [7] AZEVEDO, Álvaro F. M.. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª Edição, Abril 2003. Portugal.
- [8] BATTAGIN, Arnaldo Forti. **UMA BREVE HISTÓRIA DO CIMENTO PORTLAND**. 2022. Associação Brasileira de Cimento Portland.
- [9] CARDOSO, Ariston de Lima. **Modelo de predição de condutividade térmica de rochas usando medidas em misturas bifásicas**. 2013. Curso de Pós-graduação em Geofísica. TESE DE DOUTORADO. UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. SALVADOR.
- [10] CARVALHO, Espedito Felipe Teixeira de. **Contribuição ao estudo da resistência residual do concreto submetido ao tratamento térmico padrão para situações de incêndio**. 2001. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
- [11] CEA (French Alternative Energies and Atomic Energy Commission). **Folheto Cast3M**. Disponível em: [www-cast3m.cea.fr](http://www-cast3m.cea.fr). Acesso em: 27 setembro 2021.

- [12] COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta e. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. 2002. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural.
- [13] COUSSY, Olivier. **Poromechanics**. 2004. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [14] DAL-SASSO, Matheus Fernandes. **ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DANO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS**. 2021. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- [15] DOTREPPE, J. C.; FRANSSEN, J. M. **The use of numerical models for the fire analysis of reinforced concrete and composite structures**. 1985. Engineering Analysis, v. 2, n. 2, pp. 67-74, 1985.
- [16] EN 1992-1-2 (2004) (English): **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. [Authority: The European Union Per Regulation 305 / 2011, Directive 98 / 34 / EC, Directive 2004/18/EC].
- [17] Feldman, R.F., and P.J. Sereda. **Eng. J. (Canada)**. Vol. 53, No. 8/9, pp. 53–59, 1970.
- [18] FERREIRA, Anna Paula Guida. **Modelagem dos Fenômenos de Transporte Termo-hídricos em Meios Porosos Submetidos a Temperaturas Elevadas: Aplicação a uma Bicamada Rocha-Concreto**. Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, UFJF, 2011.
- [19] 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**. 2001. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 663, Materials Research Society.
- [20] GLOBAL CEMENT STAFF. **Brazilian cement sales rise to 64.7Mt in 2021**. 2022. Disponível em: <https://www.globalcement.com/news/item/13525-brazilian-cement-sales-rise-to-64-7mt-in-2021>. Acesso em 15 de janeiro de 2022.
- [21] GRONDIN, F.; DUMONTET, H.; BEN HAMIDA, A.; MOUNAJED, G.; BOUSSA, H. **Multi-scales modelling for the behaviour of damaged concrete**. 2007. Cement and Concrete Research, v. 37, pp. 1453–1462, outubro de 2007.
- [22] ICHIKAWA, Y.; ENGLAND, G.L.. **Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures**. 2004. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London, UK, v. 228, pp. 245-259, março de 2004.
- [23] JANSEN, Rafael Felipe. **Análise numérica não linear do comportamento termomecânico em pilares de concreto armado em situação de incêndio**. 2022. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC do Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Joinville, Santa Catarina, Brasil.

- [24] KALIFA, P.; TSIMBROVSKA, M.. **Comportement des BHP à hautes températures, État de la question et résultats expérimentaux.** 1998. Cahier de CSTB n° 3078.
- [25] KODUR, Venkatesh; DWAIKAT, Monther; RAUT, Nikhil. **Macroscopic FE model for tracing the fire response of reinforced concrete structures.** 2009. Engineering Structures, v.31, pp. 2368-2379, outubro de 2009.
- [26] LEMOS, Paulo Sérgio Baumbach. **ESTUDO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO SOB ALTAS TEMPERATURAS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.** 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre.
- [27] LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** 2005. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- [28] LOTTI, Raquel S.; MACHADO, André Wilson; MAZZIEIRO, Ênio Tonani; JÚNIOR, Janes Landre. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos.** R Dental Press Ortodon Ortop Facial Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, mar./abril 2006.
- [29] LUCKNER, L.; VAN GENUTCHEN, M.Th.; NIELSEN, D.R. **A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface.** 1989. Water Resources Research, 25, (10), 2187–21.
- [30] MACHADO, Luisa Rossini. **Análise da influência de altas temperaturas na resistência de painéis de concreto armado através da análise limite.** 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre.
- [31] MAUÁ. **O que é concreto celular? Conheça suas aplicações e vantagens.** 2018. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/o-que-e-concreto-celular-conheca-suas-aplicacoes-e-vantagens/>. Acesso em 24 de janeiro de 2022.
- [32] MAXIMIANO, Dalilah Pires. **Análise Numérica Avançada de Estruturas de Aço e de Concreto Armado em Situação de Incêndio.** 2018. Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- [33] MAZARS, J. **Application de la Mecanique de L'Endommagement au Comportement non Lineaire et a la Rupture du Béton de Structure.** Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris 6, (1984).
- [34] MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete Microstructure, Properties, and Materials.** 2006. Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley. Third Edition. McGraw-Hill Companies.

- [35] MENOU, Abdellah. **ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE : APPROCHE MULTI ECHELLES DE L'ENDOMMAGEMENT THERMIQUE**. 2004. Division Modélisation Calcul et Développement -MOCAD- du CSTB. Laboratoire des Sciences Appliquées au Génie Civil-LaSAGeC-Anglet. L'UNIVERSITE DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR.
- [36] MINDEGUIA, Jean-Christophe et al.. **Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk**. 2009. Cement and Concrete Research (2009).
- [37] MORAIS, Marcus Vinicius 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**. 2006. 24ème Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC06), p.1- 10, La Grande Motte, France.
- [38] NAUROY, Jean-François. **GEOMECHANICS APPLIED TO THE PETROLEUM INDUSTRY**. IFP Energies nouvelles. Editions TECHNIP 25 rue Ginoux, 75015 PARIS, FRANCE, 2011.
- [39] NEVILLE, Adam M. **Properties of concrete**. 5th ed. 2011. Pearson Education Limited. Edinburgh Gate, Harlow, England.
- [40] NGUYEN, Van Thai. **Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température: application à des éprouvettes de grandes dimensions**. 2013. Université de Cergy Pontoise. Français. fNNT: 2013CERG0633ff. fftel-00915666.
- [41] NINCE, Andréia Azeredo. **LASCAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS**. 2006. Universidade de São Paulo, Departamento Engenharia de Construção Civil e Urbana. São Paulo.
- [42] NITHIARASU, Perumal; LEWIS, Roland W.; SEETHARAMU, Kankanhalli N.. **Fundamentals of the finite element method for heat and mass transfer**. 2016. Second edition. John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [43] NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 15200:2012. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2012. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
- [44] NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 6118:2014. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. 2014. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
- [45] OLIVEIRA, Fabiana; BUNDER, Jeferson. **O CONCRETO: SUA ORIGEM, SUA HISTÓRIA**. 2016. Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Pós-Graduação – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura.
- [46] PERILLI, David. **Update on South America, August 2021**. Global Cement.2021. Disponível em: <https://www.globalcement.com/news/item/12878-update-on-south-america-august-2021>. Acesso em: 15 de janeiro de 2021.

- [47] PEZZANI, Pascal. **Propriétés thermodynamiques de l'eau**. 1992. Techniques de l'ingénieur.
- [48] PINHEIRO, Libânio M. et al.. **ESTRUTURAS DE CONCRETO**. 2010. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, Departamento de Engenharia de Estruturas.
- [49] PLIYA, Bidossessi A. Prosper. **Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée**. 2010. Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - L2MGC- EA 4114, L'UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE.
- [50] Powers, T.C. **J. Am. Ceram. Soc.**, Vol. 61, No. 1, pp. 1-5, 1958; and Brunauer, S., **Am. Sci.**, Vol. 50, No. 1, pp. 210-229, 1962.
- [51] Powers, T.C. **Properties of Fresh Concrete**. Wiley, New York, Chaps. 2, 9, and 11, 1968.
- [52] RAZNJEVIC, K.; POADHORSKY, R. **Table et Diagrammes Thermodynamiques**. 1970.
- [53] RESEARCH AND MARKETS. **Global Cement Market (Production, Consumption, Imports & Exports): Insights & Forecast with Potential Impact of COVID-19 (2020-2022)**. Disponível em: [https://www.researchandmarkets.com/reports/4871690/global-cement-market-production-consumption?utm\\_source=GNOM&utm\\_medium=PressRelease&utm\\_code=zdkps6&utm\\_campaign=1637240+-+Cement+Market+Global+Growth+Forecasts%3a+A+%24401+Billion+Market+in+2025%2c+with+CAGR+of+5.10%25+Forecast+During+2021-2025&utm\\_exec=cari18prd](https://www.researchandmarkets.com/reports/4871690/global-cement-market-production-consumption?utm_source=GNOM&utm_medium=PressRelease&utm_code=zdkps6&utm_campaign=1637240+-+Cement+Market+Global+Growth+Forecasts%3a+A+%24401+Billion+Market+in+2025%2c+with+CAGR+of+5.10%25+Forecast+During+2021-2025&utm_exec=cari18prd)
- [54] RESENDE, Heron Freitas. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS ELEVADAS TEMPERATURAS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS E A DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM E SEM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**. 2021. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO, CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL. Belo Horizonte.
- [55] SANTOS, Camila Freitas dos. **PATOLOGIA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. 2014. Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Tecnologia. Santa Maria, RS, Brasil.
- [56] SERCOMBE, J.; GALLE, C.; RANC, G.. **Modélisation du comportement du béton à haute température: transferts de fluides et de chaleur et déformations pendant les transitoires thermiques**. 2001. Note technique CEA SCCME, référence: NT-SCCME 081.
- [57] SOARES, Thaís Rossi Lopes. **ANÁLISE E VALIDAÇÃO DE UM MODELO TERMO-HÍDRICO DO CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELEVADAS**. 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora.

- [58] SOUZA, Leovegildo Douglas Pereira de. **Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas às altas temperaturas utilizando a metodologia do planejamento fatorial.** 2016. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). João Pessoa.
- [59] TECNOSIL. **O que é concreto e quais os principais tipos utilizados na construção?**.2021. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/o-que-e-concreto-e-quais-os-principais-tipos-utilizados-na-construcao-2/#:text=Concreto%20convencional&text=%C3%89%20aquele%20lan%C3%A7ado%20nas%20f%C3%B4rmulas,e%20em%20pe%C3%A7as%20pr%C3%A9%20moldadas>. Acesso em 24 de janeiro de 2022.
- [60] TEIXEIRA, Guilherme Palla. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PÓS INCÊNDIO DE CONCRETOS COM AGREGADOS DA REGIÃO DE VIÇOSA-MG.** 2018. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. VIÇOSA, MINAS GERAIS – BRASIL.
- [61] UYGUNOĞLU, Tayfun; TOPÇU, Ilker Bekir. **Thermal expansion of self-consolidating normal and lightweight aggregate concrete at elevated temperature.** 2009. Construction and Building Materials 23 (2009) 3063–3069.
- [62] VALIN JR, Marcos de Oliveira et al.. **VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.**2014. Anais do 56° Congresso Brasileiro do Concreto CBC2014.
- [63] VOTORANTIM CIMENTOS. **CONCRETO PESADO É IDEAL PARA APLICAÇÃO EM ANTEPAROS RADIOATIVOS.** 2017. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/concreto-pesado-e-ideal-para-aplicacao-em-anteparos-radioativos/#:text=O%20concreto%20pesado%20%C3%A9%20uma,at%C3%A9%20mesmo%20esferas%20de%20a%C3%A7o..> Acesso em 24 de janeiro de 2022.
- [64] WENDT, Sheila Cristina. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica.** 2006. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [65] XING, Zhi. **Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température.** 2011. THESE DE DOCTORAT, L'UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE, França.