

Rafaela de Oliveira Amaral

**ANÁLISE COMPUTACIONAL TERMO-MECÂNICA DE ESTRUTURAS  
DE CONCRETO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional.

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

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Flávia de Souza Bastos

Juiz de Fora

2014

Rafaela de Oliveira Amaral,

ANÁLISE COMPUTACIONAL TERMO-MECÂNICA  
DE ESTRUTURAS DE CONCRETO SUJEITAS A  
TEMPERATURAS ELEVADAS/ Rafaela de Oliveira  
Amaral. – Juiz de Fora: UFJF/MMC, 2014.

XVI, 97 p.: il.; 29,7cm.

Orientadora: Michèle Cristina Resende Farage

Coorientadora: Flávia de Souza Bastos

Dissertação (mestrado) – UFJF/MMC/Programa de  
Modelagem Computacional, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 95 – 97.

1. Dano de Mazars. 2. Fenômenos de transporte. 3.  
Temperaturas elevadas. 4. Cast3m. I. Cristina Resende  
Farage, Michèle *et al.*. II. Universidade Federal de Juiz de  
Fora, MMC, Programa de Modelagem Computacional.

Rafaela de Oliveira Amaral

**ANÁLISE COMPUTACIONAL TERMO-MECÂNICA DE ESTRUTURAS  
DE CONCRETO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional.

Aprovada em 21 de Fevereiro de 2014.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Michèle Cristina Resende Farage - Orientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Flávia de Souza Bastos - Coorientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. D.Sc Elson Magalhães Toledo  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. D.Sc José Luis Drummond Alves  
Universidade Federal do Rio de Janeiro



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre me guiando e protegendo.

A minha família que sempre foi a minha referência e suporte . Em especial aos meus pais, Nelci e Domingos, pela luta, esforço e constante apoio para construir meu futuro e aos meus irmãos Leonã, Ariane e Ruana pela amizade e companheirismo.

Ao Thiago, meu amor, por sempre ser meu amigo e companheiro, me dando amparo e força.

A todos os meus amigos e colegas, que de alguma forma colaboraram por essa conquista. Em especial ao grupo da Modelagem que contribuíram muito com a minha formação como Mestre.

A todos os professores que me transmitiram seus conhecimentos me tornando uma pessoa mais capacitada. Em especial, as minhas orientadora Michèle e co-orientadora Flávia, que mais uma vez me encheram de ciência com toda a sabedoria e maturidade que possuem. Michèle, sempre serei muito grata a você pela consideração, dedicação, orientação e confiança que existiu durante todo esse tempo de convívio.

A Anna Paula, pela ajuda e os trabalhos disponibilizados.

A FAPEMIG, pelo apoio.

A Natália, pela assistência.

Em fim, a todas as pessoas que passaram por minha vida deixando marcas e lições para toda ela, proporcionando-me alegrias, conhecimento e crescimento pessoal.

## RESUMO

O concreto é um material heterogêneo e poroso, sujeito a alterações físicas e químicas quando exposto a condições ambientais extremas, como as temperaturas elevadas.

Como a reação de hidratação do cimento é reversível e termo-ativada, a exposição do concreto a temperaturas elevadas pode ter efeitos deletérios, com a ocorrência de desidratação da matriz a base de cimento, fissuração devido a pressões internas geradas pela evaporação da água de amassamento remanescente da mistura e ao deslocamento superficial (“spalling”).

A exposição a temperaturas elevadas pode ocorrer, basicamente em duas situações bastante distintas:

- causas acidentais, como em incêndios, onde os gradientes de temperatura são muito altos e a exposição ao fogo se dá por um período de tempo relativamente curto;
- em condições normais de serviço, como os repositórios de rejeitos radioativos – em que a estrutura fica sujeita a temperaturas muito elevadas, por longos períodos de tempo (décadas) .

Em um trabalho anterior - FERREIRA (2011, [1]) -, desenvolvido no PGMC em colaboração com a Universidade de Cergy-Pontoise, foi realizada a modelagem termo-hídrico do comportamento de estruturas compostas por camadas de rocha e concreto, semelhantes ao que se encontra em túneis, elementos de instalações hidrelétricas e repositórios destinados a rejeitos nucleares. Foi, então, empregado o código computacional livre CAST3M 2000, desenvolvido no CEA (Commissariat à l’Energie Atomique, França), que é baseado nos conceitos de operadores e objetos e, para validação, foram usados resultados experimentais e numéricos.

Propõe-se aqui a incorporação naquele modelo do acoplamento mecânico, através do modelo de dano de Mazars. Tal modelo é válido para situações de carregamento continuamente crescente tem como hipóteses básicas:

- O dano local resulta de deformações de alongamento evidenciadas por sinais positivos de, ao menos, um dos componentes principais de deformação;

- O dano é representado por uma variável escalar  $D$  (entre 0 e 1) cuja evolução ocorre quando o valor de “alongamento equivalente” excede o valor da deformação de referência.

A análise dos resultados se baseia na comparação com os resultados obtidos por FERREIRA (2011, [1]) e com os dados experimentais disponíveis para os corpos-de-prova em bicamada rocha-concreto. Nota-se uma clara correspondência numérico/experimental. Discrepâncias observadas indicam a necessidade de estudos mais aprofundados acerca do efeito da degradação mecânica sobre as propriedades térmicas do concreto.

**Palavras-chave:** Dano de Mazars. Fenômenos de transporte. Temperaturas elevadas. Cast3m.

## ABSTRACT

Concrete is a heterogeneous porous material subjected to physical and chemical alterations when exposed to extreme environmental conditions, such as elevated temperatures.

Cement paste dehydration may lead to cracking - and even to the occurrence of spalling - due to internal pressures generated by water vapour formation.

The exposure to high temperatures may occur in two different situations:

- accidental causes, as fires, when the temperature gradients are rather elevated and fire exposure takes a relatively short period of time;
- ordinary service conditions, like repositories for radioactive wastes.

A previous M.Sc. work developed in the PGMC by FERREIRA (2011, [1]), as part of a scientific cooperation with the University of Cergy Pontoise, dealt with the thermo-hydric modelling of structures composed of concrete-rock bilayers - so as to represent elements present in tunnels, hydroelectric powerplant installations, for instance. That work employed the free code Cast3M 2000 (developed in the CEA, Commissariat à l'Energie Atomique, França), based on the concepts of operators and objects. Experimental and numerical data were employed for validation.

The present work proposes the incorporation of the mechanical coupling to that TH model, through the Mazars Damage Model - with the following basic assumptions:

- Local damage results from elongation deformations;
- Damage is represented by a scalar quantity  $D$ .

The numerical results are compared with data from FERREIRA (2011, [1]) and experimental information available for concrete-rock bilayer samples. It is observed a clear numerical/experimental correspondence. Resulting discrepancies indicate the need for further investigation concerning the effects of mechanical degradation on the thermal and mechanical properties of concrete.

**Keywords:** Damage of Mazars. Transport Phenomena. High Temperatures. Cast3m.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
1.1	Justificativa e Objetivos	21
1.2	Estrutura da Dissertação	22
<b>2</b>	<b>Descrição do concreto</b>	<b>23</b>
2.1	Estrutura do concreto	23
2.2	Comportamento do concreto sob altas temperaturas	26
2.3	Propriedades térmicas do concreto	29
2.3.1	<i>Condutividade térmica</i>	29
2.3.2	<i>Calor específico</i>	30
2.3.3	<i>Dilatação térmica</i>	32
2.4	Propriedades do concreto como meio poroso	34
2.5	Comportamento mecânico do concreto	35
2.5.1	<i>Comportamento à tração e à compressão do concreto</i>	35
2.5.2	<i>Modelos constitutivos</i>	39
2.5.2.1	<i>Plasticidade</i>	39
2.5.2.2	<i>Modelos de fissuração</i>	40
2.5.3	<i>Mecânica do Dano aplicada ao concreto</i>	41
2.5.3.1	<i>Introdução</i>	41
2.5.3.2	<i>Definição da variável de dano</i>	42
2.5.3.3	<i>Tensão efetiva e deformação equivalente</i>	43
2.5.3.4	<i>Descrição geral do modelo de dano de Mazars</i>	44
<b>3</b>	<b>Modelo físico e formulação Termo-Hidro-Mecânico (THM) para o concreto</b>	<b>47</b>
3.1	Considerações	47
3.2	Formulação térmica	48
3.3	Formulação hídrica	50
3.3.1	<i>Balço de momento linear das fases fluidas</i>	51
3.3.2	<i>Equação de equilíbrio termodinâmico entre as fases líquida e vapor</i>	51

<b>3.3.3</b>	<b><i>Balanco de massa para as fases fluidas</i></b> .....	<b>52</b>
3.3.3.1	<i>Considerações para o balanço de massa para as fases fluidas</i> .....	52
3.3.3.2	<i>Conservação de massa</i> .....	54
3.3.3.3	<i>Modelo hídrico final</i> .....	56
<b>3.4</b>	<b>Evolução das propriedades termo-hídricos</b> .....	<b>57</b>
<b>3.5</b>	<b>Formulação mecânica: Dano de Mazars</b> .....	<b>61</b>
3.5.1	<i>Determinação dos parâmetros do modelo de Mazars</i> .....	64
<b>4</b>	<b>Modelagem Termo-hidro-mecânica via Cast3m</b> .....	<b>66</b>
4.1	Descrição geral do Cast3m .....	66
4.2	Implementação do modelo THM no Cast3m .....	67
<b>5</b>	<b>Aplicação do modelo THM</b> .....	<b>72</b>
5.1	Introdução .....	72
5.2	Parede de concreto .....	72
5.2.1	<i>Dados para a análise</i> .....	73
5.2.1.1	<i>Parâmetros de Mazars</i> .....	74
5.2.2	<i>Resultados e discussão</i> .....	74
5.3	Bicamada rocha-concreto .....	76
5.3.1	<i>Dados para a análise</i> .....	78
5.3.1.1	<i>Parâmetros de Mazars</i> .....	81
5.3.2	<i>Resultados e discussão</i> .....	81
5.3.2.1	<i>Dano mecânico de Mazars</i> .....	82
5.3.2.2	<i>Temperatura</i> .....	83
5.3.2.3	<i>Taxa de variação das temperaturas</i> .....	86
5.3.2.4	<i>Saturação</i> .....	86
5.3.2.5	<i>Pressão de vapor</i> .....	88
<b>6</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b> .....	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>95</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1.1	Barragem de Itaipu, Brasil. Acervo pessoal. . . . .	18
1.2	Estruturas em concreto danificadas pelo fogo, extraído de FERREIRA (2011, [1]) . . . . .	19
1.3	Estruturas feitas de concreto que são submetidas a temperaturas elevadas em condições normais . . . . .	20
2.1	Esquema de uma seção polida de um corpo-de-prova de concreto. . . . .	24
2.2	Modelo Feldman-Sereda, para a microestrutura do concreto, onde os círculos representam a água absorvida fisicamente, os "x" são a água interlamelar e as linhas são as camadas de silicato de cálcio hidratado, extraído de FELDMAN e SEREDA, (1970 apud FERREIRA, 2011, [1]). . . . .	26
2.3	Deterioração de um corpo-de-prova por "spalling", extraído de FERREIRA (2011, [1]). . . . .	28
2.4	Variação da pressão nos poros em função da distância da superfície aquecida e do tempo (ZHUKOV e SHEVCHENKO, 1974 apud BAZANT e KAPLAN, 1996 [2]). . . . .	28
2.5	Limites inferior e superior para a condutividade térmica de concretos normais, conforme definição da norma Europeia. . . . .	31
2.6	Calor específico do concreto segundo a norma Europeia [3] para três teores de água ( $\mu$ ) diferentes e em função da temperatura, extraído de FERREIRA (2011, [1]). . . . .	32
2.7	Influência do tipo de agregado no coeficiente de dilatação térmica do concreto, adaptado de MEHTA e MONTEIRO (2008, [4]). . . . .	33
2.8	Efeito da temperatura na porosidade do concreto, adaptado de KALIFA e MENNETEAU (2000, apud FERREIRA, 2011, [1]). . . . .	34
2.9	Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto, extraído de MEHTA e MONTEIRO (2008, [4]). . . . .	36
2.10	Modos de solicitação de uma Fissura, extraído de ÁLVARES (1993, [5]). . . . .	37
2.11	Aberturas de microfissuras no concreto, adaptado de ÁLVARES (1993, [5]). . . . .	37

2.12	Curva tensão-deformação de ensaio de (a) compressão uniaxial (b) tração uniaxial, extraído de GUELLO (2002, [6]) . . . . .	38
2.13	Possíveis evolução para os modelos plásticos. . . . .	40
2.14	Elemento de um sólido danificado . . . . .	42
2.15	Tensão efetiva e deformação equivalente, adaptado de LEMAITRE e CHABOCHE (1994, [7]). . . . .	44
2.16	(a) Comportamento experimental (b) Modelo constitutivo que será adotado, extraído de ÁLVARES (1993, [5]). . . . .	46
3.1	Balanco de Energia no volume de controle, extraído de FERREIRA (2011, [1]).	49
3.2	Volume de controle para balanço de massa. . . . .	55
3.3	Ensaio de tração uniaxial: determinação de $\varepsilon_{d0}$ , extraído de ÁLVARES (1993, [5]). . . . .	62
3.4	Superfície de dano associada ao critério de Mazars, extraído de ÁLVARES (1993, [5]). . . . .	62
4.1	Algoritmo para a análise Termo-hido-mecanica. O trecho destacado (*) é mostrado na Figura 4.2 . . . . .	67
4.2	Código em Cast3m, em GIBIANE, para o modelo THM correspondente ao trecho destacado por (*) na Figura 4.1 . . . . .	70
5.1	Parede com 30cm de espessura. . . . .	73
5.2	Ajuste da variável dano no tempo para a parede no ponto definido a 2cm da base onde ocorreu o incêndio - comparação entre os resultados do Cast3m e os de WITEK (2006, [8]). . . . .	75
5.3	Variação da temperatura no tempo para a parede no ponto definido a 2cm da base onde ocorreu o incêndio. . . . .	75
5.4	Esquema de um corpo-de-prova em bicamada para simular um túnel em situação de incêndio. . . . .	76
5.5	Posição dos termopares no corpo-de-prova e condição de contorno mecânica. . . . .	77
5.6	Corpo-de-prova usado no programa experimental desenvolvido no Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) da UCP por Ferreira [1]. . . . .	78
5.7	Malha de elementos finitos para o corpo. . . . .	78

5.8	Evolução da temperatura para o termopar instalado na superfície do concreto.	79
5.9	Curva $E(T)/E(20) \times T$ para resultados experimental e numérico, para o concreto CC.	82
5.10	Distribuição do dano mecânico na bicamada no momento em que $T(t) = 600^\circ C$ .	83
5.11	Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC com $\lambda(T)$ .	84
5.12	Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD com $\lambda(T)$ .	85
5.13	Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC, onde a condutividade térmica do concreto é dado em função da temperatura para THM1 e em função da temperatura e da desidratação para THM2.	86
5.14	Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD, onde a condutividade térmica do concreto é dado em função da temperatura para THM1 e em função da temperatura e da desidratação para THM2.	87
5.15	Taxa da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC.	88
5.16	Taxa da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD.	89
5.17	Saturação em função da altura do corpo para várias temperaturas definidas na superfície da amostra, para o concreto CC com $\lambda(T)$ .	89
5.18	Saturação em função da altura do corpo para várias temperaturas definidas na superfície da amostra, para o concreto CAD com $\lambda(T)$ .	90
5.19	Evolução da pressão de vapor ao longo da altura do corpo para o concreto CC com $\lambda(T)$ .	90
5.20	Evolução da pressão de vapor ao longo da altura do corpo para o concreto CAD com $\lambda(T)$ .	91

## LISTA DE TABELAS

5.1	Valores das propriedades do concreto assumidos para a simulação. . . . .	73
5.2	Condições iniciais. . . . .	73
5.3	Parâmetros adotados para o modelo de Mazars. . . . .	74
5.4	Formulação dos concretos em $Kg/m^3$ [1]. . . . .	79
5.5	Propriedades dos materiais medidas experimentalmente [1]. . . . .	79
5.6	Propriedades dos materiais para o modelo-concreto [1]. . . . .	80
5.7	Propriedades dos materiais para o modelo-rocha [1]. . . . .	80
5.8	Calores específicos ( $J/Kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ) [1]. . . . .	80
5.9	Condições iniciais em temperatura e saturação [1]. . . . .	80
5.10	Parâmetros adotados para o modelo de Mazars. . . . .	81
5.11	Nomenclatura para os modelos. . . . .	82

## LISTA DE SÍMBOLOS

$q_\lambda$	→ Fluxo de calor.
$\lambda$	→ Condutividade térmica.
$A$	→ Área.
$T$	→ Temperatura.
$\alpha$	→ Dilatação térmica.
$C_p$	→ Calor específico.
$\Delta L$	→ Variação do comprimento.
$L$	→ Comprimento original.
$\Delta T$	→ Variação da temperatura.
$\varepsilon_e$	→ Deformação efetiva.
$S_D$	→ Área de defeitos.
$S$	→ Área da seção.
$\tilde{S}$	→ Área efetiva.
$D$	→ Variável dano de Mazars.
$\tilde{\sigma}$	→ Tensão efetiva.
$\tilde{\varepsilon}$	→ Deformação equivalente.
$Q$	→ Fluxo de calor.
$\rho$	→ Massa específica.
$C = \rho C_p$	→ Calor específico volumétrico.
$L_{l \rightarrow v}$	→ Calor latente de vaporização.
$L_{s \rightarrow l}$	→ Calor latente de desidratação.
$\dot{\mu}_{l \rightarrow v}$	→ Quantidade de água vaporizada por unidade de tempo.
$\dot{d}$	→ Cinética da desidratação.
$C_s, C_l$ e $C_{ll}$	→ Calor específico da fase sólida, líquida e da água ligada, respectivamente.
$F_i$	→ Fluxo de massa para o fluido na fase $i$ .
$v_i$	→ Velocidade de um fluido na fase $i$ .
$p_l$	→ Pressão de água líquida.
$p_v$	→ Pressão de vapor de água.
$\rho_l$	→ Massa específica de água líquida.
$p_{vs}$	→ Pressão de vapor saturante.
$p_c$	→ Pressão Capilar.

$\phi$	→	Porosidade.
$V_{vazios}$	→	Volume de vazios.
$V_l$	→	Volume de água líquida.
$m_l$	→	Massa de água líquida.
$m_v$	→	Massa de vapor de água.
$m_f$	→	Massa de água total.
$h$	→	Umidade.
$K_i$	→	Permeabilidade intrínseca da fase i.
$k_{ri}$	→	Permeabilidade relativa da fase i.
$\mu_i$	→	Viscosidade dinâmica.
$F_i$	→	Fluxo de massa da componente A.
$K_a$	→	Permeabilidade aparente do meio.
$E$	→	Módulo de Young.
$\nu$	→	Coefficiente de Poisson.
$f_t$	→	Força de tração.
$f_c$	→	resistência a compressão.
$D_t$	→	Variável escalar de dano para tração.
$D_c$	→	Variável escalar de dano para compressão.
$A_t, A_c, B_t$ e $B_c$	→	Parâmetros para dono mecânico de Mazars.
$\alpha_t$ e $\alpha_c$	→	Coefficientes de tração e compressão para o dano final.
$\varepsilon_i$	→	Tensor normal na direção i.
$\varepsilon_{d0}$	→	Deformação limite na tração.
$\sigma_\infty$	→	Tensão residual.
$\xi$	→	Parâmetro para medir fragilidade do concreto.
$\varepsilon_{max}$	→	Tensão limite de compressão.
$\beta$	→	Correção para o cisalhamento.
$\chi$	→	Parâmetro em função de $\alpha$ para a equação de balanço de massa.
$K$	→	Tensor elástico.

# 1 Introdução

O concreto é o material de engenharia para construção civil mais utilizado no mundo. Sua taxa de consumo é muito maior agora do que nos últimos 40 anos. Atualmente, o consumo de concreto ultrapassa bilhões de toneladas métricas ao ano. Este crescimento se deve a, pelo menos, 3 motivos [4]:

- por possuir uma excelente resistência à água, podendo ser usado na construção de estruturas para controle, armazenamento e transporte de água, diferente, por exemplo, do aço comum e da madeira;
- as estruturas de concreto podem ganhar diferentes formas e tamanhos, já que ele, no estado fresco, possui consistência plástica;
- seus principais materiais constituintes são encontrados com facilidade em diversos lugares do mundo a baixo custo, o que torna o concreto um material relativamente barato.

Quando comparado a outros materiais de construção civil, como por exemplo o aço e a madeira, o concreto possui algumas vantagens em aplicações convencionais, como: sua manutenção é menos exigente (ele não corrói, não precisa de tratamento superficial e sua resistência aumenta com o tempo) e é mais resistente ao fogo e ao carregamento cíclico.

No Brasil e no Mundo existem várias estruturas, de grande e pequeno porte, feitas de concreto. Pode-se citar como exemplo para uma obra de grande porte realizada no Brasil a Barragem de Itaipu, que é uma hidroelétrica localizada na fronteira com o Paraguai, construída por ambos os países no período de 1975 a 1982, com 180 metros de altura de barragem de gravidade aliviada de concreto no rio Paraná (Figura 1.1).

Muitas vezes, as estruturas de concreto encontram-se em situações ambientais agressivas, por isso deve-se trabalhar a fim de garantir um bom desempenho estrutural. São exemplos de agressividade ambiental locais muito úmidos (fundações, túneis, tanques), ambientes industriais (presença de substâncias corrosivas), poluição (grandes cidades, tráfego intenso) e temperaturas elevadas (repositórios de rejeitos radioativos, fornos) [4].



Figura 1.1: Barragem de Itaipu, Brasil. Acervo pessoal.

O trabalho proposto trata da análise do comportamento termo-hídrico-mecânico de estruturas feitas de concreto quando submetidas a altas temperaturas.

Em condições normais de exposição ambiental, o concreto é submetido a temperaturas abaixo de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2]. Porém, em condições especiais, ele pode ser exposto a temperaturas bem mais elevadas que  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por causas acidentais ou por fazer parte da sua condição normal de trabalho. Como exemplo de causa acidental, pode-se citar situações de incêndio em construções de concreto (Figura 1.2). Como este material tem uma boa resistência ao fogo, nestas condições, o colapso da estrutura não ocorre de forma rápida, o que é um ponto positivo para fugas. Como exemplo de estruturas feitas para trabalhar sob temperaturas elevadas, pode-se citar alguns componentes de usinas nucleares, altos-fornos ou repositórios de rejeitos radioativos (Figura 1.3(a)), churrasqueiras e fornos de concreto pré-moldado (Figura 1.3(b)), dentre outros. Nestes casos, por razão de segurança, a estrutura deve ser capaz de suportar temperaturas elevadas e de longa duração sem perder a capacidade estrutural e, no caso de usinas nucleares, mantendo a propriedade de confinamento de materiais radioativos. O concreto refratário, por exemplo, pode ser usado para servir a temperaturas por volta de  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , podendo chegar a um pouco menos que  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2].

Sendo o concreto um material poroso e altamente heterogêneo, quando exposto a altas temperaturas, independentemente da causa, ocorrem fenômenos complexos que



(a) Danos por fogo no revestimento de concreto do Channel Tunnel, França-Inglaterra.



(b) Pilar atingido pelo incêndio no Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro, 1998.

Figura 1.2: Estruturas em concreto danificadas pelo fogo, extraído de FERREIRA (2011, [1])

incluem transporte de massa, de energia e reações químicas, que podem prejudicar muito sua integridade estrutural, provocando a degradação das suas características mecânicas e comprometendo a capacidade da estrutura em desempenhar o papel para o qual foi projetado. A estabilidade da estrutura depende da evolução das características do concreto durante a exposição a temperaturas elevadas [1], que geram tensões que irão causar deformações (elásticas e plásticas) nessas estruturas. Essas deformações desempenham, em geral, o principal papel na falha das estruturas em temperaturas elevadas [2].

Em muitos casos, elementos de concreto sujeitos a altas temperaturas podem ter suas camadas fragmentadas devido a uma explosão do material, fenômeno conhecido como “spalling”<sup>1</sup>. Dentre os parâmetros que contribuem para a ocorrência do “spalling”, conforme KANÉMA (2011, [9]), pode-se citar: a porosidade, permeabilidade, expansão

<sup>1</sup>“Spalling” é o termo em inglês que significa deslocamento superficial, comumente empregado para denominar este fenômeno no concreto aquecido.



porosos. Será considerada a perda de rigidez do concreto através do modelo de Dano Mecânico de Mazars. Para esta análise termo-hidro-mecânica, será usado o código para análise estrutural Cast3m (DMT/CEA - Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l’Energie Atomique).

## 1.1 Justificativa e Objetivos

A relevância do tema é explicada pelos vários registros de estruturas de concreto atingidas por incêndio com consequências catastróficas, como foi o caso do Túnel do Canal da Mancha - construído para ligar a Inglaterra à França através de transporte subaquático - que sofreu um incêndio em 1996. A Figura 1.2(a) mostra o aspecto de uma região do revestimento de concreto do túnel após o acidente onde é observado o dano que levou à exposição das armaduras de aço [4]. CAFARO e BERTOLA (2010, [10]) e VIANELLO et al. (2012, [11]) listam uma série de incêndios em túneis com vítimas que ocorreram na Europa durante as últimas décadas, por exemplo: Mont Blanc, França-Itália, em 1999 (39 vítimas), Tauern, Áustria, em 1999 (12 vítimas) e Gothard, na Suíça, em 2001 (11 mortes). O que justifica os estudos experimentais e numéricos relacionados com o assunto [12] [13] a fim de minimizar os riscos e garantir a segurança dos usuários.

Temperaturas elevadas podem conduzir a microestrutura porosa do concreto para deterioração e perda de eficiência de toda a estrutura [14]. Muitos fenômenos e interações estão envolvidas na evolução das propriedades que ocorrem dentro do concreto aquecido, o que torna este tipo de problema altamente não-linear [15]. Assim, para descrever corretamente o comportamento do concreto submetido a altas temperaturas, é importante considerar a condução de calor acoplada, o fluxo de fluido e o comportamento mecânico. Fratura e “spalling” no concreto aquecido são questões importantes que dependem dos fatores termo-hidro e termo-mecânico [16] [17].

No programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da UFJF, este é o segundo trabalho sobre o tema e se trata de uma sequência à dissertação de FERREIRA (2011, [1]), intitulada “MODELAGEM DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE TERMO-HÍDRICOS EM MEIOS POROSOS SUBMETIDOS A TEMPERATURAS ELEVADAS: APLICAÇÃO A UMA BICAMADA ROCHA-CONCRETO”.

O objetivo deste estudo é analisar o comportamento de estruturas de concreto por um

modelo que considera os fenômenos térmicos, hídricos e mecânicos (THM) acoplados.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

A dissertação será organizada em seis capítulos, contando com este, que é a introdução. O demais capítulos são:

✓ **Capítulo 2:** nesse capítulo será realizado um estudo bibliográfico sobre o concreto, descrevendo sua estrutura, seu comportamento quando exposto a elevadas temperaturas, suas propriedades térmicas, seu comportamento mecânico (à tração e à compressão), os modelos constitutivos encontrados na literatura para descrever o dano no concreto e os tipos de deformações que podem ocorrer no concreto aquecido;

✓ **Capítulo 3:** nesse capítulo serão mostradas as formulações matemática (térmica, hídrica e mecânica) para o comportamento do concreto sob temperaturas altas;

✓ **Capítulo 4:** o código Cast3m será brevemente descrito e, posteriormente, será apresentado como foi feita a implementação do modelo termo-hidro-mecânico no Cast3m;

✓ **Capítulo 5:** nesse capítulo será mostrada a aplicação do programa desenvolvido para o modelo THM utilizando o código Cast3m;

✓ **Capítulo 6:** nesse capítulo serão comentadas as conclusões e perspectivas futuras.

## 2 Descrição do concreto

O concreto é capaz de resistir por longos períodos aos efeitos das altas temperaturas. Ele mantém características de resistência que, mesmo não sendo as adequadas ao seu funcionamento normal, são no mínimo suficientes para garantir certa estabilidade até a tomada das primeiras medidas de segurança.

Com a elevação da temperatura, os constituintes do concreto podem reagir quimicamente, dando início a processos mecânicos como expansões, fragmentações, fissurações e perda de resistência. A microestrutura porosa e permeável e a capacidade de conduzir calor influenciam no transporte dos fluidos e o desenvolvimento das pressões internas aos poros. A taxa de aquecimento interfere no comportamento global da estrutura.

Neste capítulo serão discutidos a composição do concreto, seu comportamento quando submetido a altas temperaturas, as propriedades térmicas que envolvem esse comportamento e seu comportamento mecânico.

### 2.1 Estrutura do concreto

O concreto é o produto resultante do endurecimento de uma mistura, em determinadas proporções, de cimento Portland com agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água.

As dificuldades encontradas na descrição e previsão do comportamento de estruturas de concreto devem-se a aspectos relacionados à heterogeneidade do meio em questão, que é poroso e multifásico, podendo conter em seu interior fluidos na forma líquida e gasosa. Em âmbito macroscópico, o concreto pode ser considerado como um material bifásico, constituído de partículas de agregado dispersas em uma matriz de pasta de cimento (Figura 2.1). Em âmbito microscópico, as complexidades da microestrutura do concreto são perceptíveis, uma vez que as duas fases da microestrutura não são distribuídas de forma homogênea e nem são homogêneas entre si. Enquanto algumas regiões da pasta de cimento são densas, outras são altamente porosas. Então, considera-se uma nova fase, a zona de transição, que localiza-se entre a pasta de cimento hidratada e o agregado graúdo.

Ela é uma região mais fraca do que as outras duas fases, sendo considerada um ponto de fragilidade para o concreto, apresentando, então, grande importância nas características mecânicas do mesmo [4]. Cada uma das três fases possui sua própria heterogeneidade. O agregado, por exemplo, pode ser composto por vários minerais e microfissuras, já a matriz e zona de transição possuem diversas fases sólidas como o hidróxido de cálcio, etringita e CSH (Silicatos de Cálcio Hidratado) entre outros, existentes em proporções distintas, além de poros e fissuras pré-existentes [18].

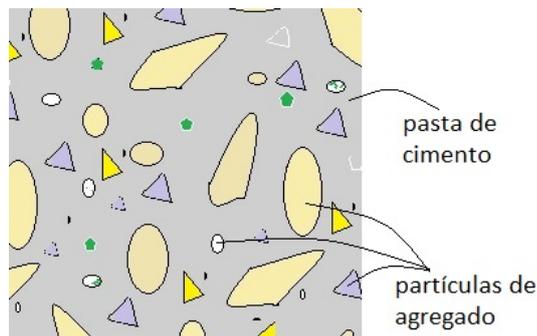


Figura 2.1: Esquema de uma seção polida de um corpo-de-prova de concreto.

A pasta de cimento hidratada é a junção do cimento Portland, que é um pó cinza composto principalmente por clínquer, com a água, agente que provoca o efeito ligante do cimento. Cimento e água, quando juntos, adquirem resistência mecânica. A qualidade do concreto depende, também, da dosagem da água e do controle de perda da água após a fabricação do mesmo.

O silicato de cálcio hidratado (CSH) e o hidróxido de cálcio são os principais hidratos<sup>1</sup> da pasta de cimento, representando aproximadamente 60% e 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratado, respectivamente. Com a elevação da temperatura no concreto, ambos sofrem desidratação, o que faz com que produtos anidros<sup>2</sup> sejam criados e vapor de água seja adicionado à fase fluida. As propriedades mecânicas do concreto sofrem interferência com a desidratação da pasta de cimento, uma vez que o CSH é o principal elemento que confere resistência à matriz cimentícia [1].

A água está presente na pasta de cimento hidratada de várias maneiras. Conforme o grau de dificuldade ou facilidade com que a água pode ser retirada da pasta, ela é classificada. Além do vapor nos poros vazios não ocupados ou parcialmente preenchidos por água, na pasta de cimento hidratada encontram-se água em estado capilar, adsorvida,

<sup>1</sup>Hidratos são substâncias que contêm água.

<sup>2</sup>Anidros são substâncias que não contêm água.

interlamelar e quimicamente combinada (Figura 2.2). Essa classificação é útil para compreender as alterações volumétricas associadas à água retida em pequenos poros.

- **Água capilar:** É o volume de água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. Ela pode ser dividida em duas categorias: a água que quando removida não causa alteração de volume (água livre), presente em grandes vazios, da ordem  $> 50$  nm, e a água cuja remoção causa retração do sistema (água retida por tensão capilar), presente em pequenos capilares, da ordem de 5 a 50 nm.
- **Água absorvida:** Encontra-se próxima à superfície do sólido. As moléculas de água são fisicamente absorvidas na superfície dos sólidos na pasta de cimento hidratada, sob influência das forças de atração. Sugere-se que a água é retida por ponte de hidrogênio por uma camada de até  $15\text{Å}$ . Quanto maior for a distância da superfície do sólido, menores serão as energias de ligação das moléculas individuais de água. Com isso, uma porção maior da água absorvida pode se perder por secagem da pasta de cimento hidratada a 30% de umidade relativa. A retração da pasta de cimento hidratada se deve à perda de água absorvida.
- **Água interlamelar:** Está associada à estrutura CSH. A perda da água interlamelar se dá por secagem a abaixo de 11% de umidade relativa. Quando essa água é perdida ocorre uma retração da estrutura do CSH.
- **Água quimicamente ligada:** Integra parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento. Essa água é liberada quando os hidratos se decompõem por aquecimento, ela não é perdida por secagem [4].

Os agregados podem ser classificados em gráudo (partículas maiores que 4,75 mm - retidas na peneira  $n^{\circ}4$ ) e miúdos (partículas que variam entre  $75\ \mu m$  - peneira  $n^{\circ}200$  - a 4,75 mm). Ao contrário do que muitos pensam, o agregado não é apenas um material de enchimento, possuindo características relevantes para a composição do concreto: porosidade, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência a compressão, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes. Essas características dependem da rocha fonte. Em geral, as propriedades do agregado influenciam no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido [4]. Eles são a fase predominantemente responsável pelo peso (de 65% a 85%) e módulo de elasticidade do concreto. Em situação de aquecimento do concreto, as

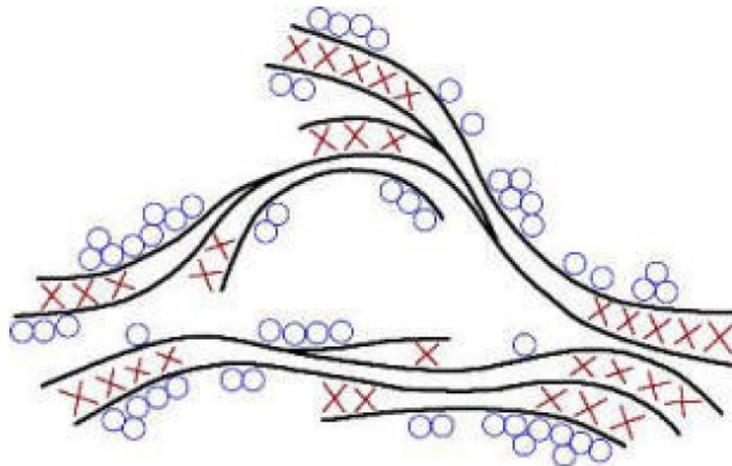


Figura 2.2: Modelo Feldman-Sereda, para a microestrutura do concreto, onde os círculos representam a água absorvida fisicamente, os "x" são a água interlamelar e as linhas são as camadas de silicato de cálcio hidratado, extraído de FELDMAN e SEREDA, (1970 apud FERREIRA, 2011, [1]).

expansões diferenciais dos agregados, em relação à pasta de cimento, podem ser destrutivas para o concreto, já que os agregados constituem uma parcela grande na composição do meio. Essas expansões podem causar microfissuras e contribuir para o "spalling".

Propriedades como a condutividade, a dilatação térmica e os danos sofridos pelo agregado devido à temperatura dependem da sua mineralogia. O basalto, o calcário, o gnaiss e o granito são as rochas mais utilizadas para a produção de concreto no Brasil.

## 2.2 Comportamento do concreto sob altas temperaturas

Na elaboração de projetos de edifícios residenciais, públicos e industriais, uma das considerações feitas é a segurança humana na ocorrência de fogo. O uso do concreto, por não ser combustível, não emitir gases tóxicos e ser capaz de conservar resistência suficiente por períodos extensos, permite operações de resgate e diminuir os riscos de colapso estrutural, quando submetido a temperaturas altas da ordem de 700 °C a 800 °C. Por exemplo, em 1972, quando um edifício de concreto armado com 31 andares, em São Paulo (Brasil), foi exposto a fogo de alta intensidade por mais de 4h, mais de 500 pessoas puderam ser resgatadas porque o edifício manteve sua integridade estrutural durante o fogo [4].

Sendo o concreto um material compósito heterogêneo, o seu comportamento sob temperaturas maiores que o normal (acima de 60 °C) envolve processos bem mais complexos do que um simples aumento de temperatura pode sugerir.

As estruturas de concreto possuem boa resistência ao incêndio, devido às suas baixas condutividade térmica e capacidades de combustão, e não exalam gases tóxicos ao serem aquecidas. Mas, com o aumento da temperatura, sua resistência característica e seu módulo de elasticidade são reduzidos e ocorre perda de rigidez da estrutura.

Sendo baixa a condutividade térmica do concreto, a elevação da temperatura não é constante na seção transversal, sendo mais intensa nas faces expostas, principalmente nos cantos, e menos intensa na medida em que se caminha para seu interior.

Aumentar a resistência do concreto e reduzir o fator água/cimento, com aditivos e adições que proporcionam maior compacidade e reduzida permeabilidade, melhora a durabilidade da estrutura em temperatura ambiente, porém antecipam a sua degradação ao fogo, pois essas estruturas se tornam mais esbeltas. Peças de menor massa e volume se aquecem mais rapidamente.

As alterações observadas nas propriedades do concreto devem-se a aspectos relacionados à microestrutura do material. Os constituintes do concreto, pasta de cimento e agregado, possuem componentes que se decompõem com o calor. A permeabilidade do concreto e a taxa de aumento da temperatura influenciam o desenvolvimento de pressões internas geradas pelos produtos de decomposição gasosa. Atualmente, o desenvolvimento de concreto de alto desempenho que tem baixíssima porosidade e permeabilidade favorece a geração de altas pressões no material, quando exposto a um incêndio.

Uma situação que pode ocorrer é a fragmentação superficial explosiva (“spalling”) que leva a uma grande degradação do material, podendo afetar de modo significativo a sua capacidade estrutural (Figura 2.3).

A fissuração e o fenômeno do “spalling” dependem diretamente de como a temperatura gera tensões na matriz sólida e da pressão exercida pelas fases fluidas presentes nos poros. A Figura 2.4 apresenta resultados medidos e calculados por ZHUKOV e SHEVCHENKO (1974, apud BAZANT e KAPLAN, 1996 [2]) para a poro pressão em função da distância da superfície aquecida. Sendo assim, torna-se necessário analisar o escoamento das espécies fluidas (ar seco, água líquida, vapor d’água), os fenômenos de hidratação e desidratação da matriz e os efeitos termo-mecânicos, além das transferências térmicas [1].



Figura 2.3: Deterioração de um corpo-de-prova por “spalling”, extraído de FERREIRA (2011, [1]).

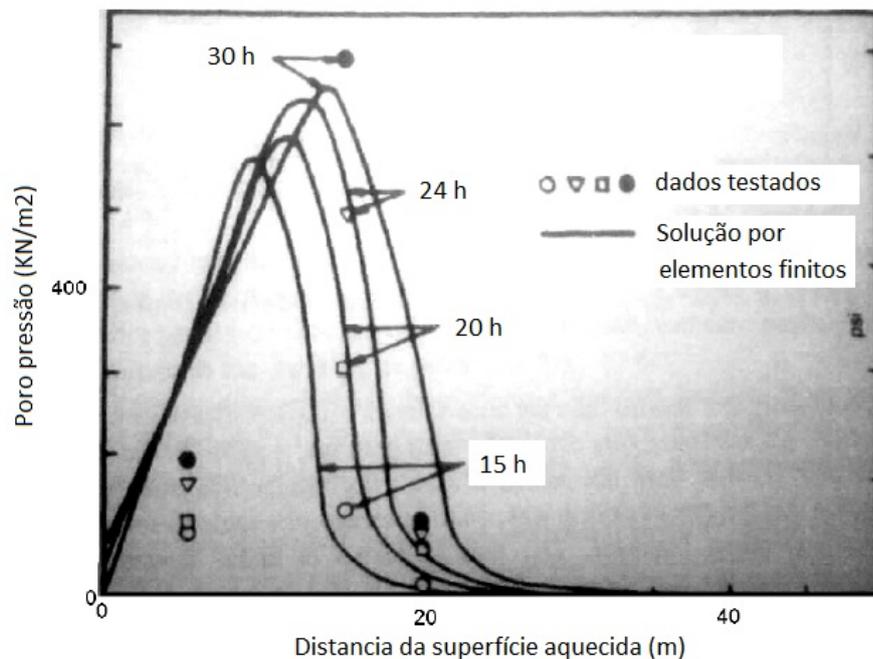


Figura 2.4: Variação da pressão nos poros em função da distância da superfície aquecida e do tempo (ZHUKOV e SHEVCHENKO, 1974 apud BAZANT e KAPLAN, 1996 [2]).

Antes de acontecer o “spalling”, com o aquecimento o concreto passa por algumas fases que foram explicadas por DAL PONT (2004, [19] apud FERREIRA, 2011, [1]):

1. No início do aquecimento, ocorre o deslocamento, por difusão, da umidade dentro do concreto, sob forma de água líquida e de vapor, em direção à zona fria do concreto.
2. A ebulição da água começa quando a temperatura chega a 100°C. Ocorre a condensação (o vapor se desloca para as zonas frias). O aumento da temperatura

até a completa ebulição da água na porção de interesse do concreto é retardado pelo calor latente requerido para a ebulição da água.

3. Ao mesmo tempo, pode acontecer uma nova hidratação através da ligação do vapor que se condensa na zona fria ao cimento não-hidratado. Uma melhora das propriedades mecânicas do concreto acontece com a formação de novos CSH.
4. Outro fenômeno que ocorrerá será a desidratação. Para temperaturas acima de  $105^{\circ}\text{C}$ , as ligações químicas que formam o CSH começam a se destruir, transformando os produtos hidratados em produtos anidros e água. Ocorre a vaporização da água livre liberada no concreto, absorvendo calor. A partir do momento em que a temperatura aumenta, obtém-se pouco a pouco mais água livre no concreto e mais água que se evapora. Como a evaporação é uma reação endotérmica, ela influencia o aquecimento do concreto ao retardar a propagação do calor.
5. A água livre tem tendência de se deslocar para as zonas frias do concreto. A água líquida e o vapor d'água não conseguem penetrar tão rapidamente nas zonas frias, já que o concreto possui uma permeabilidade baixa. Além disso, a formação de água após a desidratação é mais rápida do que a fuga da água e do vapor. Esses dois fatores irão provocar um aumento na pressão dos poros, podendo chegar a ordem de algumas atmosferas. Observa-se também que o pico de pressão se desloca em direção ao lado frio do concreto aumentando progressivamente seu valor. O aumento da pressão do gás nos poros do concreto é também a base do fenômeno do "spalling" que causa o deslocamento da camada externa do material.

## 2.3 Propriedades térmicas do concreto

As propriedades térmicas do concreto são a condutividade térmica, calor específico e expansão térmica, que são dadas em função do tipo e da quantidade de agregado usados na mistura do concreto.

### 2.3.1 Condutividade térmica

Através da condução, o calor flui em um meio sólido sempre que há um gradiente de temperatura. A Lei de Fourier indica que o fluxo de calor ( $q_{\lambda}$ ) é proporcional ao gradiente de temperatura na direção considerada ( $x$ ) multiplicado pela área através da qual o calor

é transferido ( $A$ ). A equação 2.1 mostra essa relação, onde  $\lambda$  é uma propriedade do meio chamada condutividade térmica, que é a quantidade de calor que fluirá por unidade de tempo através de uma unidade de área quando o gradiente de temperatura for unitário.

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

Para o concreto, a condutividade térmica é influenciada pela mineralogia dos agregados, pelo teor de umidade, densidade e temperatura do concreto. A condutividade térmica da pasta de cimento Portland saturada é menor do que a condutividade da maioria dos agregados comuns, ou seja, quanto mais agregados tiver o concreto, maior será a sua condutividade [2]. Outro fator que interfere na resposta do concreto à condução de calor é a quantidade de ar nos seus poros. Com o processo de desidratação e da perda de umidade de um meio inicialmente saturado, a tendência é que a condutividade térmica do concreto diminua com o aumento da temperatura, já que a condutividade térmica do ar é muito menor do que a condutividade da água.

Na literatura [1] existem várias propostas de curvas teóricas para representar a evolução da condutividade térmica do concreto. A norma Europeia para cálculo de estruturas em concreto fornece duas curvas, dadas pelas equações 2.2 e 2.3, que limitam a evolução da condutividade térmica em função da temperatura para concretos de densidade normal (entre 2000 e 2600  $Kg/m^3$ , segundo a norma Europeia) [3]:

$$\lambda_{inf} = 1,36 - 0,136 \left( \frac{T}{100} \right) + 0,0057 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$\lambda_{sup} = 2 - 0,2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (2.3)$$

onde  $\lambda_{inf}$  é o limite inferior,  $\lambda_{sup}$  é o superior e  $T$  é a temperatura em  $^{\circ}C$ .

Ambas as equações da norma Europeia fornecem a condutividade em  $W/(mK)$  e são válidas para temperaturas entre  $20^{\circ}C$  e  $1200^{\circ}C$ , e são representadas na figura 2.5.

### 2.3.2 *Calor específico*

O calor específico representa a quantidade de calor necessária para variar um grau a temperatura de uma unidade de massa do material.

Para o concreto seco de agregados silico-calcários tem-se a seguinte variação de calor

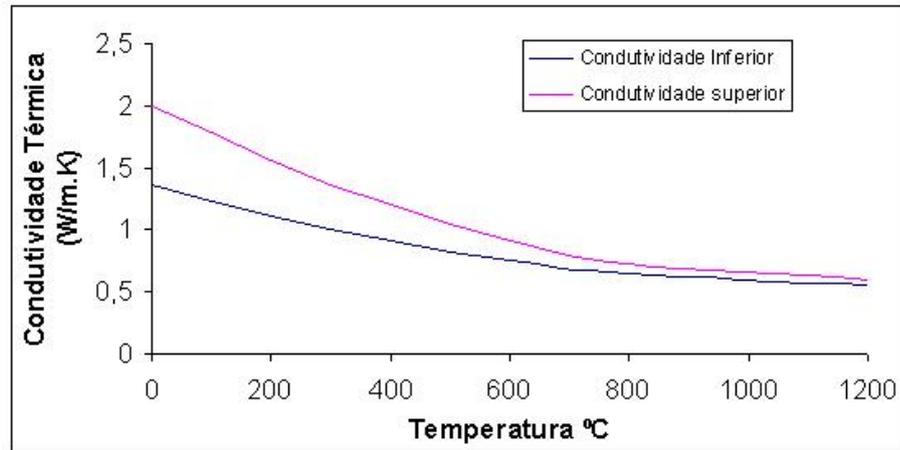


Figura 2.5: Limites inferior e superior para a condutividade térmica de concretos normais, conforme definição da norma Europeia.

específico em função da temperatura dada pela norma Europeia [3]:

$$\begin{aligned}
 c_p(T) &= 900 && \text{se } 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C} \\
 c_p(T) &= 900 + (T - 100) && \text{se } 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C} \\
 c_p(T) &= 1000 + (T - 200)/2 && \text{se } 200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C} \\
 c_p(T) &= 1100 && \text{se } 400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

onde o calor específico,  $c_p$ , será dado por  $J/KgK$ .

Neste cálculo do calor específico, não foi considerada a influência do teor de água. Para inseri-lo a norma adota valores constantes para esta propriedade entre temperaturas de  $100^{\circ}\text{C}$  e  $115^{\circ}\text{C}$  (Figura 2.6) [1].

$$\begin{aligned}
 c_p &= 900, && \text{para um teor de água de aproximadamente } 0\% \text{ do peso do concreto.} \\
 c_p &= 1470, && \text{para um teor de água de aproximadamente } 1,5\% \text{ do peso do concreto.} \\
 c_p &= 2020, && \text{para um teor de água de aproximadamente } 3,0\% \text{ do peso do concreto.}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Porém, segundo MEHTA e MONTEIRO (2008, [4]), o calor específico do concreto de peso normal não é muito afetado pelo tipo de agregado, temperatura e outros parâmetros. Tipicamente, os valores do calor específico ficam na faixa entre  $0,9$  e  $1,0 \text{ KJ/Kg}^{\circ}\text{C}$ .

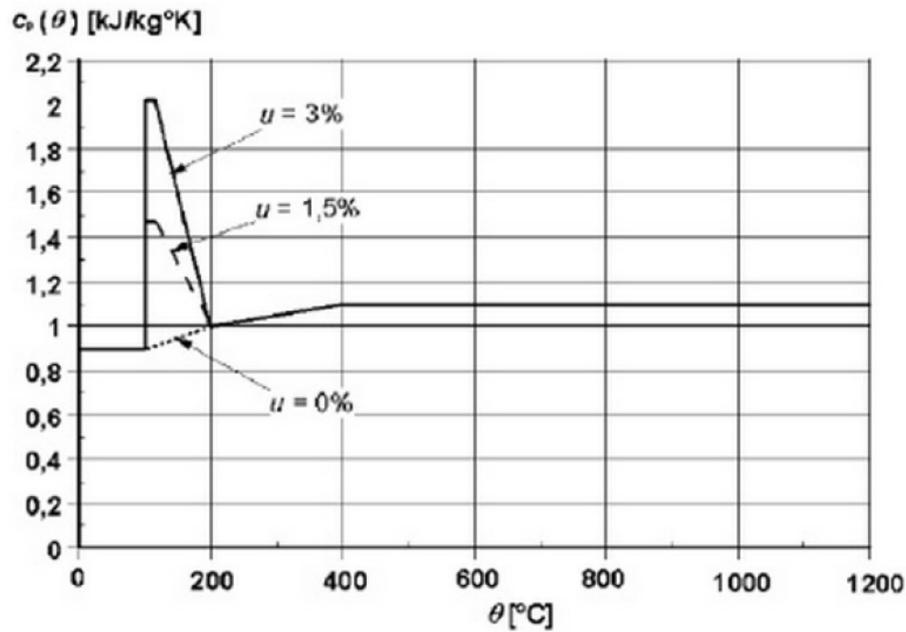


Figura 2.6: Calor específico do concreto segundo a norma Europeia [3] para três teores de água ( $\mu$ ) diferentes e em função da temperatura, extraído de FERREIRA (2011, [1]).

### 2.3.3 Dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica linear,  $\alpha$ , é a variação de comprimento pela variação de temperatura, em comprimento unitário. Essa relação é expressa pela Equação 2.6:

$$\Delta L = L\alpha\Delta T \quad (2.6)$$

onde  $\Delta L$  é a variação de comprimento dada em metro,  $L$  é o comprimento original da peça em metro,  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação linear em  $^\circ\text{C}^{-1}$  e  $\Delta T$  é a variação de temperatura em  $^\circ\text{C}$ .

A expansão normal típica dos sólidos anidros (substância que não contém ou possui pouca água em sua composição) e a expansão higrotérmica<sup>3</sup> ou contração associada com o movimento da umidade interna dos capilares ou dos poros de géis, ao mesmo tempo, são as ações responsáveis pela real expansão do concreto (KLIEGER e LAMOND, 1994 apud FERNANDES, 2011, [1]).

Assim que é aquecida até a temperatura de  $150^\circ\text{C}$ , a pasta de cimento se dilata. Após isso, ela fica sujeita a uma forte retração por secagem, que se acentua além dos  $300^\circ\text{C}$  e predomina até as temperaturas mais elevadas [1].

<sup>3</sup>Expansão higrotérmica: é a variabilidade dimensional causada por elevados teores de água ou elevadas temperaturas

As dilatações térmicas da pasta de cimento e dos agregados não são as mesmas. O coeficiente de expansão térmica linear do concreto é controlado pelo coeficiente de expansão térmica linear do agregado, que é o principal constituinte do material. Por isso é importante usar agregados que tenham uma dilatação térmica próxima à da pasta de cimento. Por exemplo, se o agregado selecionado possui um baixo coeficiente de dilatação térmica a prevenção de fissuras no concreto massa pode tornar-se crítica. Isso acontece porque a deformação por retração térmica é determinada pela magnitude da queda de temperatura e pelo coeficiente de expansão térmica linear do concreto.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008, [4]), o coeficiente de dilatação térmica pode ser calculado pela média ponderada dos componentes, supondo-se haver de 70 a 80 % de agregados na dosagem de concreto. A Figura 2.7 mostra os valores calculados para vários tipos de rocha - para agregados graúdo e miúdo da mesma rocha.

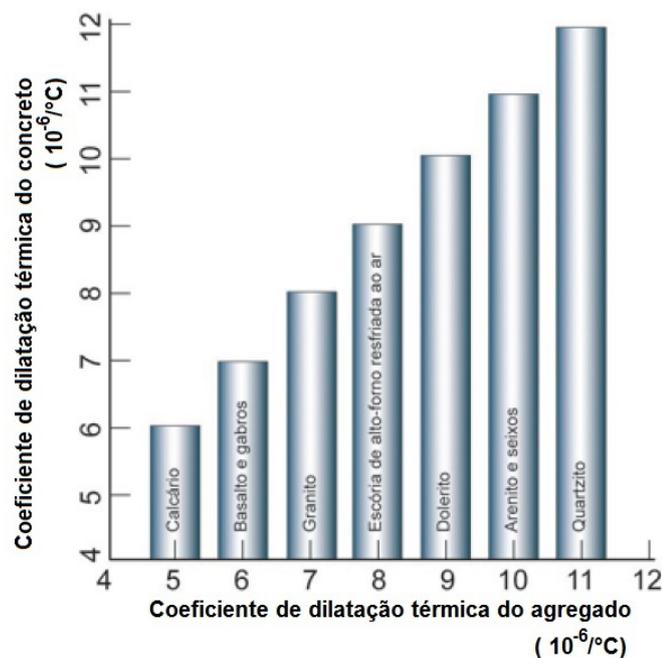


Figura 2.7: Influência do tipo de agregado no coeficiente de dilatação térmica do concreto, adaptado de MEHTA e MONTEIRO (2008, [4]).

Para o concreto, o coeficiente de dilatação térmica varia entre  $2,2 \times 10^{-6}$  até  $3,9 \times 10^{-6}$   $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , sendo  $3,1 \times 10^{-6}$  um valor típico [20].

## 2.4 Propriedades do concreto como meio poroso

As propriedades do concreto como meio poroso são a porosidade e a permeabilidade e serão discutidas adiante.

A estrutura e o volume dos poros influenciam consideravelmente nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. Os poros podem sofrer modificações sob influência dos parâmetros internos (por exemplo, resultado do processo de hidratação), e também sob influência das condições externas (temperatura, umidade, substâncias agressivas, etc) [21]. Quanto mais poroso, menos resistente se torna o concreto.

Com o aumento da temperatura, a porosidade do concreto tende a aumentar. No processo de aquecimento, a causa para esse aumento se deve a dois fenômenos que ocorrem juntos: a desidratação da pasta de cimento e consequente degradação da mesma e evolução da microfissuração. A Figura 2.8 mostra a evolução da porosidade para o concreto comum e o concreto de alto desempenho: observa-se que entre esses dois concretos o de alto desempenho é o menos poroso.

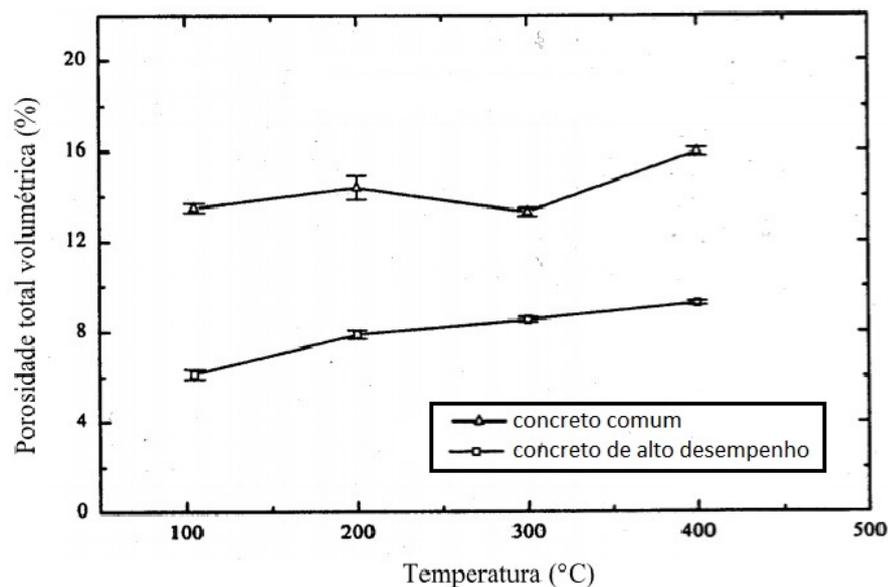


Figura 2.8: Efeito da temperatura na porosidade do concreto, adaptado de KALIFA e MENNETEAU (2000, apud FERREIA, 2011, [1]).

Segundo KOMONEN e PENTTALA (2003, apud FERNANDES, 2011, [1]), para a pasta comum, observa-se um aumento do tamanho dos poros, devido a evaporação da água, para temperaturas a  $50^{\circ}\text{C}$ . Com o aumento da temperatura até  $100^{\circ}\text{C}$ , é formado um gradiente de temperatura grande o suficiente para modificar a estrutura porosa. Este efeito pode ser causado pela expansão e decomposição da etringita, composto formado

inicialmente da hidratação e que pode expandir em contato com a água gerada com o aquecimento. Com o fim da secagem da pasta de cimento, seus componentes sofrem decomposição, o que causa mudanças na porosidade. Para temperaturas maiores que  $400^{\circ}\text{C}$  o tamanho dos poros cresce rapidamente devido à decomposição do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). A  $600^{\circ}\text{C}$  um novo crescimento ocorre, o que pode ser por causa da porosidade do  $\text{CaO}$  formado durante a desidratação do hidróxido de cálcio. A porosidade da pasta de cimento continua a crescer para temperaturas ainda maiores.

Neste trabalho, para o problema termo-hídrico, a porosidade do concreto será tratada em função da desidratação.

A permeabilidade do concreto mede a facilidade deste material poroso em transferir fluidos sob gradientes de pressão. Um fator que determina a permeabilidade de um sólido é o tamanho e a continuidade dos poros na microestrutura do sólido. Resistência e permeabilidade estão estreitamente relacionados à porosidade capilar ou à relação sólido/espaco.

O fluxo de fluido ocorre através de uma rede porosa que compreende a porosidade inicial do material e as fissuras induzidas por solicitações termo-mecânicas. A fissuração e o crescimento da porosidade geralmente interconectam os canais de fluxo, resultando no aumento da permeabilidade [1].

## 2.5 Comportamento mecânico do concreto

As relações tensão-deformação no concreto se tornam complexas a partir do limite elástico, quando as deformações deixam de ser uniformes por toda a peça do concreto. Sendo assim, a distribuição de tensão resultante tende a variar de um ponto a outro.

### 2.5.1 *Comportamento à tração e à compressão do concreto*

Como já mencionado anteriormente, o concreto possui três fases distintas: agregado graúdo, argamassa e zona de transição. A fase de transição é a menos resistente, exercendo grande influência na resistência do concreto. Ela surge durante o processo de cura quando um filme de água forma-se ao redor dos agregados (processo de exsudação), levando a uma relação água/cimento maior do que em regiões mais afastadas. Microfissuras na zona de transição (fissuras primárias), principalmente na direção horizontal, são formadas por este

processo. Além disto, existem poros e microfissuras distribuídas heterogeneamente pelo sólido [6].

Quando a matriz cimentícia e o agregado são ensaiados à compressão possuem comportamento linear elástico até a ruptura, enquanto que o concreto apresenta um comportamento não-linear e inelástico (Figura 2.9). A existência deste fenômeno se deve ao fato do concreto ser composto por materiais com diferentes resistência e rigidez, o que para MEHTA E MONTEIRO (2008, [4]) gera um processo de microfissuração progressiva [18].

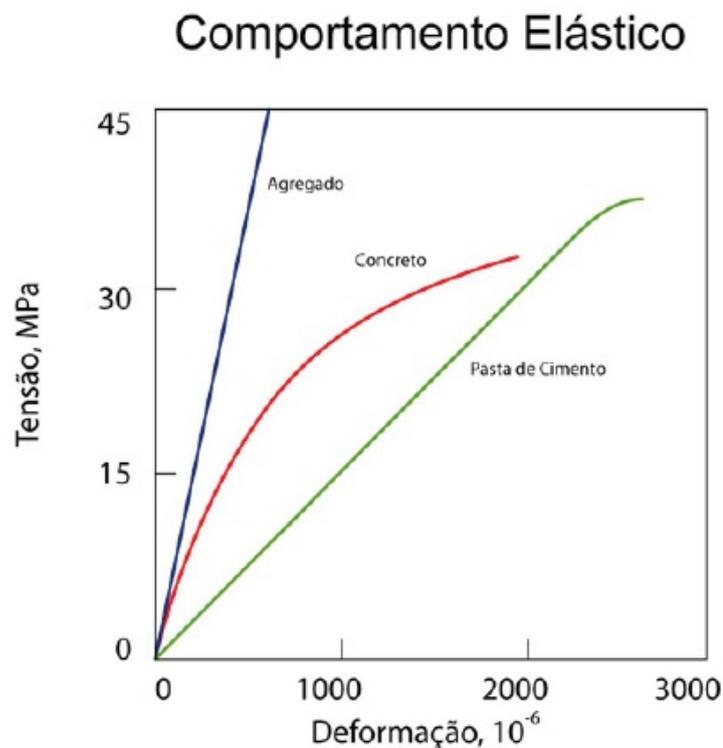


Figura 2.9: Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto, extraído de MEHTA e MONTEIRO (2008, [4]).

Uma fissura pode ocorrer de três modos. O modo I é caracterizado por um esforço de tração uniaxial com a fissura se desenvolvendo num plano perpendicular ao do carregamento (Figura 2.10(a)). No modo II existe um carregamento entre as faces da fissura provocado por um esforço cisalhante aplicado na direção paralela ao defeito (Figura 2.10(b)). O modo III também é caracterizado pelo escorregamento entre as faces da fissura, mas o esforço cisalhante é aplicado na direção perpendicular à da fissura (Figura 2.10(c)) [5].

A formação de microfissuras ocorrerá de maneiras diferentes para a tração e a

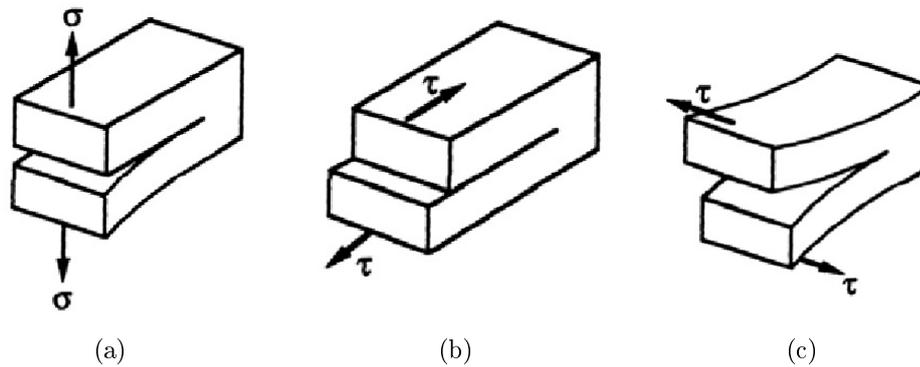


Figura 2.10: Modos de sollicitação de uma Fissura, extraído de ÁLVARES (1993, [5]).

compressão. Em tração uniaxial, a formação da microfissura ocorrerá no meio em direção perpendicular à da sollicitação, segundo o modo I de abertura (Figura 2.11(a)). Em compressão uniaxial, as microfissuras irão se desenvolver em uma direção paralela à da sollicitação segundo um modo misto de abertura (I e II). Isso ocorre devido ao efeito de Poisson e à heterogeneidade do material, que produzem alongamentos e tensão de tração (Figura 2.11(b)).

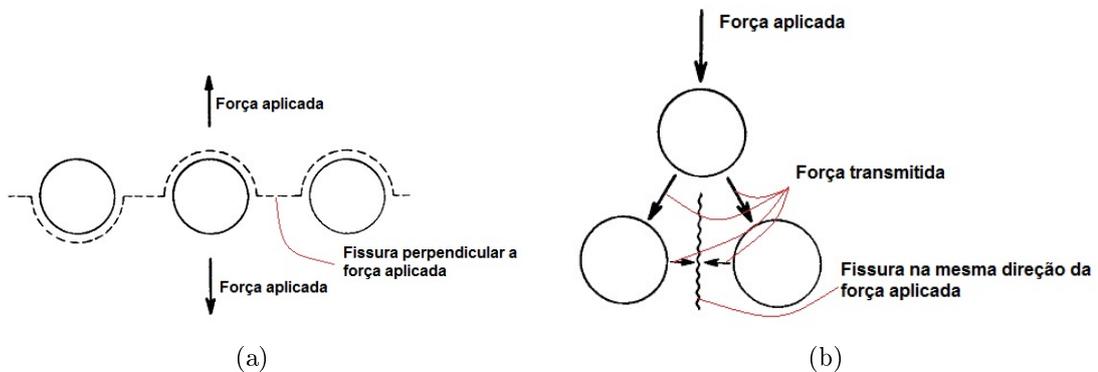
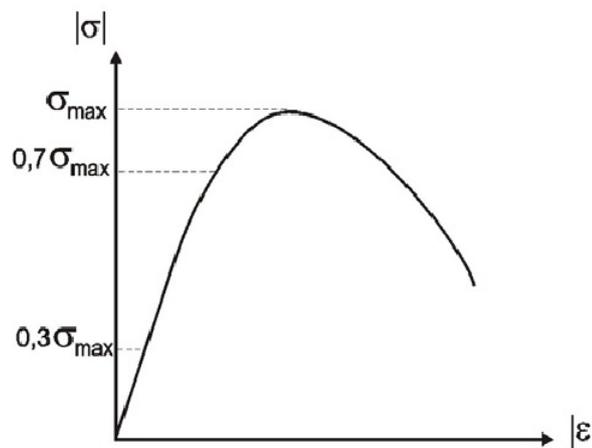


Figura 2.11: Aberturas de microfissuras no concreto, adaptado de ÁLVARES (1993, [5]).

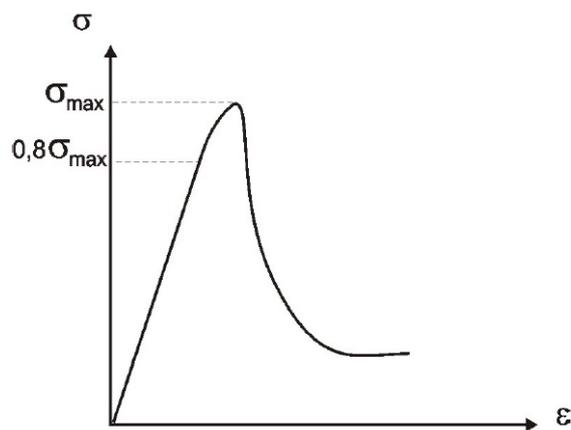
Do diagrama tensão versus deformação, obtém-se o módulo de Elasticidade (Young),  $E$ , que é a tangente angular da reta que descreve a fase elástica desse diagrama. No regime elástico um corpo deformado volta à configuração original quando a carga sollicitada é retirada. Tem-se que a tensão é diretamente proporcional à deformação para materiais trabalhando no regime elástico. Esta relação é conhecida como lei de Hooke, dada pela Equação 2.7 na direção  $i$ , quando se trata do caso unidimensional.

$$\sigma_i = E\varepsilon_i \quad (2.7)$$

Para o concreto, tem-se que o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson são iguais para o material sobre tensões de tração ou compressão, porém o comportamento do diagrama tensão-deformação e sua resistência são distintas (Figura 2.12). A ruptura, no caso destes materiais, ocorrerá pela propagação de trincas. A explicação para tal fenômeno está na necessidade de maior energia para criação e propagação de trincas em carregamentos à compressão do que à tração. Esse efeito, juntamente com a existência de pontos de discordâncias (zona de transição), confere ao concreto um comportamento aproximadamente dúctil à compressão e frágil à tração [18].



(a)



(b)

Figura 2.12: Curva tensão-deformação de ensaio de (a) compressão uniaxial (b) tração uniaxial, extraído de GUELLO (2002, [6])

## 2.5.2 Modelos constitutivos

Sendo o concreto um material de natureza complexa (heterogeneidade, resposta assimétrica à tração e à compressão, mudanças nas propriedades mecânicas devido à evolução da microfissuração), existe uma enorme dificuldade para se formular um modelo constitutivo completo e geral. Para reproduzir algumas das propriedades do material e exibir, cada uma delas, com um bom desempenho dentro de uma determinada faixa de aplicação, vários modelos vêm sendo propostos baseados em elasticidade, teoria da plasticidade e mecânica do dano. Na literatura encontram-se diversos modelos constitutivos para tratar o comportamento mecânico do concreto.

Para a modelagem do comportamento mecânico do concreto, os modelos mais conhecidos são os baseados na teoria da plasticidade e nos modelos de fissuração. Neste trabalho será usada a teoria do Dano Mecânico de Mazars.

### 2.5.2.1 Plasticidade

Inicialmente, os modelos da plasticidade foram desenvolvidos para materiais dúcteis, principalmente os metais, sendo incorporada a resposta não-linear do material. A não-linearidade do material se deve pelo movimento de discordâncias em sua rede cristalina. Para o concreto a não-linearidade é explicada devido à propagação de fissuras. Entretanto, muitos modelos foram desenvolvidos com base na teoria de plasticidade, pois macroscopicamente o concreto apresenta comportamento próximo ao de materiais dúcteis.

Para efeito de projeto de componentes estruturais, admite-se que as solicitações impostas conduzem a um comportamento elástico dos materiais que os constituem. Porém, prever o comportamento dos componentes perante o aparecimento de deformações com características plásticas, em determinadas situações, como por exemplo, por motivos de segurança, pode ser necessário. A deformação plástica ( $\varepsilon^p$ ) é definida como sendo permanente, ou seja, após o descarregamento o corpo não retorna à configuração que tinha antes, do carregamento, ao contrário do que ocorre com a deformação elástica.

A teoria da plasticidade descreve o comportamento de materiais que ao serem submetidos a carregamentos mantêm deformações permanentes, caso o limite elástico seja superado. Para isso é necessário uma lei elástica, um critério de escoamento (ou falha) e definir uma lei para o comportamento plástico do material, podendo ser do tipo endurecimento, perfeita ou amolecimento. Na Figura 2.13 estão apresentadas as possíveis

formas de evolução dos modelos de plasticidade para o caso uniaxial [18]. Dentre os modelos de plasticidade, podem-se citar, como exemplos, os de Chen e Chen, Mour-Coulomb e Tresca.

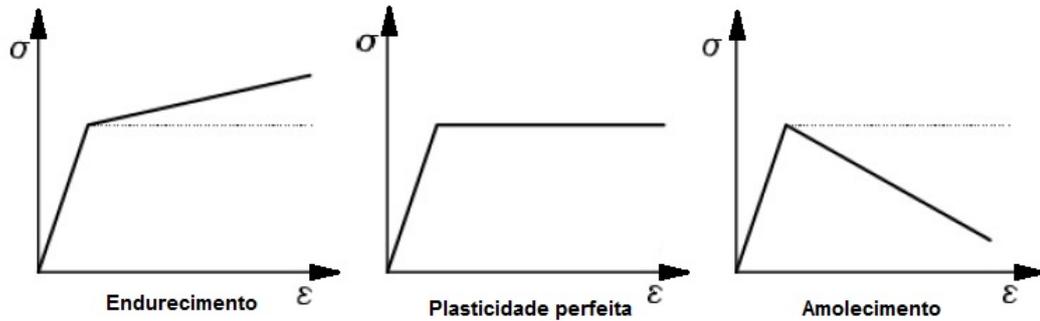


Figura 2.13: Possíveis evolução para os modelos plásticos.

Segundo SANTOS (2009, apud LIMA, 2013, [18]), dentre os modelos para a plasticidade, o de sólido elastoplástico não representa a perda de rigidez do concreto pelo processo de fissuração, e o modelo de fratura progressiva possui similaridade com o modelo de dano.

#### 2.5.2.2 Modelos de fissuração

A Mecânica da Fratura e Mecânica do Dano servem de base para os modelos ditos de fissuração. Nestes modelos são discutidos os critérios de resistência e o comportamento do concreto após o surgimento de trincas. Dentre as várias propostas, se destacam a modelagem discreta da trinca, que considera o surgimento de uma descontinuidade geométrica após a tensão última ser atingida, e os modelos de fissuração distribuída, que baseiam-se na deterioração das propriedades físicas do material em função do surgimento de fissuras.

A Mecânica do Dano contínuo está entre a Mecânica da Fratura e a Teoria da Plasticidade, uma vez que ela tem princípios teóricos parecidos com os modelos de fissuração distribuída (porém considera a existência da continuidade no meio, mesmo após o início da fissuração) e trata o diagrama tensão-deformação e a superfície de ruptura de modo parecido com a Teoria da Plasticidade [18] e [22].

### *2.5.3 Mecânica do Dano aplicada ao concreto*

#### 2.5.3.1 Introdução

Segundo LEMAITRE e CHABOCHE (1994, [7]), o desenvolvimento do estudo do dano mecânico contínuo teve início por volta de 1958. Neste ano, o pesquisador Kachanov publicou o primeiro relato desenvolvido para uma variável de dano contínuo de metais sob cargas uniaxiais. O dano é visto como um processo irreversível [7].

A terminologia Mecânica do Dano Contínuo determina modelos da Mecânica do Contínuo que tratam das respostas de materiais considerando o processo de dano. Existem varios tipos de dano, como por fluência, por plasticidade, por fadiga, por corrosão.

De acordo com ÁLVARES (1993, [5]), a ‘teoria do dano’ descreve a evolução local do processo de deterioração do material partindo de uma configuração inicial ideal, sem defeitos, até um estado final onde fissuras discretas ou microfissuras possam ser observadas.

O comportamento não-linear do concreto está ligado ao desenvolvimento de microfissuras. Como as fissuras ocorrem de forma distribuída, a mecânica do dano pretende formular modelos muito realistas para o concreto.

Para o concreto, o modelo de dano pode ser classificado como isotrópico e anisotrópico. No modelo isotrópico, a variável dano é representada por uma ou duas variáveis escalares (tração e compressão). Da literatura, têm-se os modelos isotrópicos desenvolvidos por Chaboche (1988), Lubliner et al (1989), citados por Voyiadjis, Taqieddin e Kattan (2008), Mazars e Pijaudier-Cabot (1989), Mazars e Pijaudier-Cabot (2001) e Wu. et AL (2006). Como, após o processo de fissuração, o concreto passa a ter comportamento anisotrópico, no modelo isotrópico muitos fenômenos não são levados em consideração, como, por exemplo, a resposta do material as tensões cisalhantes. Sendo assim, foram desenvolvidos, por alguns pesquisadores, modelos de dano anisotrópico. Na literatura, são encontrados alguns modelos anisotrópico, como o trabalho de LaBorderie, Mazars e Pijaudier-Cabot (1991), Mazars e Pijaudier-Cabot (2001), Voyiadjis, Taqieddin, Kattan (2008), Pavan, Creus e Maghous (2009) e Pituba (2010) [18].

### 2.5.3.2 Definição da variável de dano

Considere o elemento representativo de volume de um sólido danificado, tendo esse elemento tamanho suficientemente grande para representar a heterogeneidade do meio (Figura 2.14).

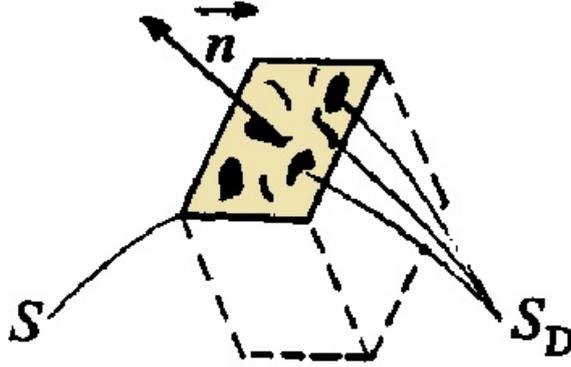


Figura 2.14: Elemento de um sólido danificado

Sendo  $S$  a área da seção do elemento de volume, identificada pela normal  $\vec{n}$ , e  $\tilde{S}$  a área efetiva de resistência ( $\tilde{S} < S$ ), a diferença entre elas define a área de defeitos,  $S_D$  (Equação 2.8):

$$S_D = S - \tilde{S} \quad (2.8)$$

Por definição,

$$D_n = \frac{S_D}{S} \quad (2.9)$$

é a mensuração mecânica do dano local relativo à direção normal  $\vec{n}$ .

A variável de dano,  $D_n$ , varia de 0 a 1, sendo 0 para o material íntegro e 1 para o material completamente danificado. Essa variável pode ser aplicada diretamente na relação tensão-deformação do material através da redução do módulo de elasticidade que, neste caso, será expresso em função do dano.

Apenas uma variável escalar representará o dano em um ponto material quando o dano for isotrópico, já que, neste caso, a variável de dano é uniforme em todas as direções  $\vec{n}$ . A Equação 2.10 faz referência a esta hipótese de isotropia.

$$D_n = D \quad \forall \quad \vec{n} \quad (2.10)$$

### 2.5.3.3 Tensão efetiva e deformação equivalente

Segundo LEMAITRE E CHABOCHE (1994, [7]), a tensão efetiva ( $\tilde{\sigma}$ ) é a razão entre a força ( $F$ ) aplicada na seção do elemento de volume representativo pela área efetiva ( $\tilde{S}$ ) dessa seção (Equação 2.11).

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} \quad (2.11)$$

Sendo tensão ( $\sigma$ ) a razão entre a força ( $F$ ) aplicada na seção pela área ( $S$ ) da seção (Equação 2.12),

$$\sigma = \frac{F}{S} \Leftrightarrow F = \sigma S \quad (2.12)$$

substituindo a Equação 2.12 na Equação 2.11, obtém-se:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma S}{\tilde{S}} \quad (2.13)$$

Da Equação 2.8, tem-se:

$$S_D = S - \tilde{S} \Leftrightarrow \tilde{S} = S - S_D \quad (2.14)$$

Da Equação 2.9, tem-se:

$$D = \frac{S_D}{S} \Leftrightarrow S_D = DS \quad (2.15)$$

Substituindo a Equação 2.14 na Equação 2.15, chega-se a:

$$\tilde{S} = S(1 - D) \quad (2.16)$$

Agora, substituindo a Equação 2.16 na Equação 2.13, obtém-se a tensão efetiva em função da variável de dano (Equação 2.17):

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{(1 - D)} \quad (2.17)$$

Válida para  $\tilde{\sigma} \geq \sigma$ , sendo:

$\tilde{\sigma} = \sigma \rightarrow$  material virgem;

$\tilde{\sigma} = \infty \rightarrow$  em momento de fratura.

Segundo LEMAITRE e CHABOCHE (1994, [7]), qualquer comportamento de deformação, sendo uniaxial ou multiaxial, do material danificado é representado pela lei constitutiva do material íntegro em que a tensão usual é substituída pela tensão efetiva. A Figura 2.15 ilustra a deformação elástica unidimensional de um material com dano descrita em função de um material íntegro, ou seja, a variável dano ( $D$ ) e a tensão usual ( $\sigma$ ) foram substituídas por uma tensão efetiva ( $\tilde{\sigma}$ ). Para o exemplo da lei elástica linear uniaxial do material danificado, dessa relação têm-se a deformação equivalente,  $\tilde{\epsilon}$ , que é dada por:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (2.18)$$

onde  $E$  é o módulo de Young para o material íntegro.

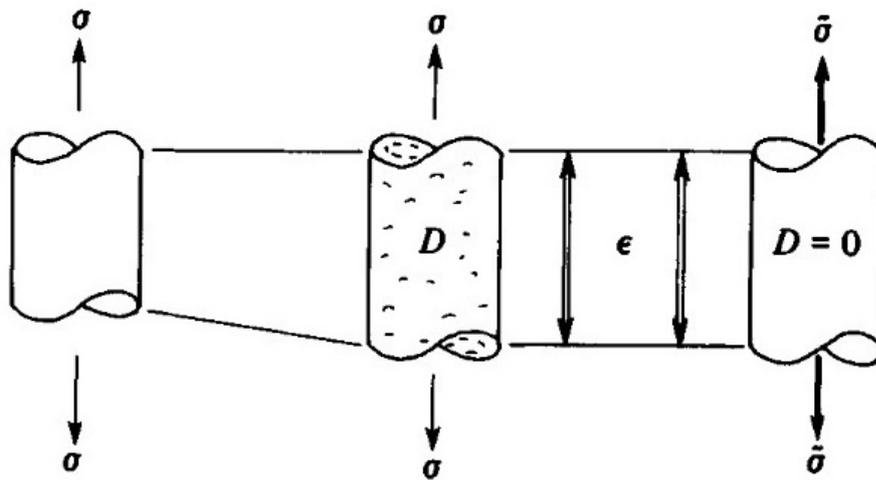


Figura 2.15: Tensão efetiva e deformação equivalente, adaptado de LEMAITRE e CHABOCHE (1994, [7]).

#### 2.5.3.4 Descrição geral do modelo de dano de Mazars

Neste trabalho será adotado o modelo de dano proposto por Mazars (1984). Esta escolha justifica-se pelo fato desse modelo ter sido elaborado para representar algumas evidências experimentais observadas em ensaios uniaxiais de corpos de prova em concreto e os parâmetros ( $A_t$ ,  $B_t$ ,  $A_c$ ,  $B_c$  e  $\epsilon_{d0}$ ) que envolvem a formulação do modelo são fáceis de serem determinados (através das curvas tensão-deformação do concreto, à tração e à compressão uniaxial). As expressões para o cálculo desses parâmetros serão mostradas no próximo capítulo. Para isso, algumas hipóteses fundamentais serão consideradas para o

concreto em processo de dano evolutivo:

- as deformações permanentes evidenciadas, experimentalmente, numa situação de descarregamento serão desprezadas, portanto será considerado apenas o comportamento elástico. A Figura 2.16(a) representa o comportamento experimental do concreto, em uma situação de carga, descarga e recarga. Neste caso, após atingir uma determinada tensão, quando o concreto é descarregado ele passa a ter uma deformação plástica, ou seja, ele não retorna a configuração inicial, o que no gráfico seria retornar ao ponto inicial, e quando o concreto recebe a recarga ele retorna ao ponto de descarga. Porém, a Figura 2.16(b) mostra que para o modelo constitutivo, a deformação plástica será substituída pela perda de rigidez do material através da variação do módulo de Young em função do dano mecânico;
- a ruptura local se desenvolverá no modo I ou modo misto (I e II), ou seja, o dano será causado apenas pela existência de alongamentos ao longo de uma das direções principais de deformação ( $\epsilon_i > 0$ );
- considera-se que o dano é isotrópico (o estado de dano num ponto é representado por uma grandeza escalar). Porém, a não-simetria do comportamento entre tração e compressão será considerada pelo modelo. Através de uma variável de dano para compressão e outra para a tração.
- o dano é representado localmente por uma variável escalar  $D$  ( $0 \leq D \leq 1$ ). A evolução do dano acontece quando um determinado valor de referência para a deformação equivalente (alongamento) for superado.

Então, neste modelo, a degradação (dano) do concreto ocorrerá pela microfissuração distribuída causada por tensões de tração. Como o modelo considera, principalmente, que o dano do material ocorrerá devido a presença de extensões (alongamento), será importante definir uma “deformação equivalente” ( $\tilde{\epsilon}$ ) como um parâmetro representativo do estado local de extensão do material.

Os aspectos aqui descritos serão considerados na formulação THM, tema do capítulo 3.

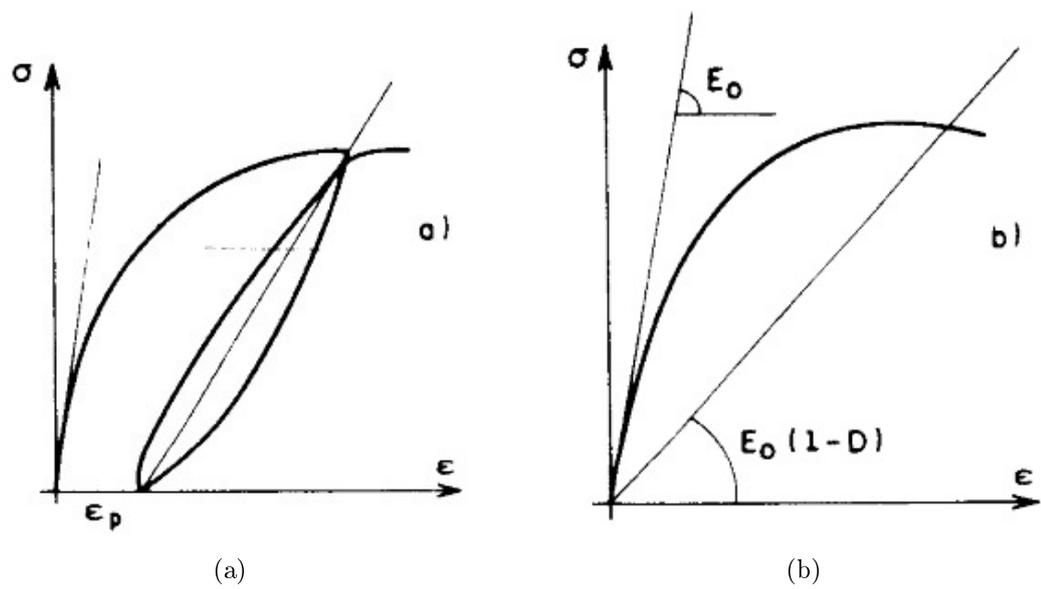


Figura 2.16: (a) Comportamento experimental (b) Modelo constitutivo que será adotado, extraído de ÁLVARES (1993, [5]).

# 3 Modelo físico e formulação

## Termo-Hidro-Mecânico (THM) para o concreto

### 3.1 Considerações

Durante o aquecimento do concreto, vários fenômenos físicos e químicos podem ser observados, resultando em mudanças significativas na estrutura interna do material e em suas propriedades. Os vazios do esqueleto sólido do concreto são preenchidos por líquido e gás. A fase líquida consiste de água líquida e a fase gasosa de uma mistura composta de ar seco e vapor de água. Em temperaturas elevadas, ocorrem fenômenos como condução de calor, difusão de vapor e fluxo de água em estado líquido. O fluxo de água ocorre devido a gradientes de pressão ou efeitos capilares.

Neste capítulo serão discutidas as formulações matemáticas para a modelagem do comportamento térmico, hídrico e mecânico do concreto quando exposto a elevadas temperaturas.

O modelo termo-hídrico (TH) do concreto descreverá o transporte acoplado de umidade e calor. Para sua formulação, algumas considerações serão levadas em conta:

- o esqueleto sólido sofre deformações infinitesimais;
- o comportamento do vapor de água será considerado como o de um gás perfeito;
- a água líquida será considerada incompressível;
- a histerese<sup>1</sup> da curva de sorção (e dessorção) será desprezada;
- a difusão na fase gasosa não será considerada;
- a existência do ar seco nos poros serão desprezados e
- o calor transportado por convecção pelos fluidos será desprezado.

---

<sup>1</sup>Histerese: sorção e desorção não seguem o mesmo caminho. Sorção: Gases e líquidos incorporam-se num material sólido; Desorção: desligamento das moléculas de gases ou fluidos do sólido.

A formulação matemática para o modelo TH consistirá de 4 equações: equação de balanço de massa para as fases fluidas (água líquida e vapor d'água), equação de balanço de energia (através da Lei de Fourier e do princípio da conservação de energia), equação de momento linear das fases fluidas e equação de equilíbrio termodinâmico entre as fases líquidas e vapor.

Para a formulação matemática do modelo mecânico, serão consideradas apenas as deformações por dilatação, ao qual será incorporada a teoria do dano mecânico de Mazars.

O concreto será tratado no âmbito macroscópico, como um contínuo poroso onde todos os seus constituintes (sólidos, vazios e fluidos) estão dispersos em um volume de controle.

## 3.2 Formulação térmica

Para a formulação térmica será usada a Equação do Balanço de Energia.

Aplicando-se a lei da conservação de energia ao volume de controle (Figura 3.1), sendo  $Q$  o fluxo de calor, tem-se por expansão de Taylor com termos de ordem superior desprezados:

$$\begin{aligned} Q_{x+dx} &= Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \\ Q_{y+dy} &= Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \\ Q_{z+dz} &= Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz \end{aligned} \quad (3.1)$$

Do balanço de energia, sabe-se que a energia que entra, somada à energia gerada, se equilibra com a variação da energia estocada mais a energia que sai do sistema. Definindo  $G$  como a energia gerada por volume ( $dx dy dz$ ),  $\rho$  a massa específica do material e  $c_p$  o calor específico do material, no volume de controle, a energia gerada será dada por  $G dx dy dz$  e a taxa de mudança de energia estocada será dada por  $\rho dx dy dz c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ , logo, a equação de equilíbrio fica:

$$(Q_x + Q_y + Q_z) + (G dx dy dz) = (\rho dx dy dz c_p \frac{\partial T}{\partial t}) + (Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz}) \quad (3.2)$$

Introduzindo a Equação 3.1 na Equação 3.2 e reorganizando-a, têm-se:

$$\left(-\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz\right) + (G dx dy dz) = (\rho dx dy dz c_p \frac{\partial T}{\partial t}) \quad (3.3)$$

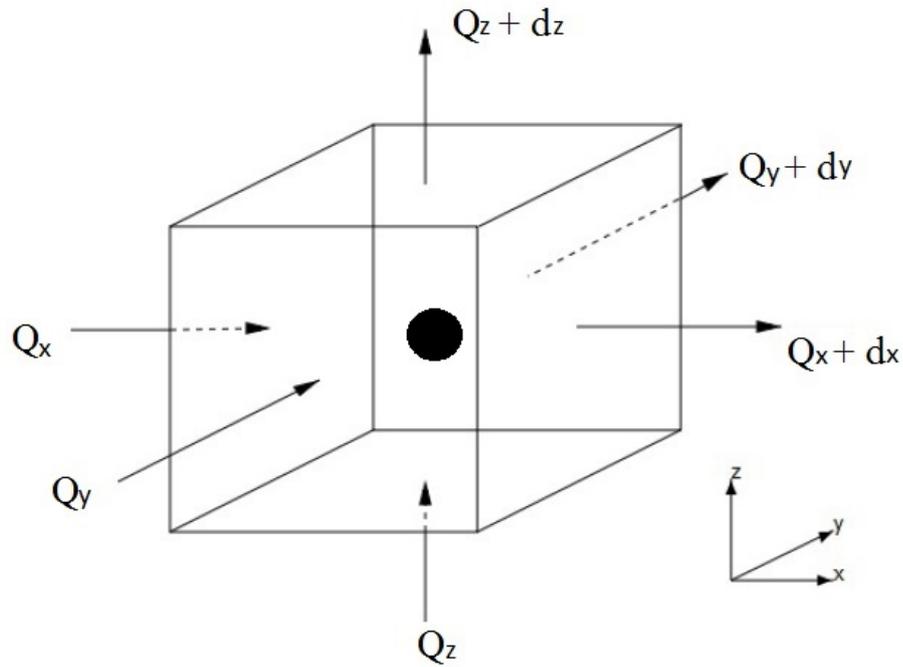


Figura 3.1: Balanço de Energia no volume de controle, extraído de FERREIRA (2011, [1]).

Através da Lei de Fourier, sabe-se que o fluxo de calor em uma dimensão na direção  $i$  é dado pela Equação 3.4:

$$q_i = -\lambda_i \frac{dT}{di} \quad (3.4)$$

onde  $\lambda$  é a condutividade térmica do meio.

Então, para cada direção o fluxo total de calor ficará:

$$\begin{aligned} Q_x &= dydzq_x = -\lambda_x dydz \frac{\partial T}{\partial x} \\ Q_y &= dzdxq_y = -\lambda_y dzdx \frac{\partial T}{\partial y} \\ Q_z &= dxdyq_z = -\lambda_z dxdy \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Substituindo a Equação 3.5 na Equação 3.3 e dividindo pelo volume  $dxdydz$ , chega-se a Equação 3.6 de condução de calor transiente expresso em coordenadas cartesianas. A condutividade térmica  $\lambda$  pode ser expressa como um tensor  $[\lambda_x \lambda_y \lambda_z]$ . Como, neste trabalho, as fases são consideradas isotrópicas, o tensor de condutividade térmica será isotrópico para cada fase.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + G = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.6)$$

Como fonte geradora de calor, serão consideradas as mudanças de estado endotérmicas (absorvem calor do ambiente) da água em estado líquido para vapor de água e de água quimicamente ligada para água em estado líquido. Então, para a geração de calor,  $G$ , têm-se:

$$G = -L_{l \rightarrow v}(T)\dot{\mu}_{l \rightarrow v} - L_{s \rightarrow l}\dot{d} \quad (3.7)$$

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

Para as notações  $\dot{d}$  e  $\dot{\mu}_{l \rightarrow v}$ , tem-se que  $(\dot{\phantom{x}})$  indica variações temporais, ou seja,  $\frac{\partial \mu_{l \rightarrow v}}{\partial t} = \dot{\mu}_{l \rightarrow v}$  e  $\frac{\partial d}{\partial t} = \dot{d}$ .

O termo  $\rho c_p$  é o calor específico volumétrico ( $c = \rho c_p$ ) e é dado em função da saturação e da desidratação (Equação 3.8).

$$c(S_l, d) = \rho_s C_s + \phi \rho_l(T) S_l C_l + (d_0 - d) C_u \quad (3.8)$$

onde  $\phi$  é a porosidade do meio,  $d_0$  é a desidratação inicial e  $d$  é a desidratação no tempo  $t$ ,  $C_s$ ,  $C_l$  e  $C_u$  são os calores específicos da fase sólida, da fase líquida e da água ligada, respectivamente, em J/(Kg°C).

Então, a Equação 3.6 pode ser reescrita assim:

$$c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \dot{\mu}_{l \rightarrow v} - L_{s \rightarrow l} \dot{d} \quad (3.9)$$

onde  $\nabla = [\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z}]$  e  $\lambda = [\lambda_x \lambda_y \lambda_z]$ .

Conforme já dito, são desprezados o calor transportado por convecção pelos fluidos (essa consideração é comum para materiais pouco permeáveis, como o concreto) e a dissipação de calor associada à compressibilidade do vapor de água, que é considerada como um gás perfeito.

### 3.3 Formulação hídrica

Para a formulação hídrica serão usadas a Equação de Balanço de massa associada à Equação de Momento Linear das Fases Fluidas e a Equação de Equilíbrio entre as fases

líquida e vapor.

Macroscopicamente, o meio poroso é formado por uma matriz sólida e pelos fluidos intersticiais ocupando todo o volume poroso. Fica convencionado que para se referir às fases líquida, gasosa, sólida e fluida (líquido + vapor) serão usados os índices l, v, s e f, respectivamente.

### ***3.3.1 Balanço de momento linear das fases fluidas***

Para a equação de transporte de massa, será admitido que o meio poroso é homogêneo, isotrópico, saturado com fluidos e a lei de Darcy é válida (essa lei será apresentada mais adiante). A lei da conservação de massa refere-se às trocas de matéria, descritas como fluxo de massa, entre o volume poroso analisado e o meio no qual se encontra. O fluxo de massa,  $F_i$ , para o fluido é dado pela Equação 3.10 em  $Kg.m^{-2}.s^{-1}$ .

$$F_i = m_i v_i \quad (3.10)$$

onde  $v_i$  é a velocidade de um fluido e  $i$  se refere à fase líquida ou vapor.

### ***3.3.2 Equação de equilíbrio termodinâmico entre as fases líquida e vapor***

A grandeza entalpia descreve as fases fluidas do sistema relacionando temperatura e pressão ( $P$ ). Para a determinação da equação de estado para as fases fluidas, pode-se igualar as entalpias livres (g) da água líquida e do vapor de água quando considera-se que as mudanças de fase, vaporização e condensação, ocorrem sem perda de energia. Sendo assim, obtém-se a equação de Clayperon generalizada (Equação 3.11). Seu desenvolvimento completo é encontrado na dissertação de mestrado de FERREIRA (2011, [1]). Como o vapor está sendo considerado como um gás perfeito, a equação de Clapeyron generalizada (Equação 3.11) é válida para fenômenos capilares [1].

$$p_l = p_{vs}(T) + \frac{\rho_l RT}{M_l} \ln \left( \frac{p_v}{p_{vs}(T)} \right) \quad (3.11)$$

onde  $R = 8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $M_l = 0,018 Kg.mol^{-1}$  é a massa molar da água na fase líquida,  $\rho_l$  é a massa específica da água na fase

líquida,  $p_v$  é a pressão de vapor e  $p_{vs}$  é a pressão de vapor saturante.

A Equação 3.12 é a equação de Clausius-Clayperon em função da temperatura, onde a pressão de vapor saturante é a pressão máxima a que uma substância na forma de vapor é submetida na temperatura em que se encontra.

$$\ln \left( \frac{p_{vs}}{p_{atm}} \right) = \frac{M_l \cdot L_{l \rightarrow v}}{R} \left( \frac{1}{T_{atm}} - \frac{1}{T} \right) \quad (3.12)$$

onde  $T_{atm}$  é a temperatura atmosférica e  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica que vale 101,325 *KPa*.

A pressão capilar ( $p_c$ ) é dada pela diferença de pressão entre a fase de vapor de água ( $p_v$ ) e de água líquida ( $p_l$ ) (Equação 3.13). Nos poros capilares o equilíbrio termodinâmico entre essas fases se encontra modificado pela presença de forças de superfície na interface entre as fases fluidas e a superfície dos poros.

$$p_c = p_v - p_l \quad (3.13)$$

A lei de Kelvin para mudanças de fase não-dissipativas é obtida inserindo a Equação 3.13 na Equação 3.11. Para isso considera-se que a fase gasosa é constituída apenas pelo vapor de água e a massa de vapor de água é desprezível diante da massa de água líquida.

$$p_c = -\rho_l(T) \frac{RT}{M_l} \ln \left( \frac{p_v}{p_{vs}(T)} \right) \quad (3.14)$$

### 3.3.3 *Balanco de massa para as fases fluidas*

#### 3.3.3.1 Considerações para o balanço de massa para as fases fluidas

Para a formulação do balanço de massa total, algumas considerações iniciais tornam-se relevantes:

1) A porosidade permite uma descrição global do meio poroso, livre de detalhes sobre distribuição e conectividade dos poros. A porosidade ( $\phi$ ) é dada pela relação entre o volume de vazios ( $V_{vazios}$ ) e o volume total ( $V_t$ ) (Equação 3.15).

$$\phi = \frac{V_{vazios}}{V_t} \quad (3.15)$$

A saturação ( $S_l$ ) é a relação entre o volume ocupado pela fase líquida ( $V_l$ ) e o volume

de vazios, que é a soma do volume de vapor de água com o volume de água líquida nos poros ( $V_{vazios} = V_v + V_l$ ). A saturação é dada pela Equação 3.16.

$$S_l = \frac{V_l}{V_{vazios}} = \frac{V_l}{V_v + V_l} \quad (3.16)$$

Relacionando-se as Equações 3.16 e 3.15 obtém-se as frações do volume poroso ocupadas pela fase líquida,  $\phi_l$ , (Equação 3.17) e pela fase vapor,  $\phi_v$ , (Equação 3.18).

$$\phi_l = \frac{V_l}{V_t} \rightarrow \phi_l = \phi S_l \quad (3.17)$$

$$\phi_v = \frac{V_v}{V_t} \rightarrow \phi_v = \phi(1 - S_l) \quad (3.18)$$

A partir dessas equações e sabendo-se que a massa volumétrica aparente é dada por  $m_i = \rho_i \phi_i$ , onde o índice  $i$  indica a fase fluida, pode-se deduzir as massas de cada fase fluida por unidade de volume do meio poroso (massa volumétrica aparente):

$$\begin{aligned} \text{Massa de água líquida} \quad m_l &= \rho_l \phi(d) S_l \\ \text{Massa de vapor de água} \quad m_v &= \rho_v \phi(d) (1 - S_l) \\ \text{Massa de água total} \quad m_f &= m_l + m_v \end{aligned} \quad (3.19)$$

onde  $\rho_l$  e  $\rho_v$  são a massa específica da água líquida e do vapor de água, respectivamente.

A porosidade está diretamente ligada à desidratação ( $d$ ), que por sua vez depende diretamente da evolução da temperatura. Então, o principal parâmetro para a evolução da porosidade é a perda da água ligada para a fase fluida.

**2)** Para gases perfeitos, Clapeyron relaciona a pressão de vapor ( $p_v$ ) com a sua massa específica ( $\rho_v$ ) através da fórmula:

$$p_v = \rho_v \frac{RT}{M_v} \quad (3.20)$$

onde  $R = 8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $M_v = 0,018 Kg.mol^{-1}$  é a massa molar do vapor de água e  $T$  é a temperatura em Kelvin.

**3)** Como a histerese da curva de sorção não está sendo considerada, conforme já comentado no início do capítulo, será considerado que a umidade ( $h$ ) se iguala à saturação do meio ( $S_l$ ). Sendo a umidade dada pela Equação 3.21, a saturação ( $S_L$ ) segue a mesma

expressão.

$$S_l = h = \frac{p_v}{p_{vs}(T)} \quad (3.21)$$

4) O movimento do gás e do líquido no meio poroso, desprezando os efeitos gravitacionais e uma eventual anisotropia do material, é descrito pela lei de Darcy da seguinte forma:

$$v_i = \rho_i \frac{K_i k_{ri}(S_i)}{\mu_i} \nabla(p_i) \quad (3.22)$$

onde o índice  $i$  pode ser  $l$  para fluxo de líquido ou  $v$  para fluxo de vapor,  $K_i$  é a permeabilidade intrínseca,  $k_{ri}$  é a permeabilidade relativa à fase considerada,  $\mu_i$  é a viscosidade dinâmica e  $p_i$  é a pressão. A Lei de Fick não será considerada já que a presença de vapor de água será somente na fase gasosa. Segundo KANEMA (2007, apud FERREIRA, 2011, [1]), esta consideração supõe implicitamente que os fenômenos de transporte no meio poroso são governados pela Lei de Darcy durante a fase transitória de aquecimento. Ao longo da fase transitória de aquecimento constata-se fortes gradientes térmicos e perda de massa. A Lei de Fick é válida para fluxos em temperaturas inferiores a  $80^\circ C$ .

### 3.3.3.2 Conservação de massa

Seja o volume de controle ( $\Delta x \Delta y \Delta z$ ) da Figura 3.2 através do qual uma mistura, incluindo uma componente A, está escoando. Neste volume tem-se que a conservação da massa da componente A será dada pela variação da massa estocada no volume igualada ao fluxo de entrada e saída através da superfície mais as variações de massa geradas internamente ao volume pelas mudanças de fase.

A taxa líquida mássica, diferença entre o fluxo de entrada e saída através da superfície de controle (área:  $\Delta y \Delta z$  em relação a  $x$ ,  $\Delta x \Delta z$  em relação a  $y$  e  $\Delta x \Delta y$  em relação a  $z$ ), será:

$$\begin{aligned} \text{Direção } x &\Rightarrow F_{A,x} \Delta y \Delta z \Big|_{x+\Delta x} - F_{A,x} \Delta y \Delta z \\ \text{Direção } y &\Rightarrow F_{A,y} \Delta x \Delta z \Big|_{y+\Delta y} - F_{A,y} \Delta x \Delta z \\ \text{Direção } z &\Rightarrow F_{A,z} \Delta x \Delta y \Big|_{z+\Delta z} - F_{A,z} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (3.23)$$

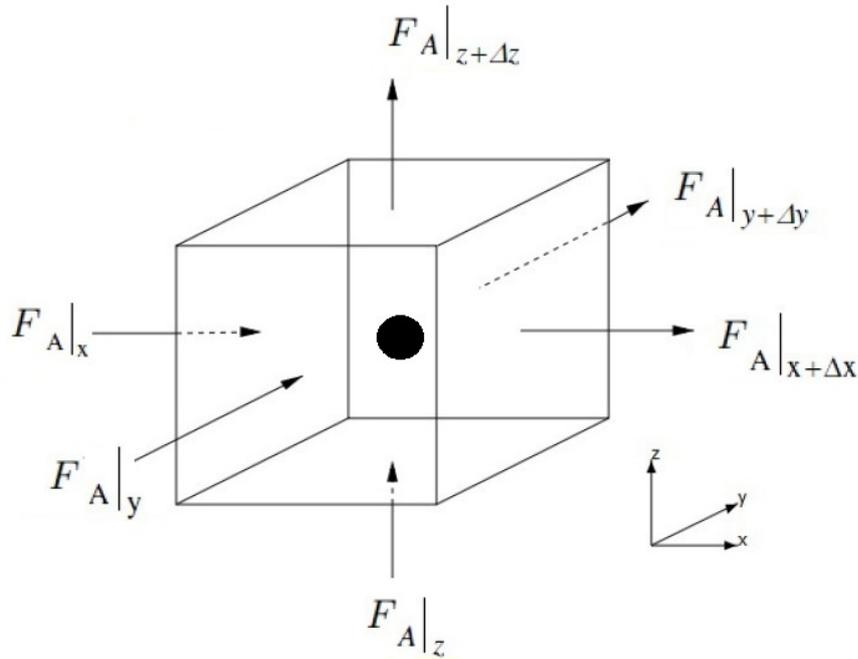


Figura 3.2: Volume de controle para balanço de massa.

onde, para a direção  $x$ , por exemplo,  $F_{A,x}\Delta y\Delta z$  é o fluxo de massa de entrada e  $F_{A,x}\Delta y\Delta z|_{x+\Delta x}$  é o fluxo de massa de saída, de uma componente  $A$ .

A variação da massa estocada ( $ME$ ) da componente  $A$  no volume será:

$$ME = \frac{\delta m_A}{\delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.24)$$

onde  $\Delta x \Delta y \Delta z$  é o volume.

A variação de massa gerada ( $MG$ ) será:

$$MG = \dot{r}_A \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.25)$$

onde  $\dot{r}_A$  é a fonte de massa da componente  $A$ .

Então, a equação de balanço de massa ficará:

$$\begin{aligned} & [F_{A,x}\Delta y\Delta z|_{x+\Delta x} - F_{A,x}\Delta y\Delta z|_x + F_{A,y}\Delta x\Delta z|_{y+\Delta y} - F_{A,y}\Delta x\Delta z|_y \\ & + F_{A,z}\Delta x\Delta y|_{z+\Delta z} - F_{A,z}\Delta x\Delta y|_z] + \left[ \frac{\delta m_A}{\delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \right] = \dot{r}_A \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (3.26)$$

Dividindo a Equação 3.26 pelo volume  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , cancelando termos e fazendo o limite para  $\Delta x \Delta y \Delta z$  tender a zero chega-se a Equação 3.27 para o balanço de massa, que pode

ser reorganizada conforme a Equação 3.28.

$$\frac{\delta F_{A,x}}{\delta x} + \frac{\delta F_{A,y}}{\delta y} + \frac{\delta F_{A,z}}{\delta z} + \frac{\delta m_A}{\delta t} = \dot{r}_A \quad (3.27)$$

$$\nabla \cdot \vec{F}_A + \frac{\delta m_A}{\delta t} = \dot{r}_A \quad (3.28)$$

A conservação de massa envolve parâmetros de mudanças de fase:

- $\dot{\mu}_{l \rightarrow v}$  para o fenômeno de evaporação e condensação (se evaporação  $\dot{\mu}_{l \rightarrow v} < 0$  e se condensação  $\dot{\mu}_{l \rightarrow v} > 0$ ) e
- $\dot{d}$  para o fenômeno da desidratação.

Para a conservação de massa de água líquida, os fenômenos de evaporação, condensação e desidratação da matriz serão considerados. Além disso, o fluxo de massa será dado pela Equação 3.10 e a componente A da Equação 3.28 será a água líquida. Então a conservação de massa de água líquida será:

$$\nabla \cdot \vec{F}_l + \frac{\delta m_l}{\delta t} = \dot{d} + \dot{\mu}_{l \rightarrow v} \quad (3.29)$$

Para a conservação de massa de vapor de água, os fenômenos de evaporação ou condensação serão considerados. De forma análoga a conservação de massa de água líquida, a conservação de massa de vapor de água será:

$$\nabla \cdot \vec{F}_v + \frac{\delta m_v}{\delta t} = \dot{\mu}_{l \rightarrow v} \quad (3.30)$$

A conservação de massa total de água (Equação 3.31) é obtida somando-se as Equações 3.29 e 3.30 e admitindo-se que a quantidade de água evaporada é equivalente à quantidade condensada.

$$\nabla \cdot (F_f) + \frac{\delta m_f}{\delta t} = \dot{d} \quad (3.31)$$

### 3.3.3.3 Modelo hídrico final

Combinando a equação de conservação da massa total dos fluidos (Equação 3.31) com a Lei de Darcy para fluxo hídrico no material (Equação 3.22), associado a expressões de

massa volumétrica (Equação 3.19), obtém-se a equação que descreve os movimentos da água líquida ou em vapor no material poroso:

$$\frac{\partial[\rho_l(T) - \rho_v(T)]\phi(d)S_l}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\rho_l(T)}{\mu_l(T)} k_{rl}(S_l) K_l(d) \frac{\rho_l}{\rho_v} \frac{1}{S_l} + \frac{\rho_v(T)}{\mu_v(T)} k_{rv}(S_l) K_v(d) \right) \frac{\partial p_v}{\partial S_l} \nabla(S_l) \right] + \dot{d} \quad (3.32)$$

A condutividade hídrica do meio pode ser definida como:

$$D(S_l, d, T) = \left[ \frac{\rho_l(T)}{\mu_l(T)} k_{rl}(S_l) K_l(d) \frac{\rho_l}{\rho_v} \frac{1}{S_l} + \frac{\rho_v(T)}{\mu_v(T)} k_{rv}(S_l) K_v(d) \right] \frac{\partial p_v}{\partial S_l} \quad (3.33)$$

A Equação 3.32 pode ser escrita de forma mais compacta:

$$\frac{\partial[\rho_l(T) - \rho_v(T)]\phi(d)S_l}{\partial t} = \nabla \cdot [D(S_l, d, T)\nabla(S_l)] + \dot{d} \quad (3.34)$$

Como o modelo é termo-hidro-mecânico, é possível acrescentar na Equação 3.34 uma parcela de acúmulo de massa devido à dilatação térmica  $(-\chi \frac{\delta T}{\delta t})$  [8]. Então a Equação hídrica ficará:

$$\frac{\partial[\rho_l(T) - \rho_v(T)]\phi(d)S_l}{\partial t} - \chi \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [D(S_l, d, T)\nabla(S_l)] + \dot{d} \quad (3.35)$$

onde  $\chi = \alpha(1 - \phi)(S_g \rho_v + S_l \rho_l)$ , que é um parâmetro em função da dilatação térmica,  $\alpha$ , da saturação de água líquida  $S_l$ , da saturação de vapor de água,  $S_v$ , da massa específica de água líquida,  $\rho_l$  e da massa específica de vapor de água  $\rho_v$ .

Assim, através da resolução do sistema de equações formado pelas Equações 3.9 e 3.35, temos a descrição do problema termo-hídrico baseado nas duas incógnitas principais: temperatura (T) e saturação em água líquida ( $S_l$ ).

### 3.4 Evolução das propriedades termo-hídricas

Para as análises a serem realizadas para as aplicações do modelo termo-hídrico, para o concreto comum (CC) e o concreto de alto desempenho (CAD), serão adotados:

- Para a condutividade térmica do concreto comum será adotada a Equação 2.3, aqui reescrita como Equação 3.36, que corresponde ao limite superior dado pela norma

Europeia para o cálculo da evolução da condutividade térmica com a temperatura.

$$\lambda_{CC} = 2 - 0,2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (3.36)$$

Sendo  $\lambda$  dada em W/(mK) e  $T$  dada em °C.

Para o concreto de alto desempenho, a condutividade térmica será dada pela Equação 3.37.

$$\lambda_{CAD} = 2,3 - 0,2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (3.37)$$

Como a desidratação no concreto influencia na condutividade térmica do mesmo, também será analisado o comportamento desse material acrescentando essa influência. Para isso será multiplicada pela curva de evolução da condutividade térmica definida pelas Equações 3.36 e 3.37 uma parcela em função da desidratação. Então, para o concreto comum e o concreto de alto desempenho, a condutividade térmica em função da temperatura e da desidratação serão dadas, respectivamente, pelas Equações 3.38 e 3.39.

$$\lambda_{CC} = \left[ 2 - 0,2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right] \times \left[ 1 - 0,9 \frac{d(T)}{d_{max}} \right] \quad (3.38)$$

$$\lambda_{CAD} = \left[ 2,3 - 0,2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0,0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right] \times \left[ 1 - 0,9 \frac{d(T)}{d_{max}} \right] \quad (3.39)$$

onde  $d_{max}$  é a desidratação máxima.

- Para a evolução da permeabilidade, tem-se uma expressão que relaciona a permeabilidade intrínseca com a permeabilidade aparente, que é dada pela Equação 3.40, expressão usada por DALPONT(2004, apud FERREIRA, 2011, [1]).

$$k_a = \frac{K k_{ri}}{\mu_l} \quad (3.40)$$

onde  $k_a$  é a permeabilidade aparente do meio,  $K$  é a permeabilidade intrínseca,  $k_{ri}$  é a permeabilidade relativa da fase considerada e  $\mu_l$  é a viscosidade dinâmica da água líquida.

A permeabilidade intrínseca ao gás e à água serão dadas, respectivamente, pelas Equações 3.41 e 3.42, porpostas por SERCOMBE et al. (2001, apud FERREIRA, 2011,

[1]):

$$k_v(d) = K_{v0}e^{0,126d} \quad (3.41)$$

$$k_l(d) = K_{l0}e^{0,126d} \quad (3.42)$$

onde  $d$  é a massa de água desidratada (desidratação) e  $K_{v0}$  a permeabilidade intrínseca ao gás de referência. A permeabilidade intrínseca ao líquido de referência é  $K_{l0} = 10^{-4} \times K_{v0}$ . Para o concreto comum adota-se a permeabilidade intrínseca ao gás de referência  $K_{v0} = 1,0 \times 10^{-17}$ .  $K_l$  e  $K_v$  serão dados em  $Kg \cdot m^2$ .

As permeabilidades relativas ao gás e à água, em função da saturação, são dadas pelas Equações 3.43 e 3.44, respectivamente, proposto por VANGENUCHTEN (1989, apud FERREIRA, 2011, [1]).

$$k_{rv}(S_l) = \sqrt{1 - S_l}(1 - S_l^2) \quad (3.43)$$

$$k_{rl}(S_l) = \sqrt{S_l}(1 - \sqrt{(1 - S_l^2)})^2 \quad (3.44)$$

- A evolução da pressão de vapor saturante, que é a pressão máxima a que uma substância é submetida antes de se condensar para uma temperatura constante, será dada pela equação de Clausius-Clapeyron em função da temperatura:

$$p_{vs} = p_{atm} \exp\left(\frac{M\Delta H_v}{R} \frac{T - 373,15}{373,15T}\right) \quad (3.45)$$

onde  $p_{atm} = 101325Pa$ ,  $R = 8,314J.mol^{-1}.K^{-1}$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $M_v = 0,018Kg.mol^{-1}$  é a massa molar do vapor de água,  $\Delta H_v = 2,26 \times 10^6 J.Kg^{-1}$  é a entalpia de vaporização da água e  $T$  é a temperatura em Kelvin.

- A evolução da cinética de desidratação ocorrerá para temperaturas superiores a  $60^\circ C$ , quando, segundo GALLE (2001, apud FERREIRA, 2011, [1]), uma modificação notável da porosidade ocorre. A partir dessa temperatura haverá extração da água ligada à matriz. Então, a Equação 3.46 representa a evolução da quantidade de água ligada.

Considera-se a desidratação como um processo irreversível.

$$d = \frac{d_{max}}{540}(T - 60) \quad \text{para } T > 60^\circ C \quad (3.46)$$

onde  $d_{max}$  é a desidratação máxima, que terá valor igual à quantidade de água ligada e  $d$  é dado em  $Kg/m^3$ .

- A evolução da porosidade total (Equação 3.47) será dada em função da desidratação e do valor médio para a densidade dos principais hidratos da pasta de cimento (CSH e  $C_a(OH)_2$ ),  $\rho_{hyd}$ . Será considerado  $\rho_{hyd} = 817,42Kg/m^3$ .

$$\phi = \phi(60) + \frac{d(T)}{\rho_{hyd}} \quad (3.47)$$

- A evolução da massa volumétrica da água líquida, que se supõe incompressível, será determinada conforme proposto por RAZNJVIC (1970, apud FERREIRA, 2011, [1]):

$$\rho_l(T) = 314,4 + 685,6 \left[ 1 - \left( \frac{T}{374,4} \right)^{1/0,55} \right]^{0,55} \quad (3.48)$$

sendo a temperatura T dada em  $^\circ C$ .

- A evolução da viscosidade dinâmica <sup>2</sup> será dada conforme proposto por PEZZANI (1992, apud FERREIRA, 2011 [1]):

$$\mu_l(T) = 2,414 \times 10^{-5} \exp \left( \frac{570,58058}{T + 133,15} \right) \quad (3.49)$$

$$\mu_v(T) = 3,85 \times 10^{-8} T + 10^{-5} \quad (3.50)$$

sendo a temperatura T em  $^\circ C$  e  $\mu_i$  em  $Kg/(ms)$ .

- A evolução do calor latente de vaporização será aproximado por:

$$L_{l \rightarrow v} = \frac{2450,2502 - 6,433949T}{1 - 0,0019057413T - 7,0023846T^2} \quad (3.51)$$

com  $L_{l \rightarrow v}$  em  $KJ/Kg$  e T em  $^\circ C$ .

---

<sup>2</sup>Viscosidade dinâmica: propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento a uma determinada temperatura.

### 3.5 Formulação mecânica: Dano de Mazars

O modelo assume que são as extensões (alongamentos) que irão causar microfissuras distribuídas no concreto e, conseqüentemente, provocarão a degradação do material influenciando no comportamento microestrutural do mesmo. Para isso torna-se necessário definir como um parâmetro representativo do estado local de extensão do material uma “deformação equivalente” ( $\tilde{\varepsilon}$ ), que é expressa pela Equação 3.54:

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{(\varepsilon_1)_+^2 + (\varepsilon_2)_+^2 + (\varepsilon_3)_+^2} \quad (3.52)$$

onde  $(\varepsilon_i)_+$  é a parte positiva do alongamento na direção  $i$  e é definido como:

$$(\varepsilon_i)_+ = \frac{1}{2}[\varepsilon_i + |\varepsilon_i|] = \begin{cases} \varepsilon_i, & \text{se } \varepsilon_i > 0 \\ 0, & \text{se } \varepsilon_i \leq 0 \end{cases} \quad (3.53)$$

O dano começa a ocorrer quando a deformação  $\tilde{\varepsilon}$  atinge um valor inicial  $S(0)$ , que, por convenção, é igual à deformação  $\varepsilon_{d0}$  determinada em teste de tração uniaxial (Figura 3.3), e corresponde à máxima tensão, que pode ser aproximada pela Equação 3.54.

$$\varepsilon_{d0} = \frac{f_t}{E} \quad (3.54)$$

onde  $f_t$  é a resistência a tração e  $E$  é o módulo de Young.

O critério de dano pode ser expresso por uma função  $f$  do tensor equivalente  $\tilde{\varepsilon}$  e do dano escalar  $D$ , tal como:

$$f(\tilde{\varepsilon}, D) = \tilde{\varepsilon} - S(D) \leq 0 \quad \text{com} \quad S(0) = \varepsilon_{d0} \quad (3.55)$$

A função  $S(D)$  pode ser representada graficamente por um oitavo de esfera no espaço das deformações principais, como mostra a Figura 3.4. Em se verificando a relação  $f(\tilde{\varepsilon}, D) < 0$ , tem-se a ausência de dano - na Figura 3.4, tal situação é representada por todos os pontos situados no interior da esfera.

A lei de evolução da variável escalar dano,  $D$ , é definida pela condição seguinte:

$$\begin{aligned} \dot{D} &= 0, \text{ se } f < 0 \text{ ou } f = 0 \text{ e } \dot{f} < 0 \\ \dot{D} &= F(\tilde{\varepsilon})(\dot{\tilde{\varepsilon}})_+, \text{ se } f = 0 \text{ e } \dot{f} = 0 \end{aligned} \quad (3.56)$$

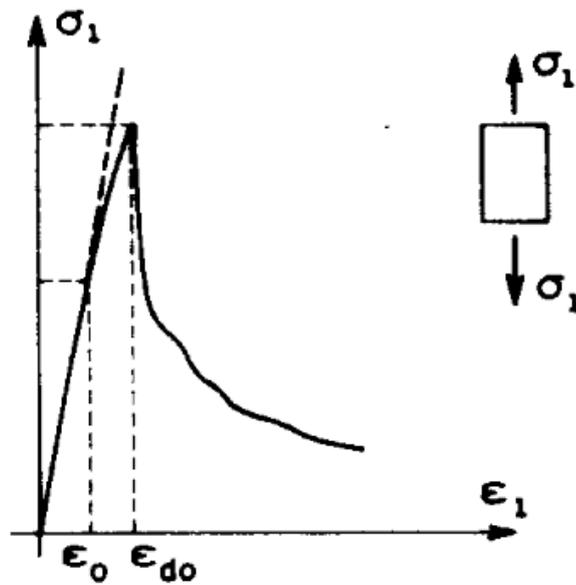


Figura 3.3: Ensaio de tração uniaxial: determinação de  $\varepsilon_{d0}$ , extraído de ÁLVARES (1993, [5]).

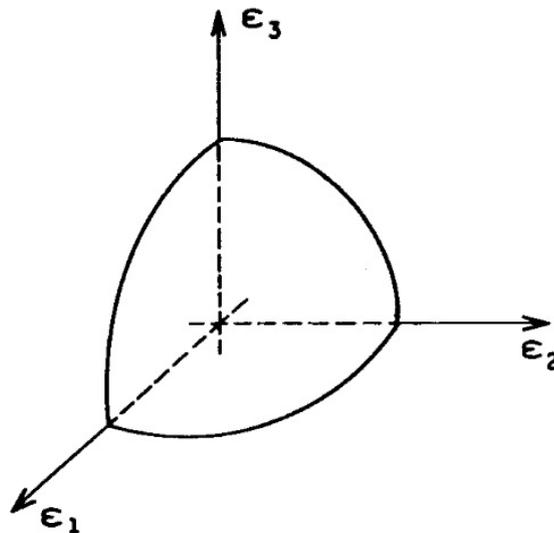


Figura 3.4: Superfície de dano associada ao critério de Mazars, extraído de ÁLVARES (1993, [5]).

onde  $(\dot{\quad})$  indica a variação no tempo e  $F(\tilde{\varepsilon})$  é uma função contínua positiva da deformação equivalente  $\tilde{\varepsilon}$ . Com isso, a variável dano crescerá continuamente, o que representa o comportamento físico observado.

Definem-se duas leis de dano diferentes para o concreto, uma para a tração e outra para a compressão, já que o comportamento do concreto em cada situação não é o mesmo, ou seja é do tipo não-simétrico. Então, no modelo isotrópico, foram propostas

por Mazars(1986) duas variáveis escalares,  $D_t$  para tração e  $D_c$  para compressão:

$$D_t = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A_t)}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_{d0})]} \quad (3.57)$$

$$D_c = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A_c)}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_{d0})]} \quad (3.58)$$

onde  $A_t$ ,  $A_c$ ,  $B_t$  e  $B_c$  são parâmetros do concreto, na tensão e compressão uniaxial, determinados através das curvas tensão-deformação do material.

A variável dano é então a combinação linear de  $D_t$  e  $D_c$ :

$$D = \alpha_t^\beta D_t + \alpha_c^\beta D_c \quad \text{sendo} \quad \alpha_t^\beta + \alpha_c^\beta = 1 \quad (3.59)$$

onde os valores para  $\alpha_t^\beta$  e  $\alpha_c^\beta$  pertencem ao intervalo fechado  $[0, 1]$ , e representam a contribuição de tração e compressão para o estado local de alongamento. O parâmetro  $\beta$  foi introduzido para melhorar o comportamento ao cisalhamento do modelo. Seu valor sugerido pela literatura para o concreto é  $\beta = 1,06$ . Através das equações 3.60 e 3.61 obtém-se as expressões para  $\alpha_t$  e  $\alpha_c$ :

$$\alpha_t = \frac{\sum \varepsilon_{ti}(\varepsilon_i)_+}{\tilde{\varepsilon}^2} \quad (3.60)$$

$$\alpha_c = 1 - \alpha_t \quad (3.61)$$

onde  $\varepsilon_{ti}$  é o vetor normal na direção principal e é calculado para a tensão efetiva principal positiva,  $(\bar{\sigma}_i)_+$ , pela Equação 3.62.

$$\varepsilon_{ti} = \frac{1 + \nu}{E}(\bar{\sigma}_i)_+ - \frac{\nu}{E}((\bar{\sigma}_i)_+ + (\bar{\sigma}_j)_+ + (\bar{\sigma}_k)_+) \quad (3.62)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $E$  é o módulo de Young do material.

Segundo o Modelo de Mazars, o dano no concreto inicia-se quando a deformação equivalente atinge o limite elástico de tração desse material  $\varepsilon_{d0}$ . A partir desse momento, a relação constitutiva será expressa por:

$$\bar{\sigma} = (1 - D)\overline{\overline{C_0}}\bar{\varepsilon} \quad (3.63)$$

onde  $\overline{\overline{C_0}}$  é o tensor elástico de quarta ordem para o material íntegro. Considerando o material isotrópico,  $\overline{\overline{C_0}}$  é dado por:

$$\overline{\overline{C_0}} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{pmatrix} \quad (3.64)$$

### 3.5.1 Determinação dos parâmetros do modelo de Mazars

Mazars (1984) propôs os seguintes intervalos de validade para os valores dos parâmetros  $\varepsilon_{d0}$ ,  $A_t$ ,  $B_t$ ,  $A_c$  e  $B_c$ :

$$\begin{aligned} 1,0 \cdot 10^{-5} &\leq \varepsilon_{d0} \leq 1,0 \cdot 10^{-4} \\ 0,7 &\leq A_t \leq 1,0 \\ 1,0 \cdot 10^4 &\leq B_t \leq 1,0 \cdot 10^5 \\ 1,0 &\leq A_c \leq 1,5 \\ 1,0 \cdot 10^3 &\leq B_c \leq 2,0 \cdot 10^3 \end{aligned} \quad (3.65)$$

Para determinar os parâmetros da variável de dano é necessário que os dados obtidos do teste uniaxial de compressão e de tração para o concreto sejam conhecidos. A dedução destes parâmetros inicia-se com as relações constitutivas das Equações 3.66 para tração e 3.67 para compressão [23].

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_{d0} \\ \left[ \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_t)}{\tilde{\varepsilon}} + A_t \cdot \exp^{-\beta_t(\tilde{\varepsilon}-\varepsilon_{d0})} \right] \cdot E \cdot \varepsilon, & \varepsilon > \varepsilon_{d0} \end{cases} \quad (3.66)$$

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_{d0} \\ \left[ \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_c)}{\tilde{\varepsilon}} + A_c \cdot \exp^{-\beta_c(\tilde{\varepsilon}-\varepsilon_{d0})} \right] \cdot E \cdot \varepsilon, & \varepsilon > \varepsilon_{d0} \end{cases} \quad (3.67)$$

Adotando-se  $\varepsilon = \varepsilon_{d0}$  e, conseqüentemente,  $\sigma = f_t$  na Equação 3.66, tem-se:

$$\varepsilon_{d0} = \frac{f_t}{E} \quad (3.68)$$

Sendo  $\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \sigma = \sigma_{\infty}$  a tensão residual, o parâmetro  $A_t$  é obtido por:

$$A_t = 1 - \frac{\sigma_{\infty}}{E \cdot \varepsilon_{d0}} \quad (3.69)$$

O parâmetro que mede a fragilidade do concreto,  $\xi$ , pertence ao intervalo fechado  $[0,1]$  e é usado para calcular o parâmetro  $B_t$ :

$$B_t = \frac{1 + \xi}{\varepsilon_{d0}} \quad (3.70)$$

Na compressão tem-se  $\sigma'(\varepsilon_{max}) = 0$ . Assim, derivando-se a Equação 3.67, obtém-se:

$$B_c = \frac{1}{\varepsilon_{max}} \quad (3.71)$$

Impondo  $\sigma(\varepsilon_{max}) = f_c$  em compressão na Equação 3.67 e usando a Equação 3.71,  $A_c$  será:

$$A_c = \frac{f_c - E \cdot \varepsilon_{d0}}{E \cdot \varepsilon + E \cdot \varepsilon_{max} \cdot \exp^{(-1 + \frac{\varepsilon_{d0}}{\varepsilon_{max}})}} \quad (3.72)$$

A formulação aqui descrita será empregada nas análises computacionais realizadas com o Cast3m, o que é tratado nos próximos capítulos.

# 4 Modelagem Termo-hidro-mecânica via Cast3m

## 4.1 Descrição geral do Cast3m

Cast3m é um programa para a resolução de equações diferenciais parciais pelo Método dos Elementos Finitos. Trata-se de um sistema de código aberto e gratuito, que permite a incorporação e adaptação de modelos por parte do usuário. Foi desenvolvido no DMT/CEA (Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l’Energie Atomique), na França, onde fez parte de uma atividade de pesquisa no campo da mecânica, a fim de definir um instrumento de alto nível que pudesse servir como um suporte válido para a concepção, projeto e análise de estruturas e componentes no domínio nuclear, como no setor industrial tradicional [24].

Trata-se de um sistema que incorpora as funções de cálculo, pré-processamento e o tratamento dos resultados (pós-processador). Por ele é possível realizar análises de problemas de elasticidade linear, térmicos, não-lineares (grandes deslocamentos, grandes deformações...), dinâmicos, dentre outros [24].

A linguagem de programação usada no Cast3m é a GIBIANE, que é orientada a objeto. O código permite usar procedimentos de cálculo que estão incorporados a ele, também escritos em GIBIANE, e os objetos são criados através de operadores pré-definidos, escritos na linguagem ESOPE [1].

A linguagem GIBIANE parte do princípio de que uma computação é uma sucessão de processos independentes comunicando-se através de estruturas de informação chamadas objetos. O objetivo de uma instrução em GIBIANE é criar um objeto particular através da ajuda de operadores que foram previamente criados [1]. Toda a documentação e tutoriais do Cast3m encontram-se disponíveis no sítio [www-cast3m.cea.fr](http://www-cast3m cea.fr).

## 4.2 Implementação do modelo THM no Cast3m

O algoritmo que será usado neste trabalho foi originalmente proposto por SERCOMBE et al. (2001, apud FERREIRA, 2011, [1]) para simular fenômenos termo-hídricos em meios porosos. Posteriormente, esse algoritmo foi adaptado por FERREIRA (2011, [1]), para permitir a análise de corpos compostos por dois ou mais tipos de material dispostos em camadas. Neste trabalho, essa última versão citada do algoritmo será novamente adaptado para tratar também do problema mecânico, sendo incorporado o procedimento que avalia o dano mecânico de Mazars. A Figura 4.1 apresenta a estrutura do algoritmo, destacando os pontos onde houve as adaptações para incorporar o cálculo mecânico.

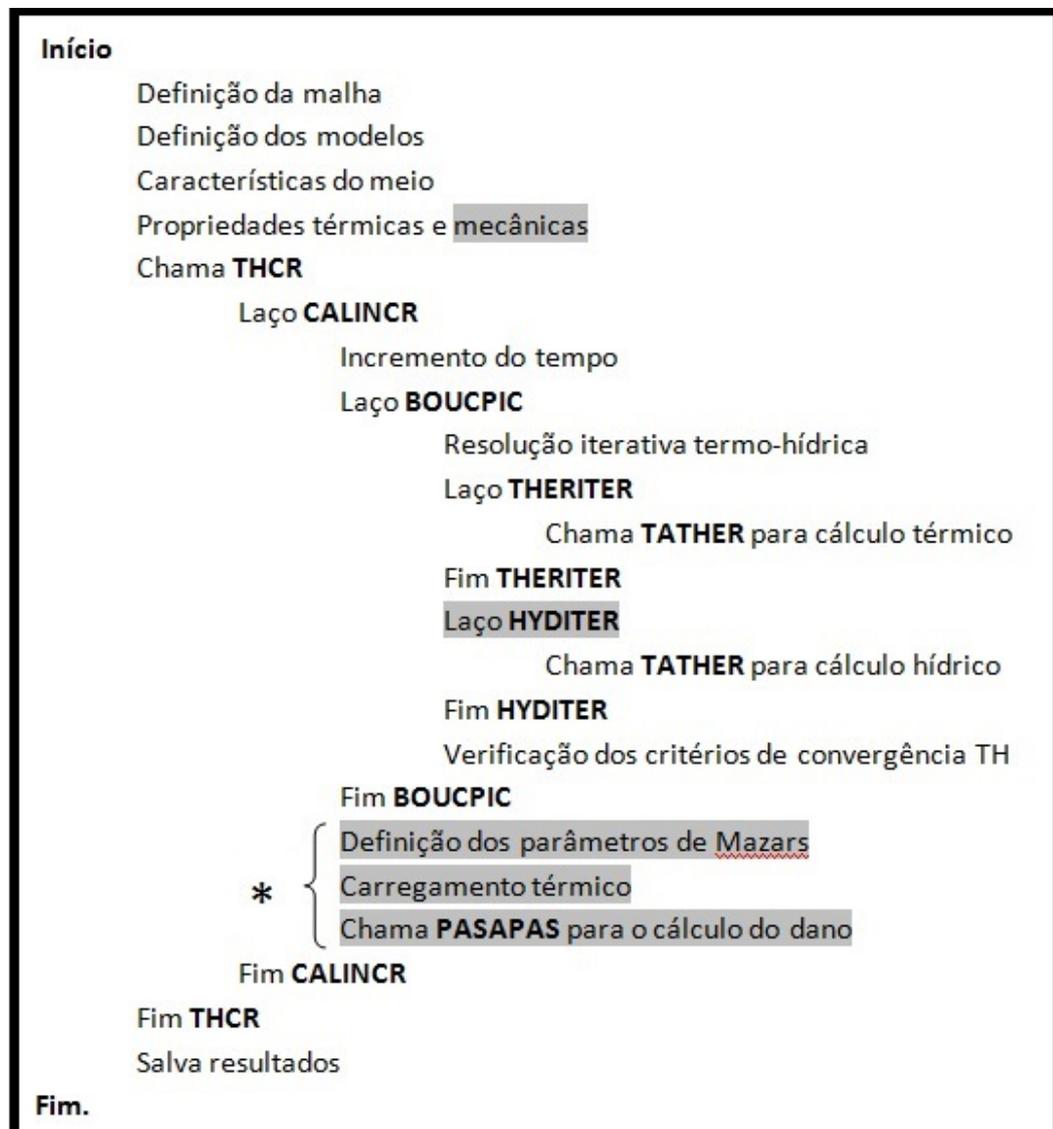


Figura 4.1: Algoritmo para a análise Termo-hido-mecânica. O trecho destacado (\*) é mostrado na Figura 4.2

No trabalho de FERREIRA (2011, [1]), a rotina para o cálculo termo-hídrico de bicamadas concreto-rocha, denominada **THCR**, resolve as equações do modelo térmico acoplado ao modelo hídrico através de dois laços, **theriter** e **hyditer**. A rotina que faz a resolução das equações não-lineares, denominada **tather**, é chamada tanto no laço do cálculo térmico para resolver a equação da energia (Equação 3.9), quanto dentro do laço hídrico, para resolver a equação da saturação (Equação 3.34). O laço denominado **picard** é responsável pela verificação da convergência simultânea dos dois cálculos. Aqui, mantém-se essas rotinas, porém para a equação da saturação será considerado o acréscimo de uma parcela de acúmulo de massa devido à dilatação térmica ( $-\chi \frac{\delta T}{\delta t}$ ) [8] (Equação 3.36).

Para a resolução do problema termo-hidro-mecânico, segundo ERVINE (2012, [25]), para o cálculo de estruturas em situações de fogo, o acoplamento termo-mecânico envolve soluções numéricas muito complexas, porém seu resultado quando comparado à solução sem esse acoplamento não é muito diferente, o que significa que o resultado mecânico não influencia no resultado térmico, no mesmo passo de tempo. Então neste trabalho o algoritmo a ser usado primeiramente realizará o cálculo acoplado termo-hídrico e em seguida o cálculo mecânico.

O código utiliza dois métodos numéricos: o Método dos Elementos Finitos, para a solução espacial, e diferenças finitas, para a solução temporal. Por causa disso, existe um problema de convergência dos resultados que pode ser resolvido ajustando o tamanho do passo de tempo e o número de elementos da malha.

A Figura 4.2 mostra um trecho do código em Cast3m para o modelo THM que mostra a rotina para o cálculo mecânico, destacado na Figura 4.1 por (\*). Observando a Figura 4.2, o trecho marcado por:

(1): refere-se a definição dos parâmetros de Mazars;

(2): são atribuídos as propriedades mecânicas do material ao modelo, como o módulo de elasticidade 'YOUNG', coeficiente de Poisson 'NU', densidade 'RHO', coeficiente de dilatação térmica 'ALPH' e os parâmetros de Mazars 'KTR0', 'ATRA', 'BTRA', 'ACOM', 'BCOM' E 'BETA' (correspondente, respectivamente, a  $\varepsilon_{d0}$ ,  $A_t$ ,  $B_t$ ,  $A_c$ ,  $B_c$  e  $\beta$ );

(3): é definido o carregamento térmico para o cálculo mecânico. As temperaturas usadas são as saídas do laço THERITER;

(4): são definidos os tempos de cálculo;

(5): neste trecho são passadas as entradas (condição de contorno mecânico, carregamento, as características do material e tempo de cálculo) para o procedimento PASAPAS, onde ocorrerão os cálculos mecânicos;

(6): é chamado o procedimento PASAPA para o cálculo mecânico;

(7): as saídas (deformação, tensão e variável dano de Mazars) do procedimento PASAPAS são salvas.

PASAPAS é um procedimento do Cast3m para resolução de problemas térmicos e mecânicos não-lineares de forma incremental (passo a passo).

Apresenta-se a seguir o passo-a-passo da análise THM - as alterações efetuadas no presente trabalho são aí explicitadas. Tomando-se como exemplo a aplicação ao concreto.

1. inicia-se o programa definindo-se a malha e a geometria do modelo em estudo;
2. então, especifica-se qual é o tipo de análise: no caso, empregou-se a análise térmica, mecânica elástica e isotrópica com dano de Mazars.
3. as propriedades térmicas e mecânicas do meio poroso são especificadas para o modelo;
4. em seguida, chama-se o procedimento THCR, que é onde acontecerão os cálculos termo-hidro-mecânica para cada passo de tempo;
5. ainda dentro do procedimento THCR, o laço CALINCR é chamado para fazer o incremento do tempo, e, a cada passo, atualizar as propriedades térmicas e hídricas;
6. dentro do procedimento CALINCR tem-se o laço BOUCPIC que é chamado para fazer o acoplamento entre o cálculo térmico e hídrico,
7. para o cálculo térmico, o laço THERITER, que está dentro de BOUCPIC, é chamado. No laço THERITER, as equações não-lineares para o cálculo térmico são montadas e enviadas para a rotina TATHER que resolve as equações de energia 3.6. Após o cálculo da incógnita temperatura  $T$ , confere-se sua convergência. Quando o resultado convergir, finaliza-se o laço THERITER;
8. então, inicia-se o cálculo hídrico chamando o laço HYDITER, que está dentro de BOUCPIC. No laço HYDITER, as equações não lineares para o cálculo hídrico são montadas e enviadas para a rotina TATHER que resolve a equação da saturação 3.35. Após o cálculo da incógnita saturação  $S_l$ , confere-se sua convergência. Quando o resultado convergir, finaliza-se o laço HYDITER;

```

*PARAMETROS DO MODELO DE MAZARS:

(1) { MKTRO = 6.0E-5 ;
      MATRA = 0.8 ;
      MBTRA = 1.0E4 ;
      MACOM = 1.4 ;
      MBCOM = 1.0E3 ;
      BETA1 = 1.06 ;

*MATERIAL FINAL:
SI ETAB.IMAZARS ;
  MATB = 'MATE' MODMB 'YOUN' YOUNGB 'NU' NUB 'RHO' DENSID
  'ALPH' ALPHAB 'KTRO' MKTRO 'ATRA' MATRA 'BTRA' MBTRA 'ACOM' MACOM
  'BCOM' MBCOM 'BETA' BETA1 ;
  MATRO = 'MATE' MODMR 'YOUN' YOUNGR 'NU' NUR 'ALPH' ALPHAR ;
SINON ;
  MATB = 'MATE' MODMB 'YOUN' YOUNGB 'NU' NUB 'ALPH' ALPHAB ;
  MATRO = 'MATE' MODMR 'YOUN' YOUNGR 'NU' NUR 'ALPH' ALPHAR ;
FINS ;

MATM = MATB ET MATRO ;

*-----
*carregamento: termico
*-----

(3) { *termico
      TEMPREF = MANU CHPO MAILM 1 'T' 24.;
      TEMPO = THERM.'TO'; COMM TEMPERATURA;
      TEMP1 = THERM.'T1'; COMM TEMPERATURA;
      TEMP = TABLE;
      TEMP.0=0. ;
      TEMP.1=TNO;
      TEMP.2=TN1;
      TEMPERA = TABLE;
      TEMPERA.0=TEMPREF;
      TEMPERA.1=TEMPO;
      TEMPERA.2=TEMP1;
      CHA = CHAR 'T' TEMP TEMPERA;

*-----
*TABELA PARA PASAPAS (USADO PARA RESOLVER PROBLEMAS N-LINEARES):
*-----

(4) { LIST1 = PROG TNO PAS 1. TN1;
      LIST2 = PROG TNO TN1;

(5) { MECA.BLOCAGES_MECANIQUES = CLTOT ;
      MECA.MODELE = MODM ;
      MECA.CHARGEMENT = CHA ;
      MECA.CARACTERISTIQUES = MATM ;
      MECA.TEMPS_CALCULES = LIST2 ;
      MECA.TEMPS_SAUVES = LIST2 ;
      MECA.RELAXATION_THETA = 1. ;
      MECA.MAXSOUSPAS = 30 ; COMM PADRAO: 200;
      MECA.PRECISION = 1.E-3 ; COMM PADRAO:1.E-4;
      MECA.MOVA = 'D' ;
      MECA.'TALPHA_REFERNE' = 20. ; COMM PADRA: 0;

*-----
*RESOLUCAO:
*-----

(6) { PASAPAS MECA;
      **

(7) { *GUARDANDO RESULTADO MECANICO:
      (ETAB.DESLOCAMENTO).NSOR=MECA.DEPLACEMENTS.1;
      (ETAB.TENSAO).NSOR=MECA.CONTRAINTES.1;

SI (ETAB.IMAZARS) ;
  MECA.DANO = MECA.VARIABLES_INTERNES.1;
  Danom1= exco 'D' MECA.DANO ;
  DANOM1= chan chpo MODM Danom1;
  ETAB.DANO.NSOR = DANOM1 ;
FINSI;

```

Figura 4.2: Código em Cast3m, em GIBIANE, para o modelo THM correspondente ao trecho destacado por (\*) na Figura 4.1

9. como o cálculo térmico e hídrico são acoplados, torna-se necessário verificar a convergência dos dois resultados, para isso, através do laço denominado PICARD

os critérios de convergência térmicos e hídricos são verificados.

10. tendo a temperatura para o passo em questão, inicia-se o cálculo mecânico. Os parâmetros de Mazars ( $A_t$ ,  $B_t$ ,  $A_c$ ,  $B_c$  e  $\varepsilon_{d0}$ ) são definidos;
11. a temperatura do passo anterior e do passo atual são definidas como carregamento térmico para o cálculo mecânico;
12. o procedimento PASAPAS, que faz parte das rotinas do Cast3m, é chamado passando-se como argumento as informações necessárias para o cálculo do dano isotrópico de Mazars, como: condições de contorno mecânico, o modelo para o cálculo (modelo mecânico elástico isotrópico com dano de Mazars), carregamento (térmico), tempo de cálculo, etc;
13. após o cálculo mecânico, o laço BOUCPIC é finalizado;
14. então, dentro ainda do laço CALINCR, passa-se para o próximo passo, incrementando-se o tempo, e repete-se todo o procedimento dentro do laço BOUCPIC;
15. quando chega-se ao tempo máximo de cálculo, encerra-se o laço CALINCR. Em seguida, o laço THCR também será finalizado;
16. salva-se os resultados;
17. o programa é finalizado.

Após o cálculo termo-hidro-mecânica, torna-se necessário a fase de pós-processamento, onde serão extraídos os resultados da análise.

As aplicações para este modelo serão apresentadas no próximo capítulo.

## 5 Aplicação do modelo THM

### 5.1 Introdução

Este capítulo descreve as aplicações desenvolvidas ao longo do trabalho, com base nos conceitos e técnicas numéricas estudados. Para o modelo termo-hidro-mecânico (THM), empregando o programa Cast3m. Serão analisados dois problemas:

**Aplicação 1:** Uma parede de concreto com 30cm de espessura sob situação de incêndio.

**Aplicação 2:** Corpo-de-prova em bicamada rocha-concreto sob situação de incêndio.

### 5.2 Parede de concreto

Este exemplo foi extraído da referência WITEK (2006, [8]) e trata da análise de uma parede de concreto com 30cm de espessura submetida a uma situação de incêndio em uma das faces, conforme a Figura 5.1. A evolução de temperatura foi representada pela curva de incêndio-padrão recomendada pela ISO 834 (Equação 5.1):

$$T_g = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (5.1)$$

onde  $T_0$  é a temperatura ambiente em graus Celsius,  $T_g$  é a temperatura do fogo em graus Celsius e  $t$  é o tempo em minutos.

A análise para a distribuição de temperatura na espessura da parede pode ser considerada unidimensional, já que ao longo da sua altura a temperatura é constante. Sendo assim, a geometria adotada na análise, com as condições de contorno e carga térmica adotada, são mostradas na Figura 5.1. Para o cálculo mecânico, haverá restrição do movimento na direção vertical (y) nas arestas 'a' e 'b' e na direção horizontal (x) na aresta 'd'.

Tal aplicação terá por objetivo validar a incorporação do modelo mecânico (dano de Mazars) ao modelo TH no programa Cast3m. Para isso, os resultados obtidos para temperatura e variável dano de Mazars serão comparados aos fornecidos na referência [8]. Cabe destacar que na referência empregou-se um modelo térmico considerando a troca de

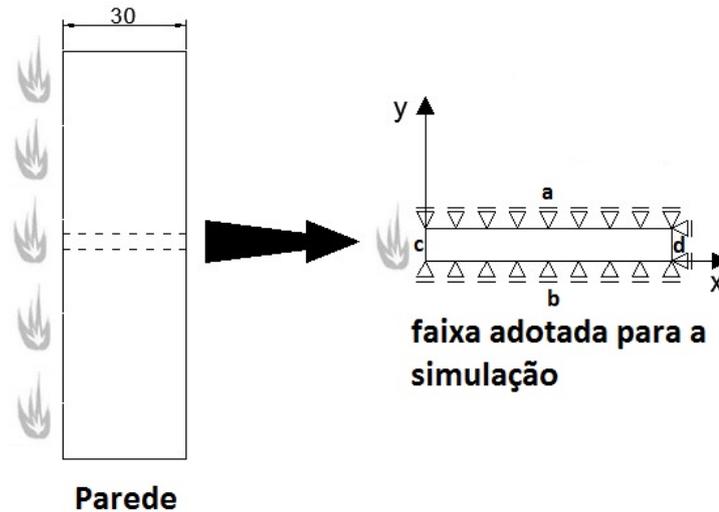


Figura 5.1: Parede com 30cm de espessura.

calor por condução, radiação e convecção.

### 5.2.1 Dados para a análise

Para o cálculo termo-hidro-mecânico, será necessário informar ao código Cast3m, usado para a análise, os valores de algumas propriedades, parâmetros e dados iniciais. A Tabela 5.1 lista os valores para algumas propriedades que foram adotados por [8], usado como referência para este exemplo.

Propriedades	Unidade	Valor
Porosidade	%	0,082
Permeabilidade intrínseca	$m^2$	$2 \times 10^{-18}$
Densidade aparente	$Kg/m^3$	2,564
Calor específico	$j/KgK$	855
Condutividade térmica	W/mK	1,92
Módulo de Young	GPa	34,52
Coefficiente de Poisson	-	0,18

Tabela 5.1: Valores das propriedades do concreto assumidos para a simulação.

A tabela 5.2 lista as condições iniciais para a temperatura e a saturação no concreto.

Propriedades	Unidade	Valor
Temperatura	$^{\circ}C$	20
Saturação	%	60
Dilatação térmica	$^{\circ}C^{-1}$	$1,19 \times 10^{-5}$

Tabela 5.2: Condições iniciais.

### 5.2.1.1 Parâmetros de Mazars

Para o cálculo do dano mecânico de Mazars, será necessário informar ao código Cast3m os valores dos parâmetros  $A_t$ ,  $B_t$ ,  $A_c$ ,  $B_c$  e  $\varepsilon_{d0}$ . Como estas informações não estão disponíveis na referência 5.1, foi realizada aqui uma análise paramétrica - tendo como base a curva de evolução do dano mostrada na Figura 5.2. Foram testados vários conjuntos de valores para os parâmetros e os selecionados foram os que forneceram os melhores ajustes para a curva da variação no tempo da variável dano. Para isto, foi utilizada uma ferramenta para análise paramétrica, chamada SWADE, desenvolvida por BONIFÁCIO (2013, [26]). Mazars propôs intervalos de valores para cada um desses parâmetros (3.65), porém, com base na literatura [5], experimentalmente podem ocorrer valores fora destes intervalos. Sendo assim, foram testados valores dentro e fora dos intervalos sugeridos por Mazars. A Tabela 5.3 lista o conjunto de parâmetros adotados para a análise. A curva obtida com esses valores é apresentada na Figura 5.2.

Parâmetro de Mazars	Valor
$A_t$	0,5
$B_t$	$1,0 \times 10^3$
$A_c$	1,5
$B_c$	$1,0 \times 10^3$
$\varepsilon_{d0}$	$3,3 \times 10^{-4}$
$\beta$	1,00

Tabela 5.3: Parâmetros adotados para o modelo de Mazars.

## 5.2.2 Resultados e discussão

A seguir, serão mostrados, para o modelo THM usando o código Cast3m, os resultados obtidos de temperatura absoluta o ponto definido a 2cm da aresta aquecida (ver Figura 5.1).

A Figura 5.3 mostra as curvas de variação da temperatura no tempo para os resultados extraídos do programa comparados aos obtidos por WITEK (2006, [8]). Como pode-se observar, a princípio, a curva obtida pelo Cast3m cresce mais rápido do que a referência, porém após aproximadamente 50min de simulação, as duas curvas passam a ser praticamente coincidentes, apresentando a mesma evolução de temperatura. Uma causa para o afastamento entre as duas curvas pode ser justificada pelo fato de que

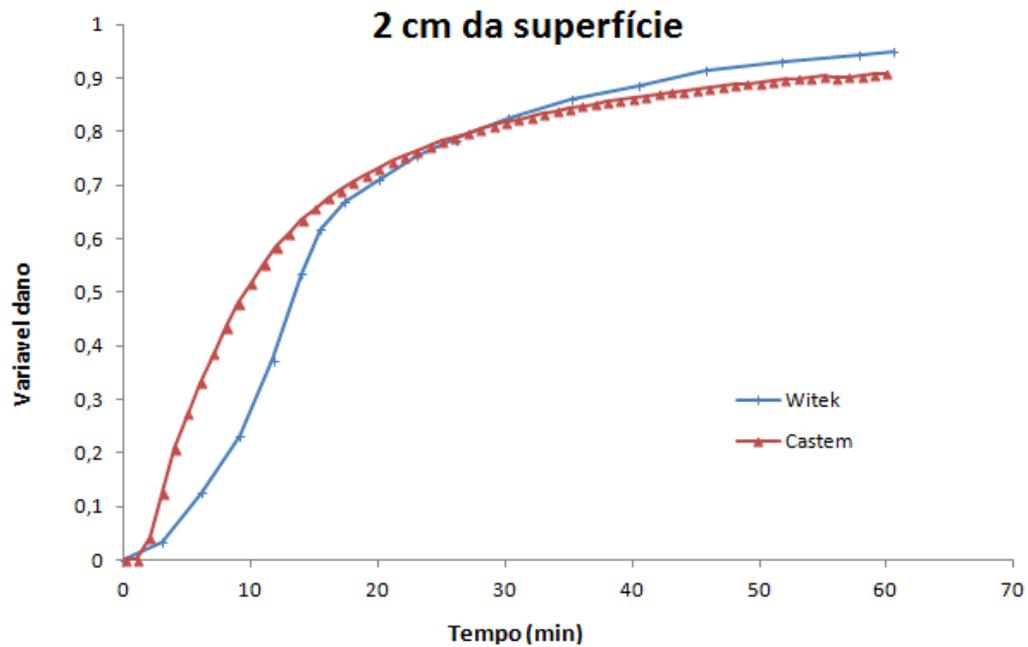


Figura 5.2: Ajuste da variável dano no tempo para a parede no ponto definido a 2cm da base onde ocorreu o incêndio - comparação entre os resultados do Cast3m e os de WITEK (2006, [8]).

considerou-se a troca de calor apenas por condução, desprezando-se os efeitos relativos a convecção e radiação .

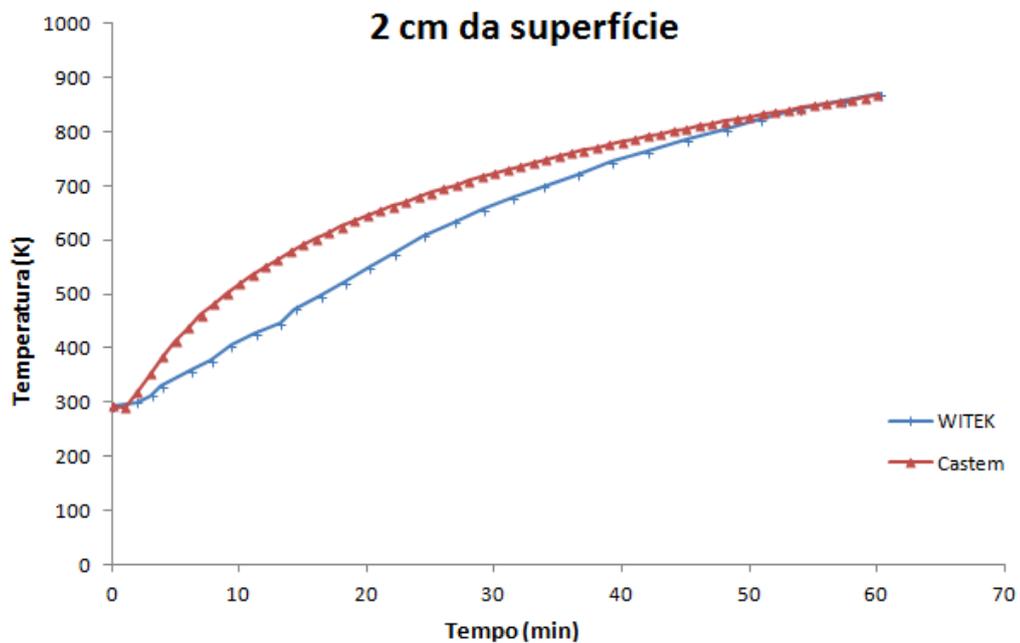


Figura 5.3: Variação da temperatura no tempo para a parede no ponto definido a 2cm da base onde ocorreu o incêndio.

### 5.3 Bicamada rocha-concreto

Esta aplicação simula o comportamento do material em uma situação de incêndio em um túnel (como, por exemplo, o incêndio no túnel sob o Canal da Mancha). Para isso, será analisada uma amostra prismática em bicamada, sendo uma camada de concreto com 23 cm de altura aderida a uma camada de 7 cm de rocha. A análise será feita para dois tipos de concreto: o concreto comum (CC) e o concreto de alto desempenho (CAD). Na superfície do concreto haverá a imposição de fogo, através de uma curva que descreva a evolução da temperatura em função do tempo, que será discutida mais adiante. A Figura 5.4 esquematiza o corpo-de-prova usado para uma análise experimental e a geometria a ser usada na análise numérica para simular um túnel pegando fogo. Para o comportamento mecânico, haverá restrição de movimento na direção vertical ( $y$ ) em toda a base da rocha e nas direções vertical e horizontal ( $y$  e  $x$ , respectivamente) no ponto no meio da base da rocha (Figura 5.5). Este mesmo problema foi analisado por FERREIRA (2011, [1]) empregando o modelo TH.

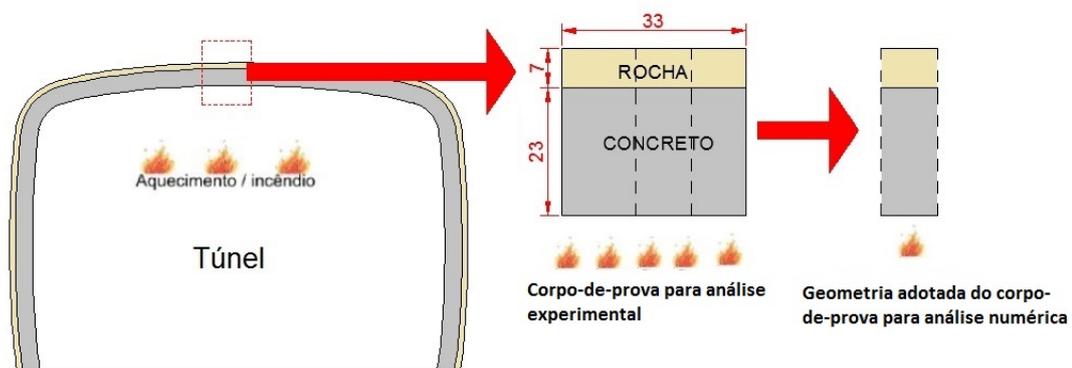


Figura 5.4: Esquema de um corpo-de-prova em bicamada para simular um túnel em situação de incêndio.

A aplicação desse modelo THM terá por objetivo avaliar o efeito da incorporação do modelo mecânico (dano mecânico de Mazars) sobre os resultados da análise da bicamada. Os resultados obtidos aqui serão comparados aos obtidos experimentalmente - apresentados por XING (2011, [27]) - e aos obtidos numericamente pelo modelo termo-hídrico - apresentados por FERREIRA (2011, [1]).

Então, serão reproduzidas algumas análises da aplicação apresentada por:

- XING (2011, [27]): analisou vários resultados experimentais (evolução no tempo para a condutividade térmica, porosidade, módulo de Young, dano mecânico, dentre

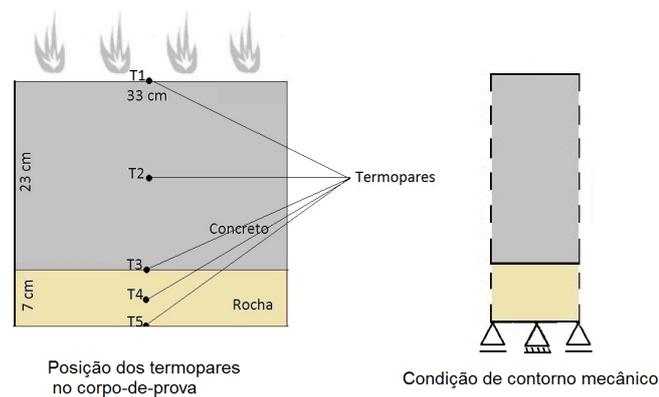


Figura 5.5: Posição dos termopares no corpo-de-prova e condição de contorno mecânica.

outros) para o ensaio feito no programa experimental desenvolvidos no Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) da UCP. Empregou-se concreto comum (CC) e concreto de alto desempenho (CAD). Foram confeccionados corpos-de-prova em bicamada (uma camada de concreto com dimensão de 23cm e a outra camada de rocha com dimensão de 7cm), submetidos a temperaturas de até  $600^{\circ}\text{C}$  em um forno de alta capacidade. Para medir temperaturas, foram utilizados termopares instalados em 5 posições diferentes no corpo-de-prova: na superfície da camada de concreto, no meio da camada de concreto, na interface das camadas, no meio da camada de rocha e na parte inferior da camada de rocha (Figura 5.5). Os corpos-de-prova foram isolados termicamente por uma lã de vidro, ficando apenas a superfície do concreto mantida a descoberto [27].

- FERREIRA (2011, [1]): obteve os resultados de um modelo acoplado termo-hídrico aplicado ao problema de transporte de energia e massa em meios porosos compostos por rocha e concreto (5.6). Os cálculos térmicos e hídricos foram realizados através do código para análise estrutural Cast3m (DMT/CEA - Département de Mécanique et Technologie du experimental à L'Énergie Atomique). Seus resultados foram comparados aos obtidos experimentalmente por XING (2011, [27]).

Como a temperatura imposta é apenas na superfície superior do concreto e as demais faces foram isoladas termicamente (Figura 5.6(b)), essa análise poderá ser considerada unidimensional, sendo assim será utilizada apenas uma faixa do corpo-de-prova para ser reproduzido numericamente (Figura 5.4). A Figura 5.6 representa o corpo-de-prova a analisar.



(a) Corpo-de-prova



(b) Corpo-de-prova dentro do forno isolado com lâ de vidro

Figura 5.6: Corpo-de-prova usado no programa experimental desenvolvido no Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) da UCP por Ferreira [1].

Para a análise a ser feita, após refinamentos sucessivos, foi estabelecido a malha de elementos finitos com 800 elementos triangulares e lineares (Figura 5.7).

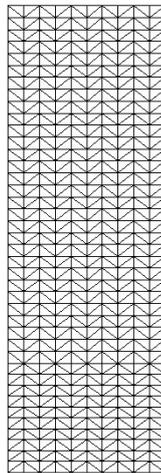


Figura 5.7: Malha de elementos finitos para o corpo.

### 5.3.1 *Dados para a análise*

A carga térmica adotada é mostrada na Figura 5.8. Trata-se da evolução da temperatura no tempo na superfície do concreto registrada no termopar instalado nesse ponto.

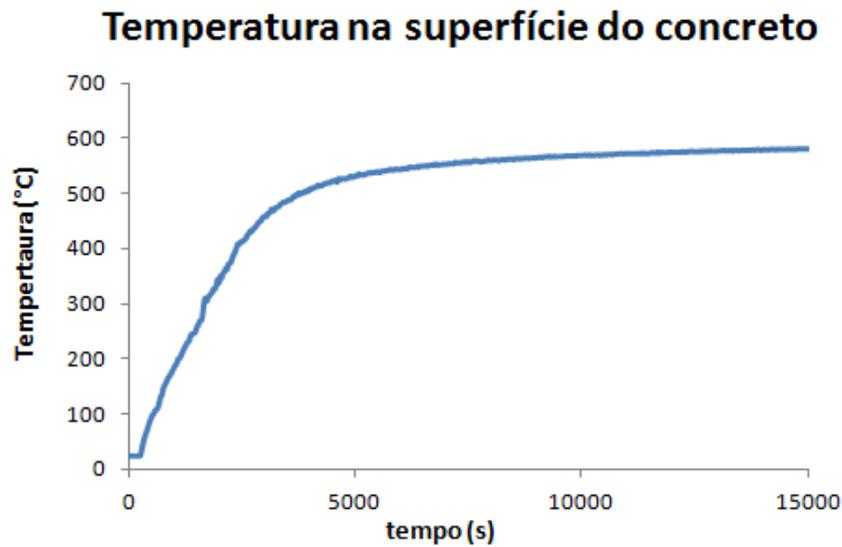


Figura 5.8: Evolução da temperatura para o termopar instalado na superfície do concreto.

Para o cálculo termo-hidro-mecânico, será necessário informar ao código Cast3m, usado para a análise, os valores de algumas propriedades, parâmetros e dados iniciais. A tabela 5.4 lista os constituintes com as respectivas quantidades para o concreto CC e CAD.

constituintes	CC	CAD
cimento CEM I 52,5	362	500
Brita 2 Sílico-calcária	956	987
Areia média Sílico-calcária	692	715
Água	217	150
Superplastificante	-	4,71

Tabela 5.4: Formulação dos concretos em  $Kg/m^3$  [1].

A tabela 5.5 lista as propriedades dos materiais medidas experimentalmente.

Propriedade	Símbolo	Unidade	CC	CAD	Rocha
Resistência à compressão	$f_c$	MPa	35,9	81,2	39,8
Resistência à tração	$f_t$	MPa	3,7	5,2	4,2
Módulo de Young	$E$	GPa	35,6	45,2	17,7
Coefficiente de Poisson	$\nu$	-	-	-	0,3
Densidade aparente	$\rho_a$	$Kg/m^3$	2150	2330	2296
Densidade real	$\rho_r$	$Kg/m^3$	-	-	2671
Condutividade térmica	$\lambda$	$w/(m.K)$	1,86	2,06	-

Tabela 5.5: Propriedades dos materiais medidas experimentalmente [1].

Como não foi medido experimentalmente o Coeficiente de Poisson para o concreto, será adotado  $\nu = 0,18$ . A tabela 5.6 lista os dados para o modelo do concreto.

Dado	Unidade	CC	CAD
Água ligada	$Kg.m^3$	$0,9 \times qtde.cimento \times 0,21$	$0,9 \times qtde.cimento \times 0,21$
Porosidade	%	16	9,5
Permeabilidade ao gás	$m^2$	$1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-19}$

Tabela 5.6: Propriedades dos materiais para o modelo-concreto [1].

A tabela 5.7 lista os dados para o modelo da rocha.

Dado	Unidade	Rocha
Condutividade térmica	$w/(m.K)$	1,5
Porosidade	%	14
Permeabilidade ao gás	$m^2$	$1 \times 10^{-19}$

Tabela 5.7: Propriedades dos materiais para o modelo-rocha [1].

A tabela 5.8 lista os valores dos calores específicos para alguns componentes que fazem parte da constituição do concreto (cimento, agregados, água ligada e água livre) e da rocha.

Cimento	750
Agregados	800
Água livre	4184
Água ligada	3760
Rocha	674

Tabela 5.8: Calores específicos ( $J/Kg^{-1}.\text{°}C^{-1}$ ) [1].

A tabela 5.9 lista as condições iniciais para a temperatura e a saturação no concreto e na rocha. Para a evolução da condutividade térmica da rocha será adotada a Equação 5.2, que foi proposta por AURANGZEB et al. (2007, apud FERREIRA, 2011, [1]).

	Concreto	Rocha
Temperatura	$24^{\circ}C$	$24^{\circ}C$
Saturação	39% para a superfície e 95% para o restante	70%
Dilatação térmica	$1,2 \times 10^{-5} \text{°}C^{-1}$	$5,5 \times 10^{-6} \text{°}C^{-1}$

Tabela 5.9: Condições iniciais em temperatura e saturação [1].

$$\lambda_r = \frac{\lambda_s \lambda_f}{\lambda_f + \lambda_s m \phi \left( \frac{T}{T_0} \right)} \quad (5.2)$$

onde  $\lambda_r$  é a condutividade efetiva da rocha,  $\lambda_s$  é a condutividade da parte sólida e é tomada igual a  $3,6Wm^{-1}K^{-1}$ ,  $\lambda_f$  é a condutividade do ar nos poros, tomada igual a  $0,026Wm^{-1}K^{-1}$ ,  $m$  é um parâmetro experimental com valores de 0,08 para a temperatura

ambiente e 0,11 para temperaturas até  $443K$  ( $\approx 170^\circ C$ ),  $\phi$  é a porosidade da amostra e  $T$  e  $T_0$  são as temperaturas dadas em Kelvin, sendo  $T_0$  a temperatura inicial.

### 5.3.1.1 Parâmetros de Mazars

Para o cálculo do dano mecânico de Mazars é necessário informar ao código Cast3m os valores dos parâmetros  $A_t$ ,  $B_t$ ,  $A_c$ ,  $B_c$  e  $\varepsilon_{d0}$ . No trabalho de XING (2011, [27]) foi mostrado, para o concreto CC, a curva experimental que relaciona  $E(T)/E_0$  com a temperatura ( $T$ ), sendo  $E(T)$  módulo de Young dado em função da temperatura e  $E_0$  módulo de Young do material íntegro. O conjunto de parâmetros para o concreto foram obtidos a partir do ajuste com a curva experimental. Para isso, foi utilizada, novamente, a ferramenta para análise paramétrica SWADE [26]. Os parâmetros identificados estão listados na Tabela 5.10. Observa-se que os valores encontram-se nos intervalos identificados por Mazars (3.65). A curva obtida com esses valores é apresentada na Figura 5.9.

Parâmetro de Mazars	Valor
$A_t$	0,8
$B_t$	$1,0 \times 10^4$
$A_c$	1,4
$B_c$	$1,0 \times 10^3$
$\varepsilon_{d0}$	$6,0 \times 10^{-5}$
$\beta$	1,06

Tabela 5.10: Parâmetros adotados para o modelo de Mazars.

### 5.3.2 Resultados e discussão

A seguir, serão mostrados, para o modelo THM usando o código Cast3m, os resultados obtidos de temperatura absoluta, taxa de variação da temperatura, saturação, porosidade e dano mecânico de Mazars para os pontos definidos pelos termopares no corpo-de-prova bicamada (ver Figura 5.5). Esses resultados foram extraídos para dois tipos de concreto: concreto comum (CC) e de alto desempenho (CAD). São testadas duas evoluções para a condutividade térmica do concreto: condutividade térmica variando só com a temperatura ( $\lambda(T)$ , Equações 3.36 e 3.37) e variando com a temperatura e a desidratação ( $\lambda(T, d)$ , Equações 3.38 e 3.39). A Tabela 5.11 lista as nomenclaturas adotadas para os modelos apresentados.

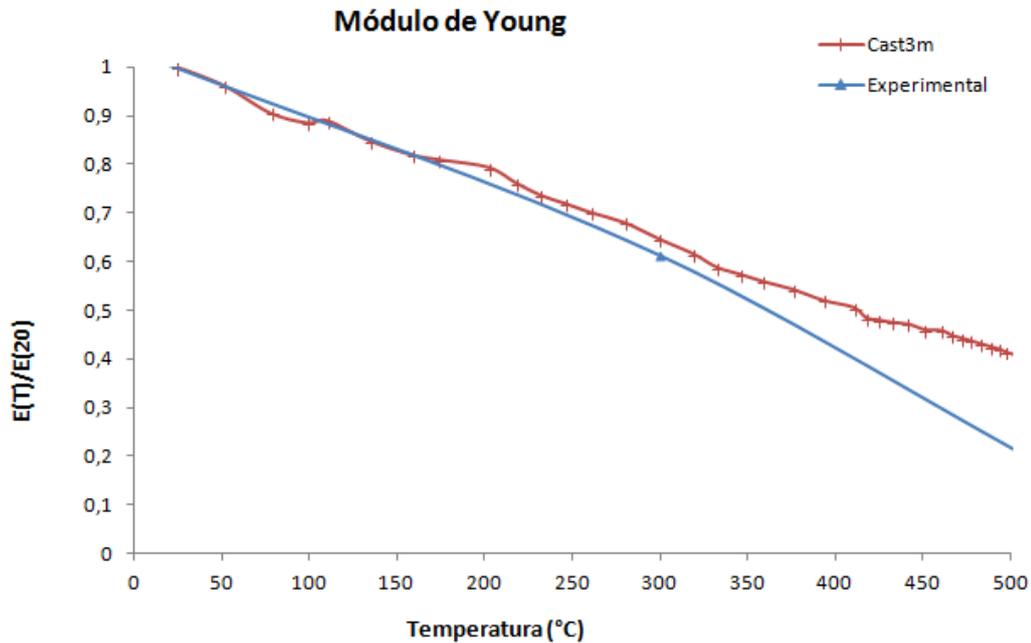


Figura 5.9: Curva  $E(T)/E(20) \times T$  para resultados experimental e numérico, para o concreto CC.

Modelo	Símbolo
Experimental [27]	experimental
Termo-hídrico [1]	TH
Termo-hidro-mecânico com $\lambda(T)$	THM1
Termo-hidro-mecânico com $\lambda(T, d)$	THM2

Tabela 5.11: Nomenclatura para os modelos.

### 5.3.2.1 Dano mecânico de Mazars

A título de ilustração, as Figuras 5.10(a) e 5.10(b) mostram o mapa com o dano mecânico no corpo no momento em que a temperatura na superfície do concreto é máxima, para os concretos CC e CAD, respectivamente, com  $\lambda(T)$ . Percebe-se que a região mais danificada foi a superfície do concreto, que foi a região mais aquecida. O valor da variável dano diminui a medida que se afasta da superfície do concreto e isso também ocorre para a temperatura, ou seja, a danificação do corpo está diretamente ligada a variação da temperatura no mesmo. Essa Figura pode ser comparada a Figura 2.3, sendo possível notar que a configuração do mapa de dano lembra a configuração do efeito “spalling” no corpo-de-prova bicamada. Cabe ressaltar que este fenômeno seria mais bem representado através de um modelo em 3D. Foi observada a influência do grau de refinamento da malha sobre a distribuição de dano.

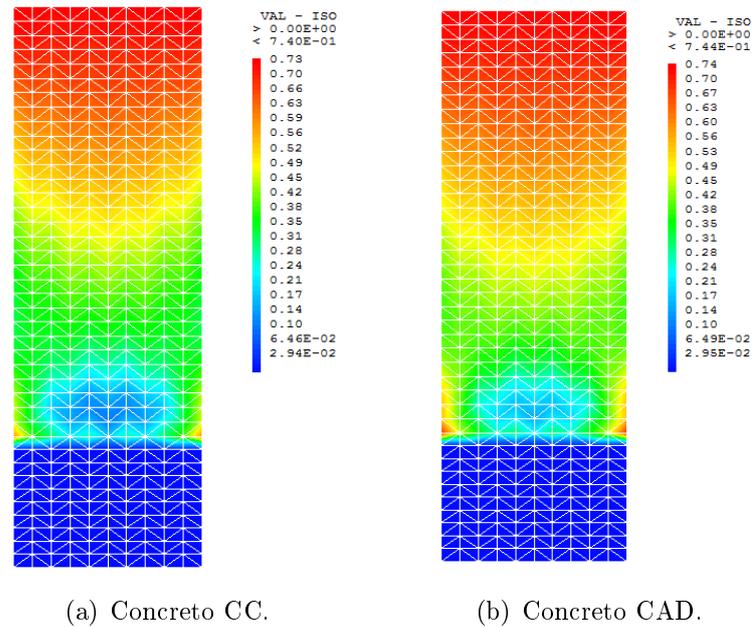


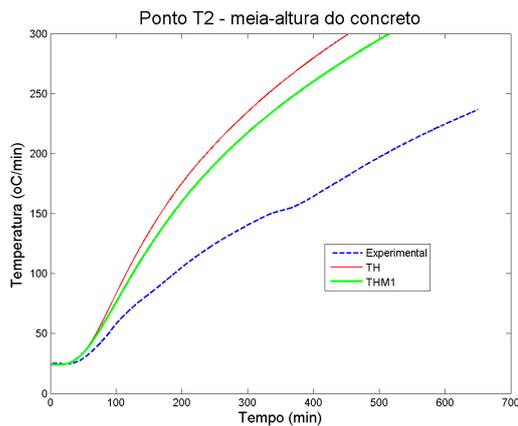
Figura 5.10: Distribuição do dano mecânico na bicamada no momento em que  $T(t) = 600^{\circ}C$ .

### 5.3.2.2 Temperatura

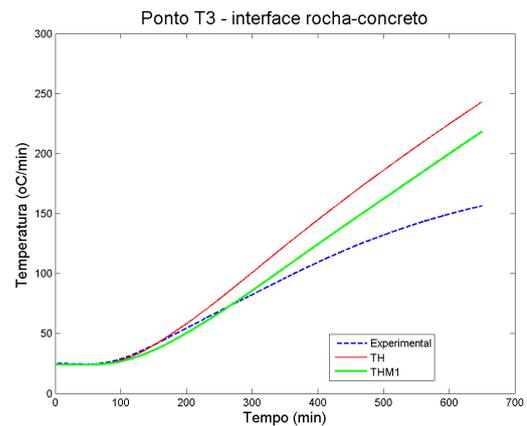
⇒ **Condutividade térmica variando com a temperatura ( $\lambda(T)$ ) para o concreto:**

Para os concretos CC e CAD com  $\lambda(T)$ , obteve-se os gráficos das Figuras 5.11 e 5.12, respectivamente, que apresentam a variação da temperatura no tempo para o modelo THM1 comparados a outros dois resultados: experimental [27] e numérico do modelo TH [1]. As Figuras 5.11(a) e 5.12(a) mostram essas curvas para o ponto no meio do concreto, as Figuras 5.11(b) e 5.12(b) para o ponto na interface entre o concreto e a rocha, as Figuras 5.11(c) e 5.12(c) para o ponto no meio da rocha e as Figuras 5.11(d) e 5.12(d) para o ponto na parte inferior da rocha.

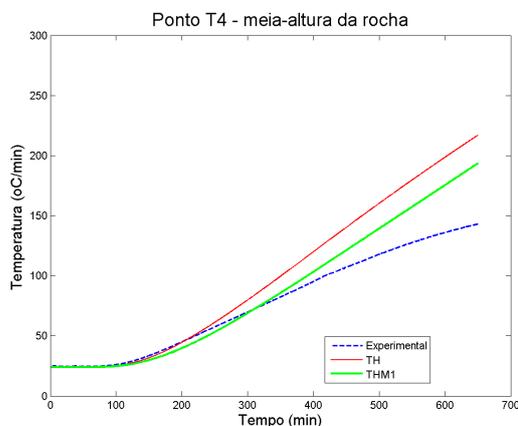
Nota-se que já havia uma diferença entre os resultados numéricos do modelo TH com os experimentais. Segundo FERREIRA (2011, [1]), isso ocorreu porque esse tipo de experimento envolve a precisão do sistema de aquecimento do forno, bem como a precisão do sistema de medição das temperaturas. O esperado era que com a incorporação do efeito mecânico no modelo TH desenvolvido no código Cast3m, as curvas numéricas THM1 se aproximassem mais da curva experimental. As curvas 5.11 mostram que para o CC a incorporação da mecânica surtiu o efeito esperado - os resultados THM1 estão mais próximos dos experimentais do que as curvas TH, para todos os pontos analisados - . Já para o CAD, as curvas TH e THM1 são praticamente coincidentes - indicando a



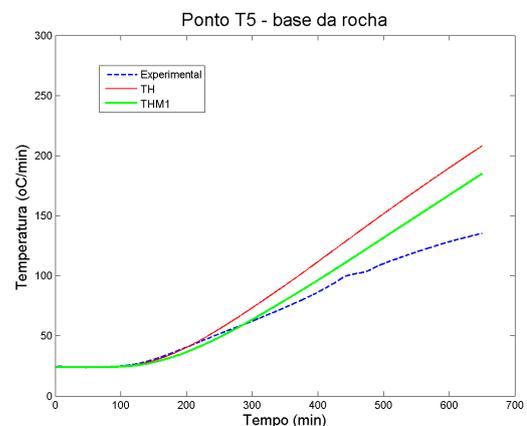
(a) CC (T2).



(b) CC (T3).



(c) CC (T4).



(d) CC (T5).

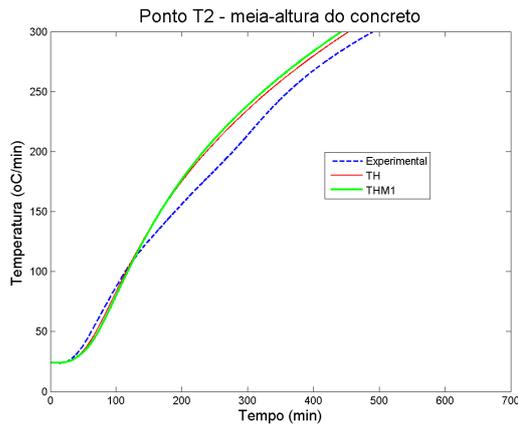
Figura 5.11: Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC com  $\lambda(T)$ .

necessidade de uma análise mais cuidadosa acerca dos efeitos da temperatura sobre as características deste material.

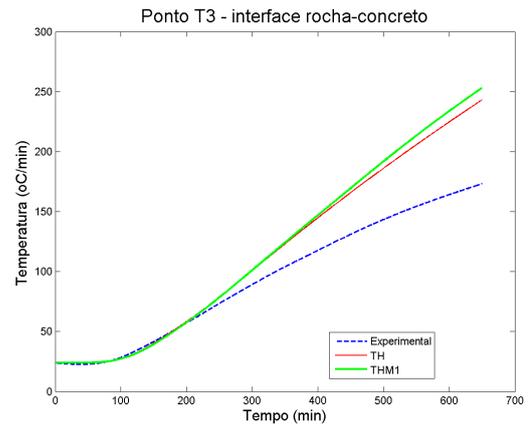
Nas Figuras 5.11 e 5.12, para o ponto T2 (Figuras 5.11(a) e 5.12(a)), percebe-se que os resultados numéricos e experimentais começam a se distanciar para temperaturas maiores que  $60^{\circ}\text{C}$ , que é a temperatura na qual, numericamente, considera-se o início da desidratação. Quanto mais longe da superfície aquecida, menor é a distância observado entre as curvas. Isto se deve, provavelmente, ao fato de que o comportamento do concreto, com a ocorrência de desidratação/reidratação, é muito mais complexo do que o da rocha.

⇒ **Condutividade térmica variando com a temperatura e a desidratação ( $\lambda(T, d)$ ) para o concreto:**

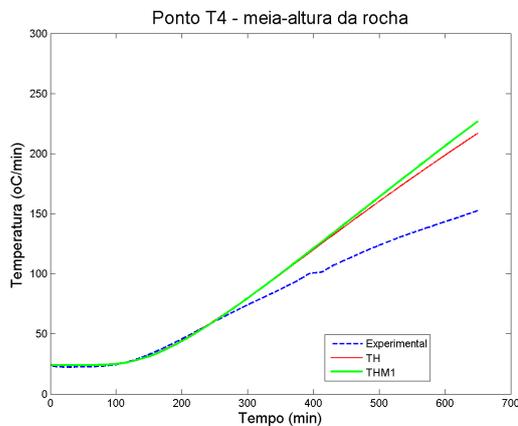
Para os concretos CC e CAD com  $\lambda(T, d)$ , obteve-se os gráficos das Figuras 5.13 5.14, respectivamente, que mostram a variação da temperatura no tempo para o modelo THM2



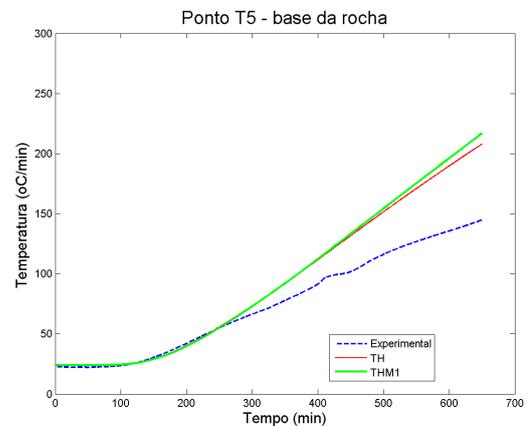
(a) CAD (T2).



(b) CAD (T3).



(c) CAD (T4).

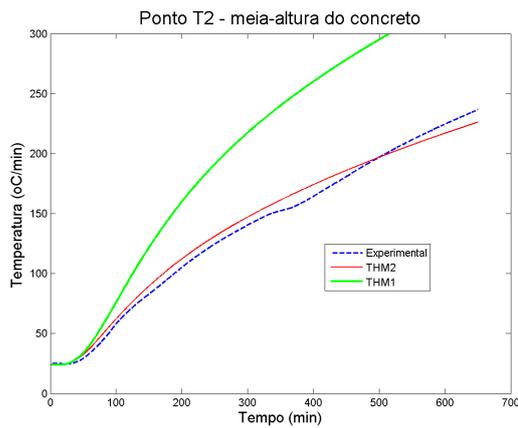


(d) CAD (T5).

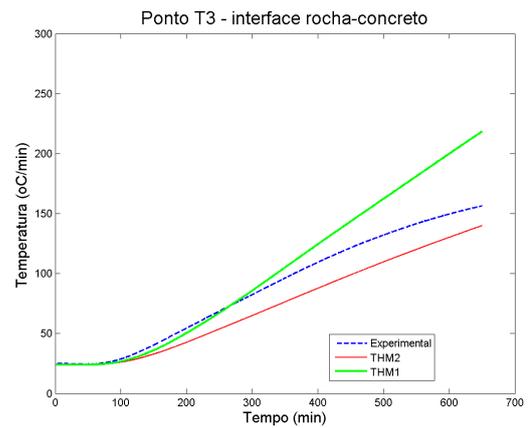
Figura 5.12: Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD com  $\lambda(T)$ .

comparada a outros dois resultados: experimentais e numérico do modelo THM1.

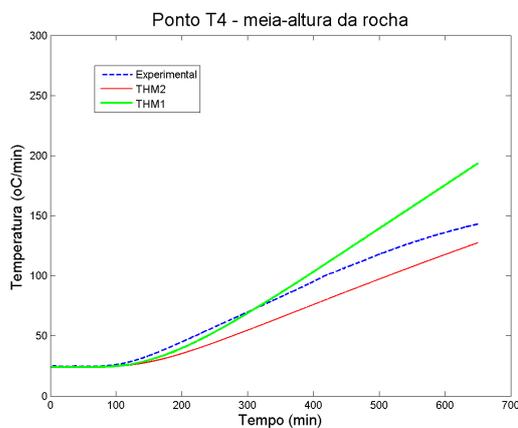
Nota-se que a hipótese de que a desidratação causaria influência na variação da temperatura no concreto é verdadeira, pois, de fato, considerar uma parcela em função da desidratação na expressão da condutividade térmica gerou mudanças na curva numérica THM1. Observando a curva THM2, para o ponto no meio do concreto (T2) essa curva se aproximou da curva experimental (Figura 5.13(a)). Em compensação, para os demais pontos essa curva se afastou ainda mais da curva experimental (Figuras 5.13(b), 5.13(c) e 5.13(d) para o concreto CC e 5.14(b), 3.3 e 3.4 para o concreto CAD). Nota-se que o resultado para THM2 piorou para os pontos que incluem a rocha, o que denota à forte não-linearidade e os efeitos acoplados inerentes à análise em questão.



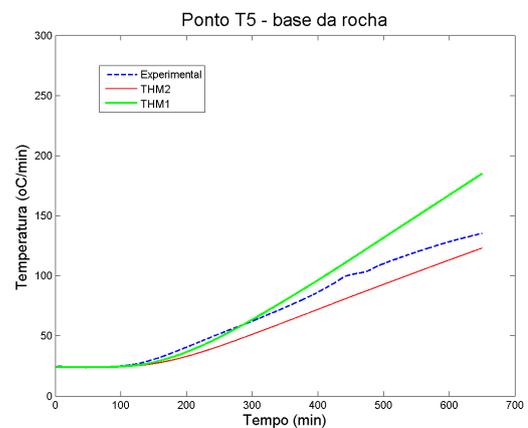
(a) CC (T2).



(b) CC (T3).



(c) CC (T4).



(d) CC (T5).

Figura 5.13: Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC, onde a condutividade térmica do concreto é dado em função da temperatura para THM1 e em função da temperatura e da desidratação para THM2.

### 5.3.2.3 Taxa de variação das temperaturas

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram as curvas da taxa de temperatura no tempo para os resultados numéricos e experimental para os concretos CC e CAD, respectivamente. Percebe-se que, para os dois concretos, em todos os pontos a curva para o modelo TH coincide com a curva para o modelo THM1. Como já observado por FERREIRA (2011, [1]), apesar das discrepâncias observadas na comparação das curvas de temperatura absoluta, existe uma clara relação entre os resultados numéricos e experimental.

### 5.3.2.4 Saturação

Para a análise considerando os concretos CC e CAD com  $\lambda(T)$ , as Figuras 5.17 e 5.18 apresentam o gráfico da saturação ao longo da altura do corpo-de-prova, sendo cada curva

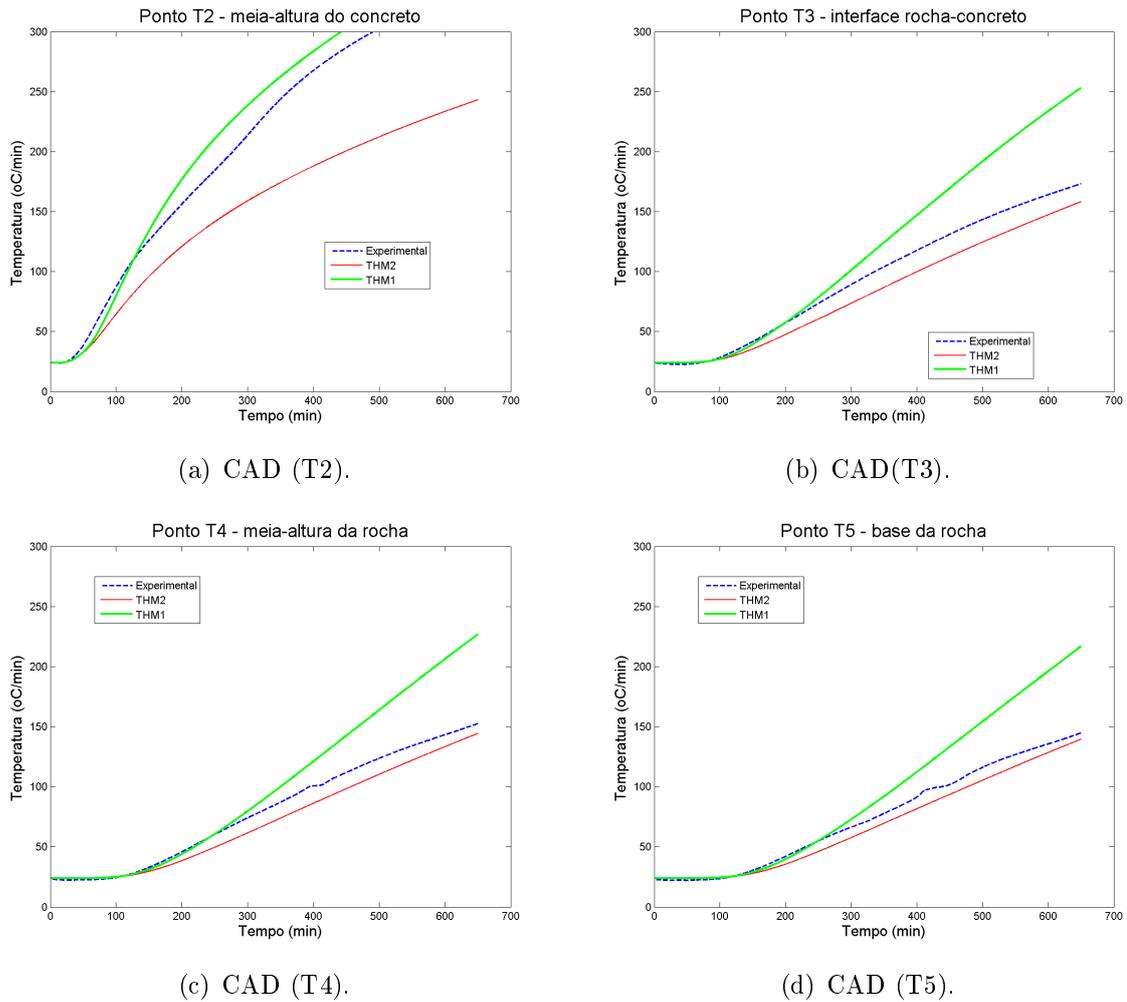


Figura 5.14: Variação da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD, onde a condutividade térmica do concreto é dado em função da temperatura para THM1 e em função da temperatura e da desidratação para THM2.

obtida para uma dada temperatura na superfície. Tem-se no eixo das abscissas os pontos P1, P7, P2, P8 e P3 que correspondem, respectivamente, os pontos denominados T5, T4, T3, T2 e T1, sendo o ponto T1 o da superfície aquecida (ver Figura 5.5).

Observa-se que foram encontrados valores da saturação maiores que 100%. Na dissertação de FERREIRA (2011, [1]), também, constatou-se o mesmo ocorrido para o resultado numérico TH. A justificativa dada, por ela, foi que como o modelo TH não considera o meio deformável, em alguns pontos críticos relativos a geração e destruição de massa líquida, o volume de água líquida na estrutura acaba superando o volume dos vazios existentes. Porém, no modelo THM o meio é considerado deformável e, mesmo assim, a saturação supera os 100% em determinados pontos. Uma outra hipótese, para isso, seria o fato de que a porosidade é considerada apenas em função dos aspectos químicos.

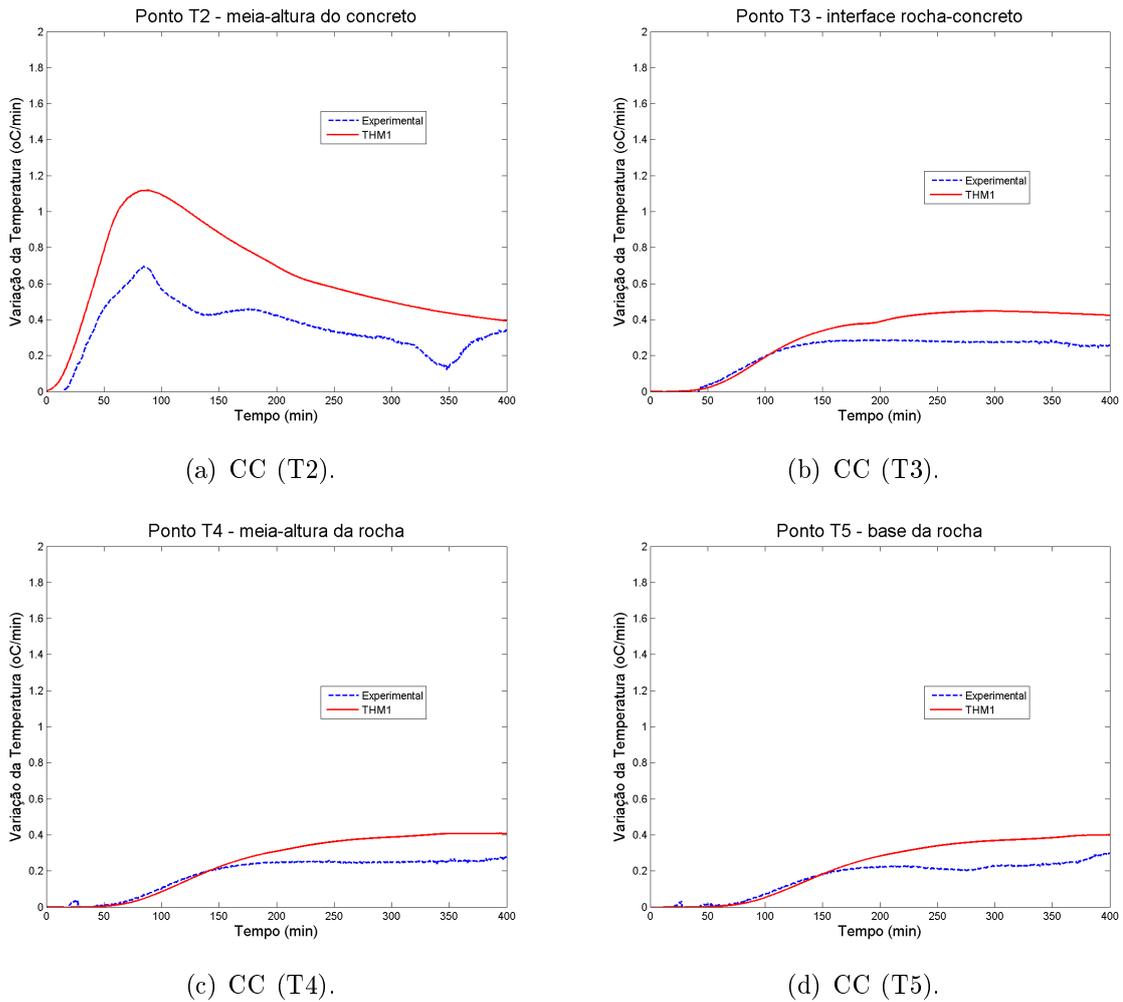
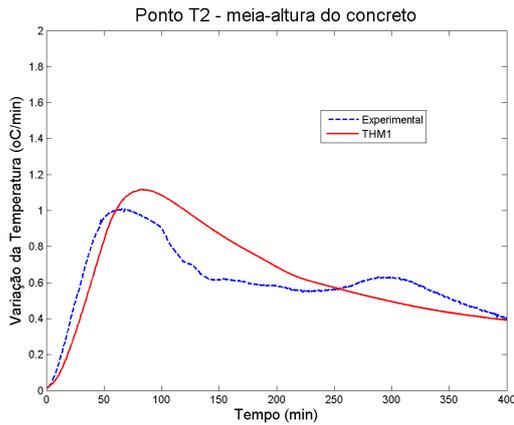


Figura 5.15: Taxa da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CC.

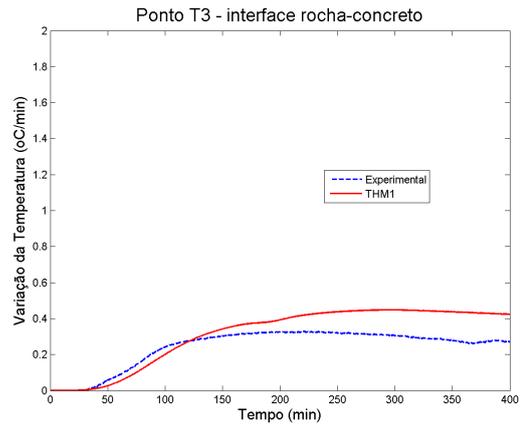
Observando a curva de saturação, nota-se que houve um aumento da saturação na camada rochosa, isso se deve por causa da tendência da migração da água para as zonas mais frias.

### 5.3.2.5 Pressão de vapor

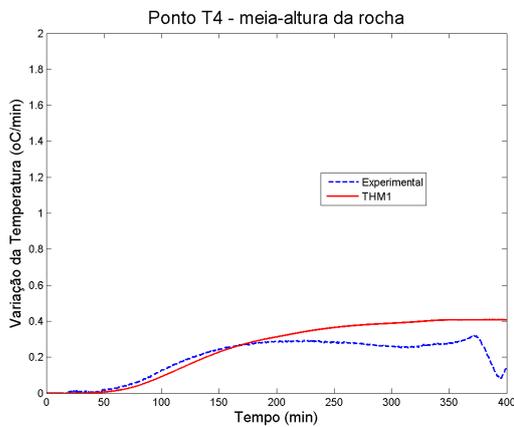
Para os concretos CC e CAD, as Figuras 5.19 e 5.20 mostram a curva de pressão de vapor em função da altura do corpo-de-prova obtida para uma certa temperatura na superfície. O mesmo aspecto apresentado na dissertação de FERREIRA (2011, [1]) e encontrado na literatura experimental ([2]) para a variação da poro-pressão nos concretos aquecidos pode ser observado nessas curvas. Com o aumento da temperatura e a distância da superfície aquecida, os picos de pressão crescem. Eles ocorreram nas regiões com alto teor de água, este fato é verificado pela coincidência entre os picos de pressão e saturação.



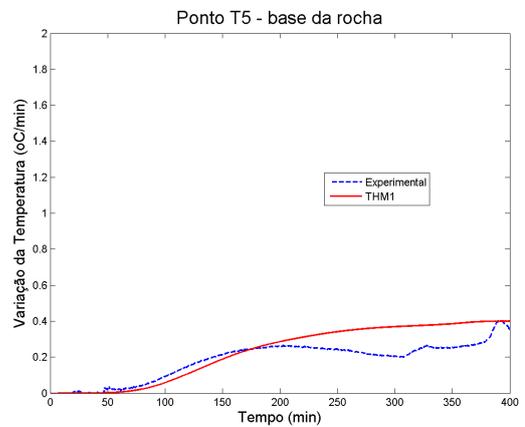
(a) CAD (T2).



(b) CAD (T3).



(c) CAD (T4).



(d) CAD (T5).

Figura 5.16: Taxa da temperatura no tempo para cada ponto analisado na bicamada, para o concreto CAD.

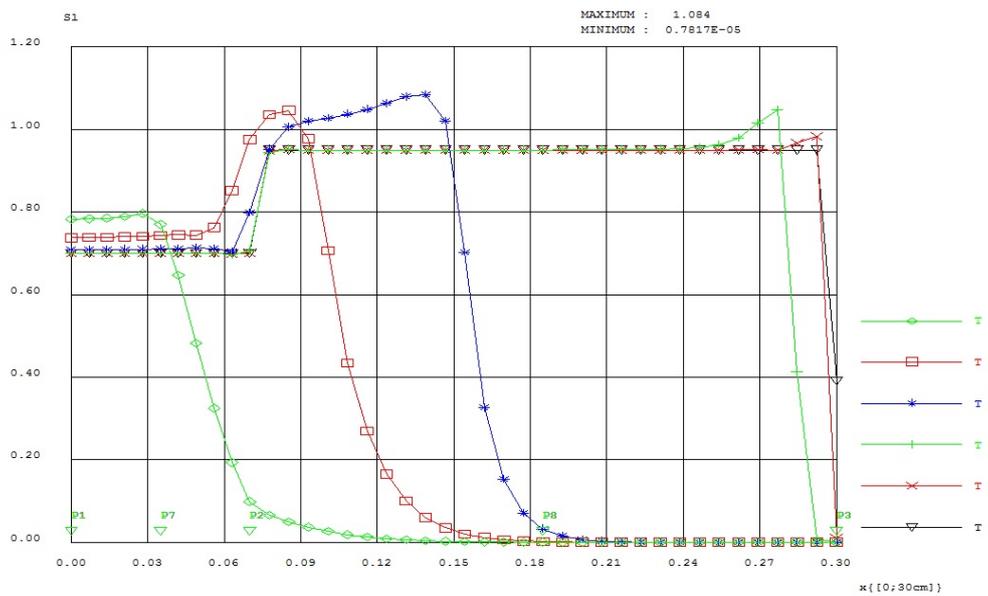


Figura 5.17: Saturação em função da altura do corpo para várias temperaturas definidas na superfície da amostra, para o concreto CC com  $\lambda(T)$ .

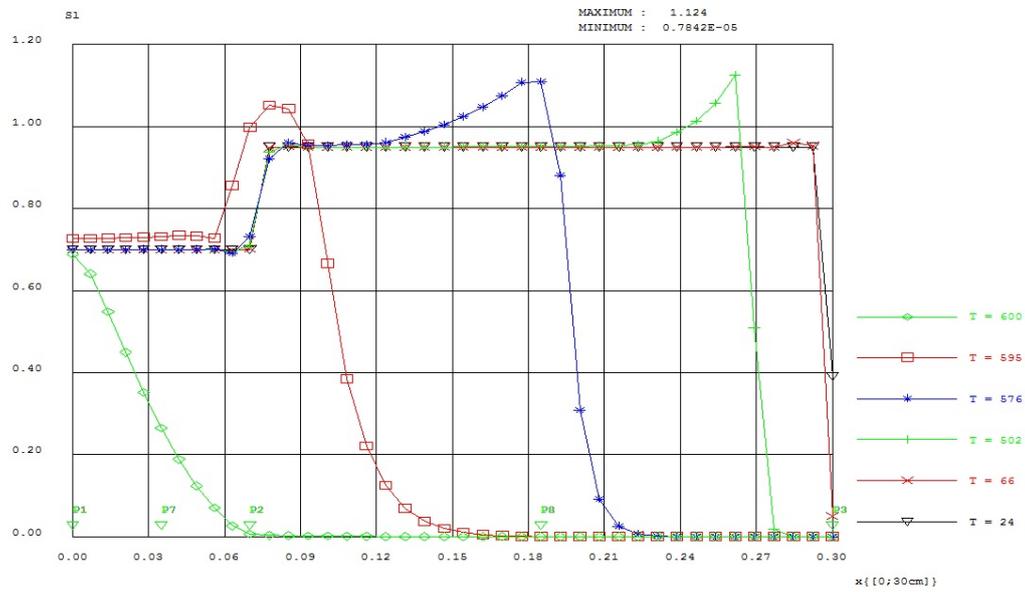


Figura 5.18: Saturação em função da altura do corpo para várias temperaturas definidas na superfície da amostra, para o concreto CAD com  $\lambda(T)$ .

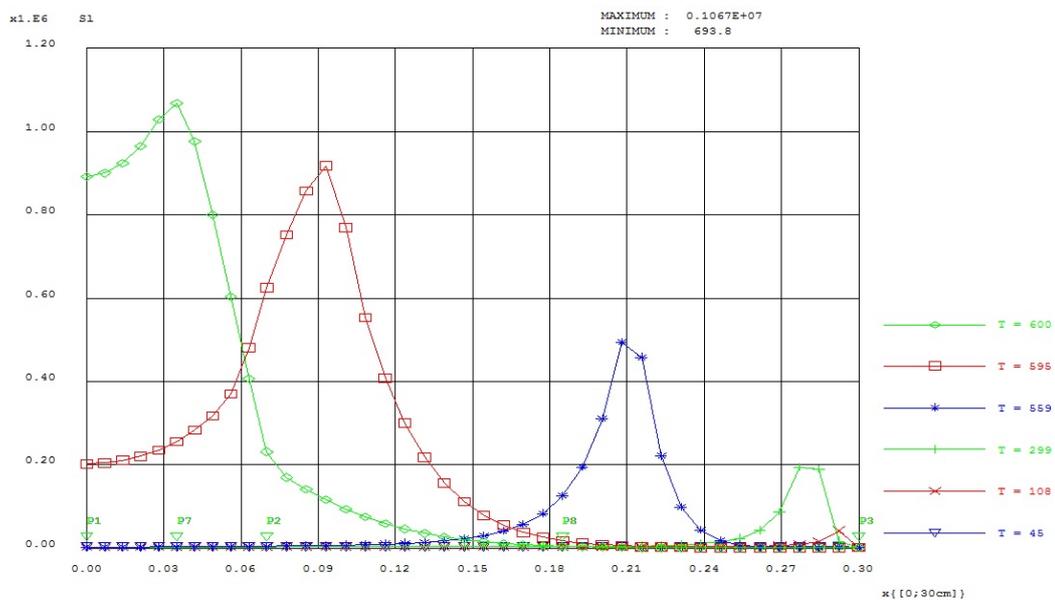


Figura 5.19: Evolução da pressão de vapor ao longo da altura do corpo para o concreto CC com  $\lambda(T)$ .

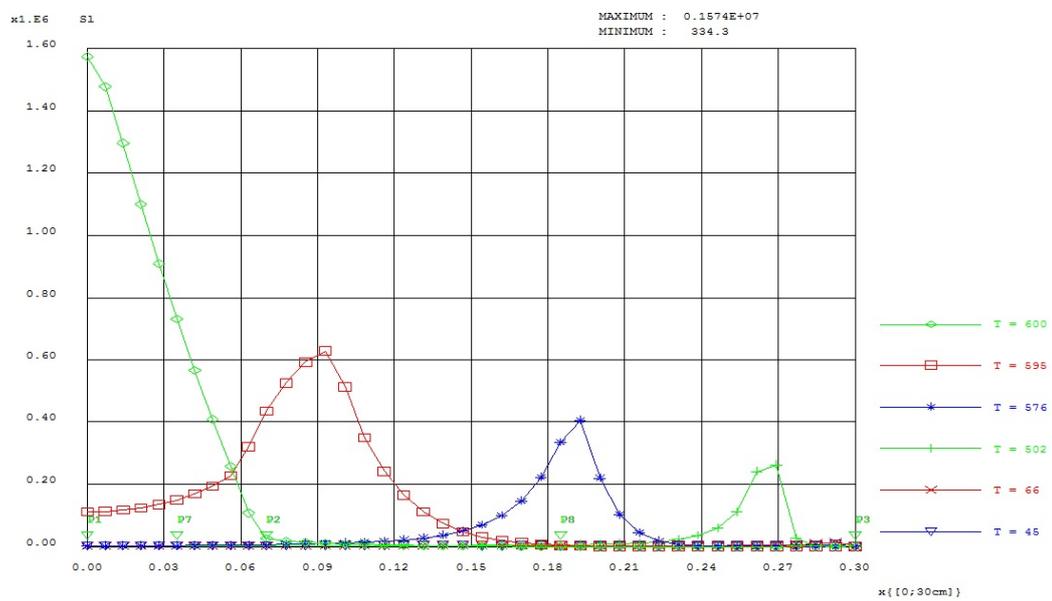


Figura 5.20: Evolução da pressão de vapor ao longo da altura do corpo para o concreto CAD com  $\lambda(T)$ .

## 6 Conclusões e Perspectivas

Este trabalho consistiu na análise numérica do comportamento de estruturas de concreto sob temperaturas elevadas. Trata-se, mais especificamente, da incorporação do modelo mecânico à formulação termo-hídrica desenvolvida por FERREIRA (2011, [1]).

O programa numérico empregou uma abordagem termo-hidro-mecânica para avaliar a distribuição de temperatura nos meios em estudo. A degradação do material foi simulada através do modelo de Dano de Mazars. Para tanto, foi empregado o código livre de elementos Finitos Cast3m, desenvolvido pelo CEA/França, que adota a linguagem própria GIBIANE. O concreto é representado como um meio poroso e bifásico. A formulação matemática do modelo TH consiste nas equações de balanço de massa para as fases fluidas, equação de balanço de energia, equação de momento linear das fases fluidas e equação de equilíbrio termodinâmico entre as fases líquidas e vapor. A reação de hidratação é considerada como reversível e termo-ativada – o que confere um significativo grau de complexidade ao problema, uma vez que as propriedades físicas e mecânicas do material são diretamente afetadas pelas transformações físicas oriundas da degradação química do meio.

O modelo foi empregado à análise de estruturas de concreto submetidas a temperaturas elevadas para o cálculo da distribuição de temperaturas e evolução do dano mecânico ao longo do tempo. Através da aplicação aqui denominada “parede de concreto” – que simula a exposição ao incêndio de uma placa de concreto – verificou-se a incorporação do modelo de dano de Mazars ao algoritmo empregado, para posterior análise dos corpos-de-prova em bicamada rocha-concreto – para os quais se dispõe de informações experimentais ([27]) e numéricas para comparação e avaliação do modelo THM. As análises e comparações realizadas levam às seguintes considerações:

- Os resultados obtidos, usando o modelo THM, para a variação de temperatura na bicamada rocha-concreto, para o CC, foram melhores do que os obtidos por FERREIRA (2011, [1]) usando o modelo TH - o que demonstra que a incorporação do modelo mecânico influenciou nos resultados fazendo com que a curva numérica se aproximasse mais da experimental -. Porém, para o CAD, os resultados obtidos, usando o modelo THM, foram praticamente coincidentes com os encontrados por

FERREIRA (2011, [1]) - o que indica a necessidade de análises mais cuidadosas dos efeitos da temperatura neste material -. Observou-se uma discrepância significativa entre os resultados de temperatura em valor absoluto a partir do início da desidratação ( $60^{\circ}C$ ). Como se pode notar nas Figuras 5.17 e 5.18, as curvas de saturação apresentam valores superiores a 1, indicando a necessidade de estudos mais cuidadosos com relação às alterações microestruturais provocadas pela temperatura;

- Além do modelo de evolução da condutividade empregado por FERREIRA (2011, [1])  $\lambda(T)$  – que é proposto por [3] – testou-se a expressão  $\lambda(T, d)$  – visando incorporar os efeitos da degradação química à evolução daquela propriedade. Embora os resultados tenham sido melhores para a camada de concreto (ver Figuras 5.13(a) e 3.1), houve uma significativa piora para a região da interface e para o interior da rocha – tal fato se deve provavelmente à forte não-linearidade e aos efeitos acoplados inerentes ao modelo em estudo;
- Como já observado por FERREIRA (2011, [1]), as curvas 5.15 e 5.16, que mostram a taxa de evolução de temperatura no tempo indicam que, apesar das discrepâncias observadas para as temperaturas em valor absoluto, existe uma clara correspondência entre os valores numéricos e as medições experimentais. Cabe notar que tais discrepâncias podem também se dever a alguma imprecisão nas medições experimentais de temperatura efetuadas nos blocos em bicamada que, como se pode ver na Figura 2.3, foram fortemente danificados durante os ensaios.
- Uma vez que não se dispunha de dados experimentais acerca dos parâmetros de Mazars ( $A_t$ ,  $B_t$ ,  $A_c$ ,  $B_c$  e  $\varepsilon_{d0}$ ), fez-se necessária a aplicação de uma ferramenta para ajuste paramétrico. Os resultados obtidos (vide tabelas 5.10 e 5.3) são coerentes com as informações disponíveis na literatura;
- O fenômeno de “spalling” pode ser bem definido e caracterizado através dos perfis de pressão (Figuras 5.19 e 5.20) nos poros.
- Os mapas de dano (Figura 5.10) apresentam alguma relação com a Figura 2.3, que mostra a ocorrência de “spalling” no corpo-de-prova. Cabe ressaltar que foi observada a dependência deste resultado com o grau de refinamento da malha de Elementos Finitos. Para uma análise mais conclusiva, faz-se necessário um estudo mais aprofundado acerca da influência da discretização sobre a distribuição de dano.

Estudos mais aprofundados acerca dos efeitos da degradação mecânica sobre as propriedades mecânicas e térmicas do concreto - baseados em resultados obtidos em laboratório - são necessários para o aprimoramento do modelo THM.

## REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, A., *Modelagem dos Fenômenos de Transporte Termo-hídricos em Meios Porosos Submetidos a Temperaturas Elevedas: Aplicação a uma Bicamada Rocha-Concreto*, Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, UFJF, 2011.
- [2] BAZANT, Z., KAPLAN, M., *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models. Concrete design and construction series*, Longman Group Limited, 1996.
- [3] *European Committee for Standardisation*, 2005.
- [4] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. IBRACON.
- [5] ÁLVARES, M., *Um modelo de dano para o concreto: formulação, identificação paramétrica e aplicação com o emprego do método dos elementos finitos*, Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, EESC - USP, 1993.
- [6] GUELLO, G., *Simulação Computacional de Estruturas de Concreto por Meio da Mecânica do Dano*, Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- [7] LEMAITRE, J., CHABOCHE, J., *Mechanics of solid materials*. FOREWORD TO THE ENGLISH EDITION BY FRED LECKIE, 1994.
- [8] WITEK, A., GAWIN, D., PESAVENTO, F., SCHRESFLER, B., “Finite element analysis of various methods for protection of concrete structures against spalling during fire”, *Computational Mechanics*, v. 39, pp. 271–292, 2006.
- [9] KANEMA, M., PLIYA, P., NOUMOWE, A., GALLIAS, J., “Spalling, Thermal, and Hydrous Behavior of Ordinary and High-Strength Concrete Subjected to Elevated Temperature”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, 7, pp. 921–930, 2011.
- [10] CAFARO, E., BERTOLA, V., “Fire in tunnels - experiments and modelling.” *Open Thermodyn J*, v. 4, pp. 156–166, 2010.

- [11] VIANELLO, C., FABIANO, B., PALAZZI, E., MASCHIO, G., “Experimental study on thermal and toxic hazards connected to fire scenarios in road tunnels.” *J Loss Prevent Process Ind*, v. 4, pp. 718–729, 2012.
- [12] YAN, Z.-G., ZHU, H.-H., JU, J., DING, W.-Q., “Full-scale re tests of RC metro shield TBM tunnel linings”, *Construction and Building Materials*, v. 36, pp. 484–494, 2012.
- [13] CHOI, S.-W., LEE, J., CHANG, S.-H., “A hollistic numerical approach to simulating the thermal behaviour of a tunnel lining subject to fire.” *Tunnel Undergr Space Technol*, v. 35, pp. 122–134, 2013.
- [14] VIEIRA, J., CORREIA, J., BRITO, J., “Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates.” *Cem Concr Res.*, v. 41(5), pp. 533–541, 2011.
- [15] GAWIN, D., PESAVENTO, F., SCHREFLER, B., “Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation.” *Comput Methods Appl Mech Eng.*, v. 13-14, pp. 1731–1771, 2003.
- [16] CÜLFIK, M., ÖZTURAN, T., “Mechanical properties of normal and high strength concretes subjected to high temperatures and using image analysis to detect bond deteriorations.” *Constr Build Mater.*, v. 24(8), pp. 1486–1493, 2010.
- [17] CÜLFIK, M., ÖZTURAN, T., “Mechanical properties of normal and high strength concretes subjected to high temperatures and using image analysis to detect bond deteriorations.” *Constr Build Mater.*, v. 24(8), pp. 1486–1493, 2010.
- [18] LIMA, M., *UM MODELO PARA A FLEXÃO DE PLACAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO A MECÂNICA DO DANO*, Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana - BA, 2013.
- [19] PONT, S., *Lien entre la perméabilié et l’endommagement dans les bétons à haute température*, These de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [20] NAUS, D., “The effest of elevated temperature on concrete materials and structures”, *Oak Ridge National Laboratory for U.S. Nuclear Regulatory Commission*, 2005.

- [21] VYDRA, V., VODÁK, F., KAPICKOVÁ, O. AND HOSKOVÁ, S., “Effect of temperature on porosity of concrete for nuclear-safety structures”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp. 1023–1026, 2001.
- [22] PENNA, S., *Formulação Multipotencial para Modelos de degradação Elástica: Unificação Teórica, Proposta de Novo Modelo, Implementação Computacional e Modelagem de Estruturas de concreto*, Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, 2011.
- [23] FERREIRA, A., FARAGE, M., BARBOSA, F., NOUMOWÉ, A., REANAULT, N., AMARAL, R., “CONCRETE UNDER FIRE CONDITIONS: A THERMO-HYDRO-MECHANICAL MODELING”, XXXIICILAMCE, Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, em Ouro Preto, Brasil.
- [24] “Cast3m”, <http://www-cast3m.cea.fr>. Acesso em 12/2013.
- [25] ERVINE, A., GILLIE, M., STRATFORD, T., PANKAJ, P., “Thermal Propagation through Tensile Cracks in Reinforced Concrete”, *Journal of materials in civil engineering*, v. 24, pp. 516–522, 2012.
- [26] BONIFÁCIO, A., BARBOSA, C., *Manual para utilização da ferramenta SWADE*, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
- [27] XING, Z., *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, These de doctorat, UNIVERSITÉ DE CERGY-PONTOISE, Spécialité: Génie Civil, 2011.