

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE CONCRETOS
REFRATÁRIOS EM APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS**

Túlio Memic Cunha

São Carlos
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE CONCRETOS
REFRATÁRIOS EM APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS

Túlio Memic Cunha

Dissertação apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Victor Carlos Pandolfelli

Coorientadora: Dra. Ana Paula da Luz

Agência Financiadora: CNPq - Processo: 134347/2019-6

São Carlos

2022

VITAE DO CANDIDATO

Bacharel em Engenharia de Materiais pela UFSCar (2019).



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Túlio Múmic Cunha, realizada em 21/03/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli (UFSCar)

Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta (UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo Afonso Angélico (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro para realização desse trabalho com bolsa de estudos, processo 134347/2019-6.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP - Código de Financiamento 2021/00251-0

Ao Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais e à Federation for International Refractory Research and Education.

RESUMO

Cerâmicas refratárias são aplicadas em altas temperaturas devido ao seu conjunto de propriedades que garantem elevada estabilidade térmica e química, resistência mecânica e propriedades térmicas. Estes materiais são divididos em dois grupos: os conformados e os monolíticos. O segundo grupo adquire seu formato durante a aplicação e comumente é obtido na forma de um pó, o qual se adiciona um líquido, comumente a água, para mistura e reação com os agentes ligantes para garantir uma resistência a verde adequada. Este material então é submetido a um aquecimento cauteloso, para a retirada desta água, uma vez que a geração de vapor de forma rápida pode acarretar em fratura do material. O processo de secagem, muitas vezes, é abordado na indústria de forma empírica e conservadora, por isto este trabalho busca introduzir metodologias computacionais para comparação e otimização de tais perfis de aquecimento. Inicialmente desenvolveu-se um modelamento por método dos elementos finitos, com a biblioteca FEniCS, em Python, o qual serviu de base para um número de simulações que foram divididas em três partes: curvas com taxa de aquecimento constante, curvas com um patamar e curvas complexas. As análises mostraram a necessidade do uso de propriedades físicas em função da temperatura, a fim de se aproximar do comportamento real do material; que elevadas taxas de aquecimento (≥ 50 °C/h) são viáveis para revestimentos com baixa espessura (< 20 cm); que a retirada de água livre em patamares com temperaturas abaixo, porém próximas, da temperatura de início da decomposição dos hidratos viabiliza o uso de patamares de curta duração em temperaturas mais elevadas, agilizando o processo de secagem. Por fim, utilizando indicadores como estado da secagem, razão de resistência e consumo energético, foi possível comparar as curvas entre si para optar-se por aquela que melhor atende as necessidades do usuário final.

Palavras-chave: concreto refratário; secagem; otimização; simulação numérica

ABSTRACT

NUMERICAL SIMULATION OF THE DRYING PROCESS OF REFRACTORY CASTABLE IN TECHNOLOGICAL APPLICATIONS

Refractory ceramics are used in high temperatures due to their unique properties that enable a high thermal and chemical stability, mechanical strength, thermal properties and others. These materials are split into two main groups: shaped and monolithic. The latter acquires its shape during application and is commonly obtained as a powder, to which a liquid, commonly water, is added for mixing and for reacting with the binding agents to guarantee suitable green strength. Following, it is subjected to careful heating schedule to withdraw this water, because rapid generation of steam can lead to the failure of the lining. The drying process is often approached empirically in the industry, and this work aims to introduce a computational methodology for comparison and optimization of such heating profiles. Initially, a finite element method modeling was developed, with the help of a library, in Python, which was the basis for a number of simulations that were divided into three stages: profiles with constant heating rate, others with a plateau and also complex curves. The analyzes showed the need to use properties as a function of temperature, so it is as close as possible to a real material; high heating rates (≥ 50 °C/h) are viable for linings with small thickness (< 20 cm); the withdrawal of free water at plateaus with temperatures below, but close to, the temperature of the beginning of the hydrate decomposition process enables the use of short plateaus at higher temperatures, speeding the drying process. Finally, using indicators such as drying status, resistance ratio and energy consumption, it was possible to compare the curves with each other to choose the one that best meets the needs of the end-user.

Keywords: refractory concrete; drying; optimization; numerical simulation

PUBLICAÇÕES

Publicação 1

MOREIRA, M.H.; LUZ, A.P. ; CUNHA, T. M. ; LEMAISTRE, H. ; AUVRAY, J. ; PARR, C. ; AUSAS, R. F. ; PANDOLFELLI, V.C. . Practical Numerical Simulation and Experimental Setup for Speeding up the Drying Behavior of Calcium Aluminate Cement (CAC)-bonded Refractory Castables. In: UNITECR, 2019, Yokohama. Proceedings of UNITECR 2019, 2019.

Publicação 2

LUZ, A. P. ; MOREIRA, M. H. ; CUNHA, T. M. ; PANDOLFELLI, V. C. . Secagem de concretos refratários densos -novas estratégias para sua avaliação. In: 63° Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2019, Bonito - MS. Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Cerâmica, 2019.

Publicação 3

MOREIRA, M. H. ; CUNHA, T. M. ; CAMPOS, M. G. G. ; SANTOS, M.F. ; SANTOS JR., T. ; ANDRE, D. ; PANDOLFELLI, V. C. . Discrete element modeling? A promising method for refractory microstructure design. American Ceramic Society Bulletin, v. 99, p. 22-30, 2020.

Publicação 4

MOREIRA, M.H. ; DAL PONT, S. ; AUSAS, R.F. ; CUNHA, T.M. ; LUZ, A.P. ; PANDOLFELLI, V.C. . Direct comparison of multi and single-phase models depicting the drying process of refractory castables. Open Ceramics, v. 6, p. 100111, 2021.

Publicação 5

MOREIRA, M.H. ; Dal PONT, S. ; AUSAS, R.F. ; LUZ, A.P. ; CUNHA, T.M. ; PARR, C. ; PANDOLFELLI, V.C. . Main trends on the simulation of the drying of

x

refractory castables - Review. *Ceramics International*, v. 47, p. 28086-28105, 2021.

Publicação 6

CUNHA, T.M.; MOREIRA, M.H. ; SANTOS, M.F. ; LUZ, A.P. ; PANDOLFELLI, V.C. . Drying behavior of steel-ladle lining refractory castables under continuous heating rate. *Ceramics International*, v. 48, p. 1142-1151, 2022.

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES	ix
SUMÁRIO	xi
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxvii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	5
3 JUSTIFICATIVA	7
4 REVISÃO DA LITERATURA	9
4.1 Cerâmicas Refratárias	9
4.2 Concretos Refratários	10
4.3 Secagem	15
4.3.1 Período de Taxa de Secagem Constante	16
4.3.2 Período de Taxa de Secagem Decrescente	17
4.4 Curvas de Aquecimento para Secagem	20
4.5 Modelamento Matemático	23

4.5.1	Modelo proposto por Bažant et al.	26
4.5.2	Modelo proposto por Gong et al.	32
4.6	Método dos Elementos Finitos	34
5	MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1	Composição refratária avaliada	37
5.1.1	Processamento	37
5.2	Medidas de Propriedade dos Materiais	38
5.2.1	Propriedades Térmicas	38
5.2.2	Permeabilidade	39
5.2.3	Densidade Aparente	41
5.2.4	Água Quimicamente Ligada	41
5.2.5	Propriedades Mecânicas	43
5.3	Modelamento Numérico	45
5.3.1	FEniCS	47
5.3.2	Estimativa de Energia Consumida	49
5.4	<i>Setup</i> das Simulações	50
5.4.1	Aquecimento Contínuo	51
5.4.2	Curvas de Aquecimento de Maior Complexidade	51
5.5	Otimização das Curvas de Aquecimento	53
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1	Propriedade dos Materiais	55
6.2	Permeabilidade Dinâmica	55
6.3	Resistência Mecânica	57
6.4	Cálculo Energético	58
6.5	Simulações	61
6.5.1	Aquecimento Constante	61
6.5.2	Aquecimento com um Patamar de Temperatura	75
6.5.3	Cálculo Energético e Comparação entre Curvas	83
6.5.4	Curvas Complexas	88
6.6	Resumo dos Resultados	97

7	CONCLUSÕES	101
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE TABELAS

4.1	Diferentes componentes da fração fina da matriz de concretos. Adaptado de [3, 20].	12
4.2	Temperaturas de decomposição de alguns hidratos formados a partir de um cimento de aluminato de cálcio. Adaptado de [26]. . .	14
4.3	Compilação de alguns modelos de secagem de concreto existentes. Adaptado de [6]. As referências para as legendas são: A - Abdel et al. [36], B - Bažant et al. [12], C - Gong et al. [17], D - Ishikawa et al. [37], E - Tenchev et al. [4], F - Chung et al. [38], G - Dwaikat et al. [39], H - Ulm et al. [35], I - Gawin et al. [6], J - Fey et al. [15].	25
5.1	Composição do concreto 5CAC.	37
5.2	Propriedades e Parâmetros utilizados no modelo.	47
5.3	Propriedades das camadas II, III e IV, adaptado de [60].	52
6.1	Propriedades medidas para a composição 5CAC.	55

LISTA DE FIGURAS

4.1	Representação da microestrutura de um concreto refratário. Retirado de [2].	10
4.2	Parte da zona de combustão de uma unidade de aquecimento em uma refinaria de petróleo. Retirado de [25]. Escala aproximada. . .	13
4.3	Esquemas de reação de hidratação para a) CA , b) CA_7 e c) $C_{12}A_7$. Retirado de [20].	14
4.4	Etapas da secagem de concretos refratários [21].	16
4.5	Representação dos diferentes tipos de água encontradas no material. δ_a é a espessura da camada de adsorção livre e l_d é a espessura da camada de adsorção limitada. Adaptado de [16].	18
4.6	Comparação entre a pressão de vapor e a resistência mecânica do concreto. Adaptado de [3, 21].	19
4.7	Esquematisação dos processos a) termomecânicos e b) termohídricos em concretos. Adaptado de [29].	20
4.8	Comparação entre a pressão de vapor obtida em diferentes composições. $k_{1_a} > k_{1_b}$. A legenda indica a posição da medição da pressão. Adaptado de [31].	20
4.9	Diferentes exemplos de curvas de aquecimento para a secagem retiradas de fornecedores de concretos refratários e literatura. . . .	22
4.10	Curvas obtidas por Fey ao variar a pressão limite p_{lim} no controlador PID. Adaptado de [15].	23
4.11	Plot da curva de sorção obtida por Bažant et al. Adaptado de [16].	30
4.12	Permeabilidade de Bažant et al. para diversas temperaturas e umidades relativas [12]. Adaptado de [16].	32
4.13	Processo de formação de malha em um elemento finito, em ordem: a) geometria a ser preenchida, b) tipo de elemento a ser utilizado, c) malha gerada pouco refinada e d) malha com maior nível de refinamento. Adaptado de [41].	35

4.14 a) Modelo de elementos finitos da batida de um Ford Taurus, b) Sobreposição de uma malha de elementos finitos perto de um ferimento. Adaptado de [41].	36
5.1 Posição dos entalhes nos tijolos na técnica do fio quente	38
5.2 Esquemática do permeâmetro. Retirado de [53].	39
5.3 Esquemática do equipamento de análise termogravimétrica.	42
5.4 Diagrama de conversão: resistência mecânica a três pontos → resistência mecânica a tração uniaxial → resistência mecânica a tração triaxial.	45
5.5 Disposição das camadas da panela de aço avaliadas, figura adaptada a partir de [60].	53
6.1 Valores de condutividade térmica para o material.	56
6.2 Interpolação dos dados obtidos em [54].	56
6.3 Valores de permeabilidade em função da temperatura para o material.	57
6.4 Cálculo do módulo de Weibull para a composição.	57
6.5 Conversão da resistência mecânica.	58
6.6 Cálculo da energia consumida por meio da integração do termo $q = -k\nabla T$ no primeiro elemento, na face quente, e no último elemento, na face fria (a). A diferença entre os dois valores é apresentada no gráfico à direita (b).	59
6.7 Contribuição de cada componente energético do cálculo, a) mostra o comportamento individual, enquanto em b) se tem a soma dos mesmos, sendo a área colorida indicada pela legenda representando o valor total da contribuição de cada componente.	60
6.8 a) Contribuição dos componentes calculados de forma manual e b) mostra a contribuição de cada componente, integrada a partir dos fluxos térmicos extraídos do FEniCS.	60
6.9 Cálculo da diferença dos valores de energia consumida no processo, obtidos pela segunda e terceira metodologia.	61

6.10 a) Comparação entre primeira e terceira metodologia, a b) diferença entre os valores calculados é de aproximadamente 0.1%. . .	61
6.11 Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade são consideradas constantes.	62
6.12 Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade é considerada constante e a condutividade varia com a temperatura.	63
6.13 Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a condutividade é considerada constante e a permeabilidade varia com a temperatura.	63
6.14 Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade variam com a temperatura.	64
6.15 Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade são consideradas constantes.	65
6.16 Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade é considerada constante e a condutividade varia com a temperatura.	65
6.17 Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a condutividade é considerada constante e a permeabilidade varia com a temperatura.	66
6.18 Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade variam com a temperatura.	66
6.19 Temperatura na face fria da camada de interesse em função da taxa de aquecimento, isto é, na interface com a camada permanente.	67
6.20 Porcentagem dos elementos da malha da camada monolítica que se encontram abaixo de 110°C.	68

6.21 Perfil térmico no final das simulações considerando ambas propriedades constantes para diferentes espessuras e taxas de aquecimento.	69
6.22 Perfil térmico no final das simulações considerando somente a condutividade variável para diferentes espessuras e taxas de aquecimento.	70
6.23 Mapa da máxima razão de resistência <i>versus</i> a sua posição para cada uma das simulações considerando 10cm de parede do concreto refratário 5CAC.	71
6.24 Mapa da máxima razão de resistência <i>versus</i> a sua posição para cada uma das simulações considerando 15cm de parede do concreto refratário 5CAC.	72
6.25 Mapa da máxima razão de resistência <i>versus</i> a sua posição para cada uma das simulações considerando 20cm de parede do concreto refratário 5CAC.	72
6.26 Mapa da máxima razão de resistência <i>versus</i> a sua posição para cada uma das simulações considerando 30cm de parede do concreto refratário 5CAC.	73
6.27 Quantidade de água livre para cada posição no material refratário em função da evolução do processo de secagem para uma parede com 10cm de espessura e 150 °C/h de taxa de aquecimento.	74
6.28 Quantidade de água livre para cada posição no material refratário em função da evolução do processo de secagem para uma parede com 20cm de espessura e 150 °C/h de taxa de aquecimento.	74
6.29 Quantidade de água livre para cada posição no material refratário em função da evolução do processo de secagem para uma parede com 20cm de espessura e 10 °C/h de taxa de aquecimento.	75

- 6.30 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 50°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 77
- 6.31 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 50°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 77
- 6.32 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 50°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 78
- 6.33 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 75°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 80

- 6.34 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 75°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 80
- 6.35 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 75°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 81
- 6.36 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 100°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 81
- 6.37 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 100°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante. 82

6.38	Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 100°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.	82
6.39	Quantidade de energia consumida para cada simulação, agrupadas pela taxa de aquecimento, temperatura de patamar e destacadas de acordo com a espessura da camada de trabalho.	84
6.40	Etapa 1 da metodologia de seleção, o eixo-x descreve a quantidade de água livre normalizada no último timestep, e o eixo-y mostra a quantidade de água quimicamente ligada normalizada neste mesmo momento. A hachura vermelha indica a região na qual as simulações falham a condição de seleção (água residual <5% do valor inicial). A letra π indica as temperaturas de patamar.	85
6.41	Etapa 2 da metodologia de seleção. As simulações foram listadas da menor para a maior razão de resistência máxima, com o limite de segurança em 0.8.	86
6.42	Etapa 3 da metodologia de seleção. As curvas de aquecimento sobreviventes são classificadas de acordo com o consumo energético.	87
6.43	Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 20 horas.	88
6.44	Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 20 horas.	89

- 6.45 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 20 horas. 89
- 6.46 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 40 horas. 90
- 6.47 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 40 horas. 90
- 6.48 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 40 horas. 90
- 6.49 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 80 horas. 91
- 6.50 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 80 horas. 91

- 6.51 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 80 horas. 91
- 6.52 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C, 350 °C e 600 °C por 10 horas 93
- 6.53 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C por 20 horas, 350 °C e 600 °C por 10 horas 93
- 6.54 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C por 30 horas, 350 °C e 600 °C por 10 horas 94
- 6.55 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C, 350 °C e 600 °C por 5 horas 94
- 6.56 Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C por 20 horas, 350 °C e 600 °C por 5 horas 95

6.57	Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C por 30 horas, 350 °C e 600 °C por 5 horas	95
6.58	Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C por 10 horas, 350 °C por 3 horas e 600 °C por 2 horas.	96
6.59	Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C por 10 horas e 350 °C por 3 horas.	97

LISTA DE SÍMBOLOS

a - Permeabilidade

B_w - Coeficiente de troca mássica

B_t - Coeficiente de troca térmica

C_p - Calor específico do material

C_a - Calor de adsorção da água

C_w - Calor específico da água

g - Aceleração gravitacional

J - Fluxo mássico

k_1 e k_2 - Coeficientes da equação de Forchheimer

P_v - Pressão de vapor do líquido

P_{ven} - Pressão de vapor ambiente

q - Fluxo térmico

T - Temperatura

T_{en} - Temperatura ambiente

\dot{w} - Variação da água de sorção com o tempo

k - Condutividade térmica

\dot{w}_d - Variação da água quimicamente ligada com o tempo

Γ - Contorno

ε - Emissividade

π - Temperatura de Patamar

μ - Viscosidade dinâmica da água

ξ - Razão de resistência

ρ - Densidade do material

σ - Tensão

Ω - Domínio

1 INTRODUÇÃO

As cerâmicas refratárias são de grande importância para diversos setores industriais por suas características únicas de viabilizar economicamente a produção dos mais diversos produtos, devido à sua elevada estabilidade termoquímico-mecânica em altas temperaturas. Suas principais aplicações se encontram na indústria siderúrgica, em painéis de aço e canais de corrida.

Estes materiais são normalmente agrupados em duas principais categorias: conformados e monolíticos [1]. Os monolíticos, diferente dos conformados, não são pré-moldados e adquirem o formato final durante a etapa de aplicação [1]. Tais produtos são geralmente comercializados na forma de uma mistura de diferentes componentes particulados, os quais requerem a adição de um líquido (geralmente água) durante a etapa de mistura e homogeneização. Posteriormente, a mistura úmida preparada pode ser vertida em moldes ou projetada em superfícies onde se deseja depositar e construir a parede do revestimento cerâmico, sendo seguido da etapa de cura - a qual requer um tempo para que transformações de fase ocorram na microestrutura do refratário [2, 3]. Consequentemente, o enrijecimento e aumento da resistência mecânica a verde do material monolítico são obtidos após estas etapas. Dentre as vantagens dos materiais monolíticos pode-se destacar a conformação *in loco* e a ausência de juntas de expansão, que podem atuar como regiões que podem favorecer o início do processo de corrosão.

O processo de secagem das cerâmicas refratárias ocorre por meio da remoção da água utilizada nas etapas anteriores de preparação destes materiais, o que deve ser efetuado de maneira controlada, uma vez que o uso de uma elevada taxa de aquecimento pode resultar na acentuada geração de vapor no interior da estrutura consolidada. Caso o refratário apresente reduzida permeabilidade e porosidade, a pressurização do mesmo pode ser induzida durante as etapas iniciais de aquecimento devido ao aprisionamento do vapor no interior do revestimento cerâmico [3]. Este fenômeno não é restrito a concretos refratários, e foi inicialmente descrito para concreto civil como objeto de estudo em acidentes

com incêndio [4–7].

Desta forma, a pressão de vapor induzida deve aumentar de maneira exponencial com o aumento da temperatura se a quantidade de vapor gerado dentro dos poros é superior à qual o material é capaz de aliviar através de sua permeabilidade, podendo ocasionar um alto risco de fratura do material.

Para evitar o dano ao revestimento cerâmico e aos equipamentos industriais, riscos a saúde da equipe técnica e pausas no processo produtivo (que, consequentemente, acarretam na elevação do custo do produto final), diversas empresas utilizam curvas de aquecimento demasiadamente conservadoras. Tais procedimentos se baseiam em taxas de aquecimento lentas e na aplicação de patamares onde a temperatura é mantida constante por tempo prolongado [8–10].

Além disso, nota-se o predomínio da escolha destas curvas de secagem a partir de conhecimentos práticos (empíricos), fazendo-se pouco uso de ferramentas computacionais e conhecimentos fundamentais para a definição dos procedimentos de aquecimento dos equipamentos revestidos com materiais cerâmicos. Devido aos limitados procedimentos adotados na indústria, opta-se por obter um processo mais seguro, sacrificando a economia energética e o custo operacional [8–10].

Apesar de complexo, este fenômeno pode ser avaliado por meio de modelamento numérico [5, 11–14]. Baseados no modelo inicialmente proposto por Luikov [11], dois principais grupos de metodologia foram desenvolvidas: (i) a multifásica, que considera os diferentes estados físicos que a água pode se encontrar dentro do corpo cerâmico [5, 6, 15] e (ii) e o monofásico, onde todas as fases de água são reduzidas a um único componente, comumente chamado como "umidade"[12, 14, 16, 17]. Embora um modelo mais complexo possa descrever o fenômeno físico de forma mais próxima à realidade, o número de parâmetros pode tornar-lo inviável para aplicação prática e, portanto, um modelo mais simples pode ser optado para tais operações [8].

A proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia onde seja possível propor curvas de aquecimento mais adequadas para diferen-

tes composições de refratários monolíticos, considerando também a geometria e as condições de aplicação destes materiais. Para este fim foram efetuadas simulações a partir de um modelo de secagem termohídrico desenvolvido em elementos finitos pela biblioteca *opensource* FEniCS na linguagem de programação Python. Os cálculos foram efetuados levando em consideração diversas propriedades (obtidas experimentalmente) dos materiais refratários escolhidos.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a proposição de curvas de aquecimento otimizadas para a secagem de concretos refratários, as quais foram elaboradas a partir de propriedades obtidas experimentalmente e simulações, considerando um modelo termohidromecânico desenvolvido em elementos finitos.

Para melhor delinear o objetivo principal, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Obtenção e interpolação das propriedades físicas de uma composição específica (de referência) para *input* no modelo de simulação.
- Realização de simulações no modelo numérico de simulação do processo de secagem, levando em consideração as propriedades físicas dos materiais, geometria e curvas de aquecimento.
- Metodologia para a comparação da pressão obtida por meio das simulações com a resistência mecânica real dos materiais refratários.
- Definição de um procedimento de otimização das curvas de aquecimento durante a etapa de secagem.

3 JUSTIFICATIVA

O estudo proposto busca fornecer uma solução, por meio de simulações numéricas e metodologias de otimização, para o problema do primeiro aquecimento de refratários, visto que as curvas de aquecimento na literatura e aplicadas industrialmente não levam em consideração as peculiaridades de cada sistema, como geometria e composição química, e sendo assim obtidas de forma empírica, tendo como resultado curvas demasiadamente conservadoras. A secagem é a etapa do processamento mais crítica e propensa à indução de falhas no revestimento cerâmico, o que causa perdas incontáveis no aspecto financeiro e pessoal.

Outro destaque do trabalho é a apresentação de resultados e análises que justificam a introdução de um modelo matemático de secagem mais simples que o encontrado na literatura, sendo que diferentes comportamentos e *insights*, como a observação da evolução do perfil de umidade relativa, podem ser gerados, que corroboram com os fenômenos observados experimentalmente e já documentados historicamente.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Cerâmicas Refratárias

Cerâmicas refratárias são aquelas que mantêm suas propriedades funcionais, como estabilidade mecânica e resistência à corrosão, entre outras, em elevadas temperaturas (acima de 538°C [18]) e, devido a isto, são amplamente utilizadas nas mais diversas indústrias, desde a metalúrgica que requer operações em elevadas temperaturas, como também em indústrias de conformação plástica.

As cerâmicas refratárias podem ser empregadas para desempenhar as seguintes funções: (i) estrutural, atuando na contenção do produto que está sendo processado no interior dos equipamentos, e (ii) isolamento térmico, reduzindo a transferência do interior dos equipamentos que operam em altas temperaturas para as regiões mais externas do ambiente de trabalho, garantindo maior eficiência energética na operação dos equipamentos [18, 19].

Dentre os principais componentes das refratárias se encontram o óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de silício (SiO_2), óxido de zircônio (ZrO_2), dentre outros [18, 19].

Os materiais cerâmicos refratários geralmente são divididos em dois grupos, baseados no seu processamento e forma física durante a aplicação: os materiais conformados, que são materiais cujo formato e dimensões são definidos durante a sua fabricação, e os materiais não conformados, também conhecidos como monolíticos, que abrangem os concretos e massas plásticas, dentre outros, que adquirem a sua forma final durante a sua aplicação [1, 20].

Os refratários monolíticos vem substituindo lentamente os materiais conformados devido à ausência de junta de expansão na aplicação, o que garante uma maior resistência a corrosão, além de permitirem geometrias mais complexas, que é adquirida durante a aplicação [1]. Devido a isto, o estudo proposto foca neste grupo de materiais, que serão melhor descritos a seguir.

4.2 Concretos Refratários

Os concretos refratários, pertencente ao grupo dos monolíticos, são materiais produzidos a partir de uma mistura controlada de diferentes matérias primas (conforme ilustrado na Figura 4.1). Os agregados são partículas com diâmetro médio entre 50mm e 100 μm , a matriz é constituída por partículas menores, com diâmetro médio $< 100\mu\text{m}$, que compõem a matriz, sendo ainda encontrados nesta fração da composição aditivos e impurezas. De acordo com Gomes [20], os agregados compõem a maior fração mássica do concreto, representando entre 40% e 80% de massa total.

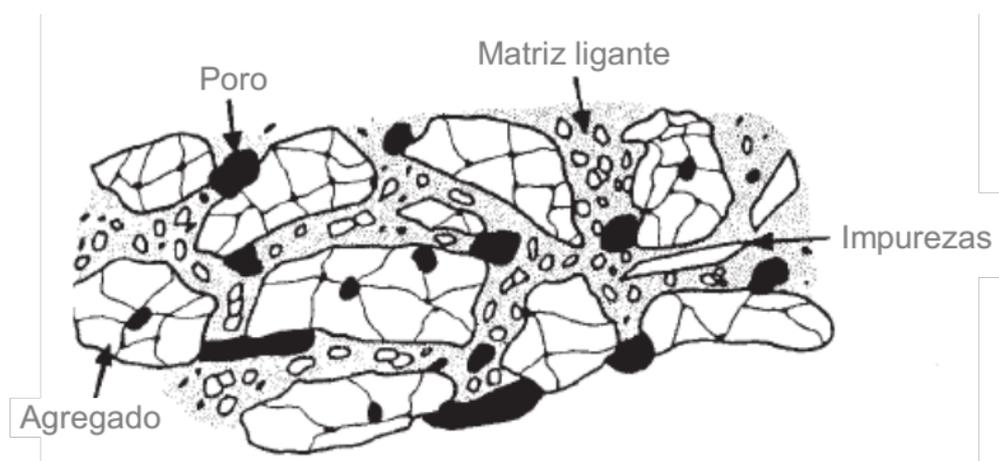


Figura 4.1: Representação da microestrutura de um concreto refratário. Retirado de [2]

A função dos agregados é a formação do *esqueleto* físico do concreto, garantindo uma estrutura rígida. A matriz é o conjunto de partículas menores que preenchem os espaços deixados pelo empacotamento dos agregados, enquanto os ligantes possuem a função de garantir coesão entre as partículas do sistema por meio de reações físicas e/ou químicas do material verde até a sinterização do material durante a queima [1]. Dentre os possíveis aditivos se encontram aqueles para aumentar a permeabilidade, como a adição de fibras poliméricas de baixa temperatura de fusão, e a adição de carbono para controle da molhabilidade e aumento de condutividade térmica [3, 21]. A Tabela 4.1 destaca de maneira resumida os principais componentes da matriz dos concretos refratários.

Os ligantes podem ser agrupados em diferentes classes como os hidráulicos e químicos. Os primeiros reagem com a água para a formação de hidratos

que atuarão na coesão da estrutura, há os ligantes químicos atuam a partir da reação com outros componentes contidos nos refratários, os quais possuem características químicas distintas, favorecendo assim a formação de novas frases hidratadas ou não. Em ambos os casos é necessária a incorporação de um meio líquido na massa cerâmica, pois, além de atuar como reagente hidratante ou meio de reação, este garante propriedades reológicas que são essenciais para a preparação e aplicação do concreto [1].

O processamento destes materiais inclui quatro diferentes etapas: (i) mistura, quando a matéria prima é adicionada com o ligante e o agente líquido selecionado (por exemplo, água ou soluções ácidas), (ii) cura, onde as reações físico-químicas do ligante ocorrem, garantindo coesão e resistência mecânica a verde, (iii) secagem, onde o aquecimento inicial do material visa remover a água livre (adsorvida na superfície das partículas) e a estrutural (contida na estrutura dos hidratos), e por fim (iv) queima, quando o material é tratado termicamente a altas temperaturas, o que induz o processo de sinterização da microestrutura, fazendo com que o material adquira propriedades finais [2, 3, 22].

A etapa de secagem, dentre as quatro mencionadas acima, é a mais crítica pois a água liberada na forma de vapor dentro da estrutura do material pode se acumular devido a baixa permeabilidade, resultando em uma pressão que supera a resistência mecânica a verde no refratário, podendo assim levar à fratura do material caso o procedimento de aquecimento não seja devidamente controlado (a Figura 4.2 mostra as consequências do fenômeno de explosão de um material refratário quando submetido ao seu primeiro aquecimento).

Tabela 4.1: Diferentes componentes da fração fina da matriz de concretos.
Adaptado de [3, 20].

Aditivo	Composição	Função
Agregados finos moídos	Diversas	Ajuste químico/mineralógico, modificação/desenvolvimento de liga
Alumina		
Calcinada	$\alpha - Al_2O_3$	Ajuste químico/mineralógico, modificação/desenvolvimento de liga
Reativa	$\alpha - Al_2O_3$	Ajuste químico/mineralógico, modificação/desenvolvimento de liga
Sílica		
Quartzo	SiO_2	Controle de retração (~800 °C)
Microssílica	SiO_2	Ajuste químico/mineralógico, modificação/desenvolvimento de liga, formação de mulita
Magnésia	MgO	Modificação/desenvolvimento de liga, formação de espinélio, redução do ataque por metal/escória
Mulita	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Controle da retração, ajuste químico-mineralógico, propriedades gerais
Espinélio	$MgAl_2O_4$	Preenchimento da matriz, redução do ataque por metal/escória
Carbeto de Silício	SiC	Ajuste da condutividade térmica e melhoria da resistência ao choque térmico
Argilas	Hidratos de Alumino-Silicatos	Preenchimento da matriz, ajuste da fluidez/reologia
Zirconita	$ZrSiO_4$	Redução do ataque por metal/escória/álcalis
Grafite e outras fontes de carbono	C	Redução do ataque por metal/escória, aumento da condutividade térmica
Antioxidantes	Al, Si, SiC, B_4C e outros	Inibição ou retardamento da oxidação do carbono, modificação/desenvolvimento de liga
Fibras poliméricas	Diversas	Aumento da permeabilidade, facilidade de secagem
Fibras metálicas	Aço Inoxidável	Aumento da tenacidade e resistência mecânica
Aditivos nanométricos	Diversas	Otimização do empacotamento e propriedades termomecânicas, modificação/desenvolvimento de liga

Devido aos recentes avanços no desenvolvimento de novas formulações de concretos refratários com melhores empacotamentos e, portanto, resultando em microestrutura com menores porosidades e permeabilidades, o uso de curvas de aquecimento ainda mais conservadoras, e muitas vezes baseadas em conhecimento empírico, são majoritariamente empregadas em ambientes industriais para se evitar efeitos como os mostrados na Figura 4.2 ocorram na prática [3, 23, 24].



Figura 4.2: Parte da zona de combustão de uma unidade de aquecimento em uma refinaria de petróleo. Retirado de [25]. Escala aproximada.

A água removida do material durante a secagem se divide em (i) água de adsorção livre, resultante da adesão de água às superfícies internas na microestrutura e (ii) água quimicamente ligada, resultante da decomposição de fases hidratadas, formadas pelos ligantes em etapas anteriores à da secagem. A quantidade de (ii) liberada em função da temperatura depende da composição e quantidade de ligante e água, do tempo e temperatura de cura, além da própria curva de aquecimento do concreto [3]. Além disto, também a taxa de liberação de massa depende da temperatura de decomposição de cada um dos hidratos formados durante a cura, vide Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Temperaturas de decomposição de alguns hidratos formados a partir de um cimento de aluminato de cálcio. Adaptado de [26].

Fases de Hidratos	Temperatura de Decomposição [°C]
CAH_{10}	120
C_2AH_8	170-195
C_3AH_6	240-370
AH_3 (gibbsite)	210-300
AH_3 gel	100

Para exemplificação, a Figura 4.3 ilustra uma série de reações de hidratação de diferentes compostos encontrados em cimentos de aluminato de cálcio (CAC), formados por sistemas de CaO/Al_2O_3 (C/A). A figura deixa claro que um mesmo composto pode gerar diferentes hidratos, ou seja, a etapa de cura regulará a quantidade de água quimicamente ligada no material e qual fase hidratada será resultante [20].

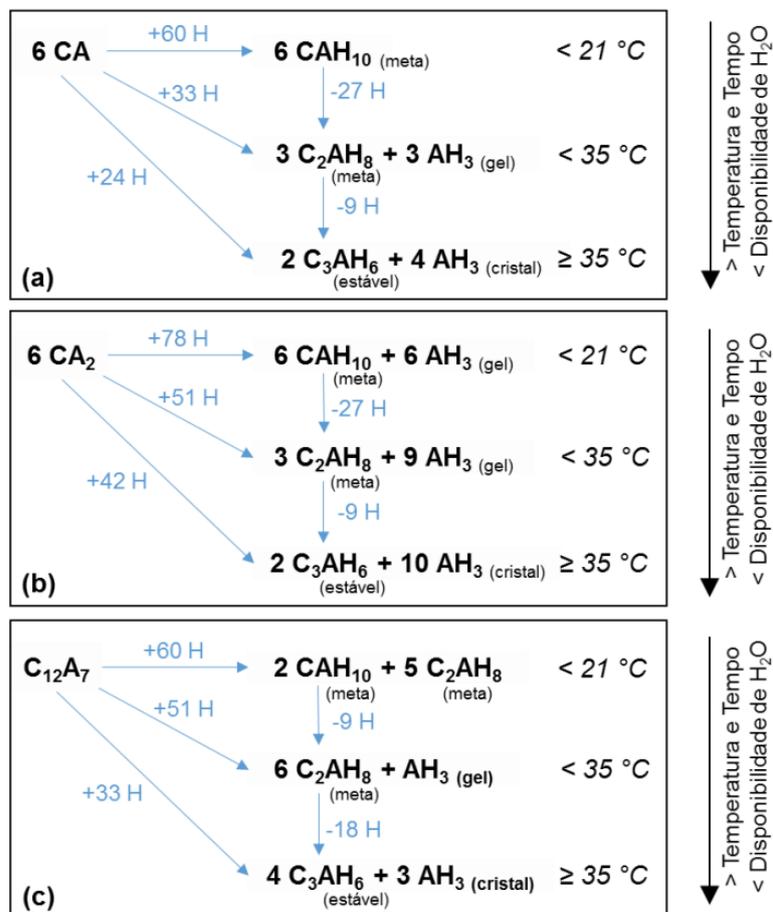


Figura 4.3: Esquemas de reação de hidratação para a) CA , b) CA_7 e c) $C_{12}A_7$. Retirado de [20].

Diferentes sistemas de ligantes geram distintas fases hidratadas que requerem uma atenção especial durante a etapa da secagem, uma vez que as elevadas taxas de geração de vapor devido à decomposição das fases formadas podem implicar na possível fratura do material.

4.3 Secagem

A secagem é o processo onde a água livre e a água quimicamente ligada são removidas do material por meio da aplicação de um aquecimento controlado. Este é um processo complexo que envolve transportes mássicos pela porosidade do material regidos por gradientes térmicos e, por consequência, gradientes de pressão e concentração, além de transformações físicas, como a liberação de água adsorvida, água capilar e ligada quimicamente, como a decomposição dos hidratos presentes [3, 16].

Refrataristas dividem a secagem em dois diferentes períodos, onde o transporte é regido por diferentes causas: o Período de Taxa de Secagem Constante (PTSC) e o Período de Taxa de Secagem Decrescente (PTSD) [21, 23, 27].

Apesar de ambos períodos serem melhor discutidos nas próximas seções, a Figura 4.4 ilustra de forma esquemática: durante o PTSC a água é removida em estado líquido e a frente de secagem avança do centro do material para a superfície, enquanto no PTSD a água é removida como vapor e a direção de secagem é da superfície para o centro.

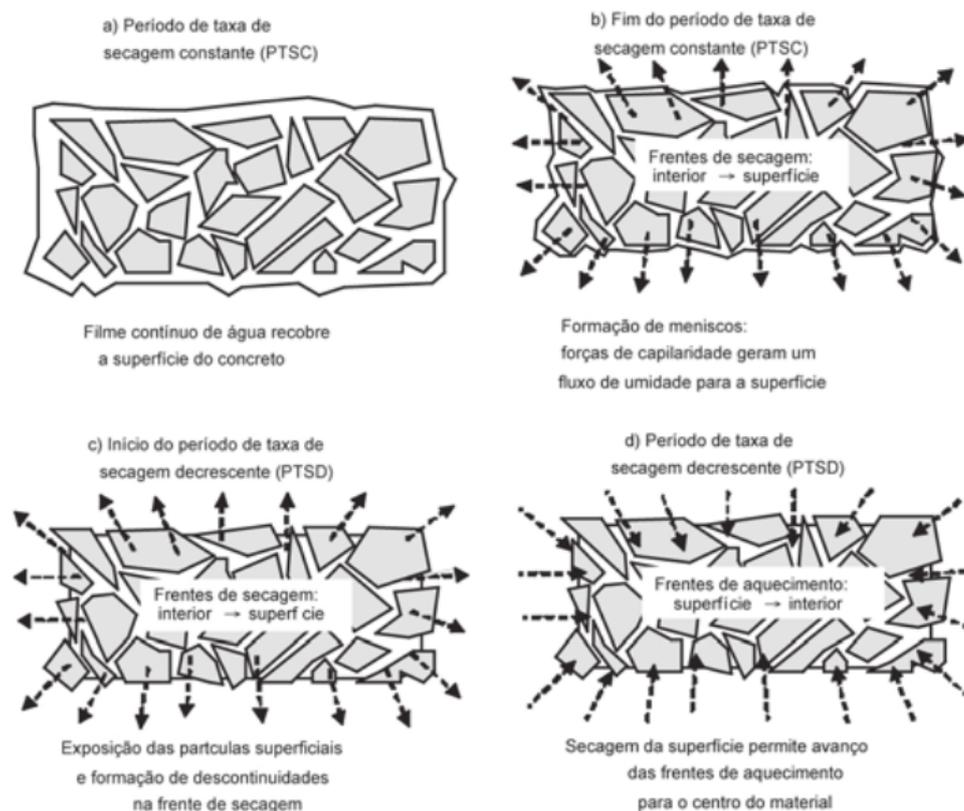


Figura 4.4: Etapas da secagem de concretos refratários [21].

4.3.1 Período de Taxa de Secagem Constante

Logo após a mistura e a cura do concreto, algumas regiões da microestrutura do material se encontram saturadas com água e um filme de líquido pode recobrir o corpo. Inicialmente este filme é removido por meio de um lento processo de secagem onde não há gradiente de pressão sendo regido por condições ambientais, como temperatura e umidade relativa (Figura 4.4 a) [3, 21].

Uma vez que este filme de água é removido, surgem interfaces sólido-líquido e meniscos são formados. Durante este procedimento, a água é removida por meio de forças de capilaridade, que favorecem a movimentação da água da região central do corpo em direção à superfície (Figura 4.4 b) [3].

Este período onde a taxa de remoção de água é constante se mantém enquanto o fluxo de água é contínuo, para então adentrar no período de taxa de secagem decrescente [3].

4.3.2 Período de Taxa de Secagem Decrescente

Logo que a temperatura na superfície do refratário atinge valores próximos a 100°C, há um crescimento exponencial na pressão de vapor, fazendo com que a taxa de extração de água na superfície se torne muito maior que no centro, devido ao gradiente térmico, resultando em uma superfície seca e um interior úmido (Figura 4.4 c) [21]. Uma vez que a descontinuidade entre as regiões é gerada, a água não pode ser mais removida de forma líquida, mas sim na forma de vapor a partir do interior do material, percolando por sua porosidade, tendo, então, um decréscimo na taxa de secagem.

Durante este período, a água física dentro do material se encontra em diferentes fases. Em um primeiro momento temos a água nos poros capilares, isto é, com dimensões micrométricas. Em seguida temos o vapor de água que se encontra em mistura com o ar seco. Por fim temos a água adsorvida, que se divide em dois tipos: a camada de água adsorvida livre, que pode ter até 5 moléculas de espessura ($5 \cdot 0.27\text{nm}$), que é a camada em contato com a partícula e o vapor (água capilar), além da camada de adsorção limitada, encontrada em poros nanométricos com espessura menor que 10 camadas de moléculas de água (27Å), onde a maior espessura da camada de adsorção não pode ser formada, limitando o transporte mássico com o vapor e a água capilar livre somente por meio da difusão. A Figura 4.5 ilustra esquematicamente os diferentes tipos de água encontradas no material durante este período [16].

A partir de 100°C, a água presente no material inicia seu processo de ebulição (Figura 4.4 d) e o transporte de massa deixa de ser uma função das condições ambiente e se torna uma função do gradiente de pressão dentro dos poros [3].

A pressão de vapor da água em função da temperatura em um recipiente fechado onde a fase de vapor se encontra em equilíbrio termodinâmico com a fase líquida é descrita pela equação de Antoine [28]:

$$P_{sat} = \exp\left(A - \frac{B}{T + C}\right) \quad (4.1)$$

onde, P_{sat} é a pressão de vapor em Pascal, ou pressão de saturação, que

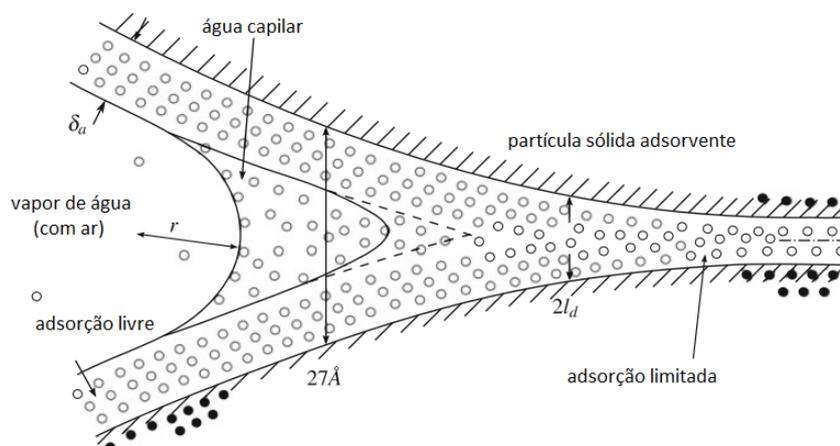


Figura 4.5: Representação dos diferentes tipos de água encontradas no material. δ_a é a espessura da camada de adsorção livre e l_d é a espessura da camada de adsorção limitada. Adaptado de [16].

varia exponencialmente com a temperatura T em Kelvin, enquanto A , B e C são constantes adimensionais com os seguintes valores para água: $A = 23.22$, $B = 3841.22$ e $C = -45.00$. A equação é uma aproximação válida de 0°C até a temperatura do ponto crítico da água, 374°C , a partir do qual não se distingue mais as fases líquida e gasosa [3, 28].

Com base na Equação 4.1, pode-se definir a umidade relativa no interior do material (h) como

$$h = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (4.2)$$

onde, P_v é a pressão de vapor no interior do material. No início da etapa de secagem, as regiões do material que se encontram totalmente saturadas possuem um valor de $h = 1$, porém a partir do momento que a água começa ser retirada, o valor de h diminui. A água capilar livre é dominante em $h > 0.85$ e desaparece quase por completo quando $h < 0.5$ [16].

A partir do momento que a água de adsorção livre (que será chamada de água livre) e a água capilar se transformam em vapor, ocorre um aumento na pressão de vapor local que, caso este vapor não consiga ser transportado pela permeabilidade do material, este poderá se acumular e gerar *i*) condensação de água, uma vez que o valor de h aumentará, fenômeno chamado de *moisture*

clogging (que também ocorre quando não se varia a pressão e se diminui a temperatura), e *ii*) dano ao material (*explosive spalling*, Figura 4.6), caso a pressão acumulada supere a resistência mecânica do mesmo [16].

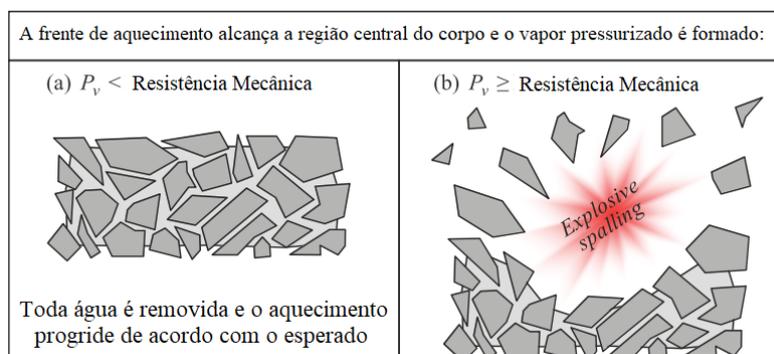


Figura 4.6: Comparação entre a pressão de vapor e a resistência mecânica do concreto. Adaptado de [3, 21].

Alguns autores discutem, ainda, que a falha dos concretos a alta temperatura tem como origem um efeito termo-hídrico-mecânico, onde o elevado acúmulo de pressão atua em conjunto com o efeito termomecânico do elevado gradiente de temperatura na superfície do material [7, 12, 29, 30].

A Figura 4.7, adaptada de [29], nos mostra ambos efeitos. No item a) temos a representação dos campos de tensão no material. Enquanto há uma fonte de calor na superfície, esta região se dilata mais que a parte central devido ao gradiente de temperatura e, portanto, a primeira se encontra em compressão. Caso a tensão gerada supere a resistência mecânica do material, ele fraturará. Já o item b) ilustra que, durante a secagem, se forma uma região de alta pressão de vapor na frente de secagem e que, se esta tensão for maior que a resistência mecânica, o material também irá falhar.

A pressão máxima gerada no concreto depende, então, de dois principais fatores: a taxa de geração de vapor no material e da liberação ou saída desta da microestrutura. Caso uma maior quantidade de vapor seja gerada devido a uma grande quantidade de água e/ou curva de aquecimento inadequada, haverá um acúmulo de vapor dentro do material. Portanto, uma das saídas para uma secagem segura, além do controle das curvas de aquecimento, seria por meio do ajuste da permeabilidade do material.

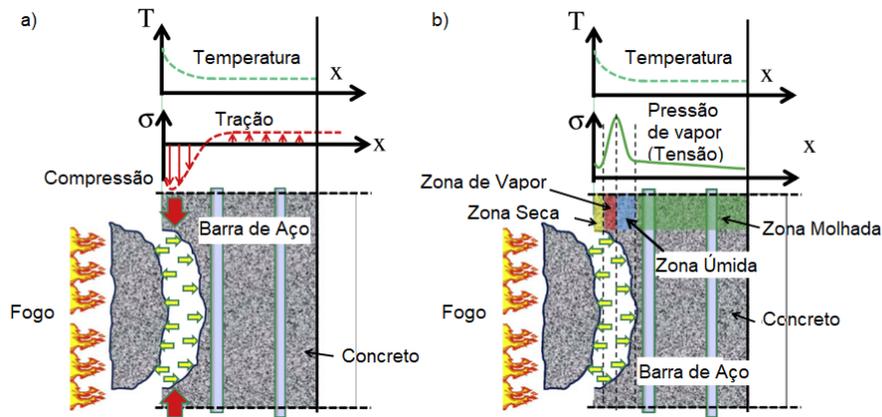


Figura 4.7: Esquematisação dos processos a) termomecânicos e b) termohídricos em concretos. Adaptado de [29].

A Figura 4.8 mostra a comparação entre os valores de pressão obtidos experimentalmente para duas diferentes composições de concretos refratários. O material ilustrado na Fig. 4.8a possui uma permeabilidade de $k_{1a} = 6.9 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ enquanto aquele mostrado na Fig. 4.8b ilustra uma permeabilidade de $k_{1b} = 23.4 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, ambas medidas a 200°C [31]. Nota-se que o experimento com menores valores de pressão de vapor são aqueles que possuem uma maior permeabilidade, já que este material teria, também, uma maior facilidade no alívio do vapor acumulado.

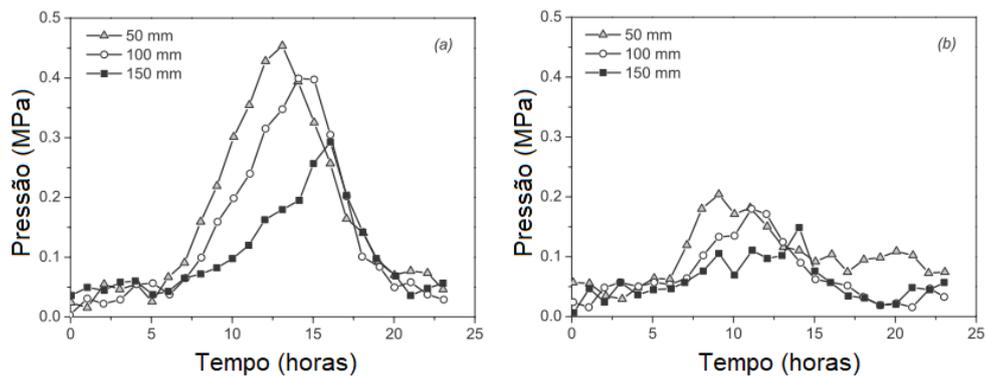


Figura 4.8: Comparação entre a pressão de vapor obtida em diferentes composições. $k_{1a} > k_{1b}$. A legenda indica a posição da medição da pressão. Adaptado de [31].

4.4 Curvas de Aquecimento para Secagem

Uma vez que os concretos refratários sofrem o risco de explosão quando sujeitos às curvas de aquecimento inadequadas, na prática industrial é comum o

uso de taxas lentas de aquecimento e a inserção de patamares em temperaturas próximas àquelas onde ocorre a decomposição de fases hidratadas com o objetivo de garantir uma maior segurança do processo [3].

Estas curvas obtidas, porém, se baseiam em uma metodologia empírica, sendo muitas vezes inadequadas para um processo específico, fato que pode ser verificado quando se observa que alguns fabricantes utilizam curvas com a presença de patamares e outros não. A falta de otimização do procedimento de aquecimento dos refratários faz com que o usuário final seja prejudicado de duas diferentes formas: sendo empregado um maior tempo de processamento e, por consequência, um maior gasto energético [32, 33].

São poucas as indústrias que, de fato, utilizam de modelos matemáticos de otimização para definir o processo de secagem de refratários, visto a complexidade de aplicação do mesmo e a dificuldade de escalonamento de modelos baseados em resultados laboratoriais para dimensões industriais [8].

Uma curva de aquecimento comum utilizada na indústria é caracterizada comumente por diversos períodos de taxa de aquecimento constante, variando tais valores entre 10 e 100 °C/h, com interrupções para a adição de patamares de segurança. A Figura 4.9 ilustra diversas curvas de aquecimento extraídas de sites de fabricantes e da literatura. Os materiais utilizados são concretos refratários LCC (concreto com baixo teor de cimento), MCC (concreto com médio teor de cimento), RC (concreto convencional), Jet Cast (concreto para aplicação por projeção), ligantes não cimentícios, etc., aplicados como revestimento de painéis de fundição, fornos rotativos, canais de corrida, fornos de reação, etc.

Esta figura nos mostra que não existe exatamente um padrão na definição das curvas de aquecimento. Muitas vezes são empregados aquecimentos com diferentes taxas de aquecimento com patamares em temperaturas não-coincidentes. Algumas outras curvas ilustram grande número de patamares para garantir uma maior segurança no processo, possivelmente devido ao custo da aplicação, resultando em longos períodos até que o material esteja seco.

Na literatura ainda são poucos os autores que trabalham com o processo de otimização da secagem de concretos refratários por meio de métodos matemáti-

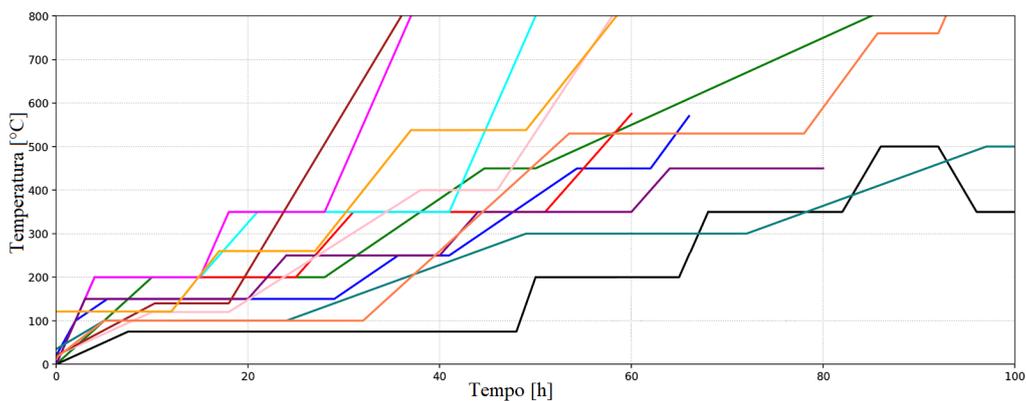


Figura 4.9: Diferentes exemplos de curvas de aquecimento para a secagem retiradas de fornecedores de concretos refratários e literatura.

cos, sendo os principais Gong [32], Palmer [14, 30] e Fey [13, 15].

A abordagem de otimização das curvas de secagem utilizadas por Gong et al. [32] e Palmer et al. [14, 30] se baseia na análise do comportamento de um material refratário unidimensional quando aplicado a uma curva genérica, seguido por um ajuste manual das taxas de aquecimento e dos patamares.

Seguindo uma outra estratégia, Fey et al. propuseram a utilização de um modelo de controlador PID (*proporcional integral derivativo*), isto é, um algoritmo que controla a taxa de aquecimento com base na pressão máxima da simulação. Com base na pressão máxima limite, Fey obteve diferentes curvas de aquecimento não lineares, com taxa de aquecimento variável, além de utilizar geometrias de uma ou duas dimensões [13, 15]. Apesar de um controlador ser o ideal na otimização de uma curva de secagem, a sua difícil aplicação acaba inviabilizando a sua instalação no setor industrial. A Figura 4.10 indica algumas das diversas curvas de aquecimento geradas por Fey utilizando o controlador PID.

Com tudo isso, o trabalho proposto neste estudo se mostra uma oportunidade de expandir as fronteiras do conhecimento nesta área ainda pouco explorada, por meio da simulação de casos mais simples de secagem, que partem do aquecimento contínuo de um material, até casos onde se obterá uma curva de aquecimento adequada à aplicação.

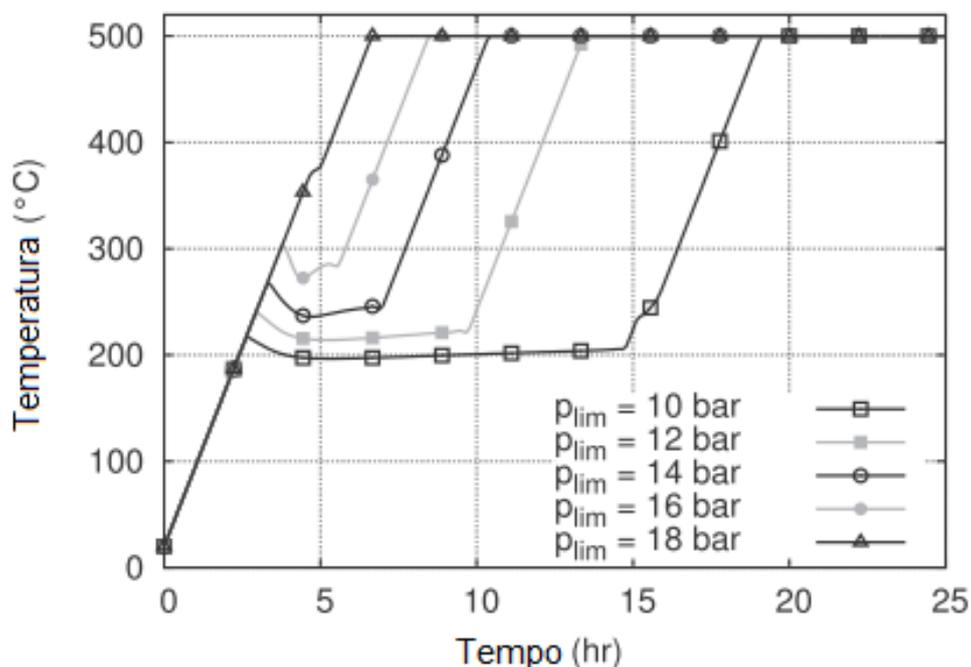


Figura 4.10: Curvas obtidas por Fey ao variar a pressão limite p_{lim} no controlador PID. Adaptado de [15].

4.5 Modelamento Matemático

Os primeiros modelamentos do fenômeno de secagem surgiram por meio do trabalho de Aleksei Vasielivich Luikov, a partir de 1929, durante seus estudos do transporte de fluidos em meios porosos [11]. Seu desenvolvimento foi baseado no modelo de Termodinâmica Irreversível Clássica, que, diferente da Termodinâmica Clássica, não considera somente o estado inicial e final de um fenômeno, possibilitando sua variação no espaço-tempo [34].

O modelo de Luikov traz uma solução analítica baseada em observações empíricas para o problema da secagem e considera cinco diferentes fases: esqueleto sólido, vapor de água, água líquida, água sólida e gás inerte.

O conjunto de equações utilizados descrevem o *i)* balanço térmico do corpo, *ii)* o balanço de massa no meio poroso e *iii)* o balanço de pressão no corpo [11].

Apesar da difícil aplicação, este primeiro modelo viabilizou o desenvolvimento de modelos derivados a ele, que serão discutidos a seguir.

O primeiro modelo amplamente utilizado foi desenvolvido por Bažant et al., em 1976 [12]. Diferente daquele desenvolvido por Luikov, levava em conside-

ração somente o fluxo de uma fase, além de uma simplificação com base em experimentos realizados pelos autores. Reforça-se que este, ainda, não era um modelo de secagem próprio para concretos refratários, e sim para concreto civil.

A Tabela 4.3, adaptada de [6], ilustra de forma resumida alguns dos diferentes modelos utilizados na secagem de concretos.

Observa-se que há os mais diferentes tipos de modelagem, desde as que consideram somente a fase sólida, como Ulm et al. [35] a modelos de maior complexidade como o de Gawin et al. [6]. Outro ponto importante a ser ressaltado é que a maior parte dos modelos citados, apenas Gong [17] e Fey [15] são aplicados em materiais refratários, enquanto todos os outros ilustram análise voltada a aplicações na engenharia civil, como incêndios e/ou acidentes de reatores nucleares.

Apesar do modelo de Fey et al. ser um dos mais recentes na literatura e também se basear em relações semi-empíricas, ele é um modelo multifásico e muito mais complexo que os propostos por Bažant et al. e Gong et al. O grande número de variáveis que teriam que ser medidas experimentalmente para a representação de um material por meio dele acarreta em uma dificuldade para sua aplicação [15, 16].

Visando a aplicabilidade dos modelos ilustrados e após uma extensa avaliação prévia dos mesmos, este trabalho optou por utilizar um modelo mais simples, derivado do estudo de Gong et al., que por sua vez se baseou no trabalho de Bažant et al. [12, 17] portanto, os próximos itens trarão uma revisão mais detalhada dos parâmetros e conceitos associados a estes dois últimos modelos mencionados.

Tabela 4.3: Compilação de alguns modelos de secagem de concreto existentes. Adaptado de [6].

As referências para as legendas são: A - Abdel et al. [36], B - Bažant et al. [12], C - Gong et al. [17], D - Ishikawa et al. [37], E - Tenchev et al. [4], F - Chung et al. [38], G - Dwaikat et al. [39], H - Ulm et al. [35], I - Gawin et al. [6], J - Fey et al. [15].

Aspectos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Gerais	<i>l + g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>s + g</i>	<i>l + g</i>	<i>l + g</i>	<i>l + g</i>	<i>s</i>	<i>l + g</i>	<i>l + g</i>
Fases consideradas	1	1	1	1	2	1	1	-	2	2
Número de componentes gasosas	2	1	1	1	3	2	2	-	3	2
Número de fases da água	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Condução térmica	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+
Convecção térmica	+	+/-	+	-	+	+	-	-	+	+
Calor latente de vaporização / condensação	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+
Calor latente de desidratação	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+
Difusão de vapor de água	+	-	-	-	+/-	-	-	-	+	+
Advecção das fases fluidas	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Água fisicamente ligada	-	+	+	-	+/-	-	-	-	+	+
Água de desidratação	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+
Água por mudança de fase	+	-	-	-	+	-	+	-	+	+
Desidratação	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
Degradação da rigidez por efeito da temperatura	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
Degradação da resistência mecânica por aquecimento	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
Tensões residuais	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-
Deformações causadas por gradientes térmicos	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-

4.5.1 Modelo proposto por Bažant et al.

A partir de 1975, Zdenek Bažant e colaboradores desenvolveram um primeiro modelo matemático com base no trabalho de Luikov, o qual foi aprimorado até ser publicado, em conjunto com Werapol Thonguthai, em 1979 [12]. O principal destaque deste modelo é que ele considera um fluxo unifásico, isto é, não há distinção entre vapor de água e água líquida, sendo considerada estes componentes computados como "umidade".

Com base em relações semi-empíricas e dados experimentais, os autores foram capazes de simplificar o fluxo mássico, desconsiderando o fluxo de Soret, além de incluírem uma série de adaptações, como a criação de uma curva de sorção, dependência da permeabilidade na temperatura e pressão e variação da porosidade [6, 16]. Outras simplificações realizadas incluem o efeito da transformação no balanço energético apenas em função da capacidade térmica, a desconsideração do fluxo de Dofour (fluxo convectivo) e a consideração de somente água capilar e não da água adsorvida na curva de sorção semi-empírica [6].

Gawin e coautores [6] criticam, ainda, a possibilidade do modelo de Bažant et al. de permitir um estado onde a umidade relativa (Equação 4.2) se encontra em valores maiores que a saturação da água (100%) em sua curva de sorção, caracterizando um estado de super-saturação. Bažant defende em seu livro [16] que é possível obter valores de $h > 1$ quando o menisco formado é anticlástico e possui uma curvatura gaussiana negativa. Além disto, ele também defende a modelagem a partir de uma única fase fluida, visto que o fluxo é limitado pelos capilares nanométricos onde somente ocorre fluxo adsorvido (camada limitada da Figura 4.5). Portanto, seria lógica uma simplificação com base nestes aspectos ao invés de considerar um fluxo livre para diferentes fases [6].

O modelo propriamente dito é baseado em duas variáveis: a temperatura,

descrita por T e a pressão de vapor de água, P_v . Como indicado a seguir [12]:

$$\underbrace{J}_{\text{(a.1)}} = -\underbrace{\frac{a}{g}}_{\text{(b.1)}} \nabla P \quad (4.3)$$

$$\underbrace{q}_{\text{(a.2)}} = -\underbrace{k}_{\text{(b.2)}} \nabla T \quad (4.4)$$

$$\underbrace{\dot{w}}_{\text{(a.3)}} = -\underbrace{\nabla \cdot J}_{\text{(b.3)}} + \underbrace{\dot{w}_d}_{\text{(c.3)}} \quad (4.5)$$

$$\underbrace{\rho C_p \dot{T}}_{\text{(a.4)}} - \underbrace{C_a \dot{w}}_{\text{(b.4)}} - \underbrace{C_w \cdot J \nabla T}_{\text{(c.4)}} = -\underbrace{\nabla \cdot q}_{\text{(d.4)}} \quad (4.6)$$

A Equação 4.3 descreve o fluxo mássico **(a.1)** como o fluxo de Darcy **(b.1)**, a 4.4 indica o fluxo térmico **(a.2)** como o de Fourier **(b.2)**, e a 4.5 ilustra a variação de água livre com o tempo **(a.3)**, como função do fluxo em função do gradiente de pressão (fluxo de Darcy) **(b.3)** somado com uma fonte de água de desidratação **(c.3)**. Por sua vez, a Equação 4.6 representa o balanço energético, sendo **(a.4)** o fluxo de calor, **(b.4)** a entalpia de dessorção, **(c.4)** a energia transportada via convecção e **(d.4)** a energia transportada por condução térmica (fluxo de Fourier) [12].

Como condição de contorno, Bažant considerava nas faces expostas ao exteriores as duas condições de Neumann, mostradas seguir [12]:

$$\underbrace{n \cdot J}_{\text{(a.1)}} = \underbrace{B_w (P_v - P_{ven})}_{\text{(b.1)}} \quad (4.7)$$

$$\underbrace{n \cdot q}_{\text{(a.2)}} = \underbrace{B_t (T - T_{en})}_{\text{(b.2)}} + \underbrace{C_w n \cdot J}_{\text{(c.2)}} \quad (4.8)$$

onde, na Equação 4.7 o fluxo mássico normal na superfície **(a.1)** é definido pela diferença de pressão de vapor dentro do material e a pressão de vapor ambiente, multiplicada por um coeficiente de película B_w **(b.1)**. Já a Equação 4.8 nos diz que o fluxo térmico normal na superfície **(a.2)** é função de uma troca térmica com coeficiente de película B_t **(b.2)**, somada com a energia utilizada pela evaporação de água superficial **(c.2)** [12, 16].

Além disto, a curva de sorção obtida semi-empiricamente, como quatro diferentes regiões [12, 16]:

- $T < 374 \text{ °C}$ e $h \leq 0.96$: de acordo com certas considerações termodinâmicas para água capilar, nestas condições o comportamento da curva de sorção para concretos foi definido como uma função baseada na lei de potências (Equação 4.9), onde w_c é a massa inicial de cimento por unidade de volume de concreto [kg/m^3] e w_1 consiste em um parâmetro que representa a água evaporável [kg/m^3] em um concreto saturado a 25 °C , conforme indicado na Equação 4.10.

$$w = \phi(h, T) = W_c \left(\frac{w_1}{c} h \right)^{1/m(T)} \quad (4.9)$$

$$m(T) = 0.04 + \frac{1}{1 + (T - 263)^2 / 27370} \quad (4.10)$$

- $T < 374 \text{ °C}$ e $1.04 \leq h$: neste caso, Bažant e Thonguthai [12] propuseram descrever a curva de sorção por meio da Equação 4.11, onde ε é a deformação volumétrica, ρ_l é a massa específica da água, em função da umidade (ou pressão, de acordo com a Equação 4.2) e n_p é a porosidade acessível à água.

$$w = \phi(h, T) = (1 + \varepsilon_V) \rho_l(h, T) n_p(h, T) \quad (4.11)$$

$$(4.12)$$

Os autores reportaram que a massa específica da água varia em função da pressão de vapor e temperatura, conforme indicado na equação constitutiva simplificada indicada na Equação 4.13, sendo ρ_{l0} é a densidade referência na temperatura T_0 , P_l é a pressão do líquido e P_{l0} a pressão em T_0 , α_{vT} é o coeficiente de expansão volumétrica e K_l é o módulo volumétrico da água (2.2 GPa).

$$\rho_l = \rho_{l0} \left[1 - \alpha_{vT} (T - T_0) + \frac{P_l - P_{l0}}{K_l} \right] \quad (4.13)$$

Por fim, temos a Equação 4.14 que descreve a variação da porosidade com a temperatura. Os autores [16] justificaram a necessidade de se utilizar uma porosidade não constante, pois, a altas pressões nanoporos que antes não eram acessíveis à água podem estar disponíveis. Os parâmetros contidos nesta expressão são a n_p que é função da porosidade capilar n_{p0} a uma temperatura referência T_0 , água de desidratação w_d , massa específica ρ_{l0} em T_0 e umidade relativa h .

$$n_p(h, T) = \left(n_{p0} + \frac{w_d(T)}{\rho_{l0}} \right) [1 + 0.12(h - 1.04)] \quad (4.14)$$

- $T < 374 \text{ °C}$ e $0.96 < h < 1.04$: entre os valores limitantes de subsaturação e supersaturação, Bažant et al. [12, 16] propuseram uma interpolação linear que é descrita pela a seguir:

$$w(h, T) = w(0.96, T) + 0.08 \frac{w(0.96, T) - w(1.04, T)}{h - 0.96} \quad (4.15)$$

- $T \geq 374 \text{ °C}$: em temperaturas superiores ao ponto crítico da água, se considera que não há água adsorvida e, portanto, seu valor é:

$$w(h, T \geq 374) = 0 \quad (4.16)$$

A Figura 4.11 ilustra as isotermas de sorção plotadas a partir das condições descritas acima. Nota-se claramente a distinção de três regiões, sendo $h \leq 0.96$, $0.96 < h < 1.04$ e $h \geq 1.04$, enquanto há um decréscimo na quantidade de água evaporável conforme se aumenta a temperatura, com a tendência de se assumir o valor 0 a partir da temperatura de 374 °C [12, 16].

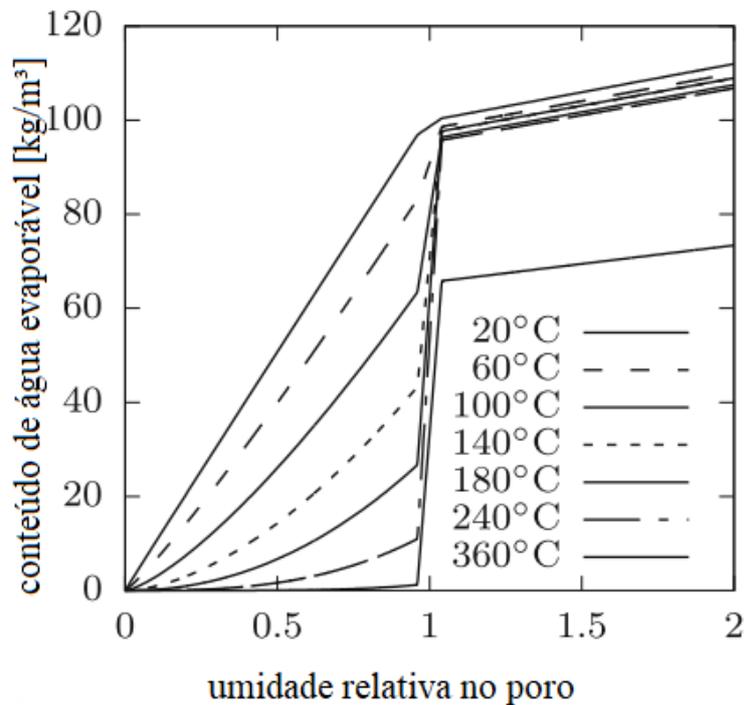


Figura 4.11: Plot da curva de sorção obtida por Bažant et al. Adaptado de [16].

Bažant et al. [16] também reforçaram a importância da permeabilidade variar com a temperatura e umidade relativa. De acordo com estes autores, a água em forma de vapor não consegue ser conduzida pelos nanoporos (0.3 - 20nm), visto que o seu caminho livre médio é muito maior na temperatura ambiente (80nm a 25°C). Conseqüentemente, o vapor passa a ser transportado por difusão na camada adsorvida, que é um processo lento e em função da umidade relativa. Em altas temperaturas as porosidades se tornam contínuas e a água pode percolar no material livremente, tornando o fluxo uma função do gradiente de pressão (lei de Darcy) [16]. Portanto, em baixas temperaturas o material (concreto Portland estudado pelo autor) possui uma permeabilidade menor, na qual foi observada um aumento drástico em temperaturas próximas a 100°C. Dentre as possíveis explicações do autor, ele menciona a conversão de géis de CSH (hidratos de silicato de cálcio) de baixa densidade para géis de alta densidade [16].

Para representar o fenômeno observado, os autores propuseram com o se-

guinte conjunto de equações [16]:

$$a(h, T) = \begin{cases} a_0 f_1(h, T) f_2(T) & \text{para } T \leq T_{tr} \\ a_0 f_2(T_{tr}) f_3(T) & \text{para } T > T_{tr} \end{cases} \quad (4.17)$$

$$f_1(h, T) = \alpha(T) + \frac{1 - \alpha(T)}{1 + 256(1 - h)^4} \quad (4.18)$$

$$f_2(T) = \exp \left[\frac{Q_w}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.19)$$

$$f_3(T) = \exp \left(\frac{T - T_{tr}}{0.881 + 0.214(T - T_{tr})} \right) \quad (4.20)$$

$$\alpha(T) = 0.05 + 0.95 \frac{T - T_0}{T_{tr} - T_0} \quad (4.21)$$

A Equação 4.17 representa a permeabilidade hidráulica no material como uma função da umidade relativa e da temperatura, onde a_0 é o valor de permeabilidade a 25°C no material saturado e T_{tr} é a temperatura do começo da transição para uma maior permeabilidade.

A função f_1 , descrita pela Equação 4.18, possui a mesma forma que a expressão de difusividade descrita por Bažant-Najjar, onde o α é um parâmetro que depende da temperatura.

Já a Equação 4.19 trás a dependência da permeabilidade em função da temperatura, quando esta está abaixo da transição, e tem a forma de uma equação de Arrhenius, onde T e $T_0 = 298$ K são utilizados na escala Kelvin, Q_w é a energia de ativação para a migração de água a baixas temperaturas e R a constante universal dos gases. Os autores também recomendam o uso de $Q_w/R = 2700$ K com base em dados experimentais [12].

Em seguida temos a função f_3 (Equação 4.20) que descreve o crescimento abrupto do valor da permeabilidade próxima a T_{tr} , onde $T_{tr} = 368$ K (95°C) foi escolhida como a temperatura de início da transição.

Combinando-se as condições descritas, se obtém a Figura 4.12 que descreve a permeabilidade do material em função da temperatura e da umidade relativa.

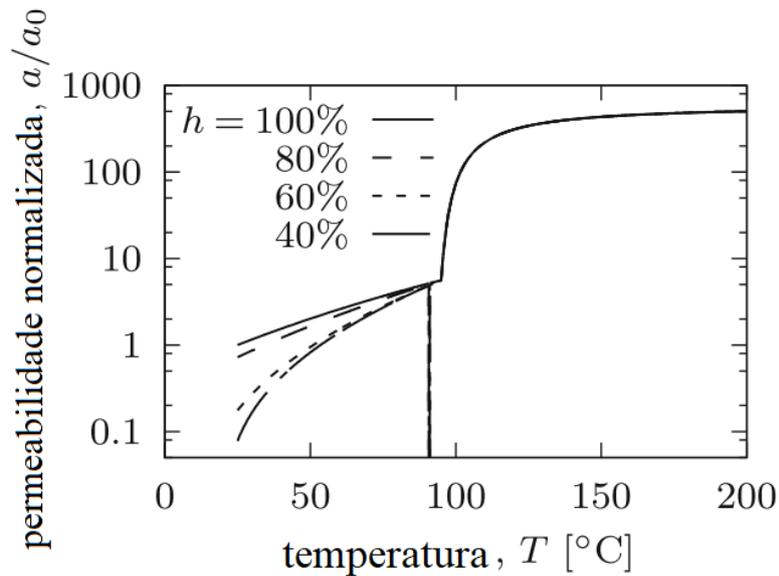


Figura 4.12: Permeabilidade de Bažant et al. para diversas temperaturas e umidades relativas [12]. Adaptado de [16]

Uma vez que os princípios básicos deste modelo foram ilustrados, pode-se agora aprofundar no estudo realizado por Gong et al., que serviu como base para o desenvolvimento do modelo numérico utilizado neste trabalho.

4.5.2 Modelo proposto por Gong et al.

O modelo proposto por Zheng-Xiang Gong e Arun. S. Mujumdar foi uma das primeiras adaptações dos modelos de secagem tradicionais visando a aplicação em concretos refratários e permitindo o desenvolvimento da metodologia de elementos finitos para a aplicação do mesmo [17, 40].

Embora o conjunto de equações constitutivas e de condição de contorno utilizadas por Gong et al. sejam os mesmos utilizados por Bažant et al. (equações 4.3 a 4.6), os primeiros desenvolveram adaptações nas formulações das propriedades de *input*, as quais serão discutidas a seguir [12, 16, 17, 40].

Um primeiro ponto que se destaca no trabalho de Gong et. al [17] foi a adaptação da curva de sorção. Como visto na seção anterior, por meio das equações 4.11 e 4.14, a curva de sorção semi-empírica de Bažant et al. [12] é função da porosidade n_0 . Para simplificação da fórmula com base em valores medidos para um material refratário, foi definido que a aproximação da região supersaturada é somente função da temperatura, Equação 4.22, enquanto que as outras

equações da curva de sorção foram mantidas como indicado na seção 4.4.1. [40].

$$w(h, T) = w_c \left[0.037(h - 1.04) + 0.3335 \left(1 - \frac{T^2}{3.6 \cdot 10^5} \right) \right] \quad (h \geq 1.04) \quad (4.22)$$

Outra adaptação realizada por Gong e Mujumdar foi a simplificação das equações de permeabilidade de Bažant (equações 4.17, a 4.21). De uma forma geral nota-se que foram substituídos os valores de $t_r = 95$ e $Q_w = 2700$, sendo eliminada a necessidade de calcular o $\alpha(T)$ separado, como indicado a seguir:

$$a = \begin{cases} a_0 f_1(h, T) f_2(T) & (h \leq 95^\circ\text{C}) \\ 5.6 a_0 f_3(T) & (T > 95^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (4.23)$$

$$f_1 = \begin{cases} \frac{1.28929 - 0.013571T}{1 + [4(1-h)]^4} + 0.013571T - 0.28929 & (h < 1) \\ 1 & (h \geq 1) \end{cases} \quad (4.24)$$

$$f_2(T) = \exp \left[2700 \left(\frac{1}{273 + T_0} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \quad (4.25)$$

$$f_3(T) = \exp \left[\frac{T - 95}{0.881 + 0.214(T - 95)} \right] \quad (4.26)$$

Por fim, por meio da metodologia de elementos finitos Gong et al. em conjunto com as simplificações e as propriedades utilizadas dos materiais refratários, analisaram diversos efeitos pertinentes à secagem dos materiais, como a análise de diferentes taxas de aquecimento e o efeito da permeabilidade e isolamento térmico em aquecimentos unilaterais [40] e desenvolvimento de novas curvas de aquecimento [32].

Uma das principais críticas a se fazer ao trabalho de Gong et al. [32, 40] é a utilização de um material refratário fictício, que mistura propriedades obtidas da literatura, outras propriedades utilizadas por Bažant et al. [12] e outras propriedades não referenciadas. Além disto, a metodologia de otimização proposta não busca abranger as diferentes características da aplicação, e sim é somente um estudo por superficial sobre a possibilidade de otimizar as curvas de secagem

de concretos refratários.

4.6 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos, popularmente chamado de FEM, foi desenvolvido na década de 1950 pelo setor aeroespacial como uma técnica universal para a solução de problemas de equações diferenciais em qualquer domínio e qualquer dimensão por meio de uma discretização de um domínio, a geometria, e o tempo, o *timestep*. Uma vez discretizados, aproximações por funções de elementos finitos são realizadas para a resolução do problema que dificilmente pode ser resolvido por meio de um modelamento analítico [41–44].

O FEM fornece uma metodologia sistemática em que este tipo de problema possa ser resolvido por meio de um computador. Fish et al. afirmaram que para um problema linear simples, o número de incógnitas é o número de elementos e que, para obter uma aproximação mais precisa, um grande número de elementos, isto é, uma maior discretização do espaço, é necessário, requerendo o auxílio computacional para a solução deste sistema. Porém, é importante notar que quanto maior a precisão desejada, maior a discretização, que implica em um maior número de cálculos computacionais e, portanto, requer mais recursos físicos e financeiros. Quando se avalia um problema simples como condução de calor, o programa determina a variação de temperatura em cada um dos elementos, e os resultados podem ser extraídos para um pós-tratamento onde eles são *plotados* em gráfico para uma posterior análise [41].

Para se entender a discretização espacial realizada, a Figura 4.13, nos mostra uma placa retangular com um furo circular (a). Caso queiramos representar esta malha com elementos finitos triangulares (b), teríamos que criar uma série de nódulos (ou pontos) e conectá-los por meio de uma malha, que pode ser menos (c) ou mais (d) refinada, melhorando a qualidade dos resultados obtidos [41, 44].

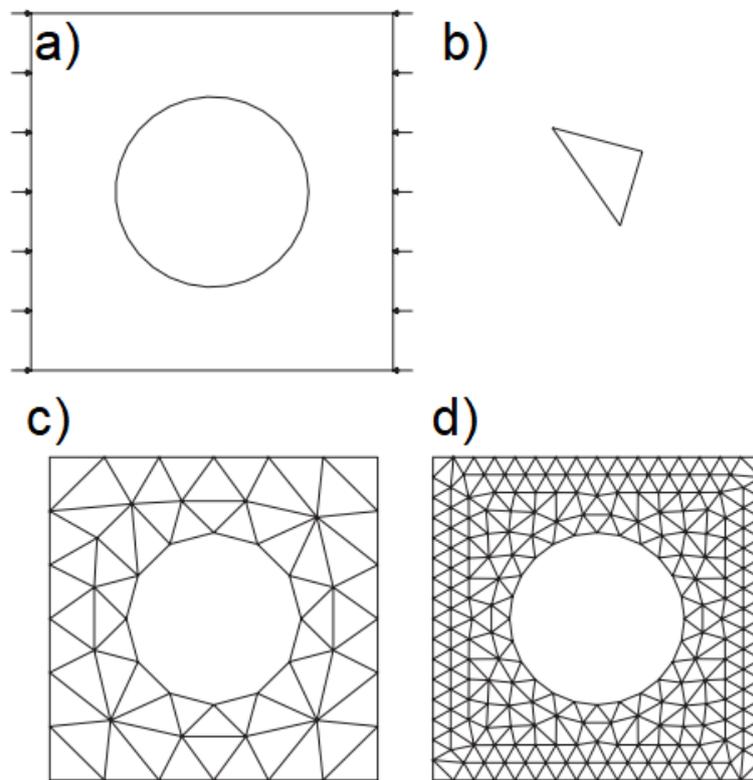


Figura 4.13: Processo de formação de malha em um elemento finito, em ordem: a) geometria a ser preenchida, b) tipo de elemento a ser utilizado, c) malha gerada pouco refinada e d) malha com maior nível de refinamento. Adaptado de [41].

Além de resolver problemas, como o de condutividade térmica descrito anteriormente, uma simples troca das equações constitutivas e as condições de contorno resulta na resolução para os mais diversos problemas encontrados na engenharia, como em análise mecânica, utilizando o deslocamento como incógnita, em sistemas químicos, utilizando concentração de compostos, em sistemas eletromagnéticos, utilizando campos potenciais magnético e elétrico, etc. Uma outra vantagem é que uma mesma malha pode ser utilizada para a resolução de diferentes problemas de elementos finitos, lineares ou não [41].

Devido à sua versatilidade, FEM é aplicado nos mais diversos campos da indústria que partem desde aplicações puramente de engenharia, como análise de tensão e temperatura de componentes industriais, como análises de acidentes de veículos (Figura 4.14 a), trens, aeronaves, e até mesmo em campos médicos, como simulação de fluidos e análises de procedimentos cirúrgicos (Figura 4.14 b).

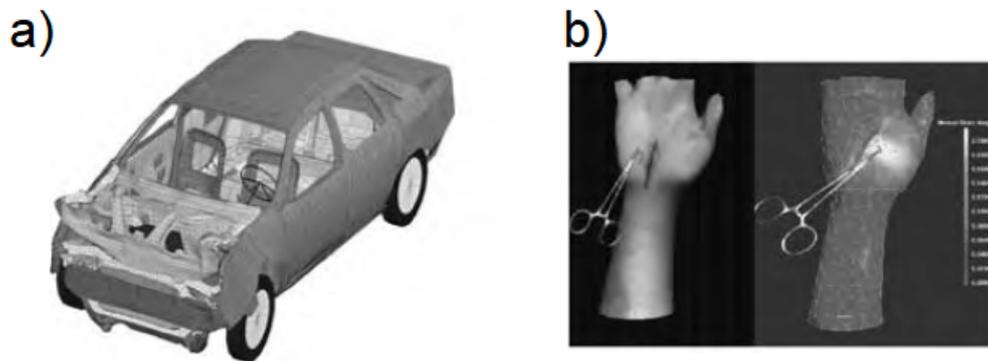


Figura 4.14: a) Modelo de elementos finitos da batida de um Ford Taurus, b) Sobreposição de uma malha de elementos finitos perto de um ferimento. Adaptado de [41].

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Composição refratária avaliada

O material de interesse avaliado foi um concreto refratário contendo 5%-peso de cimento aluminato de cálcio (CAC), composição encontrada na tabela 5.1, que será referenciado como 5CAC. O fator de empacotamento calculado de acordo com o modelo de empacotamento de Andreasen é $q = 0.21$ [45].

Tabela 5.1: Composição do concreto 5CAC.

Matéria Prima	Fração Mássica(%)	Fabricante
Alumina Tabular	74	Almatis
Alumina Calcinada	11	Almatis
Alumina Reativa	10	Almatis
CAC (Secar 71)	5	Imerys Aluminates
Água Destilada	4,5	-
Dispersante	0,2	BASF

5.1.1 Processamento

O processamento deste material envolve diferentes etapas, que se inicia com a preparação da composição, onde as matérias primas são selecionadas [46]. Então se mistura adicionando os componentes sólidos com água em um reômetro, onde inicialmente é misturado os componentes sólidos e o dispersante a uma rotação de 25rpm entre 1 e 2 minutos, a seguir a água é adicionada gradualmente enquanto a rotação imposta é de 45 rpm por um tempo de aproximadamente 3 minutos, para então se aumentar a velocidade de rotação para 55 rpm em uma etapa de homogeneização do material.

Após a mistura, o material é vertido no formato final usado nos ensaios a serem realizados (cilindros de 50mm de diâmetro e 50mm de espessura para as medições de termogravimetria [47, 48], paralelepípedos de 25 x 25 x 150 mm usado nas avaliações mecânicas, e em paralelepípedos com 223 x 114 x 64 mm, curado a 30 °C por 24h em um ambiente úmido, seco a uma temperatura de 110 °C por 24h e então queimado nas temperaturas de interesse das análises a serem realizadas.

5.2 Medidas de Propriedade dos Materiais

O modelo de elementos finitos desenvolvido precisa como *input* as propriedades do material a ser avaliado. Estas se dividem como propriedades térmicas (o calor específico e a condutividade térmica), a permeabilidade, a densidade, a água quimicamente ligada e a resistência mecânica do material.

5.2.1 Propriedades Térmicas

A condutividade térmica e o calor específico (via medição da difusividade térmica) serão obtidos por meio do ensaio de Fio Quente (ISO 8894-2) [49, 50] em um equipamento Netzsch TCT 426. A técnica consiste em dispor três tijolos de uma mesma composição cujas superfícies devem ser retificadas e entalhadas para a acomodação dos fios (termopares) necessários para a coleta dos dados durante as medidas.

A metodologia se baseia no tempo, e na quantidade, que é necessário para que o fluxo de calor gerado pelo fio quente chegue no termopar da amostra enquanto o termopar de referência registra a temperatura de equilíbrio do forno. A Figura 5.1 ilustra um esquema dos entalhes.

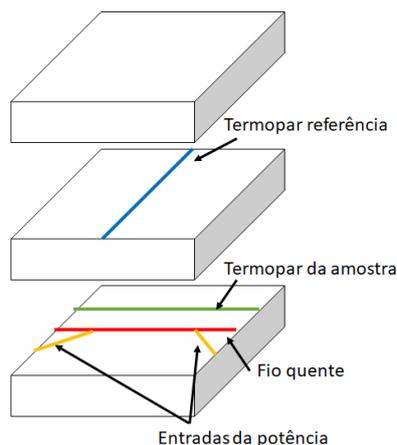


Figura 5.1: Posição dos entalhes nos tijolos na técnica do fio quente

As amostras medidas foram curadas a 30°C/24h, secas a 110°C/24h podendo ser calcinadas em temperaturas de até 800°C/5h.

5.2.2 Permeabilidade

O procedimento para a obtenção da permeabilidade intrínseca do material se dividirá em duas partes: i) a obtenção experimental do valor da permeabilidade, na temperatura ambiente seguindo a norma ASTM C577 [51, 52], e fazendo uso de amostras obtidas após a secagem e queima entre 110 e 400 °C ii) a extrapolação da permeabilidade com base em dados da literatura.

Na primeira parte foram preparados 5 corpos de prova cilíndricos com 35mm de raio e 25mm de espessura para cada condição a ser analisada. Escolheu-se a avaliação das amostras após a secagem a 110 °C por 24h e calcinação a 200 °C, 300 °C e 400 °C durante um período de 5 horas. Os corpos de prova foram vedados lateralmente com o auxílio de silicone. Então estes foram inseridos em um permeâmetro (Figura 5.2), onde foi aplicada uma pressão de entrada conhecida e, a partir da medida da pressão de saída e da velocidade do gás, foram calculadas as constantes de permeabilidade k_1 e k_2 de acordo com a equação de Forchheimer mostrada a seguir:

$$\frac{P_e^2 - P_s^2}{2P_0L} = \frac{\mu}{k_1}v_s + \frac{\rho}{k_2}v_s^2 \quad (5.1)$$

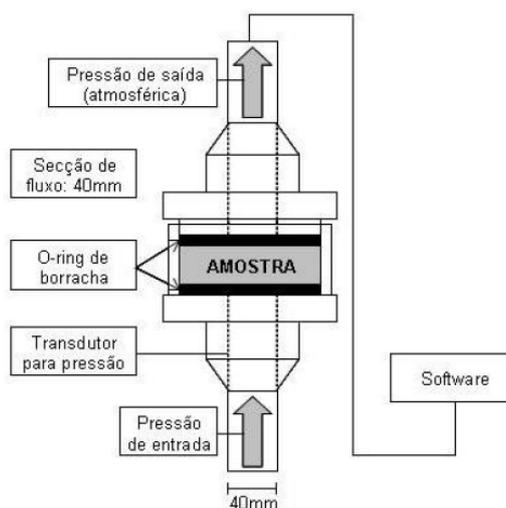


Figura 5.2: Esquemática do permeâmetro. Retirado de [53].

onde, P_e e P_s são pressões de entrada e saída do gás na amostra, P_0 é

a pressão a uma vazão de ar conhecida, L é a espessura da amostra, μ é a viscosidade do ar, ρ é a densidade do ar e v_s é a vazão de saída do fluxo linear e, portanto, k_1 é a propriedade de interesse medida nas amostras para este conjunto de simulações [54].

Porém, é de se esperar também que a permeabilidade no material varie dinamicamente com a temperatura. Ao adotar estas medidas experimentais como base para uma interpolação, não pode-se ignorar o fato de que esta propriedade está sendo influenciada pelas mudanças microestruturais associadas ao tratamento térmico específico.

O procedimento em questão consiste na normalização das vazões obtidas em alta temperatura usando como valor base para o cálculo a vazão obtida a 110°C. Com isto temos que a vazão normalizada é dada por:

$$\bar{v}_s(T) = \frac{v_s(T)}{v_s(110^\circ\text{C})} \quad (5.2)$$

onde \bar{v}_s é a vazão normalizada na temperatura de 110°C. A partir da Equação 5.1, que descreve a lei de Forchheimer, se considerarmos somente a parte linear temos a seguinte simplificação:

$$\frac{P_e^2 - P_s^2}{2P_0L} \propto \frac{\mu}{k_1} v_s \Rightarrow k_1 \propto v_s \quad (5.3)$$

Esta simplificação nos mostra uma correlação direta entre a vazão de saída e a constante de permeabilidade, porém desconsidera a variação da viscosidade do ar com a temperatura e, portanto, seu propósito é somente ser uma ferramenta para a obtenção de uma permeabilidade dinâmica para comparação com a permeabilidade constante.

A seguir, multiplica-se o valor medido de k_1 obtido experimentalmente para a composição de interesse na temperatura de 110°C com o valor normalizado de vazão \bar{v}_s para obter a permeabilidade dinâmica extrapolada \hat{k}_1 , como mostrado abaixo:

$$\hat{k}_1(T) = \bar{v}_s(T)k_1 \quad (5.4)$$

Nota-se que a viscosidade dinâmica é uma função da temperatura que pode ser aproximada por meio da Equação 5.6, onde T é a temperatura em °C.

$$a = k_1 \frac{\rho g}{\mu} \quad (5.5)$$

$$\mu(T) = 8.85 \cdot 10^{-6} + 3.53 \cdot 10^{-3}(T - 25) \quad (5.6)$$

5.2.3 Densidade Aparente

Para medir a densidade aparente, foi utilizado o método de Arquimedes, de acordo com a norma ASTM C830-00. Cinco corpos de prova para cada conjunto foram curados a 30°C por 24h, secos a 110°C por 24h e calcinados a 150°C, 200°C, 250°C e 300°C por 5h. Considerando que este trabalho irá avaliar a densidade de concretos que possuem cimento como ligante, foi usado querosene como meio imersivo durante o ensaio para evitar a reidratação deste material e outras possíveis mudanças de fases que comprometeriam os resultados.

A densidade aparente foi obtida conforme procedimento indicado na norma ASTM C830-00 e seguindo a Equação 5.7.

$$\rho = \frac{P_s}{P_s - P_i} \rho_l \quad (5.7)$$

onde ρ é a densidade, P_s o peso seco, P_i o peso imerso e ρ_l a densidade do líquido de imersão. Como se utiliza de querosene, adota-se o valor de $\rho_l = 820 \text{ Kg/m}^3$.

5.2.4 Água Quimicamente Ligada

Análises termogravimétricas foram realizadas com o objetivo de se inferir a quantidade de água quimicamente ligada contida nas amostras preparadas. Este ensaio consiste em aquecer um corpo de prova cilíndrico com 50mm de diâmetro e 50mm de altura, curado a 30°C/24h e seco a 110°C/24h, e aferir a variação de massa em função do tempo e da temperatura, visto que diferentes taxas de aquecimento podem ser aplicadas.

O equipamento a ser utilizado foi um pequeno forno do tipo mufla com aquecimento lateral por resistência adaptado com uma balança, na qual a amostra

de 50mm de diâmetro e 50mm de altura foi pesada continuamente, enquanto o processo de aquecimento é repetido com uma segunda amostra com a mesma dimensão, geometria e composição tem sua temperatura analisada por um termopar. Um computador adquire, então, a massa da amostra e a temperatura da amostra e do forno. O diagrama esquemático do equipamento se encontra na Figura 5.3.

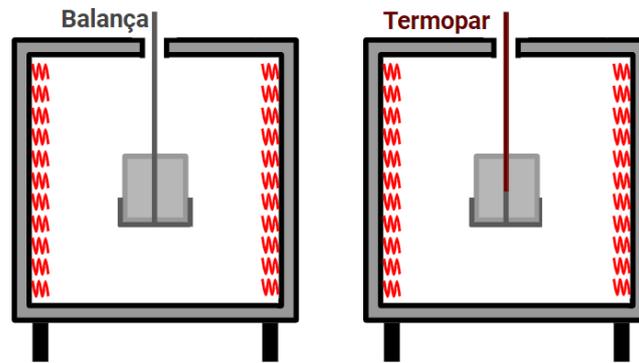


Figura 5.3: Esquemática do equipamento de análise termogravimétrica.

Para este trabalho foi utilizada uma taxa de aquecimento de 2°C/min visto que as taxas utilizadas na indústria são iguais ou inferiores a esta. O comportamento das amostras foi avaliado na temperatura entre 30 e 800°C, sendo posteriormente calculado a variação de massa com a temperatura e a taxa de liberação de água, como indicado a seguir.

$$W = \frac{M_0 - M}{M_0} \quad (5.8)$$

$$\dot{W} = \frac{dW}{dt} \quad (5.9)$$

onde W é a fração de água liberada, M_0 é a massa inicial, M é a massa medida, M_f a massa final e \dot{W} a taxa, também conhecida como DTG.

A partir destes dados foi calculada a curva de liberação de água quimicamente ligada, de acordo com a Equação 5.10, sendo w_d é a água quimicamente

ligada, m_l é a massa de água na amostra e V é o volume da amostra.

$$w_d = \frac{m_l}{V} \left(1 - \frac{W}{100} \right) \quad (5.10)$$

5.2.5 Propriedades Mecânicas

Com o objetivo de comparar a possível pressão de vapor gerada no revestimento cerâmico durante o aquecimento do mesmo, conforme previsto pelo modelo de simulação, com a resistência mecânica a verde do refratário, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Obtenção da resistência mecânica e módulo de Poisson das peças produzidas
- Cálculo do módulo de Weibull
- Transformação da tensão obtida para tensão triaxial
- Criação de uma função comparativa

Para o primeiro item desta lista, foram preparados cinco corpos de provas para cada temperatura avaliada (30°C, 110°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C e 800°C) da composição analisada nas seguintes dimensões: 25 x 25 x 150 mm. Estas foram avaliadas em ensaios de flexão em três pontos, seguindo o procedimento descrito na norma ASTM C583-15 e usando o equipamento MTS 810 USA com uma taxa de carregamento de 12.9 N/s. Para o cálculo do módulo de ruptura (MOR) foi considerada a seguinte equação:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5.11)$$

onde σ_f é a tensão de fratura (MPa), P é a carga medida(N), L é a distância entre os apoios inferiores, que tem um valor fixo de 127mm, b e d são largura (mm) e altura (mm) do corpo, respectivamente.

O módulo de Poisson utilizado foi um valor assumido baseado naqueles valores observados na literatura para um concreto refratário com a composição avaliada.

Para a estimativa do módulo de Weibull da composição avaliada, foram considerados alguns dados de resistência a flexão em quatro pontos obtidos anteriormente para este concreto em questão. O módulo de Weibull foi calculado por meio da linearização da distribuição de Weibull das resistências mecânicas obtidas a partir de 30 amostradas curadas a 50 °C/h, conforme Equação 5.12, onde P é a de probabilidade sobrevivência, m é o módulo de Weibull, σ é a tensão medida e σ_0 é a resistência característica, onde a probabilidade de sobrevivência é $1/e$. Para obter o módulo de Poisson basta calcular o coeficiente angular desta regressão, representado por **(a.1)**, enquanto o coeficiente linear é definido por **(b.1)**

$$\ln(\ln(\frac{1}{P})) = \underbrace{m}_{\text{(a.1)}} \ln(\sigma) - \underbrace{m \ln(\sigma_0)}_{\text{(b.1)}} \quad (5.12)$$

Com o objetivo de transformar a resistência mecânica obtida por meio do ensaio de flexão a três pontos em uma resistência mecânica triaxial (o mesmo modo em que a pressão de vapor atua dentro dos poros), foi realizada primeiro uma conversão da resistência mecânica a três pontos para uma resistência mecânica a tração uniaxial, a qual então foi convertida para a resistência a tração triaxial, conforme diagrama apresentado na Figura 5.4.

Por último, com o objetivo de comparar a pressão gerada no interior do concreto durante o aquecimento com a resistência mecânica triaxial, propõe-se o uso de um novo termo de comparação adimensional, chamado de **razão de resistência**, representado pela letra grega ξ , que é definido pela seguinte equação:

$$\xi = \frac{P_v}{\sigma_{tri}} \quad (5.13)$$

onde P_v é a pressão de vapor gerada em MPa e σ_{tri} a resistência mecânica à tração triaxial, também em MPa.

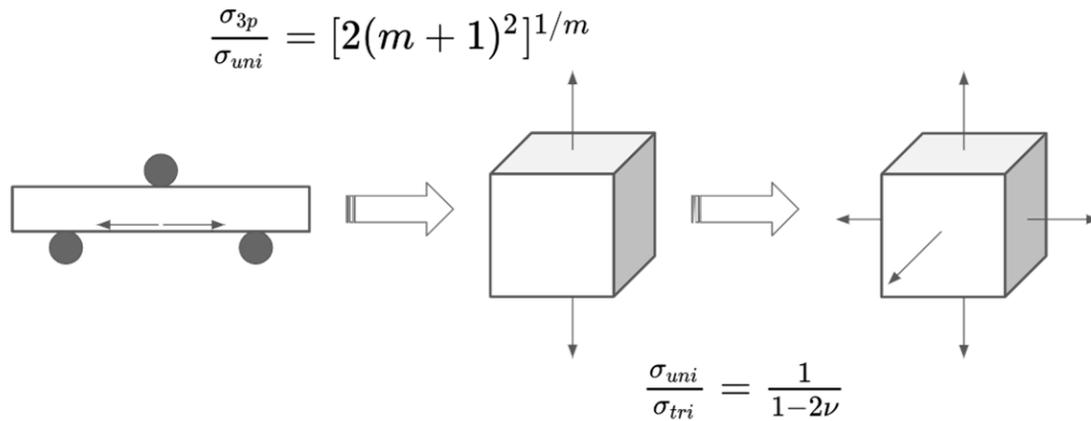


Figura 5.4: Diagrama de conversão: resistência mecânica a três pontos → resistência mecânica a tração uniaxial → resistência mecânica a tração triaxial.

5.3 Modelamento Numérico

O modelamento numérico que será utilizado neste projeto já foi implementado pelo próprio grupo de pesquisa [55, 56] e tem como origem o modelo de secagem de Gong et al. e Bažant et al. [12, 17, 40]. Diversas adaptações do modelo e das propriedades foram previamente implementadas com o objetivo de se avaliar um material real e comparar estes resultados com dados experimentais.

A formulação numérica é a mesma utilizada por Bažant, considerando as incógnitas T e P_v , e definida por:

$$\frac{dw}{dt} = \nabla \left(\frac{a}{g} \nabla P_v \right) + \frac{d\dot{w}}{dt} \quad (5.14)$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = C_a \frac{d\dot{w}}{dt} - C_w \frac{a}{g} (\nabla P_v \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5.15)$$

A condição de aquecimento imposto foi definida pela condição de contorno de Dirichlet (Equação 5.16) onde a temperatura é função de uma curva de aquecimento personalizada $T_{HUC}(t)$. Para condição de resfriamento foi considerada a Equação 5.17, uma condição de contorno de Robin que descreve o resfriamento por um termo convectivo e por um termo de radiação, onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e ϵ a emissividade. Ainda foi considerada a condição de con-

torno de troca mássica, definida pela Equação 5.18.

$$T_{\Gamma} = T_{HUC}(t) \quad (5.16)$$

$$n \cdot q = \underbrace{B_t(T) (T_{en} - T)}_{\text{termo convectivo}} - \underbrace{\sigma \epsilon (T_{en}^4 - T^4)}_{\text{termo radiativo}} \quad (5.17)$$

$$n \cdot J = B_w (P_v - P_{ven}) \quad (5.18)$$

As propriedades utilizadas nas simulações se dividirão em dois grupos: parâmetros do material e do modelo. As propriedades de *input* dos materiais avaliados foram: densidade, permeabilidade, condutividade térmica, capacidade calorífica, água quimicamente ligada e água de sorção. Dentre todas estas, apenas a última não foi medida, e sim adaptada da literatura, a partir da simplificação feita por Gong et al [40]. As equações abaixo apresentam as condições de contorno consideradas nas simulações.

$$w_1(h, T) = w_c \left(\frac{w_0}{w_c} h \right)^{1/m(T)} \quad (5.19)$$

$$w_2(h, T) = w_c(0.037(h - 1.04)) + \frac{w_0}{w_c} \left(1 - \frac{(T - 273.15)^2}{3.5 \cdot 10^5} \right) \quad (5.20)$$

$$w(h, T) = \begin{cases} w_1(h, T) & (h \leq 0.96 \text{ e } T < 374 \text{ }^\circ\text{C}) \\ w_2(h, T) & (h \geq 1.04 \text{ e } T < 374 \text{ }^\circ\text{C}) \\ w_1(0.96, T) + w_2(1.04, T) \frac{h-0.96}{0.08} & (0.96 < h < 1.04 \text{ e } T < 374 \text{ }^\circ\text{C}) \\ 0 & (T \geq 374\text{C}) \end{cases} \quad (5.21)$$

O foco das adaptações realizadas é permitir a modificação das frações de cimento w_c e água w_0 , ambas em $[\text{Kg}/\text{m}^3]$ com base na composição.

Os parâmetros de simulação, em conjunto com os do material podem ser encontrados resumidos na Tabela 5.2 junto com suas unidades dimensionais e valores selecionados, enquanto a função que descreve o calor latente de adsor-

ção da água pode ser encontrado na Equação 5.22.

Tabela 5.2: Propriedades e Parâmetros utilizados no modelo.

Propriedade	Unidade	Valor
Densidade, ρ	Kg m ⁻³	Aferido do Material
Permeabilidade, a	m s ⁻¹	Aferido do Material
Condutividade Térmica, k	W m ⁻¹ K ⁻¹	Aferido do Material
Água Quimicamente Ligada, w_d	Kg m ⁻³	Aferido do Material
Água Sorvida, w	Kg m ⁻³	Adaptado a partir de [40]
Calor Específico da Água, C_w	J Kg ⁻¹ K ⁻¹	4100
Calor Latente de Adsorção, C_a	J Kg ⁻¹ K ⁻¹	Descrito pela Equação 5.22
Coeficiente de Troca Térmica, B_t	W m ⁻² K ⁻¹	Depende da camada externa avaliada
Coeficiente de Troca Mássica, B_w	s m ⁻¹	$1 \cdot 10^{-6}$
Temperatura Ambiente, T_{en}	°C	25
Pressão de Vapor Ambiente, P_{ven}	Pa	2850
Emissividade, ϵ	-	Depende da camada externa avaliada

$$C_a = \begin{cases} 3.5 \cdot 10^{-5} & T \leq 374 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0 & T > \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.22)$$

5.3.1 FEniCS

FEniCS é uma plataforma que consiste em um conjunto de bibliotecas para Python e C++ originadas do FEniCS Project, com o objetivo de criar métodos matemáticos e processos de modelamento computacional automáticos para a resolução de equações diferenciais parciais (PDEs) por meio das técnicas de elementos finitos. O projeto surgiu em 2003 a partir da colaboração entre diversos pesquisadores sobre os mais diversos temas [42].

Sendo uma ferramenta *open-source*, isto é, de código acessível e modificável, essa foi utilizada para o desenvolvimento do modelo matemático e para a resolução dos problemas avaliados neste projeto.

Ela permite a criação de uma malha customizada em até três dimensões com diferentes tipos e graus de elementos, a definição dos problemas e condições de contornos, a solução do problema por meio de diferentes métodos, lineares ou não, além de ter compatibilidade na extração de dados com diversos outros

programas, como por exemplo o software de visualização Paraview [57].

Para inserir o problema matemático no programa é necessário realizar uma transformação da forma forte, a forma na qual as equações diferenciais parciais (PDEs) do problema se encontram, para a forma fraca por meio da multiplicação de cada termo por funções arbitrárias v_1 para transporte mássico e v_2 para transporte térmico, e integração no domínio de interesse [42, 43, 58, 59]. Seguindo estas etapas, se obtém as seguintes formas fracas que são adequadas ao uso no FEniCS, onde Ω é o domínio e Γ é o contorno. A partir disto, a formulação numérica pode ser inserida no código do modelo para a resolução dos problemas.

$$\int_{\Omega} \frac{dw}{dt} v_1 d\Omega + \int_{\Omega} \frac{d\dot{w}}{dt} v_1 d\Omega - \int_{\Omega} \frac{a}{g} \langle \nabla P, \nabla v_1 \rangle d\Omega - \int_{\Gamma} B_w (P_v - P_{ven}) v_1 d\Gamma = 0 \quad (5.23)$$

$$\int_{\Omega} \rho C_p \frac{dT}{dt} v_2 d\Omega + \int_{\Omega} k \langle T, v_2 \rangle d\Omega - \int_{\Omega} C_a \frac{dw}{dt} v_2 d\Omega + \int_{\Omega} C_w \frac{a}{g} \langle P_v, T \rangle v_2 d\Omega - \int_{\Gamma} \sigma \epsilon (T_{en}^4 - T^4) v_2 d\Gamma + B_t (T_{en} - T) v_2 d\Gamma = 0 \quad (5.24)$$

Durante as análises monocamadas no FEniCS, o setup de simulação acima não apresentou problemas, porém, a partir do momento que incluiu-se outras camadas, se tornava difícil para fazer o código funcionar. Para resolver este problema, atualizou-se a versão do FEniCS de `fenics 2019.1` para `fenics 2019.2-dev`, onde está incluída uma metodologia para resolução de problemas mistos, como é chamado este tipo de problema onde se há uma separação das submalhas para a resolução de mais de uma variável.

Com isto, foi possível separar os domínios de resolução do problema de balanço de massa somente para a camada de interesse, enquanto o balanço de energia pode ser realizado livremente para qualquer camada. Apesar de garantir resultados mais próximos de uma situação real, os custos computacionais aumentaram e o tempo de simulação aumentou de 1 a 2 ordens de grandeza.

5.3.2 Estimativa de Energia Consumida

Como um dos objetivos do trabalho é o cálculo do consumo energético para comparação entre as curvas avaliadas, desenvolveu-se diferentes metodologias para a qual este valor poderia ser calculado.

A primeira delas envolve em uma estimativa da entrada de fluxo energético próximo à face quente, que é calculada a partir do fluxo no primeiro elemento da geometria. Com base no histórico térmico dos dois pontos deste elemento, a energia de entrada E_{input} é calculada a partir da integração do fluxo q no tempo ($q = -k\nabla T$). O método de integração para o cálculo deste valor pode ser encontrado nas equações 5.25 and 5.26, onde k é a condutividade térmica como função da temperatura, T a temperatura, t o tempo, x o espaço e Δx a distância entre os dois pontos do elemento, valor que depende da espessura da camada monolítica.

$$Q = \int_{\Omega} -k\nabla T \, d\Omega = \int_{\Omega} -k \left(\frac{T_{el1} + T_{el2}}{2} \right) \frac{T_{el1} - T_{el2}}{\Delta x} d\Omega \quad (5.25)$$

$$E_{input} = \int_{t_0}^{t_f} Q \, dt = \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} -k\nabla T \, d\Omega \, dt \quad (5.26)$$

A segunda metodologia desenvolvida consiste-se no cálculo e somatória de cada componente para cada camada, baseado nas Equações 5.15 e 5.14. Para a camada monolítica, que consiste-se nos 100 primeiros elementos, tanto os componentes térmicos (Equação 5.27) quanto de pressão (Equação 5.28) foram calculados de uma maneira similar à primeira metodologia, enquanto para as outras camadas, com 30 elementos cada, apenas a contribuição térmica foi levada em consideração, visto que estes materiais são considerados secos. Nas equações a seguir, E_{st} é a energia armazenada na camada monolítica e E_{dc} é a energia consumida por evaporação e dessorção da água

$$E_{st} = \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} \rho C_p \frac{dT}{dt} \, d\Omega \, dt \quad (5.27)$$

$$E_{dc} = \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} -C_a(T) \frac{dW}{dt} d\Omega dt \quad (5.28)$$

E finalmente, também se calculou a energia que é liberada pela camada fria, E_{cf} (Equação 5.29). Por fim, a quantidade de energia total consumida pelo processo E_{total} pode ser calculada conforme Equação 5.30.

$$E_{cf} = \int_{t_0}^{t_f} B_t(T)(T_{en} - T) - \sigma\varepsilon(T_{en}^4 - T^4) dt \quad (5.29)$$

$$E_{total} = E_{st} + E_{dc} + E_{cf} \quad (5.30)$$

Por último, a terceira metodologia consiste-se na extração direta dos valores do fluxo térmico e de cada componente energética do sistema em tempo real durante a simulação através da função `assemble()`, do FEniCS, que integra cada componente no domínio espacial adequado para o cálculo do fluxo, que então é salvo e integrado no tempo para a obtenção da energia total consumida.

As três metodologias foram comparadas e observou-se que a diferença entre o valor final delas é menor que 3%. Por isso, optou-se pelo uso da última metodologia para o cálculo energético visto que ela não requer tantos cálculos manuais quanto as outras. Na seção de Resultados serão discutidos os resultados obtidos durante tais comparações.

5.4 Setup das Simulações

As simulações se encontram em um arquivo com a extensão `.py` que é chamado junto com os parâmetros que se deseja analisar no material: diferentes espessuras, curvas de aquecimento, se há permeabilidade na face fria, etc.

O programa, então, realizará as simulações requeridas, salvando os resultados em pastas separadas para cada simulação, que são nomeadas de acordo com os parâmetros utilizados para fácil identificação. Dentro de cada pasta se encontra um arquivo com o histórico de pressão de vapor e um histórico com o valor de temperatura para cada ponto da geometria, ambos arquivos em formato `.CSV`.

Um código de pós-processamento realiza o cálculo dos valores de água quimicamente ligada, água livre e razão de resistência com base nos dois arquivos descrito e salva um histórico com estes valores em arquivos separados, todos também em formato `.csv`.

Abaixo será melhor descrita a geometria de interesse utilizada e as condições de contorno.

5.4.1 Aquecimento Contínuo

A geometria de interesse da simulação foi baseada em uma panela de aço. Foi preparada uma malha unidimensional com as camadas utilizadas no trabalho de Santos [60, 61], no *setup 2*, conforme Figura 5.5.

A avaliação do campo de pressão ocorre somente na camada de trabalho, que possui concreto refratário 5CAC, enquanto as outras camadas foram avaliadas, em conjunto com a camada de interesse, apenas termicamente. As propriedades utilizadas para as camadas avaliadas termicamente foram retiradas de [60, 61], assim como as condições de contorno de resfriamento, as quais podem ser encontradas na Tabela 5.3. A camada a ser avaliada é composta a partir do material 5CAC e possui uma espessura variável entre 10cm, 15cm, 20cm e 30cm. Serão utilizadas taxas de aquecimento de 10, 20, 50, 100, 150 e 200 °C/h, com uma temperatura inicial de 25°C e final de 825°C, enquanto a pressão de vapor interna inicial, para todos os casos, estará equilibrada com a do ambiente externo.

Além disto, também foram consideradas as propriedades de condutividade térmica (Figura 6.1) e permeabilidade (Figura 6.3) como função da temperatura ou constante. A interface entre a camada de interesse e a camada permanente será considerada permeável, isto é, a água pode sair do concreto por esta interface.

5.4.2 Curvas de Aquecimento de Maior Complexidade

Uma vez obtidos os resultados do aquecimento contínuo, a configuração das próximas simulações seguiu o modelo proposto, com as seguintes mudanças para cada diferente etapa.

Tabela 5.3: Propriedades das camadas II, III e IV, adaptado de [60].

Material	Propriedade	Temperatura [°C]	Valor
Camada II	ρ [kg m ⁻³]	-	2660
Alta Alumina (98.7% Al₂O₃)	k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	400	2.60
		800	2.10
		1200	2.00
Tijolo			
Camada Permanente	C _p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	200	890
		700	1060
		1200	1144
Camada III	ρ [kg m ⁻³]	-	510
Alumina Isolante (80.0% Al₂O₃)	k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	250	0.15
		800	0.25
		1350	0.34
Placa de Fibras			
Camada Isolante	C _p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	-	1047
Camada IV	ρ [kg m ⁻³]	-	7840
Aço Carbono	k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	200	47.34
		350	42.34
		500	37.35
Placas	C _p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	200	530
		350	539
		500	666
		-	0.6
	ε	-	

Curvas com um patamar de temperatura:

1. Espessuras da camada de trabalho: 10, 20 e 30 cm.
2. Temperatura final: 925 °C ao invés de 825 °C.
3. Taxas de aquecimento: 50, 75 e 100 °C/h.
4. Patamares: a 150, 180, 220 e 350 °C, com 30h de duração.
5. Condutividade térmica: função da temperatura.
6. Permeabilidade: função da temperatura.

Curvas complexas:

1. Espessuras da camada de trabalho: 10, 20 e 30 cm.
2. Temperatura final: 825 °C.
3. Taxas de aquecimento: 75 °C.

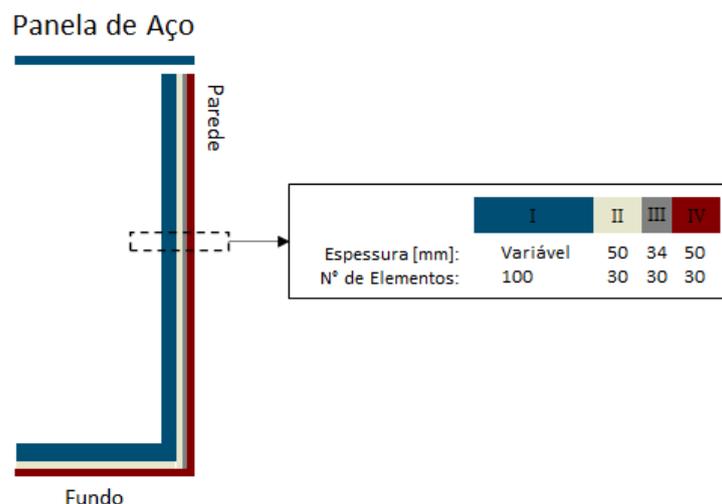


Figura 5.5: Disposição das camadas da panela de aço avaliadas, figura adaptada a partir de [60].

4. Patamares: Variável.
5. Condutividade térmica: função da temperatura.
6. Permeabilidade: função da temperatura.

5.5 Otimização das Curvas de Aquecimento

A etapa de otimização das curvas de secagem por meio do uso das ferramentas de simulação no escopo do mestrado foi dividida em três partes: i) simulação de curvas de aquecimento contínuo ii) simulação de curvas de aquecimento com somente um patamar e iii) simulação de curvas mais complexas.

A curva de aquecimento poligonal (a mais básica encontrada na indústria) possui dois diferentes estágios, que podem se repetir inúmeras vezes: aquecimento contínuo e patamar de temperatura. Com o objetivo de avaliar a influência das taxas de aquecimento nos corpos simulados, foram efetuadas diversas simulações variando a espessura da camada do revestimento monolítico. Uma vez conhecido o efeito deste parâmetros, foi considerada uma taxa de aquecimento fixa e o uso de patamares, com tempos e temperaturas variáveis.

Após esta etapa, o ajuste manual dos parâmetros das curvas poligonais (taxa de aquecimento, temperatura e tempo de patamar) foi realizado a fim de se reduzir o tempo de secagem total enquanto se mantém uma razão de resistência

abaixo de 0,8, valor adotado como fator de segurança. Como metodologia de otimização, foi introduzido o cálculo energético como um dos diferentes parâmetros de interesse para o usuário final.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Propriedade dos Materiais

As propriedades medidas para a composição 5CAC se encontram na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Propriedades medidas para a composição 5CAC.

Propriedade	Valor
Condutividade térmica [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	10.65 a 35°C ou variando com a temperatura Figura 6.1
Capacidade Calorífica [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]	790
Densidade [$kg \cdot m^3$]	3174
Permeabilidade [$m \cdot s^{-1}$]	$1.084 \cdot 10^{-10}$ a 100°C ou variando com a temperatura Figura 6.3
Resistência Mecânica [MPa]	Variando com a temperatura Figura 6.5
Módulo de Poisson [-]	0.15

Assumiu-se valores constantes, ou não, de condutividade térmica e permeabilidade, com o objetivo de se avaliar a influência da simplificação destas propriedades. A aproximação da curva de condutividade térmica foi realizada com base em resultados de ensaios entre 35°C e 800°C, enquanto que o valor assumido como constante foi o aquele calculado na temperatura de 25°C. A Figura 6.1 indica os valores utilizados da condutividade térmica do concreto 5CAC nas simulações.

O valor medido da permeabilidade ocorreu após secagem do material a 110°C por um período de 24 horas. Porém, visto que este valor não representa os fenômenos dinâmicos ocorrentes ao variar-se a temperatura, realizou-se a extrapolação dele, que será explicada no tópico a seguir.

6.2 Permeabilidade Dinâmica

Uma vez obtida a permeabilidade do material 5CAC a 110°C, $k_1 = 1.108 \cdot 10^{-10}$ m/s, extraiu-se os valores de vazão do fluido em função da temperatura obtidos no trabalho de C. Ribeiro [54] para a composição com 2% de CAC, a qual foi seca a

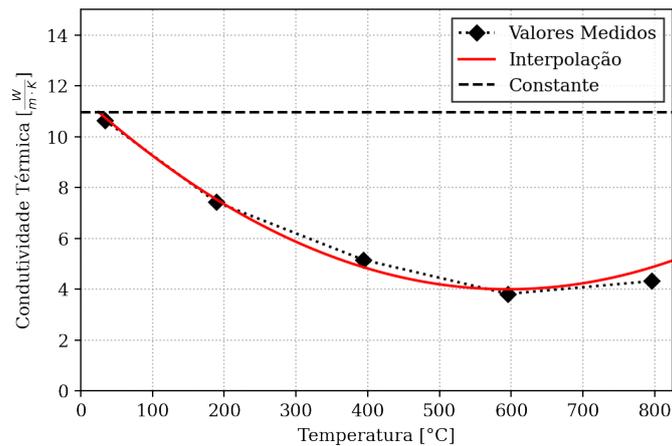


Figura 6.1: Valores de condutividade térmica para o material.

110°C por 48h e aquecida numa taxa de 5°C/h. Com base nestes resultados, extrapolou-se uma curva aproximada do comportamento observado (Figura 6.2).

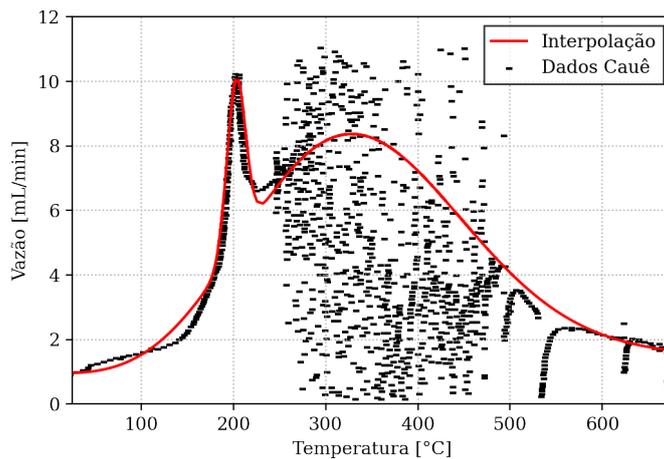


Figura 6.2: Interpolação dos dados obtidos em [54].

Após realizar a interpolação dos dados, seguiu-se a ordem de trabalho mencionada na seção 4.2.2, normalizando os valores de vazão de acordo com a Equação 5.2, para então multiplicar-se este valor por aquele da permeabilidade obtida do material 5CAC a 110°C, resultando no perfil de permeabilidade dinâmica a ser utilizado no conjunto de simulações (Figura 6.3). É importante ressaltar que esta propriedade não representa propriamente o material 5CAC, uma vez que o ajuste dela foi realizado com base nas vazões medidas para um material similar, porém ela indica as transformações físico-químicas que ocorrem durante os processos dinâmicos da secagem.

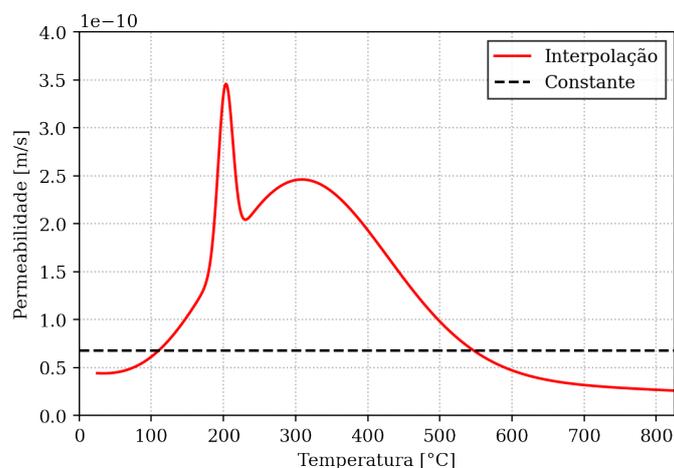


Figura 6.3: Valores de permeabilidade em função da temperatura para o material.

6.3 Resistência Mecânica

Inicialmente mediu-se a resistência mecânica no modo de flexão em quatro pontos para um total de 30 amostras da composição avaliada ao ar (5CAC curado por 24h e seco a 110°C por 24h), com o objetivo de se extrair o módulo de Weibull. A Figura 6.4 demonstra a linearização e a obtenção do valor do módulo de Weibull, o qual foi de 10.1.

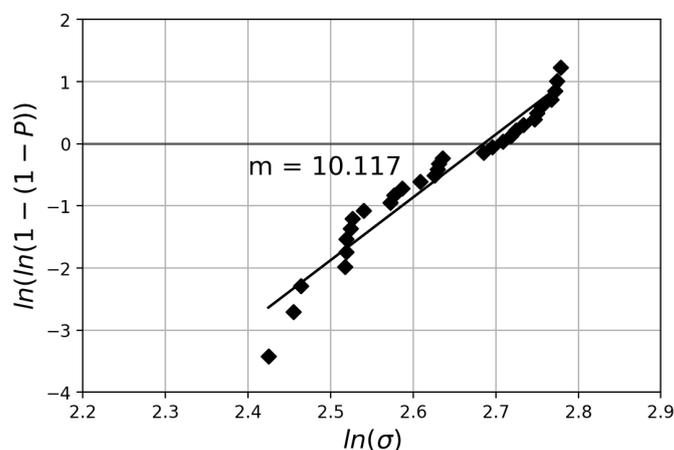


Figura 6.4: Cálculo do módulo de Weibull para a composição.

O outro parâmetro necessário para a conversão da resistência à flexão em três pontos para tração triaxial é o coeficiente, que foi assumido como 0.15 com base na literatura e experimentos anteriores do grupo.

Por fim, mediu-se os valores de resistência mecânica de corpos de prova do concreto 5CAC curados a 30°C/24h, secos a 110°C/24h ou calcinados entre 150

e 800°C por 5h nas temperaturas escolhidas. A Figura 6.5 apresenta os resultados para o ensaio de flexão em três pontos (diamantes pretos), a conversão da resistência em três pontos para resistência à tração uniaxial (diamantes azuis), para então ser obtida a resistência mecânica à tração triaxial (diamantes vermelhos) e interpolar este valor para a obtenção de uma curva contínua que será utilizada na Equação 5.13, para o cálculo da razão de resistência.

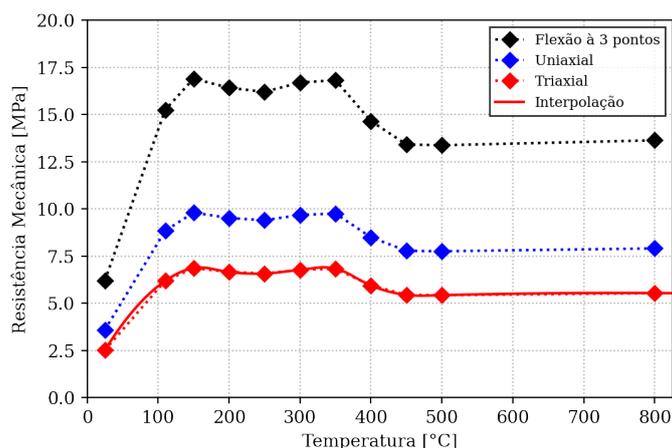


Figura 6.5: Conversão da resistência mecânica.

6.4 Cálculo Energético

Para fim de comparação entre as curvas em etapas do estudo, desenvolveu-se três diferentes metodologias para a computação do consumo energético dos processos, como já descrito anteriormente.

Um dos casos de curva de aquecimento foi estabelecido para servir de base do equacionamento, e os parâmetros deste aquecimento são: taxa de aquecimento de 100°C/h, patamar a 350°C com 30 horas de duração, temperatura de início de 25°C e temperatura de fim de 825°C.

A primeira metodologia consiste no cálculo do fluxo de calor no primeiro elemento, porém também se realizou o cálculo no último elemento para visualização da quantidade de energia que sai do sistema pela face fria. A Figura 6.6 nos mostra a quantidade de energia acumulada no processo em função do tempo, onde é possível se destacar a presença do patamar pela seção com uma menor taxa de variação de energia. A diferença entre a energia de entrada e de saída, isto é, a quantidade total de energia armazenada pode ser visualizada no gráfico à

direita b) e pela área hachurada no gráfico a esquerda a).

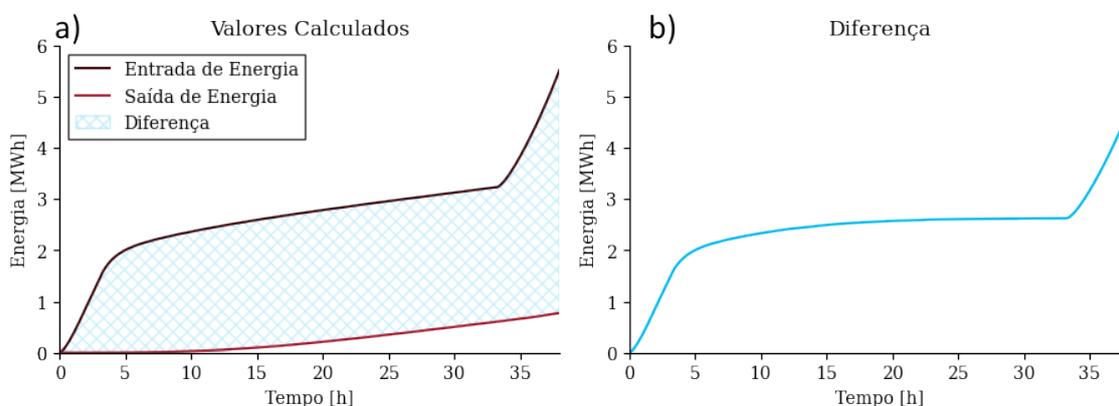


Figura 6.6: Cálculo da energia consumida por meio da integração do termo $q = -k\nabla T$ no primeiro elemento, na face quente, e no último elemento, na face fria (a). A diferença entre os dois valores é apresentada no gráfico à direita (b).

A segunda metodologia discutida é baseada no cálculo individual de cada componente térmica na simulação, considerando os termos de consumo e/ou armazenagem energética na Equação 5.15, utilizando como base o histórico térmico do material. Para isto, integrou-se em cada subdomínio (camada) as componentes correspondentes (térmicas e termohídricas para a camada de trabalho, e puramente térmica para as outras) para se obter o fluxo térmico que foi integrado no tempo da simulação. A Figura 6.7 ilustra a contribuição dos diferentes componentes. É notável a semelhança entre o formato final da curva somada, na Figura 6.7b, com a curva de Entrada de Energia, na Figura 6.6a, uma vez que ambas calculam o mesmo valor. Ignorando a contribuição da saída de energia (área azul), nota-se também que o perfil é similar àquele da diferença entre os valores de entrada e saída de energia da primeira metodologia (Figura 6.6b).

Então, integrou-se os valores extraídos diretamente do FEniCS. Cada componente individualmente, e eles foram plotados de maneira similar ao gráfico anterior, como mostrado na Figura 6.8. Para facilitar a comparação, o gráfico à direita b) da Figura 6.7 foi incluso na figura. Inicialmente nota-se a semelhança entre os valores. Para melhor efeito de comparação, resolveu-se calcular a diferença entre a energia final do processo para ambas metodologias, conforme Figura 6.9, e com isso foi possível observar que a diferença entre os processos é de aproximadamente 0.17 MWh, ou seja, 3.2%.

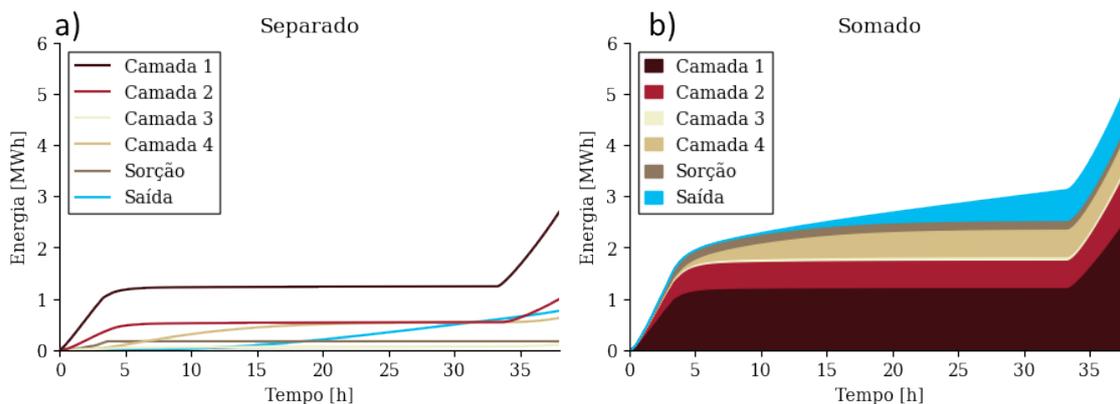


Figura 6.7: Contribuição de cada componente energético do cálculo, a) mostra o comportamento individual, enquanto em b) se tem a soma dos mesmos, sendo a área colorida indicada pela legenda representando o valor total da contribuição de cada componente.

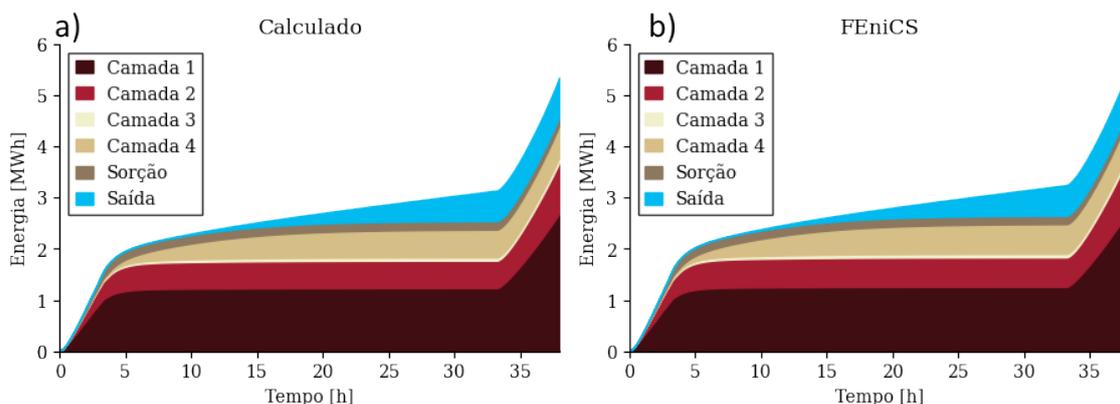


Figura 6.8: a) Contribuição dos componentes calculados de forma manual e b) mostra a contribuição de cada componente, integrada a partir dos fluxos térmicos extraídos do FEniCS.

Por fim, comparou-se os resultados extraídos do FEniCS com aqueles obtidos na primeira metodologia, conforme Figura 6.10. A diferença entre os resultados foi ainda menor, por volta de 0.1%, e, com isso, tem-se que a maior diferença entre as metodologias de cálculo energético foi por volta de 3.2%, indicando que, uma vez que a diferença é pequena, a utilização do método depende do usuário final. É importante ressaltar o nível de discretização nos cálculos que também possam ter influenciados na obtenção do valor de 3.2%, uma vez que os cálculos manuais foram realizados de forma "grosseira" para validar os valores obtidos. Para este trabalho, optou-se pela integração dos valores extraídos da simulação, uma vez que a quantidade de cálculos finais é menor quando comparado às

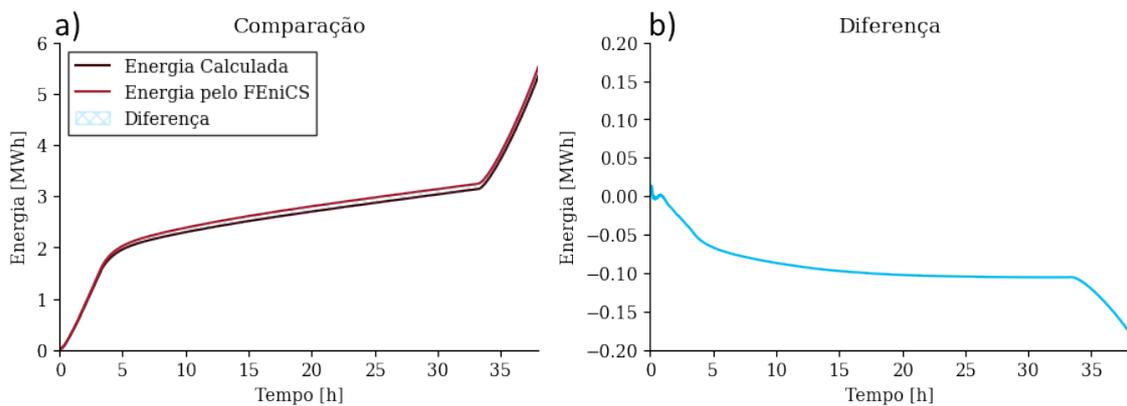


Figura 6.9: Cálculo da diferença dos valores de energia consumida no processo, obtidos pela segunda e terceira metodologia.

outras formas de estimativa.

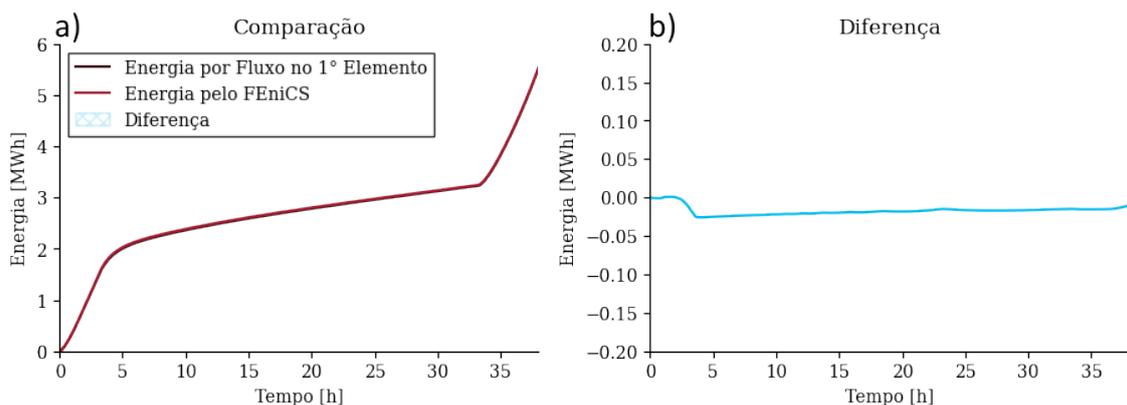


Figura 6.10: a) Comparação entre primeira e terceira metodologia, a b) diferença entre os valores calculados é de aproximadamente 0.1%.

6.5 Simulações

6.5.1 Aquecimento Constante

O primeiro caso avaliado foi o de aquecimento com taxa de aquecimento constante, para se entender os fenômenos que ocorrem durante a secagem, tais como: a influência das propriedades constantes ou em função da temperatura e o efeito tanto da espessura do corpo quanto da taxa de aquecimento no valor e posição da maior razão de resistência.

Na camada monolítica foi aplicada uma temperatura equivalente a uma curva de aquecimento contínuo iniciando a 25 °C e finalizando a 825 °C com taxa de aquecimento constante variando entre 10 °C/h, 20 °C/h, 50 °C/h, 100 °C/h, 150 °C/h

e 200 °C/h.

As Figuras 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14 trazem os perfis de pressão máxima para cada uma das simulações rodadas. Cada conjunto de gráficos em uma figura única possuem as mesmas condições de propriedades constantes ou variáveis, sendo a espessura a variável que diferencia um gráfico do outro.

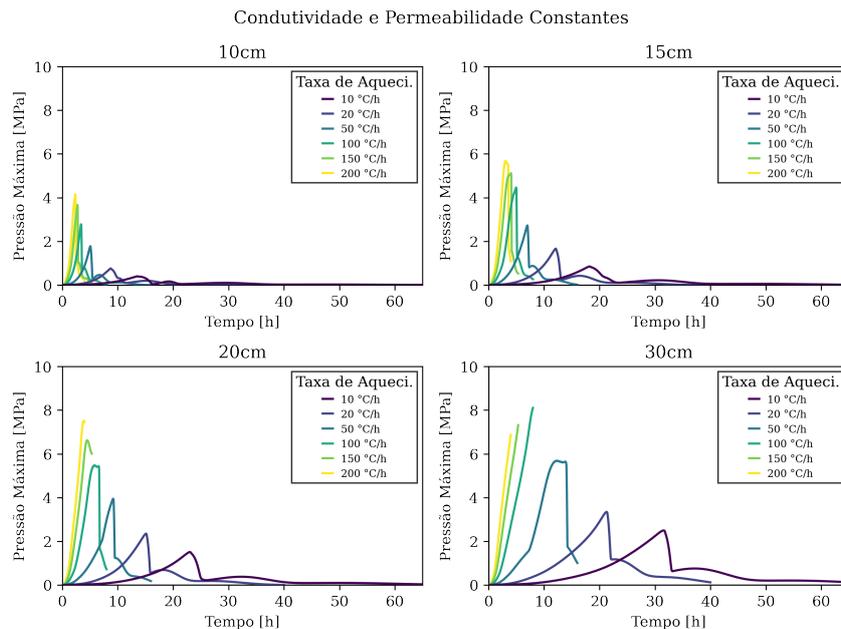


Figura 6.11: Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade são consideradas constantes.

As curvas de pressão que não finalizam em um valor próximo a 0 MPa representam casos onde não foi possível secar o material por completo até o fim do aquecimento contínuo, fato que ocorreu com as amostras cuja espessura da camada de interesse era elevada e/ou a taxa de aquecimento aplicada era alta.

Comparando os gráficos dentro de cada conjunto apresentado nas figuras, nota-se um aumento da pressão máxima de vapor em função da espessura. Observando os conjuntos, pode-se observar algumas tendências da evolução da pressão de vapor, como maiores pressões quando se considera as propriedades constantes, porém é importante ressaltar que estes resultados não incluem a resistência mecânica do material.

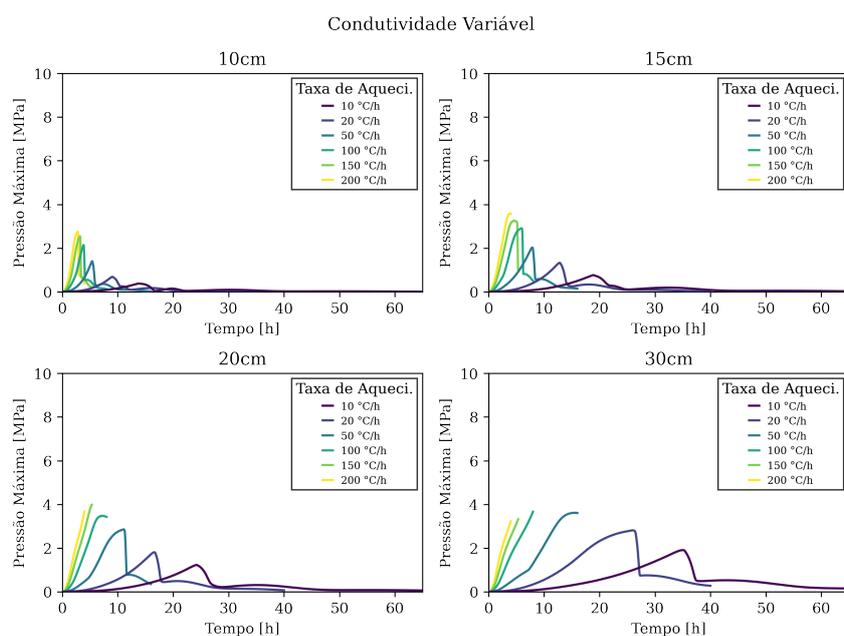


Figura 6.12: Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade é considerada constante e a condutividade varia com a temperatura.

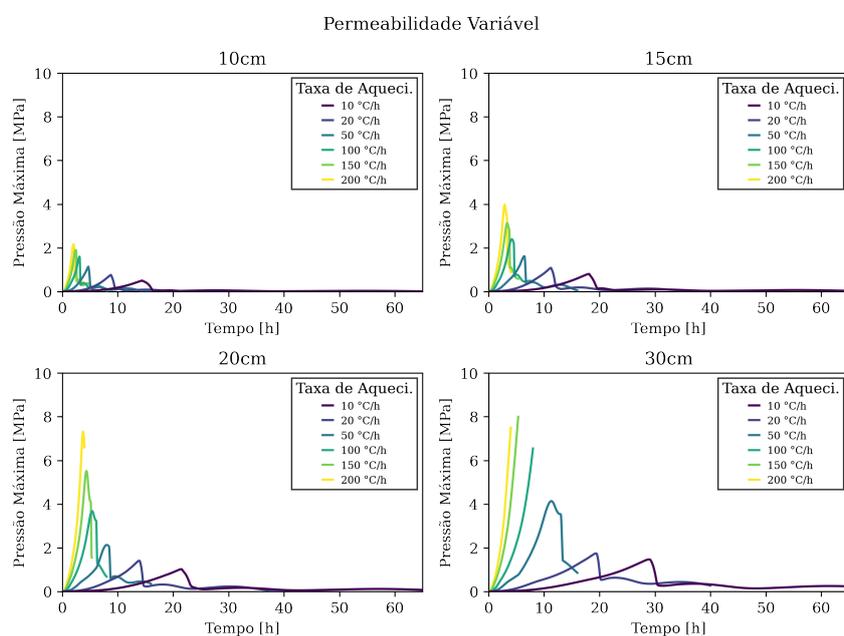


Figura 6.13: Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a condutividade é considerada constante e a permeabilidade varia com a temperatura.

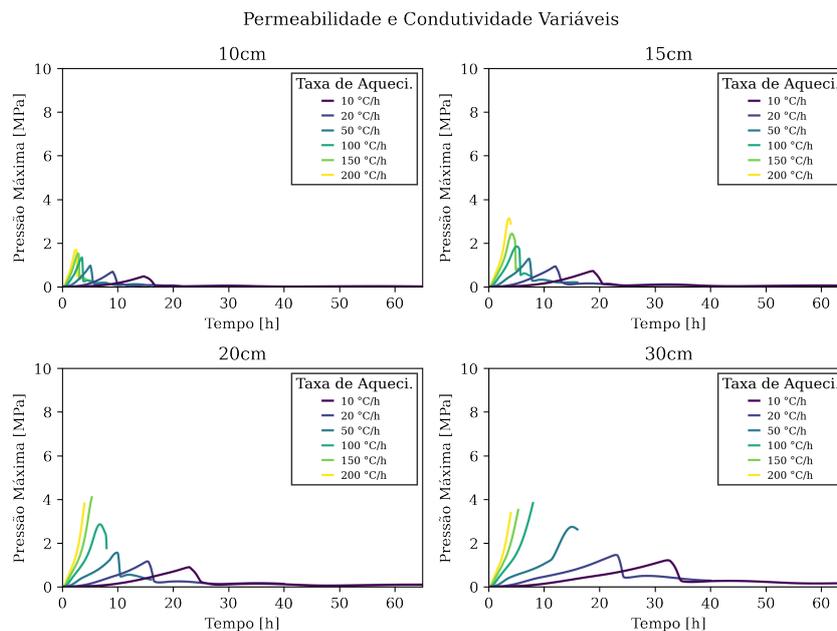


Figura 6.14: Valores de pressão de vapor máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade variam com a temperatura.

Para isto, foi feito uso da Equação 5.13 em conjunto com os valores de resistência mecânicos calculados na Figura 6.5. Assim, para cada valor de pressão analisado, é computada a resistência mecânica na temperatura local, que servirá como a tensão de fratura para o cálculo da razão de resistência. Os resultados abaixo (Figuras 6.16, a 6.18) reportam a razão de resistência para as simulações anteriores.

A partir deste conjunto de dados é possível observar que as curvas de aquecimento possuem um risco de fratura moderado (região amarela) ou grave (região vermelha) com base no valor de razão de resistência, sendo o valor de $\xi = 0.8$ escolhido como um fator de segurança, visto que existe uma variabilidade na resistência mecânica dos materiais.

Considerar as variáveis como constantes (que será denominado caso padrão) é a simplificação mais comum encontrada na literatura. Observando todos os gráficos demonstrados, observa-se que esta não parece ser uma estratégia segura, visto que variações nas propriedades podem resultar em grandes diferenças nos valores e formatos dos gráficos. No entanto, tais considerações trariam dificuldades em posteriormente alterar ou trabalhar curvas de aquecimento

reais, pois impediriam a alteração de tempo de patamares de uma forma segura.

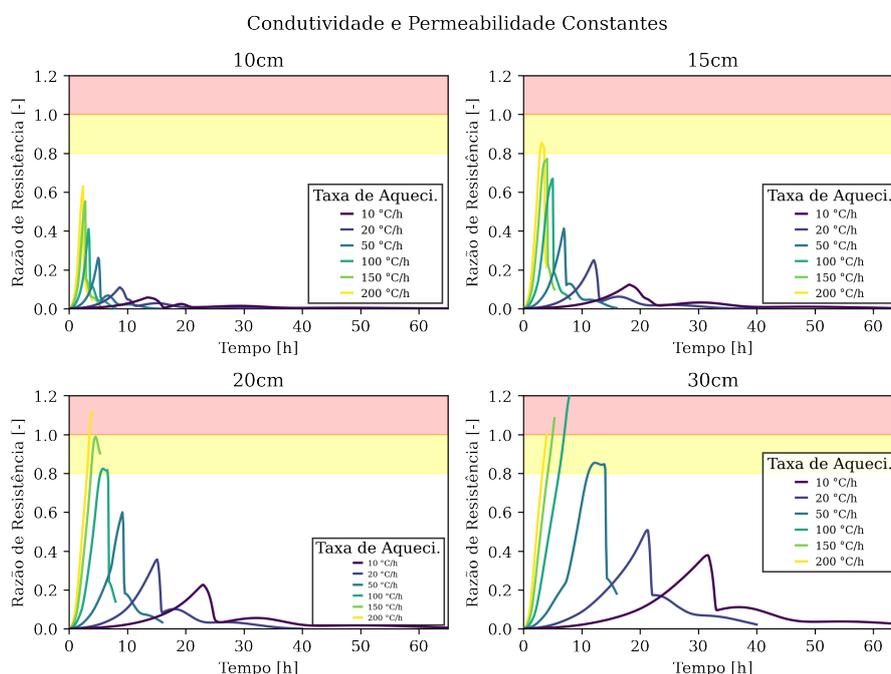


Figura 6.15: Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade são consideradas constantes.

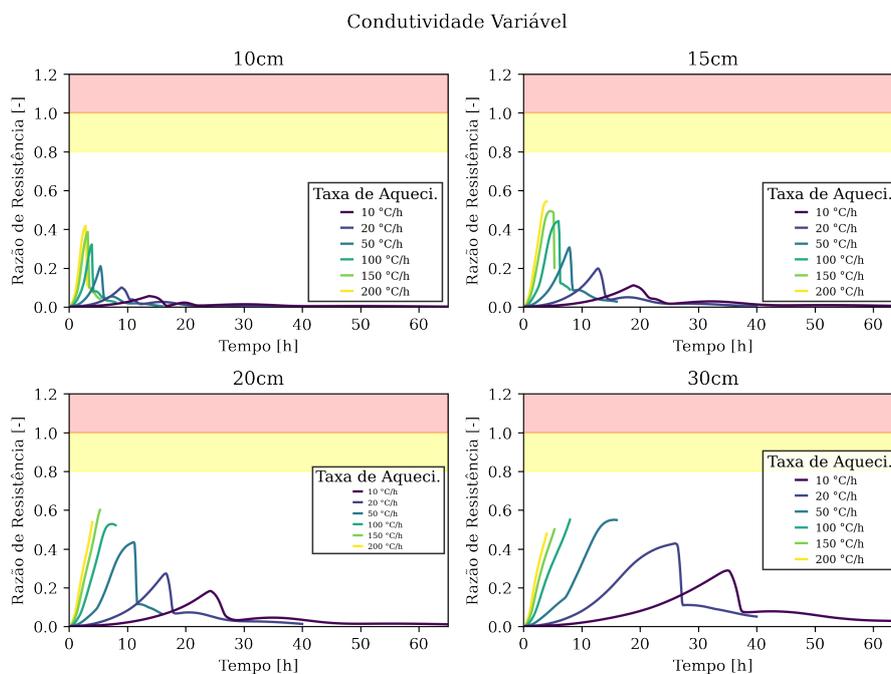


Figura 6.16: Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade é considerada constante e a condutividade varia com a temperatura.

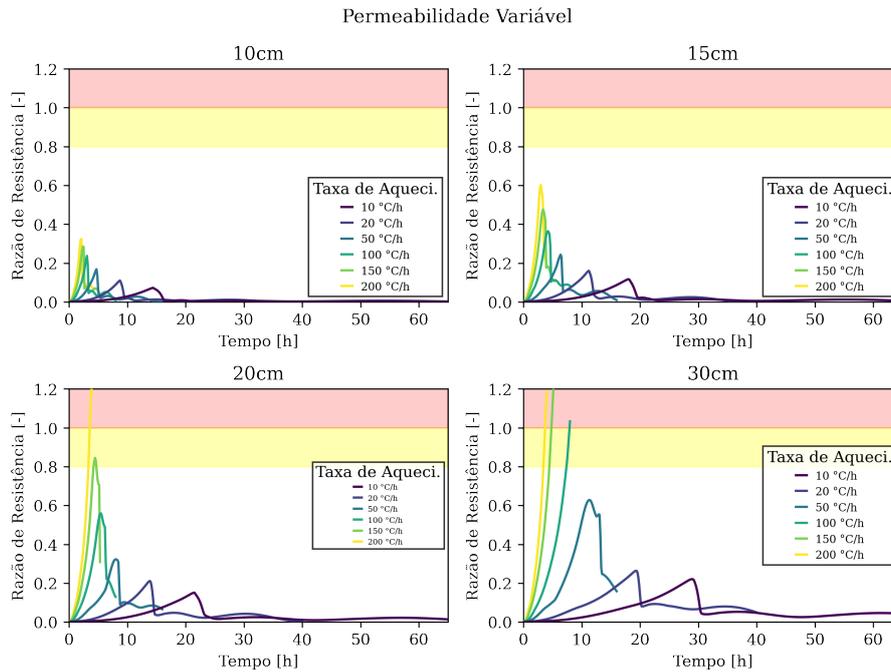


Figura 6.17: Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a condutividade é considerada constante e a permeabilidade varia com a temperatura.

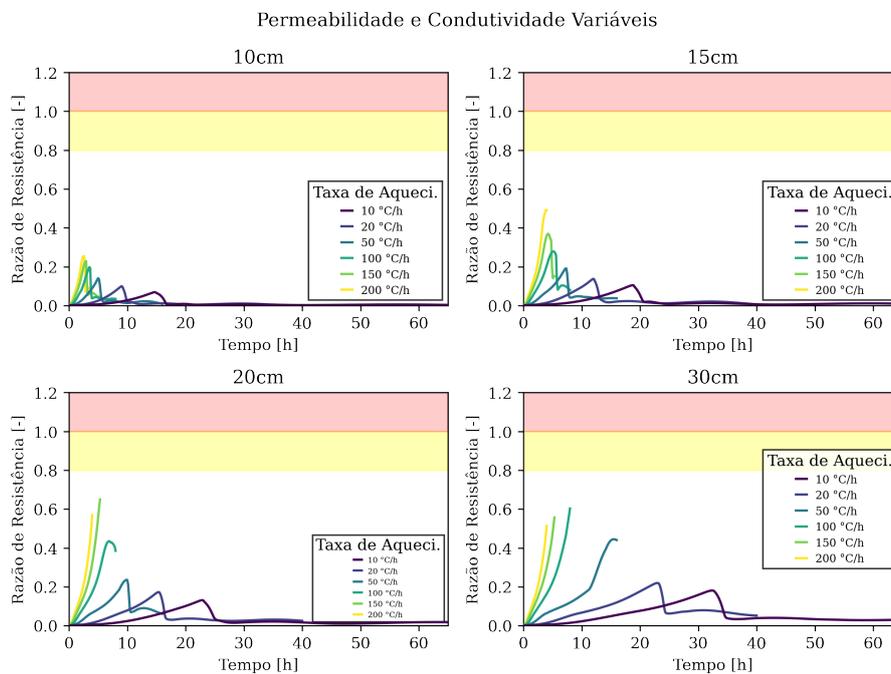


Figura 6.18: Valores de razão de resistência máxima em função do tempo para as simulações onde a permeabilidade e a condutividade variam com a temperatura.

Ao considerar a permeabilidade variável e a condutividade constante, lida-se

com resultados cujos valores são menores do que o caso padrão para menores taxas e espessuras, enquanto para maiores taxas e espessuras, os valores obtidos na verdade são maiores.

Num primeiro momento isso soa contraintuitivo, visto que a permeabilidade variável possui um valor maior que a permeabilidade constante, porém isto só é verdade para temperaturas entre 110°C e 547°C. Adicionalmente, caso o corpo de prova esteja submetido a temperaturas abaixo de 110°C, a permeabilidade efetiva na verdade é muito menor do que o caso padrão. Já a redução da permeabilidade acima da temperatura de 547°C não teria grande efeito, visto que, localmente, nesta temperatura o material já estaria seco dependendo da espessura considerada.

Observando a Figura 6.19, nota-se que para baixas taxas de aquecimento, independente da espessura, as temperaturas mínimas observadas na camada de interesse são muito acima da temperatura “crítica” da permeabilidade dinâmica (110°C), enquanto que para altas taxas de aquecimento, quanto maior a espessura, menor é a temperatura medida, chegando a valores inferiores a 100°C se observarmos a espessura de 30cm.

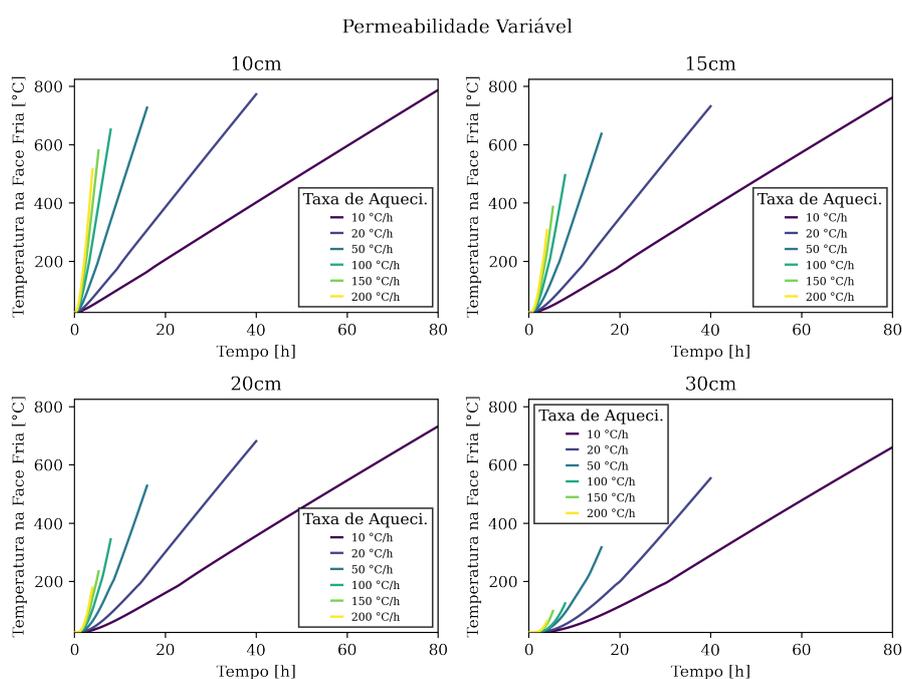


Figura 6.19: Temperatura na face fria da camada de interesse em função da taxa de aquecimento, isto é, na interface com a camada permanente.

Isso nos mostra que provavelmente uma parte do corpo de prova, não só a face fria, se encontra em temperaturas inferiores da temperatura crítica. Para analisar isto, a Figura 6.20 nos traz a fração de elementos (análogo à porcentagem volumétrica) do corpo de prova cuja temperatura medida para cada momento está abaixo de 110°C.

Assim como esperado, maiores taxas de aquecimento e espessura contribuíram para que grande parte dos elementos estivessem ainda em baixa temperatura devido ao gradiente térmico existente dentro do próprio material.

Como mencionado anteriormente, como a permeabilidade abaixo de 110°C é menor que o caso padrão, podemos concluir que o aumento das pressões de vapor para estes casos que possuem um elevado gradiente térmico (a face quente se encontra a 825°C no final de cada simulação) ocorre devido à menor permeabilidade em baixas temperaturas. Já o oposto, isto é, menores pressões para menores taxas e espessuras, ocorre devido ao fato de que a permeabilidade efetiva no corpo de prova é maior que o caso padrão visto que as temperaturas observadas são acima de 110°C para a maior parte da simulação.

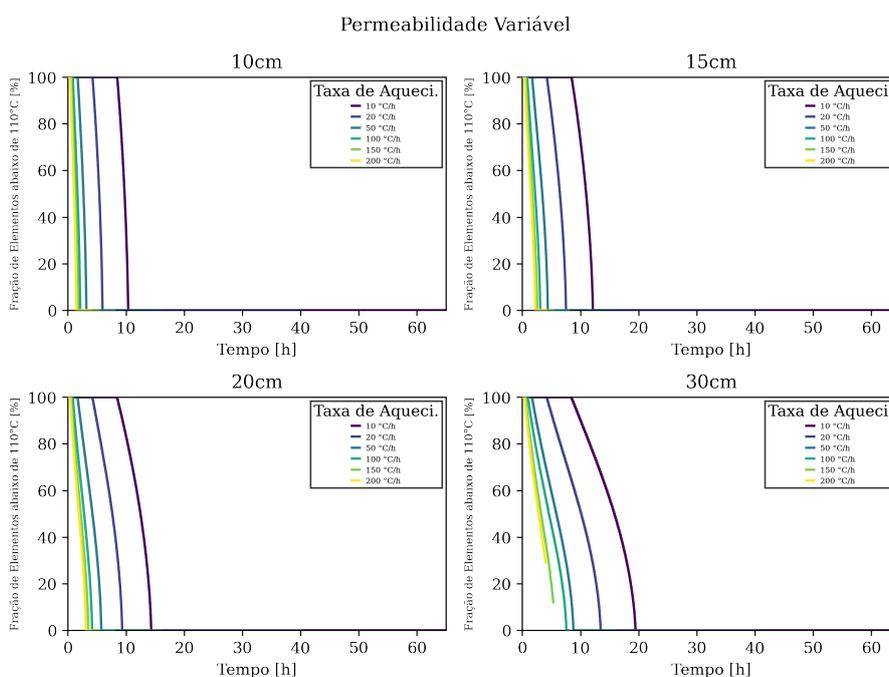


Figura 6.20: Porcentagem dos elementos da malha da camada monolítica que se encontram abaixo de 110°C.

Quando temos a condutividade térmica variável, os valores de razão de resistência são menores do que aqueles apresentados no caso padrão, uma vez que a condutividade térmica em função da temperatura é menor ou igual àquela considerada constante e, ao se reduzir o valor de tal propriedade, introduz-se um maior gradiente térmico que implica em uma maior fração do corpo em menores temperaturas, como demonstrado pelas Figuras 6.21 e 6.22.

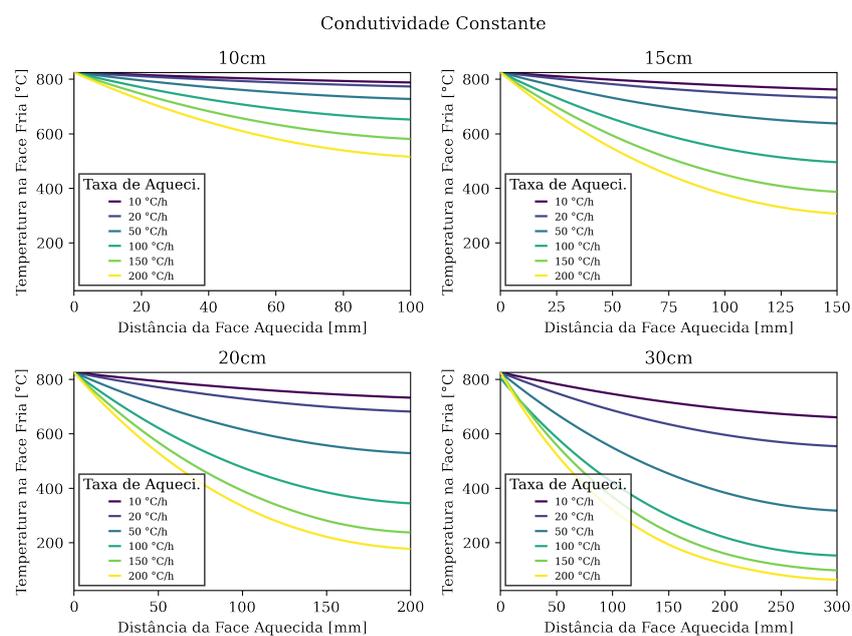


Figura 6.21: Perfil térmico no final das simulações considerando ambas propriedades constantes para diferentes espessuras e taxas de aquecimento.

Ambas imagens apresentam casos onde a permeabilidade é constante e a única variável é a condutividade térmica. Os resultados da primeira figura são os perfis térmicos relacionados ao conjunto padrão (Figura 6.21), enquanto o segundo conjunto nos mostra a condutividade variável (Figura 6.22).

Visto que não foi variada a permeabilidade com a mudança de temperatura, uma maior região com menor temperatura resultaria em menores valores de razão de resistência final, uma vez que a pressão de vapor da água é uma função da temperatura de acordo com a equação de Antoine (Equação 4.1).

Por último, tem-se o caso onde ambas as propriedades (condutividade térmica e permeabilidade) variam com a temperatura. Isso implica que as simulações resultantes tem as nuances da variação de cada uma delas: a diminuição

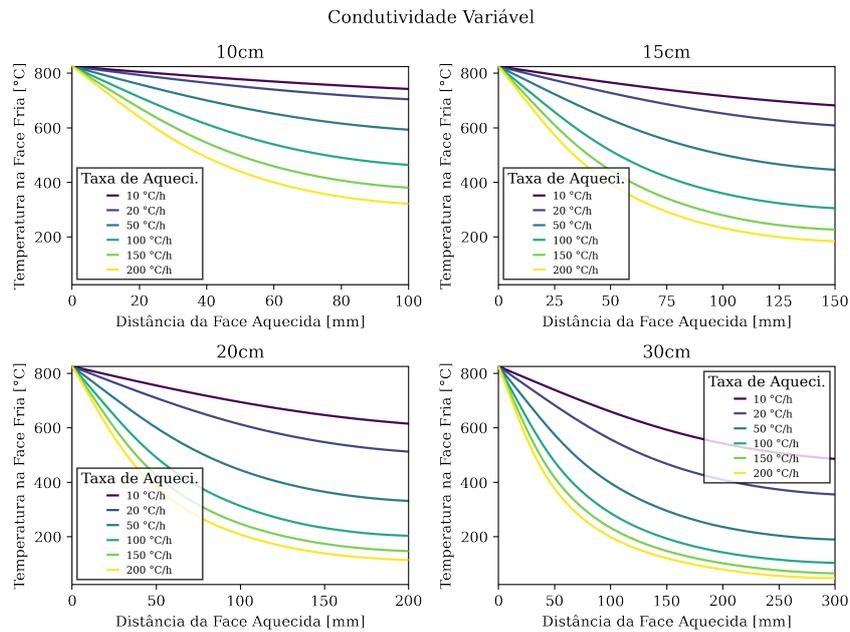


Figura 6.22: Perfil térmico no final das simulações considerando somente a condutividade variável para diferentes espessuras e taxas de aquecimento.

da condutividade efetiva média (vide Figura 6.1) implicará em um maior gradiente térmico e menores temperaturas finais na face fria, enquanto que a variação da permeabilidade gerará maiores valores de pressão quando se possui um grande volume do material a temperaturas abaixo de 110 °C.

Quando combina-se os dois fatores, é de se esperar que as pressões para maiores taxas de aquecimento e espessuras de parede sejam também maiores e com uma maior dificuldade de secagem. O primeiro ponto, de que as pressões de vapor sejam superiores, não pode ser observado nos gráficos da Figura 6.18 visto que o material nas maiores taxas e espessuras ainda não atingiu o pico de pressão/razão de resistência devido a uma dificuldade de secagem, o que nos mostra que o segundo ponto está correto.

Isso nos indica que, para um mesmo conjunto de simulações, considerando todas as propriedades constantes (exceto a resistência mecânica) e variando somente o comportamento da condutividade térmica e/ou da permeabilidade, diferentes perfis de razão de resistência podem ser obtidos, com tempos de secagem e valores máximos distintos entre si.

Tal fato indica a importância da medição das propriedades experimentais com

a melhor precisão possível para representação do fenômeno a ser analisado, visto que, por exemplo, a permeabilidade medida durante o aquecimento de um material será distinta daquela medida após um tratamento térmico em diferentes temperaturas. Isto ocorre pois, uma vez que a permeabilidade dinâmica leva em consideração as transformações *in-situ* que ocorrem no material, conseqüentemente, tais mudanças estruturais afetam a resistência ao fluxo do fluido em seu interior.

Outro fator que também pode ser analisado é a posição do pico indicando a maior razão de resistência para cada simulação. As Figuras 6.23, a 6.26 trazem de forma compilada, para cada simulação, o valor e a posição da máxima razão de resistência.

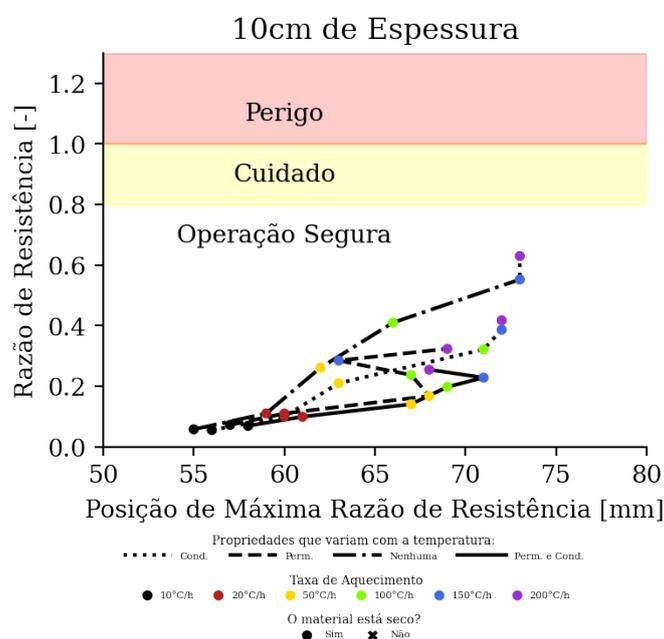


Figura 6.23: Mapa da máxima razão de resistência *versus* a sua posição para cada uma das simulações considerando 10cm de parede do concreto refratário 5CAC.

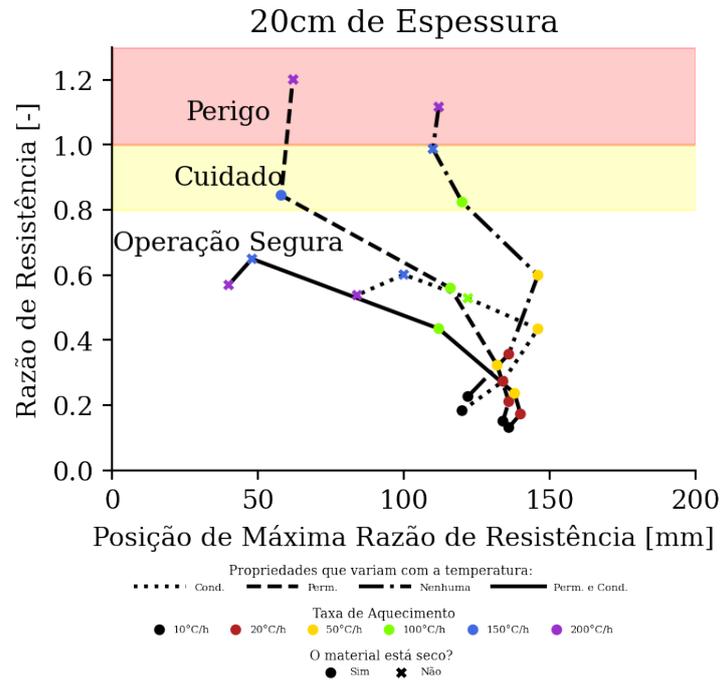


Figura 6.24: Mapa da máxima razão de resistência *versus* a sua posição para cada uma das simulações considerando 15cm de parede do concreto refratário 5CAC.

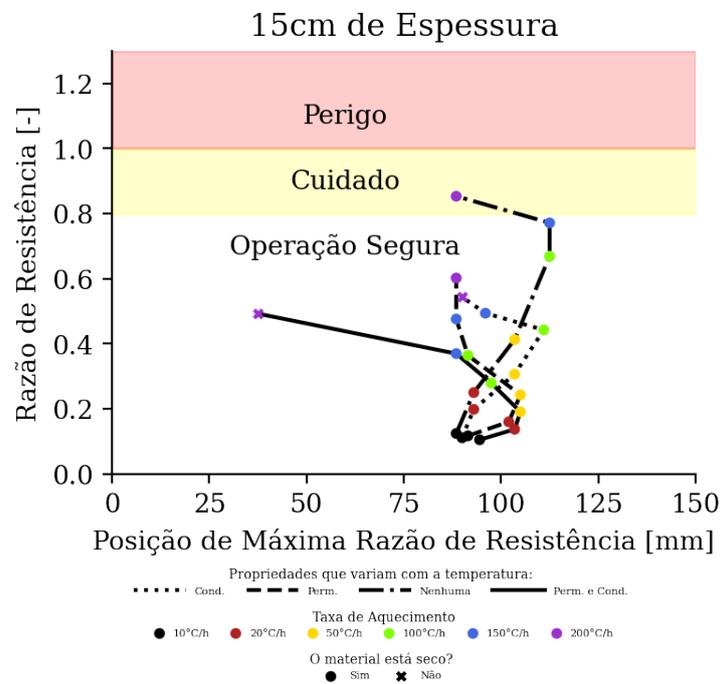


Figura 6.25: Mapa da máxima razão de resistência *versus* a sua posição para cada uma das simulações considerando 20cm de parede do concreto refratário 5CAC.

Um fato que fica claro ao observar os resultados é que as propriedades (per-

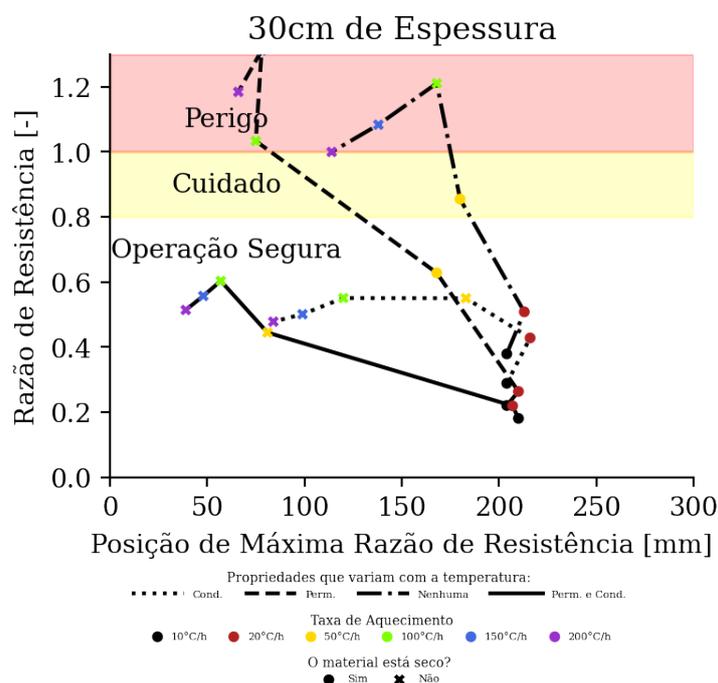


Figura 6.26: Mapa da máxima razão de resistência *versus* a sua posição para cada uma das simulações considerando 30cm de parede do concreto refratário 5CAC.

meabilidade e condutividade térmica) que geram valores mais críticos da razão de resistência variam de acordo com a espessura. Outro ponto importante é que, em menores espessuras e/ou menores taxas de aquecimento, a tendência geral da razão de resistência é se deslocar em direção à face fria, enquanto que o inverso ocorre para maiores taxas e/ou espessuras.

As próximas ilustrações trazem três casos selecionados para justificar este comportamento. A Figura 6.27 apresenta um perfil de água livre no material em função da temperatura onde se considera todas as propriedades variáveis com baixa espessura e elevada taxa de aquecimento. Observa-se neste caso a formação da frente de secagem na face aquecida (posição 0mm) e na face fria (posição 10mm) logo no começo do aquecimento, com ambas as frentes se encontrando próximo à posição de 80mm.

O acúmulo da água nesta região gera uma barreira para a transferência do fluido pela face fria, o que faz com que a região de maior pressão de vapor se encontre deslocada para a esquerda. Visto que esta barreira surge devido ao acréscimo da espessura de parede e altas taxas de aquecimento, é necessária

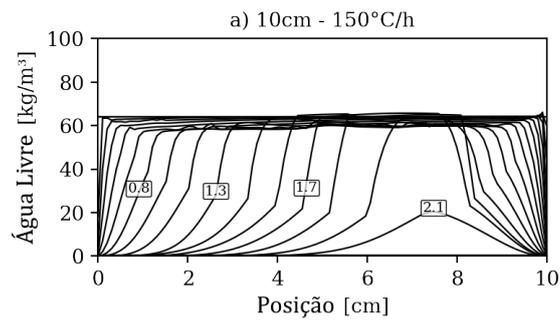


Figura 6.27: Quantidade de água livre para cada posição no material refratário em função da evolução do processo de secagem para uma parede com 10cm de espessura e 150 °C/h de taxa de aquecimento.

a investigação de um terceiro resultado, com menor taxa de aquecimento e igual espessura, para verificar se haverá o surgimento da segunda frente de secagem ou se haverá um acúmulo de água no material.

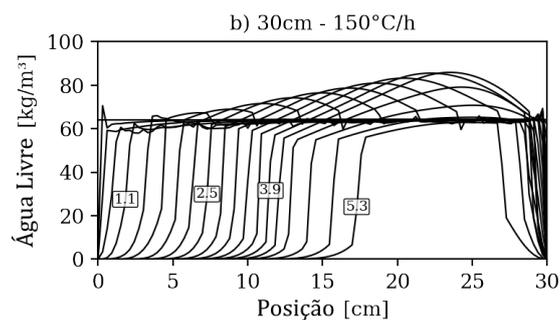


Figura 6.28: Quantidade de água livre para cada posição no material refratário em função da evolução do processo de secagem para uma parede com 20cm de espessura e 150 °C/h de taxa de aquecimento.

Por fim, a Figura 6.29 indica que assim como o primeiro caso avaliado, também foi prevista a formação de ambas frentes de secagem, que se convergem em uma região mais interna do corpo.

Correlacionando cada caso com um ponto diferente, presentes nas Figuras 6.23 e 6.25, observa-se que o primeiro (10cm de espessura e 150 °C/h) e terceiro caso (20cm de espessura e 10 °C/h) se encontram em regiões onde a tendência da posição de maior razão de resistência é avançar em direção à face fria, enquanto o segundo caso (20cm de espessura e 150 °C/h) se localiza em uma região na qual a inclinação da linha que conecta os pontos indica que há um deslocamento da posição de máxima razão de resistência em direção à face

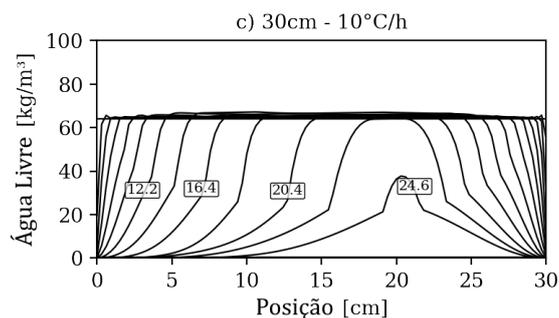


Figura 6.29: Quantidade de água livre para cada posição no material refratário em função da evolução do processo de secagem para uma parede com 20cm de espessura e 10°C/h de taxa de aquecimento.

fria.

Isto serve como um indicador de que, provavelmente, a direção de avanço da maior razão de resistência está relacionada com a formação ou não da segunda frente de secagem e do acúmulo de água. Quanto maior a taxa de aquecimento, um maior gradiente térmico é gerado no material e o fluxo nas regiões frias pode ser baixo o suficiente para reter a água presente, ou até mesmo o tempo de processamento ser baixo o suficiente para que a água não consiga ser totalmente eliminada, forçando a região de maior pressão, que se encontra na frente de secagem primária, a se localizar nas regiões próximas à face quente.

Já a maior espessura atua de forma semelhante à taxa de aquecimento, aumentando o caminho com que a água tenha que percorrer para ser eliminada pela face fria, e também introduzindo uma maior quantidade de matéria a ser aquecida, podendo causar uma maior diferença de temperatura entre a face fria e face quente para uma mesma taxa de aquecimento, acarretando nos fenômenos discutidos no tópico anterior.

6.5.2 Aquecimento com um Patamar de Temperatura

Visto que a utilização de propriedades variando com a temperatura trouxe resultados os quais levavam em consideração uma configuração mais próxima à realidade, resolveu-se adotar estes parâmetros como variáveis.

Para avaliar a adição de um patamar (tempo da curva de aquecimento onde a taxa de aquecimento é 0°C/h), adotou-se três diferentes taxas de aquecimento (50°C/h, 75°C/h e 100°C/h) que foram aplicadas no período fora do patamar, e

um patamar com 30 horas de duração em diferentes temperaturas, divididas em dois diferentes grupos: (i) 150 °C e 180 °C como patamaras em temperaturas inferiores à saída de água livre e parcialmente da quimicamente ligada e (ii) 220 °C e 350 °C para temperaturas acima deste valor (de aproximadamente 200 °C). Além disso, a temperatura de início foi de 25 °C e final foi de 925 °C, 100 °C acima da temperatura máxima do primeiro estudo. A decisão deste acréscimo foi baseada no fato de observar melhor o comportamento enquanto se aumenta a taxa de aquecimento e a espessura da camada de trabalho.

Também foram consideradas três diferentes espessuras da camada monolítica para a simplificação das análises: 10cm, 20cm e 30cm. As figuras 6.30 à 6.32 mostram esses resultados para cada simulação efetuada na taxa de aquecimento de 50 °C/h, mostrando o comportamento da razão de resistência, conteúdo de água e perfís térmicos como uma função do tempo.

Pode-se observar que, para a espessura de 10cm não existe risco de explosão, independente da temperatura de patamar, que pode ser destacado pelos valores de razão de resistência máxima abaixo do limite de 0.8. Além disso, o patamar a 150 °C pareceu ser super conservativo no cenário avaliado, uma vez que o tempo total utilizado para a secagem completa do conteúdo de água livre é maior que àquele de quando se utilizou um patamar a 180 °C, enquanto que os valores de razão de resistência foram similares.

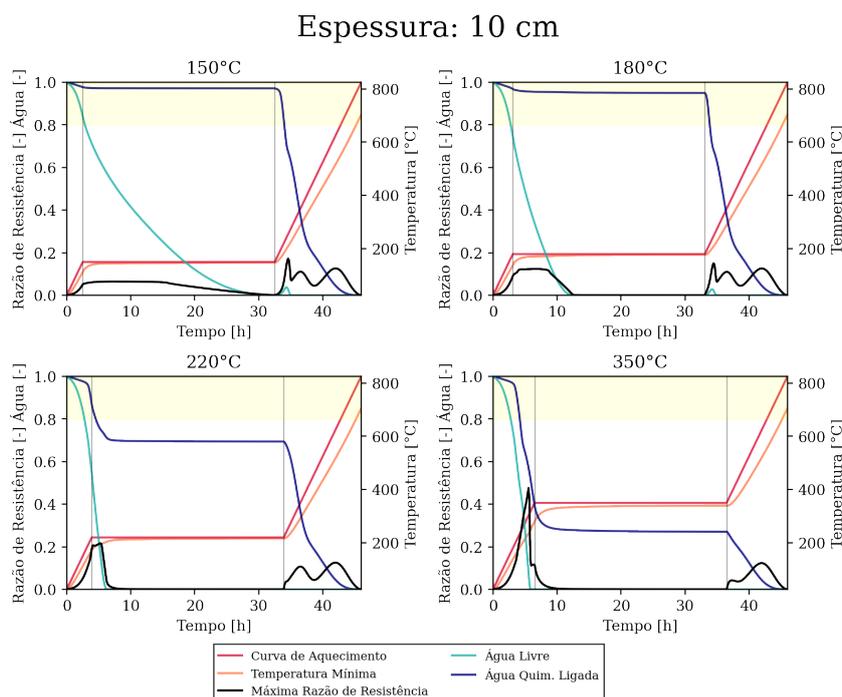


Figura 6.30: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150 °C a 350 °C em uma taxa de aquecimento de 50 °C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

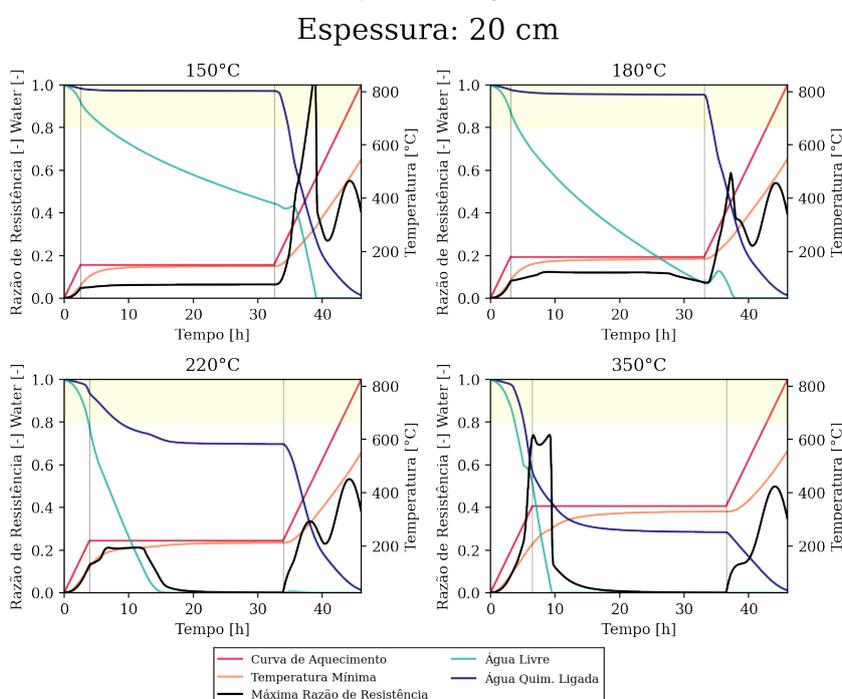


Figura 6.31: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150 °C a 350 °C em uma taxa de aquecimento de 50 °C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

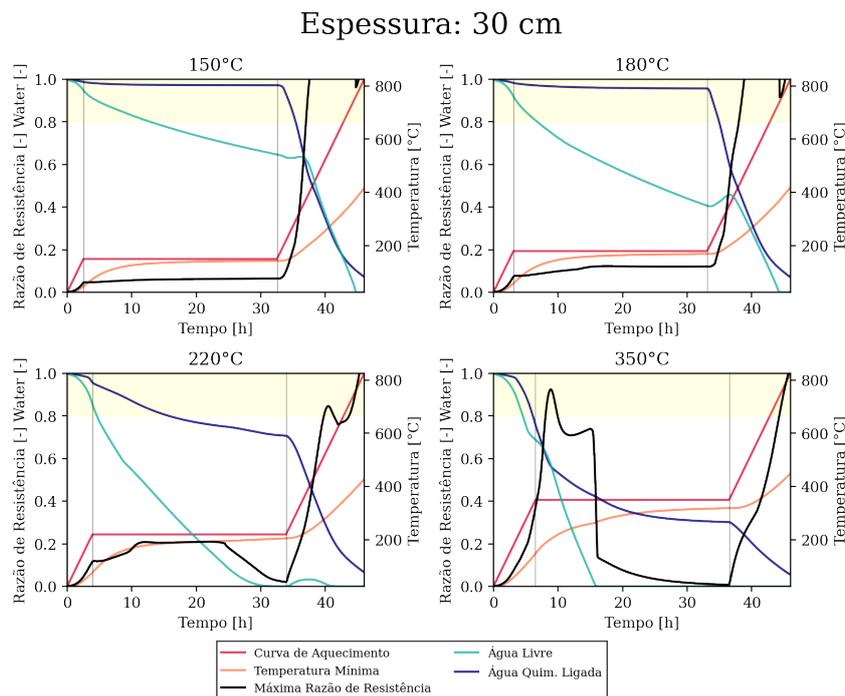


Figura 6.32: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 50°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

Quando a espessura da camada de trabalho aumentou para 20cm, este comportamento super conservativo dos patamares a 150°C se tornou mais claro, uma vez que nesta temperatura não é mais possível secar completamente a água livre, mesmo após 30 horas. Este último efeito pode ser observado, também, no patamar a 180°C que, apesar de não secar completamente a água livre no final do patamar, é possível observar que o acúmulo de pressão não é suficiente para aumentar a razão de resistência acima do fator de segurança. Além disso, mesmo que ainda haja pressão residual no final do processo, pode-se observar que apenas uma pequena quantidade de água quimicamente ligada resta no material, que não é suficiente para aumentar a pressão a níveis alarmantes e, portanto, estas simulações também foram consideradas como nas quais o material foi seco por completo.

Para o patamar de 220°C, nota-se que o comportamento é muito similar àquele de quando se observou a mesma curva de aquecimento com a espes-

sura de 10cm, porém a duração do patamar de pressão aumentou de aproximadamente 4 horas para 15 horas, enquanto a 350 °C observou-se o pico de pressão antes que a face quente alcançasse a temperatura do patamar.

Dentre todas as simulações, nenhuma considerando a espessura de 30cm finalizou de forma segura. A explicação é que, apesar de ser possível eliminar a água livre em patamares acima de 200 °C, também havia a pressão acumulada da liberação de vapor da água quimicamente ligada, fazendo com que estas curvas se tornassem impráticas para uso em um caso real. O motivo destes elevados valores de pressão é devido à correlação de Antoine (Equação 4.1), já descrita anteriormente e que correlaciona um crescimento exponencial da pressão com o aumento da temperatura.

Quando a taxa de aquecimento foi aumentada para 75 °C/h (Figuras 6.33 a 6.35) e 100 °C/h (Figuras 6.36 a 6.38), nota-se inicialmente que, na maior parte dos resultados, os valores de pressão dos patamares são os mesmos daqueles já observados quando se avaliou a taxa de 50 °C/h, indicando que, independente da taxa de aquecimento, o patamar tende a limitar a máxima pressão durante seu efeito.

Um efeito importante a se observar é quando a água livre esta sendo evaporada ao mesmo momento que a água quimicamente ligada, como pode ser verificado nas simulações com patamar a 350 °C das figuras 6.34, 6.35 e 6.38. A evaporação simultânea da água de duas diferentes fontes aumenta a quantidade total de vapor dentro da microestrutura do material, resultando em uma pressurização maior e mais rápida do que aquela que pode ser observada quando os efeitos não ocorrem simultaneamente.

Isto indica que quando o objetivo é o design de novas curvas de aquecimento, a retirada separada destas duas águas pode se mostrar uma estratégia interessante, e pode ser obtida por meio da introdução de um patamar em temperaturas inferiores àquelas da decomposição dos hidratos dos ligantes, que é de 200 °C para esta composição específica, e então um segundo patamar após a total secagem da água livre.

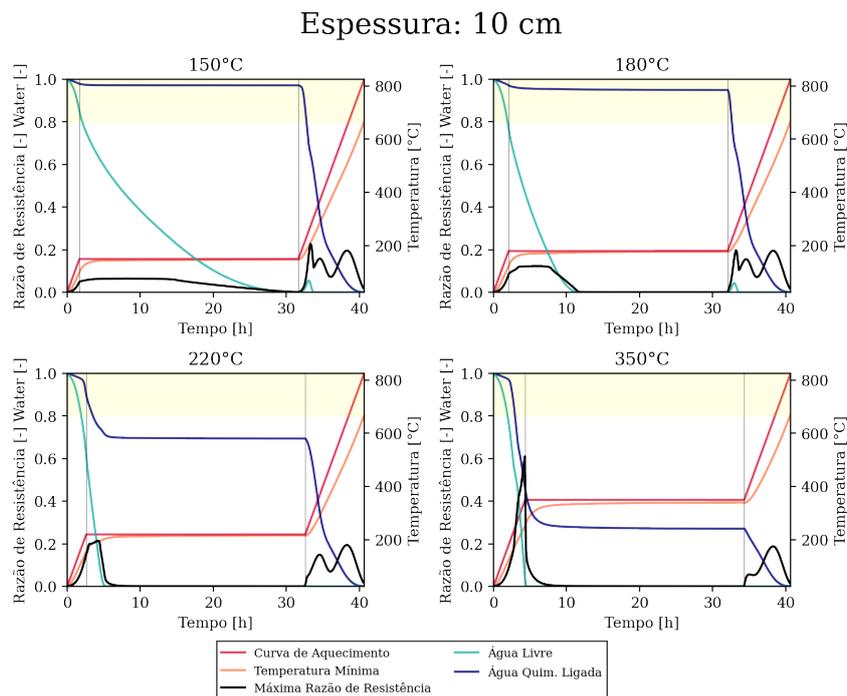


Figura 6.33: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 75°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

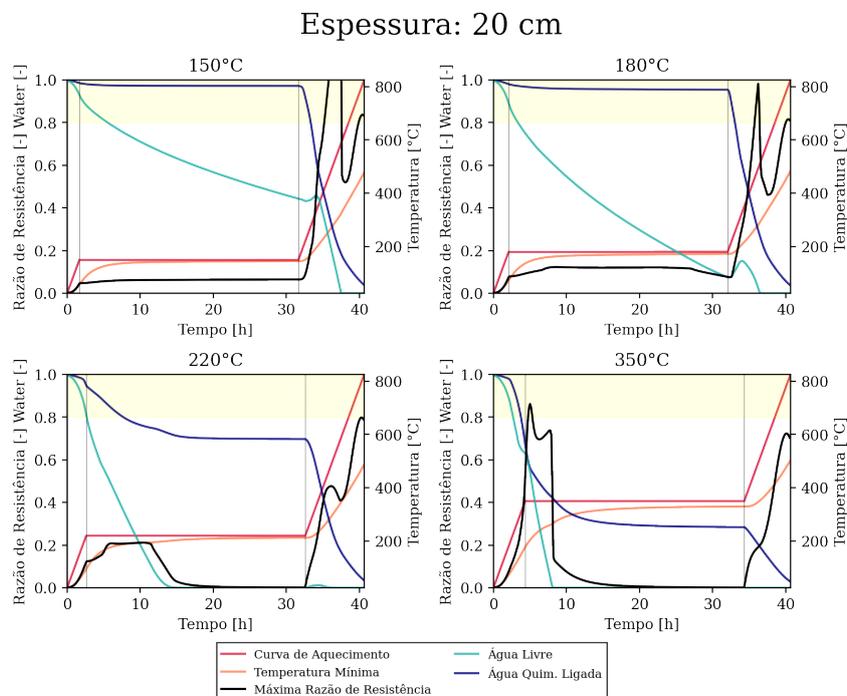


Figura 6.34: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 75°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

Espessura: 30 cm

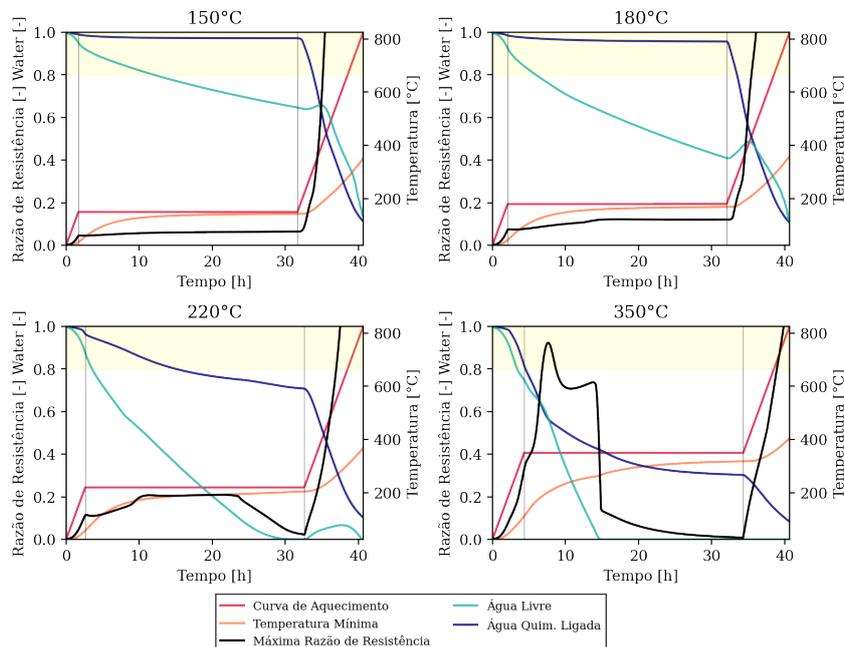


Figura 6.35: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 75°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

Espessura: 10 cm

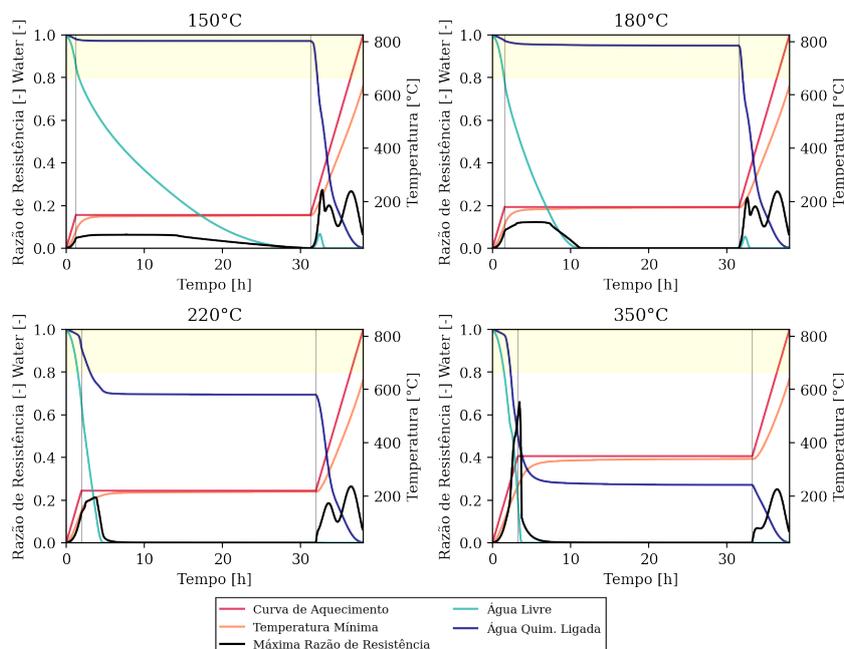


Figura 6.36: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 100°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

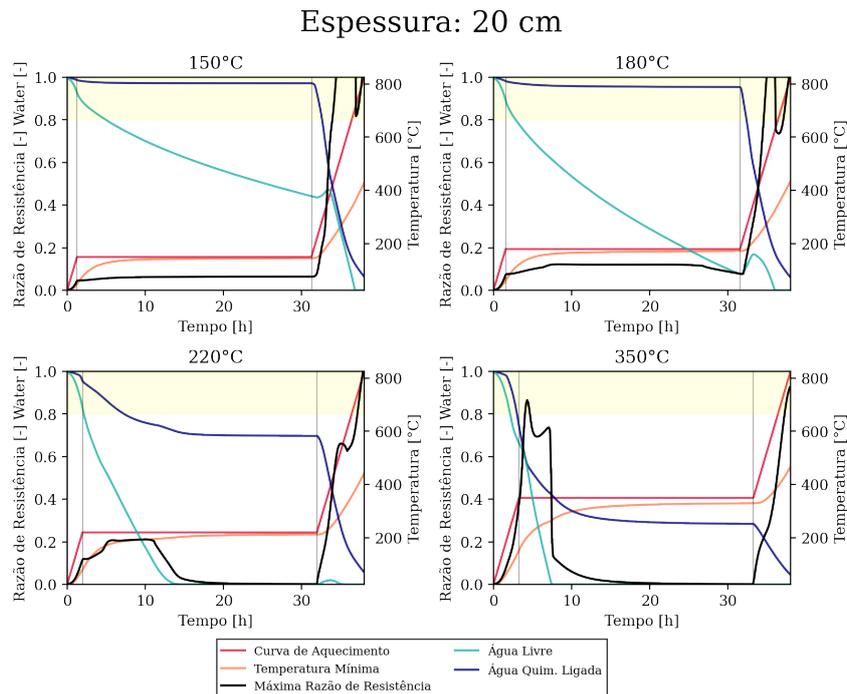


Figura 6.37: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 100°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

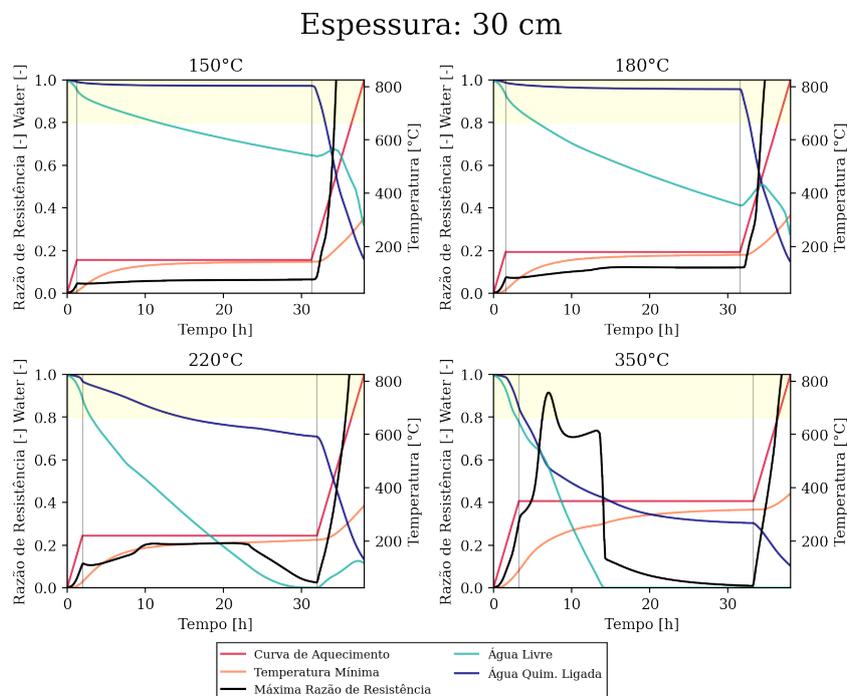


Figura 6.38: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo. Cada gráfico descreve o comportamento para um patamar com diferentes temperaturas, variando de 150°C a 350°C em uma taxa de aquecimento de 100°C/h nas seções de aquecimento com taxa constante.

Estes resultados também mostram que patamares a 180°C são muito mais eficientes que àqueles a 150°C. Além disso, para todas as simulações que consideraram uma espessura de 30cm na camada de trabalho, nenhuma foi seca com segurança, indicando que para que este processo ocorra de maneira segura, deve-se utilizar uma curva de aquecimento com patamares mais longos, ou até mesmo com mais patamares, utilizando, por exemplo, a estratégia recentemente sugerida.

6.5.3 Cálculo Energético e Comparação entre Curvas

Além disso, durante o estudo das curvas de aquecimento com dois patamares, desenvolveu-se a metodologia já descrita para o cálculo energético, cujo objetivo é permitir a otimização de qual seria a "melhor" curva para um caso específico, uma vez que não somente este cálculo permite quantificar o consumo, mas também comparar as curvas entre si, reduzindo o custo total de produção.

Para cada timestep foi salvo o valor do fluxo térmico em cada elemento, sendo a seguir integrados no domínio geométrico e também no tempo, para cada simulação rodada durante o estudo. Os gráficos mostrados na Figuras 6.39 mostram estes valores.

Nota-se que os valores de consumo energético são próximos e não variaram muito entre si. A razão disto é que este estudo não teve como um objetivo imediato a otimização destas curvas, reduzindo o tempo total de aquecimento, mas sim introduzir uma metodologia de comparação de curvas e avaliar o comportamento das variáveis em um patamar de temperatura, como o que foi observado do maior risco de explosão quando há retirada simultânea das duas fontes de água.

Porém, ainda assim pode-se observar alguns pontos do gráfico, como o fato de que os resultados seguem uma "tendência" comum, que pode ser descrita por: (i) quanto maior a taxa de aquecimento, menor o consumo energético, uma vez que o tempo total da curva é menor, (ii) quanto mais espessa a camada de trabalho, mais energia é consumida, devido ao volume total aquecido e (iii) patamares em altas temperaturas utilizam de maior energia que aqueles em baixa temperatura, uma vez que manter o material nestes valores requer mais energia.

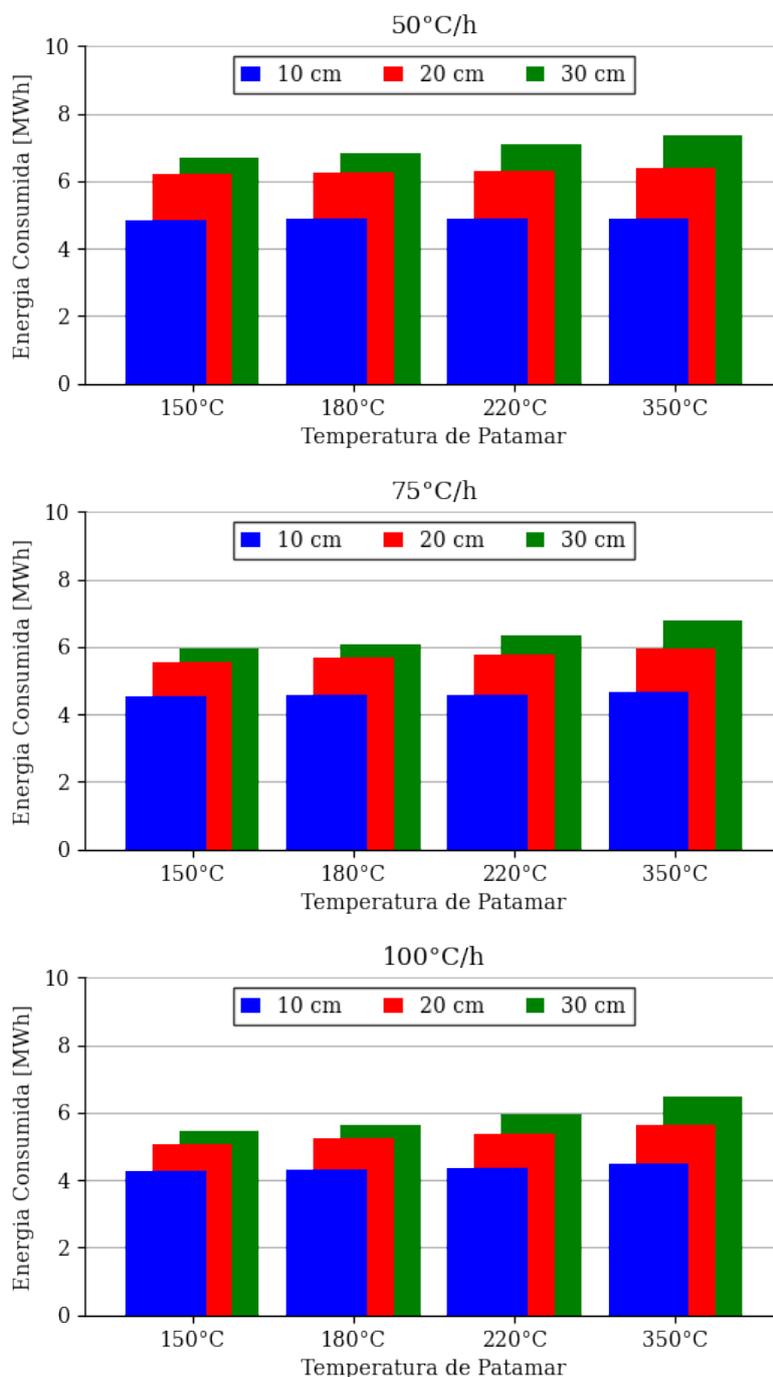


Figura 6.39: Quantidade de energia consumida para cada simulação, agrupadas pela taxa de aquecimento, temperatura de patamar e destacadas de acordo com a espessura da camada de trabalho.

Estes resultados, porém, ainda não mostraram a base comparativa dentre os diferentes cenários, e é por isso que se definiu uma “metodologia de otimização de curva”, que se consiste em três diferentes etapas que serão descrevidas a seguir.

O primeiro fator a que ser levado em consideração nesta metodologia é a consideração básica da curva de aquecimento: o material secou? Para definir o que é uma secagem completa, escolheu-se que o material seco possui menos que 5% de ambas água livre e da água quimicamente ligadas residual, isto é, o volume de água a ser extraído no fim do processo é menor que 5% que o valor inicial, calculado no primeiro timestep. A Figura 6.40 mostra todas as simulações deste bloco plotadas em um espaço "resíduo de água quimicamente ligada" versus "resíduo de água livre", onde as áreas hachuradas se referem à região superior ao valor de 5%. Ao verificar, nota-se que nenhuma simulação que considerou a espessura de 30cm está abaixo dos limites definidos e, portanto, concluiu-se que uma metodologia de secagem diferente deve ser assumida para estas, algo que foi observado nas Figuras 6.32, 6.35 e 6.38. Enquanto isso, todas as simulações na área não-hachurada foram submetidas ao segundo critério de seleção.

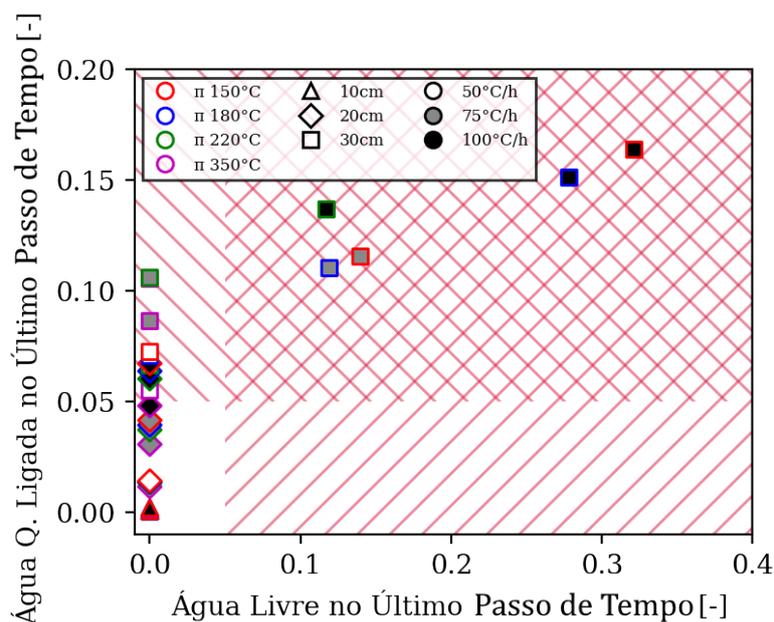


Figura 6.40: Etapa 1 da metodologia de seleção, o eixo-x descreve a quantidade de água livre normalizada no último timestep, e o eixo-y mostra a quantidade de água quimicamente ligada normalizada neste mesmo momento. A hachura vermelha indica a região na qual as simulações falham a condição de seleção (água residual <5% do valor inicial). A letra π indica as temperaturas de patamar.

Então avaliou-se para todas as curvas que restaram se o valor de máxima ra-

ção de resistência para cada simulação foi acima do limite estabelecido em 0.8, como fator de segurança, como mostra a Figura 6.41. Com este filtro, apenas simulações que levaram em consideração uma espessura de 20cm da camada de trabalho foram descartadas, indicando que todas aquelas com 10cm de espessura não só foram secas por completo, mas também não fraturaram durante o processo de secagem. Além disso, há uma simulação específica cujo valor ficou muito próximo do limite de segurança, que é aquela que considera uma taxa de aquecimento de 75°C/h, a temperatura de patamar em 220°C e a espessura em 20cm. Uma vez que esta análise avalia somente o lado numérico, ela foi considerada aprovada para a submissão à última etapa de avaliação, porém um usuário final teria toda liberdade de julgar a curva como adequada à aplicação ou não.

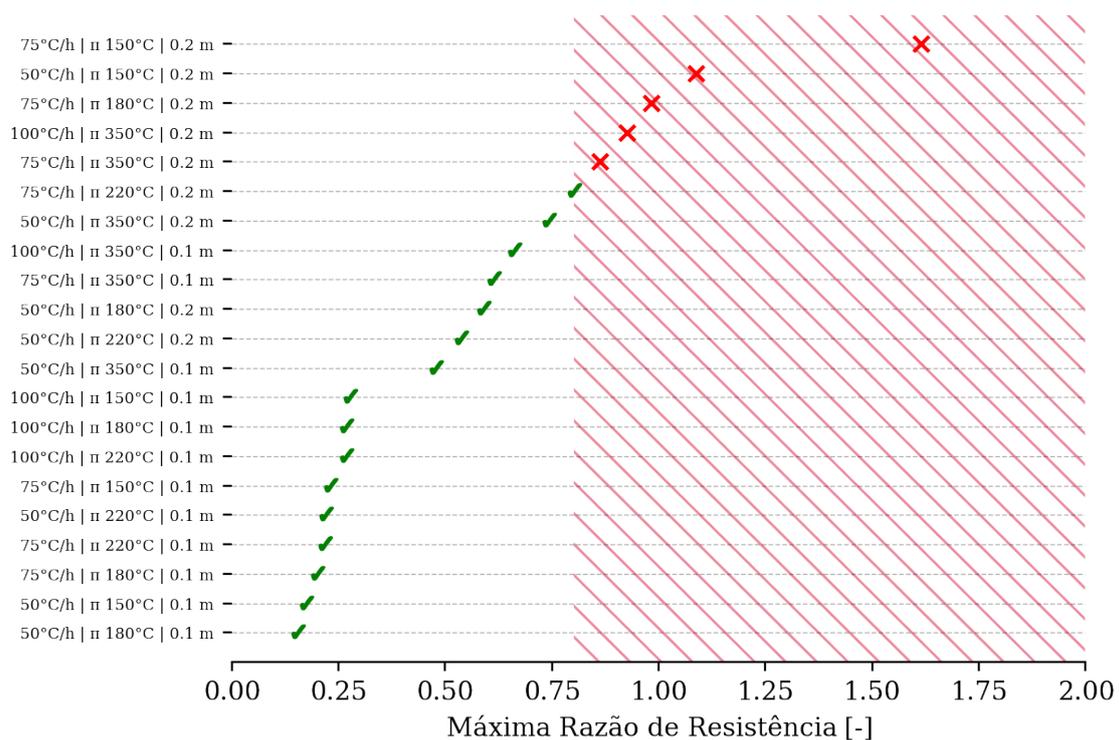


Figura 6.41: Etapa 2 da metodologia de seleção. As simulações foram listadas da menor para a maior razão de resistência máxima, com o limite de segurança em 0.8.

Por último, os perfis foram classificados de acordo com o total de energia consumida no processo, conforme Figura 6.42. As melhores escolhas considerando a espessura de 10cm na camada de trabalho foram aquelas que utilizaram

100°C/h como taxa de aquecimento e patamares a 150°C e 180°C, enquanto para a espessura de 20cm as melhores foram as com a taxa a 75°C/h e patamar a 220°C, e 50°C/h e patamar a 180°C. Como já foi mencionado anteriormente, os patamares a 180°C são mais eficientes que aqueles a 150°C, e portanto a seleção ficaria no primeiro para a camada de 10cm. Além disso, como a curva de aquecimento mais econômica energeticamente para a espessura de 20cm foi aquela cuja razão de resistência se encontra próxima ao limite, o usuário final também poderia optar pela segunda melhor.

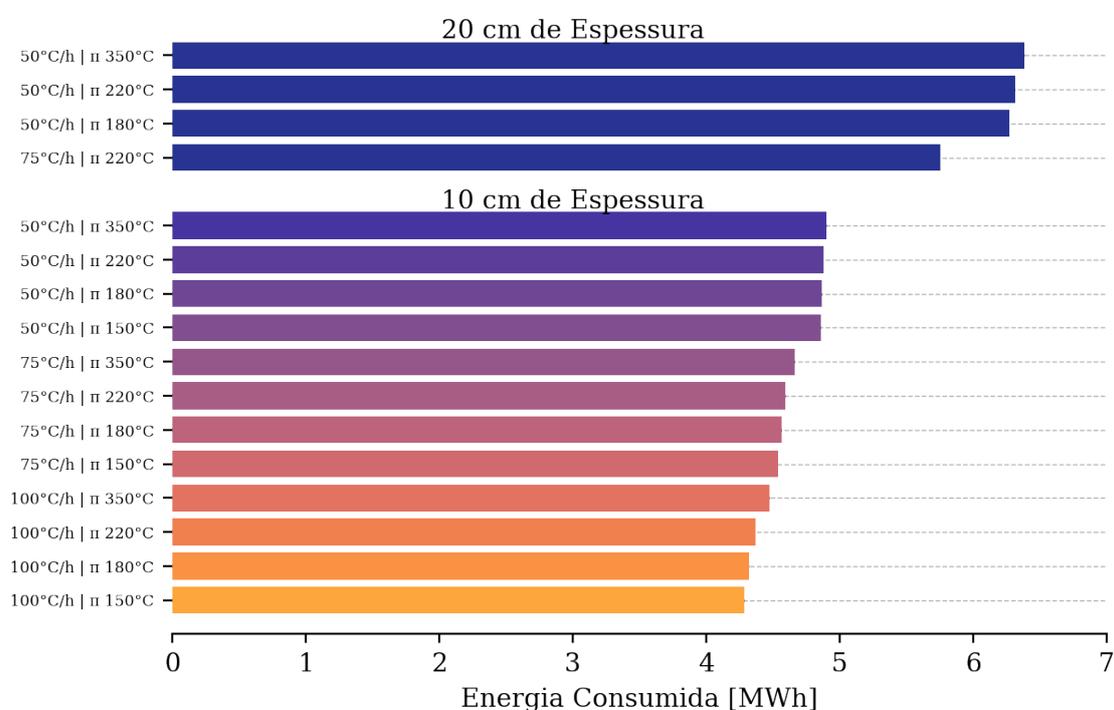


Figura 6.42: Etapa 3 da metodologia de seleção. As curvas de aquecimento sobreviventes são classificadas de acordo com o consumo energético.

Esta metodologia mostra que as diferentes curvas podem ser filtradas de acordo com condições baseadas nos conceitos fundamentais de importância na aplicação final. Apesar da metodologia apresentada não levar diretamente o tempo total de aquecimento como um de seus parâmetros, uma vez que todas as curvas possuem quase a mesma duração, este fator ainda poderia ser considerado pelo usuário final para a obtenção de uma metodologia ainda mais complexa. Além disso, os pesos de cada índice podem ser definidos diferente-

mente dependendo das necessidades do consumidor e da aplicação.

6.5.4 Curvas Complexas

Por fim, o estudo focou em avaliar algumas curvas mais complexas com o objetivo de verificar se as afirmações descobertas anteriormente, como em relação à sobreposição da retirada das águas livre e quimicamente ligadas, são aplicáveis em todos os cenários e, se não, como se pode utilizar destes conceitos na otimização das curvas de secagem. Até o fim do período deste projeto, avaliou-se a variação dos patamares com uma taxa de aquecimento fixa em $75^{\circ}\text{C}/\text{h}$, ficando o entendimento de curvas mais complexas como sugestão a estudos futuros

Inicialmente se fixou um primeiro patamar a 180°C pela duração de 20 horas, enquanto um segundo foi introduzido a 350°C conforme indicado nas Figuras 6.43 a 6.45. Nota-se que não foi possível realizar a secagem completa no revestimento com 20 e 30cm, porém um fato interessante a ser observado é que, mesmo com a água livre não sendo completamente eliminada, o pico de pressão gerado pela saída simultânea desta água com a água quimicamente ligada não colocou o revestimento de 20cm em risco, porém o de 30cm sim, uma vez que a retirada de água residual no final do patamar foi mínima.

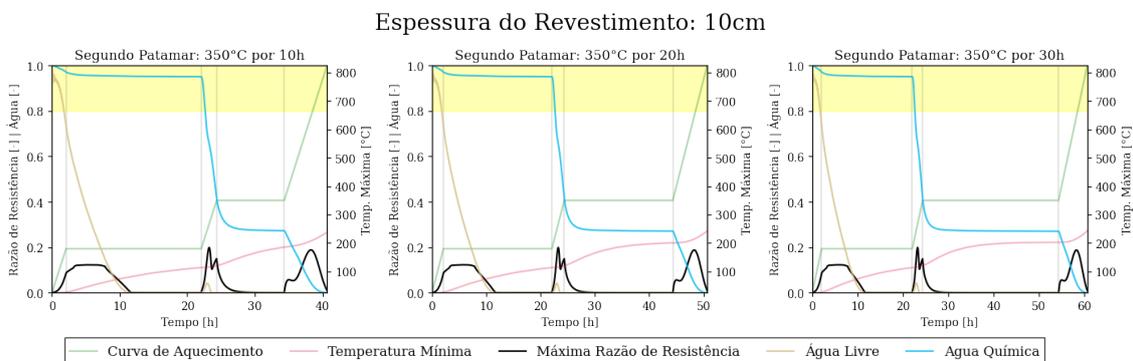


Figura 6.43: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 20 horas.

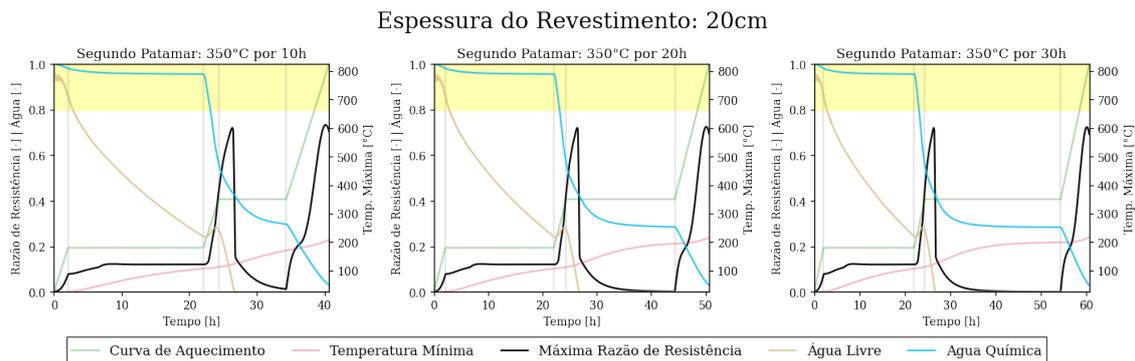


Figura 6.44: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 20 horas.

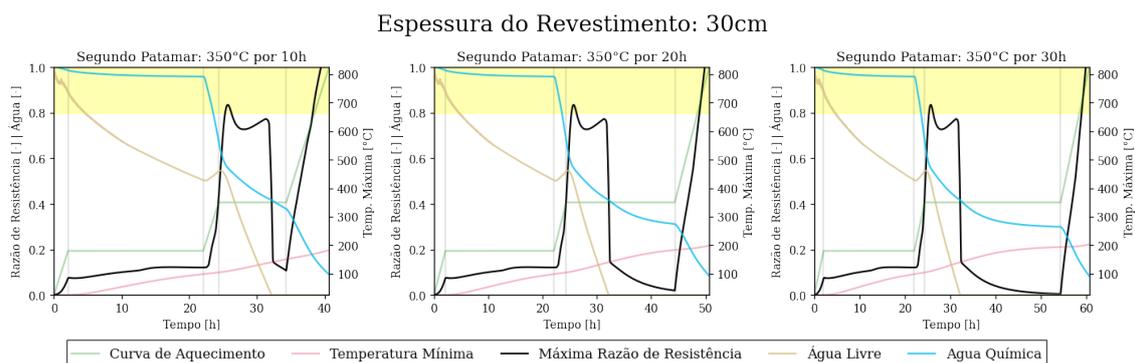


Figura 6.45: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 20 horas.

Outro comportamento observável é que, no final do patamar destas mesmas curvas, há uma "recuperação" no conteúdo de água livre, indicando visualmente o fenômeno conhecido como *moisture clogging*, que pode ser facilmente visualizado na Figura 6.45.

Uma vez que a duração de 20 horas do primeiro patamar não foi suficiente, aumentou-se este valor para 40 e 80 horas, como mostrado nas Figuras 6.46 a 6.51. Estes tempos são exagerados no aspecto prático, mas que indicam tendências que podem ser parcialmente utilizadas.

Espessura do Revestimento: 10cm

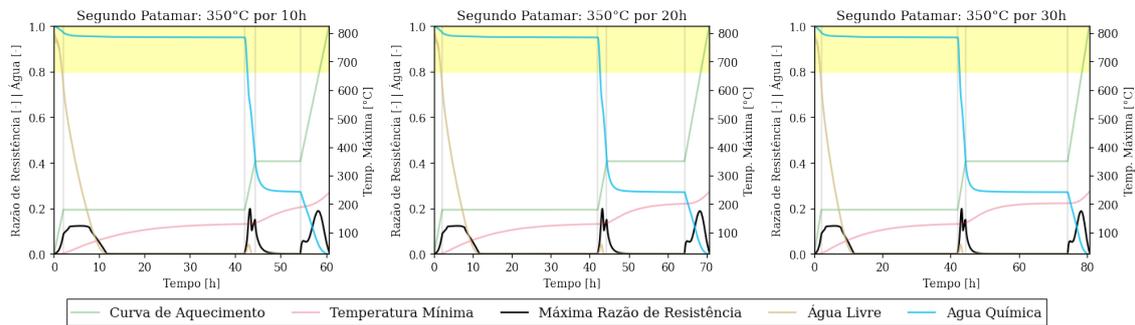


Figura 6.46: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 40 horas.

Espessura do Revestimento: 20cm

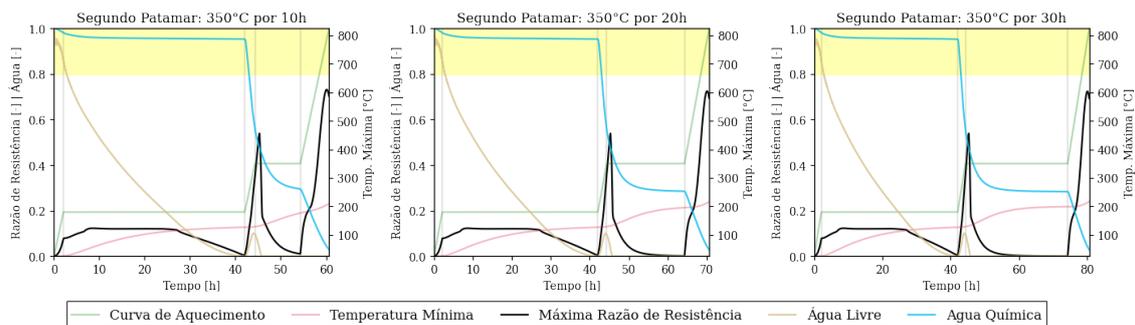


Figura 6.47: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 40 horas.

Espessura do Revestimento: 30cm

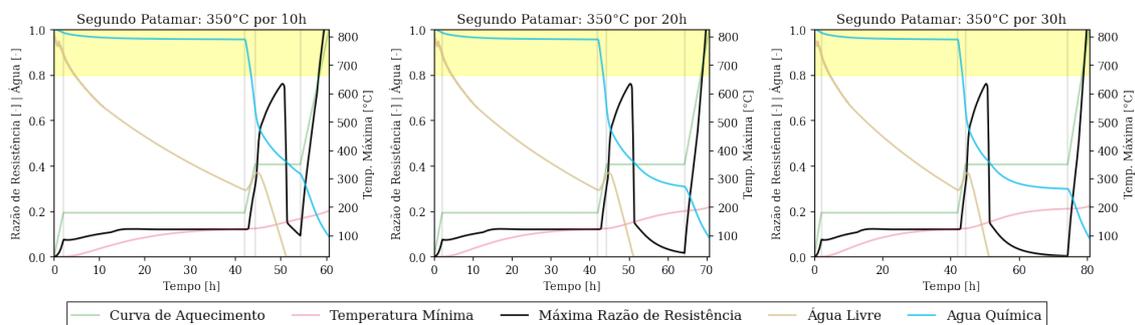


Figura 6.48: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 40 horas.

Espessura do Revestimento: 10cm

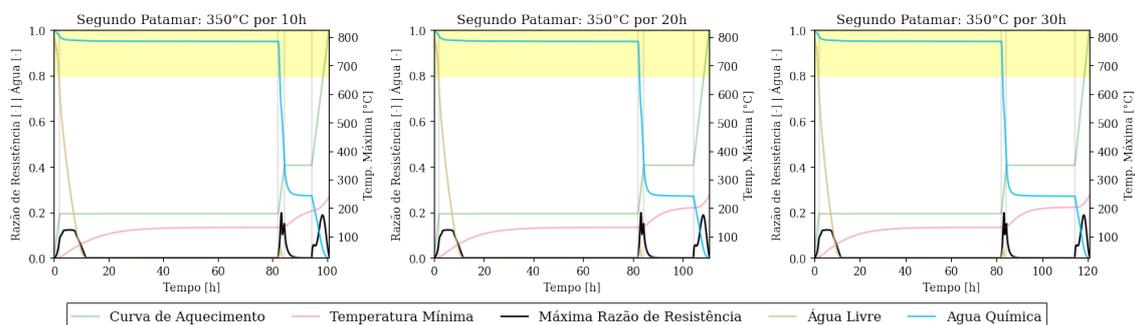


Figura 6.49: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 10 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 80 horas.

Espessura do Revestimento: 20cm

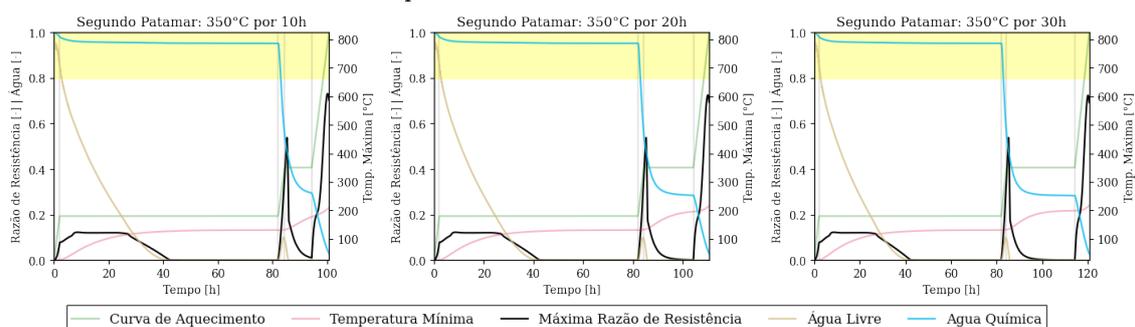


Figura 6.50: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 80 horas.

Espessura do Revestimento: 30cm

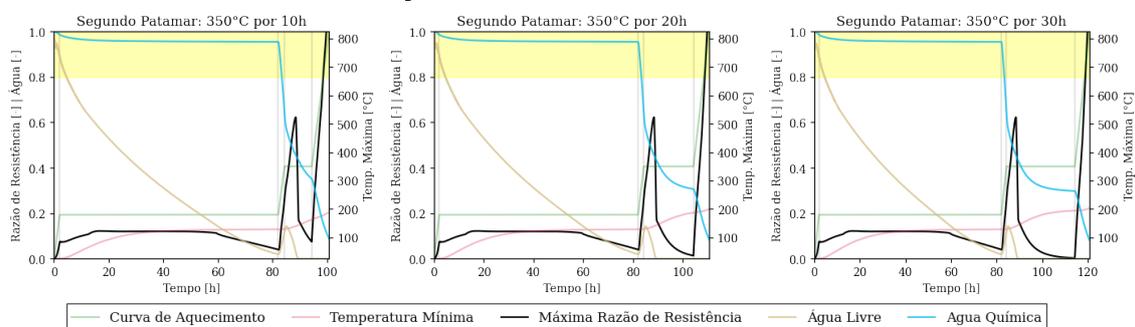


Figura 6.51: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 30 cm de espessura como uma função do tempo para curvas que variam a duração do segundo patamar enquanto o primeiro é fixo em 80 horas.

Os resultados mostram que, para ter uma secagem completa da água livre, necessitaria-se de aproximadamente 10h de patamar para espessura de 10cm, 40h para 20cm e mais que 80h para 30cm, o que pode tornar o processo não ótimo uma vez que segura-se o aquecimento por tempo demasiado em baixas temperaturas. Além disso, o pico de pressão observado no final do aquecimento independe da quantidade de água livre, uma vez que ele é a resposta da saída da água quimicamente ligada e, portanto, necessitaria-se de menores taxas por períodos mais longos para retirar-la de forma segura.

Para avaliar as curvas que exploram um número ainda maior de patamares, optou-se pelo uso de somente uma espessura: 20cm, uma vez que 10cm consegue ser seca até por curvas simples, enquanto 30cm é demasiadamente espesso para uma aplicação comum. Com isso, pôde-se avaliar a adição de um terceiro patamar e a variação da duração de todos eles, tentando otimizar o tempo de aquecimento sem colocar em risco a integridade do material.

Inicialmente se fixou patamares a 350°C e 600°C por 10 horas, sendo a escolha da segunda temperatura baseada na não secagem completa do processo nos casos recentemente descritos, e então se introduziu um patamar a 200°C, temperatura em que se inicia o processo de decomposição dos hidratos do ligante, com duração variável. O objetivo da variação deste primeiro patamar é reduzir o tempo extra àquele da secagem da água livre. As Figuras 6.52 a 6.54 trazem os resultados mencionados.

Nota-se que 10 horas de patamar foi um período mais curto que o necessário para a secagem da água livre, enquanto 20 e 30 horas foram além do que é necessário. Apesar disso, a primeira curva (Figura 6.52) não apresentou picos de pressão que colocassem em risco o processo de secagem, fenômeno já observado no estudo anterior. Com isso, o tempo total de secagem não se alterou tanto quando comparado com àquele observado na Figura 6.44.

Para reduzir ainda mais o tempo de secagem sem colocar o material em risco, optou-se por reduzir o segundo e terceiro patamar para um total de 5 horas de duração cada e variar o patamar a 200°C, conforme Figuras 6.55 a 6.57.

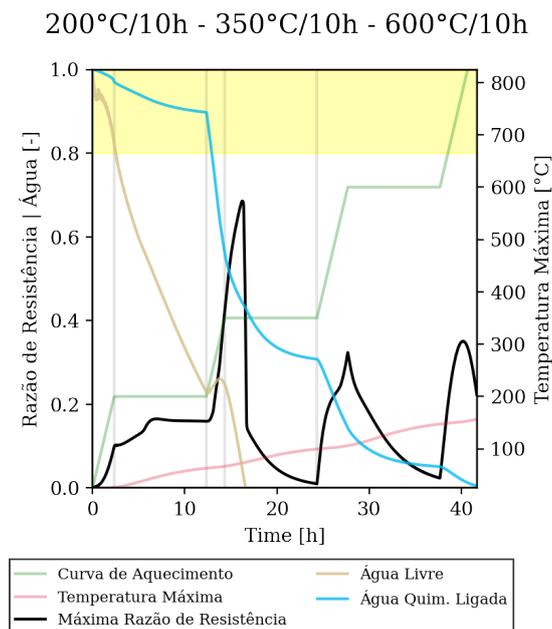


Figura 6.52: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75°C/h, com patamar a 200°C, 350°C e 600°C por 10 horas

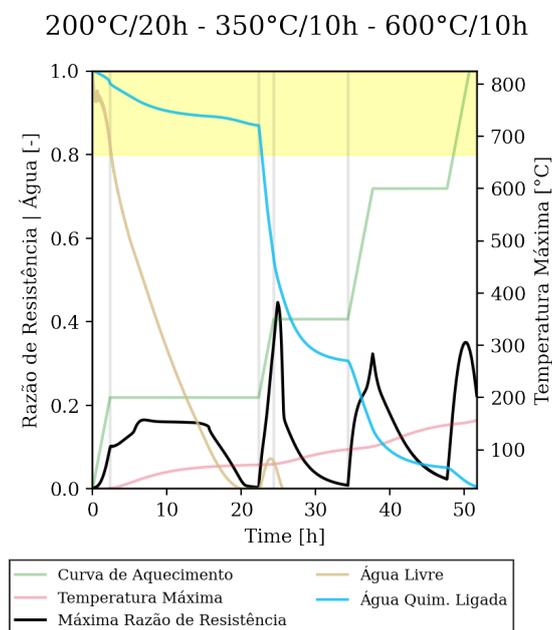


Figura 6.53: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75°C/h, com patamar a 200°C por 20 horas, 350°C por 10 horas e 600°C por 10 horas

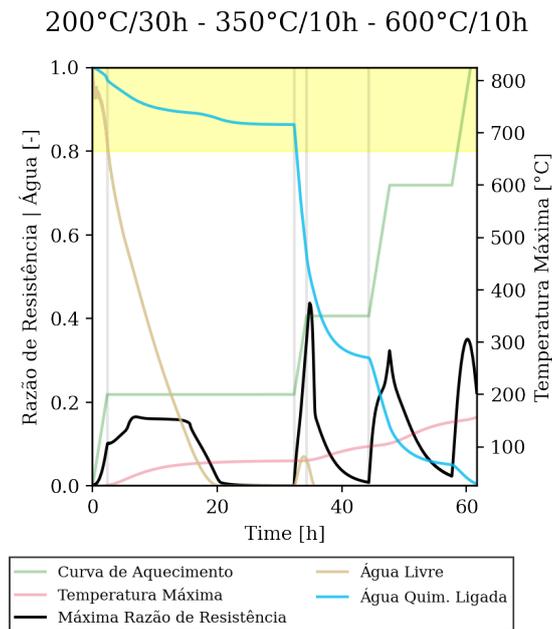


Figura 6.54: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75°C/h, com patamar a 200°C por 30 horas, 350°C e 600°C por 10 horas

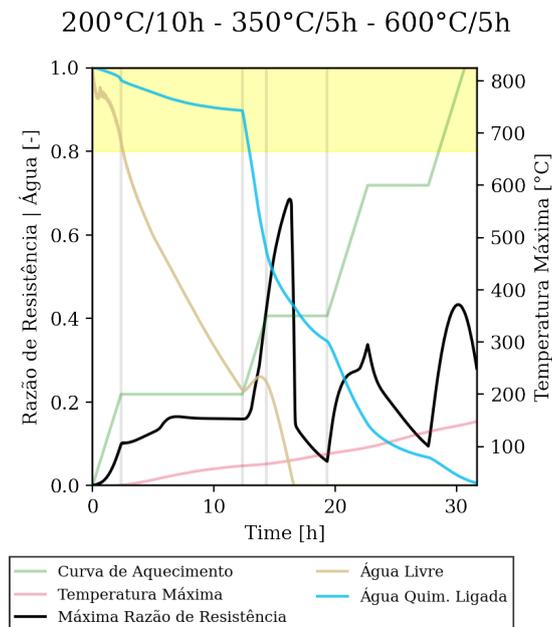


Figura 6.55: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75°C/h, com patamar a 200°C, 350°C e 600°C por 5 horas

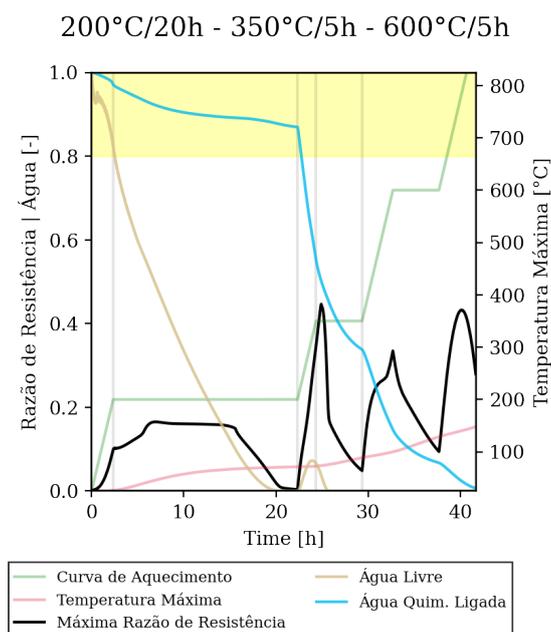


Figura 6.56: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75°C/h, com patamar a 200°C por 20 horas, 350°C e 600°C por 5 horas

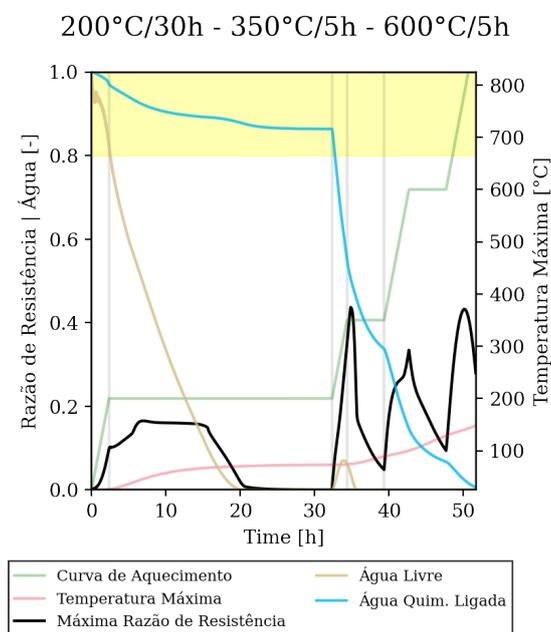


Figura 6.57: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75°C/h, com patamar a 200°C por 30 horas, 350°C e 600°C por 5 horas

Ainda assim, manter o primeiro patamar a 10 horas se mostrou seguro, visto

que o resíduo da água livre não impactou significativamente a saída da água quimicamente ligada, a ponto de gerar valores de razão de resistência superiores a 0.8.

Por fim, resolveu-se manter o primeiro patamar com 10 horas, e reduzir o tempo dos patamares subsequentes. A Figura 6.58 traz a redução do segundo patamar para 3 horas e do terceiro a 2 horas, e é possível observar que o valor máximo de resistência mecânica não foi alterado.

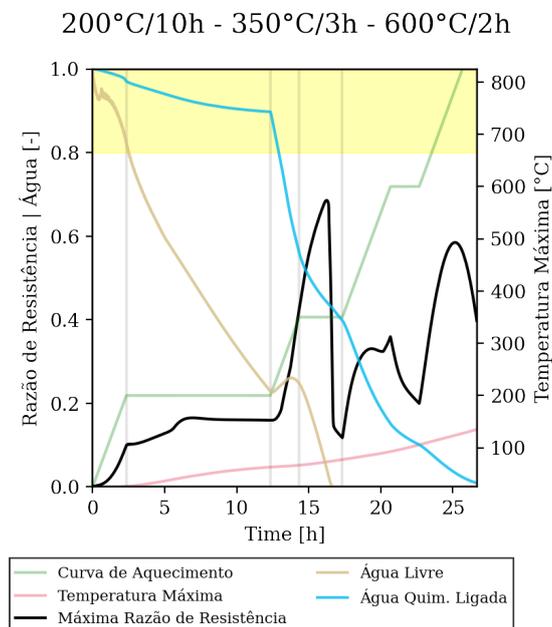


Figura 6.58: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75°C/h, com patamar a 200°C por 10 horas, 350°C por 3 horas e 600°C por 2 horas.

Com o objetivo de reduzir-se ainda mais a duração, também foi retirado por completo o terceiro patamar, que havia inicialmente sido introduzido para auxiliar o alívio da pressão a altas temperaturas e reduzir o risco do processo. A Figura 6.59 nos mostra que o maior valor de razão de resistência foi alterado da saída da água livre para a retirada de água quimicamente ligada a altas temperaturas, chegando a valores próximos do limite de segurança estabelecido.

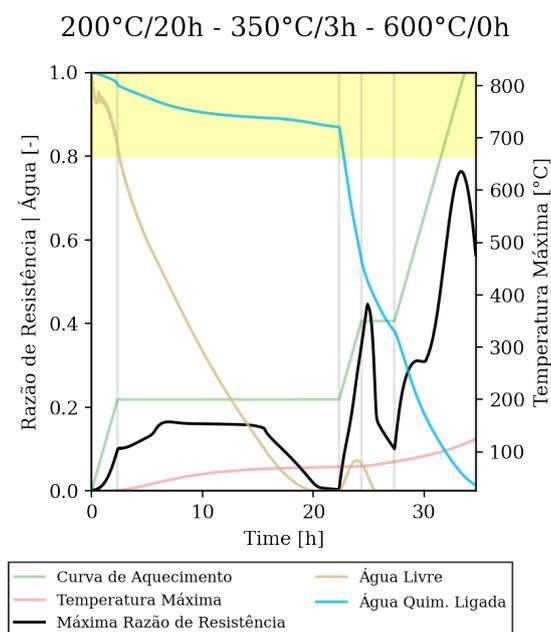


Figura 6.59: Máxima razão de resistência, água livre adsorvida, água quimicamente ligada, máxima e mínima temperatura para a camada de trabalho de 20 cm de espessura como uma função do tempo para uma curva de aquecimento a 75 °C/h, com patamar a 200 °C por 10 horas e 350 °C por 3 horas.

Apesar disso, foi possível reduzir o tempo total de secagem de aproximadamente 40 horas para cerca de 25 horas, somente alterando a temperatura do primeiro patamar de 180 °C para 200 °C, e adicionando um segundo patamar a 350 °C, mesmo com curta duração. Isto indica que a simples adição de um segundo patamar curto em temperaturas estratégicas pode aliviar a pressão resultante da retirada simultânea das duas fontes de água, reduzindo a necessidade de se ter um patamar mais longo a baixas temperaturas. Além disso, caso seja necessário devido ao conjunto de propriedades e geometria em uma definida aplicação, um terceiro patamar a altas temperaturas pode ser introduzido com o objetivo de aliviar a pressão gerada da água quimicamente ligada que, apesar de ser pouca em relação ao conteúdo prévido de umidade no material, pode alcançar valores elevados devido à correlação de Antoine (Equação 4.1).

6.6 Resumo dos Resultados

A metodologia de simulação e avaliação de curvas demonstrou ser de grande utilidade ao se comparar, ou até mesmo ao se analisar as consequências das tomadas de decisão no design das mesmas.

Durante a primeira parte do projeto, concluiu-se que existe uma necessidade de se aproximar as propriedades colocadas como entrada no modelo ao comportamento observado na realidade, visto que os perfis de pressão e temperatura são muito distintos quando propriedades como condutividade térmica e permeabilidade são simplificadas e consideradas como constantes. Além disso, foi introduzido um novo parâmetro de comparação, chamado “razão de resistência”, que serviu como uma ferramenta simples para verificar se um perfil de aquecimento em um determinado material se aproxima da falha ou não. Também observou-se que o uso de curvas com taxa de aquecimento constante podem ser viáveis na secagem, porém com restrição geométrica de espessura de parede para que não se alcance valores acima do fator de segurança imposto. Por último, concluiu-se que a posição onde o pico de maior razão de resistência ocorre no material em cada perfil de secagem é uma função principalmente da condutividade térmica, espessura e permeabilidade, e que este pico se desloca em direção à face quente caso ocorra o acúmulo de água nas regiões frias do material.

Já na segunda parte, introduziu-se uma metodologia para quantificar a energia consumida no processo, que foi verificada em três diferentes abordagens com valores próximos entre si. Adicionalmente, avaliou-se curvas de aquecimento com a presença de um único patamar de 30 horas, sendo possível observar a existência de dois principais comportamentos observáveis em patamares: i) aqueles que são posicionados abaixo da temperatura de decomposição dos hidratos do ligante, os quais servem para a secagem da água livre no material, sendo que quanto maior a temperatura destes, mais rápida e eficiente a secagem, ii) e aqueles acima deste valor de temperatura, os quais podem resultar em um elevado risco de fratura do revestimento caso a água residual ainda não tenha sido seca por completo, uma vez que a saída de vapor por duas diferentes fontes acarreta em elevadas pressões internas.

Por fim, ao considerar se o material foi seco ou fraturou e classificando os perfis de acordo com o menor uso energético, foi possível comparar as curvas para se obter aquela que melhor seria aplicada em um caso industrial e concluiu-se que nenhuma curva desenvolvida nesta etapa é aplicável a revestimentos com

30cm de espessura, uma vez que todos os casos resultam em fratura.

Por último, desenvolveu-se curvas complexas, com a presença de mais de um patamar, e observou-se que a secagem da água livre em um primeiro patamar abaixo da temperatura de degradação dos hidratos do ligante não é necessariamente mandatória, uma vez que é possível de se alcançar um processo de secagem seguro com a remoção parcial do conteúdo inicial desta água. Além disso, verificou-se a possível necessidade da adição de patamares a temperaturas elevadas, não com o objetivo de aliviar a pressão da água livre residual, mas sim para homogenização do perfil térmico e diminuir possíveis picos de pressão que poderiam ocorrer.

7 CONCLUSÕES

Tendo em mente os objetivos estabelecidos pelo trabalho, foi possível obter as propriedades físicas e realizar aproximações numéricas dos comportamentos delas, para que pudessem ser inseridas no modelo como uma função da temperatura ou não. Além disso, conseguiu-se adaptar o modelo de simulação para a inclusão de geometrias complexas, como a parede de uma panela de aço, e também do uso de curvas de aquecimentos personalizadas, as quais permitiram observar os efeitos das taxas de aquecimento e temperatura de patamar.

Com isto, o projeto evoluiu de curvas mais simples, onde se variava somente a taxa de aquecimento, para curvas que levam em consideração períodos onde a temperatura é mantida por longos períodos. Os efeitos destes períodos foram observados mais claramente em temperaturas abaixo de 200° C, onde há a secagem da água adsorvida livre, enquanto patamares em maiores temperatura retiravam, também, a água presente na forma de hidratos.

Com o objetivo de comparar as curvas, desenvolveu-se uma metodologia baseada em três critérios: se o material está seco, se ele fraturou e, por fim, estes foram ranqueados de acordo com os valores de energia consumidos durante o processo.

Finalmente, decidiu-se variar os parâmetros das curvas para uma otimização manual, onde foi possível reduzir o tempo total de uma curva de aquecimento genérica de 60 horas para aproximadamente 25 horas, sem o risco de explosão, porém a otimização foi limitada às curvas exploradas, indicando que ainda há uma lacuna de conhecimento a ser preenchido.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) A avaliação de curvas com diferentes taxas de aquecimento, uma vez que patamares assumem uma taxa de aquecimento nula e, mesmo que uma taxa baixa seja aplicada na mesma região, os tempos de secagem devem reduzir.

2) Uma vez que a metodologia de comparação de otimização individual das curvas de secagem foi desenvolvida, sugere-se a aplicação de metodologias numéricas de otimização das mesmas. Para isto serão necessários indicadores do processo, que no caso podem ser valores de razão de resistência, consumo energético, tempo total de secagem e quantidade de água residual no material.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Schacht, C.. Refractories Handbook. Hoboken: CRC Press; 2004. ISBN 978-0-203-02632-8. OCLC: 910581448.
- [2] Lee, W., Vieira, W., Zhang, S., Ahari, K., Sarpoolaky, H., Parr, C.. Castable refractory concretes. *International Materials Reviews* 2001;46(3):145–167. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/095066001101528439>. doi:10.1179/095066001101528439.
- [3] Da Luz, A.P., Bráulio, M.d.A.L., Pandolfelli, V.C.. *Refractory Castable Engineering*. 2015. ISBN 978-3-87264-004-8. OCLC: 1085536302.
- [4] R. T. Tenchev, L. Y. Li, J. A. Purk, . Finite element analysis of coupled heat and moisture transfer in concrete subjected to fire. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 2001;39(7):685–710. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407780119853>. doi:10.1080/10407780119853.
- [5] Gawin, D., Pesavento, F., Schrefler, B.A.. What physical phenomena can be neglected when modelling concrete at high temperature? A comparative study. Part 1: Physical phenomena and mathematical model. *International Journal of Solids and Structures* 2011;48(13):1927–1944. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768311001004>. doi:10.1016/j.ijsolstr.2011.03.004.
- [6] Gawin, D., Pesavento, F., Schrefler, B.A.. What physical phenomena can be neglected when modelling concrete at high temperature? A comparative study. Part 2: Comparison between models. *International Journal of Solids and Structures* 2011;48(13):1945–1961. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768311000990>. doi:10.1016/j.ijsolstr.2011.03.003.
- [7] Jansson, R.. *Fire spalling of concrete: Theoretical and experimental studies*. Ph.D. thesis; KTH Royal Institute of Technology; 2013.
- [8] Moreira, M., Dal Pont, S., Ausas, R., Cunha, T., Luz, A., Pandolfelli, V.. Direct comparison of multi and single-

- phase models depicting the drying process of refractory castables. *Open Ceramics* 2021;6:100111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666539521000572>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100111>.
- [9] Taira, H., Nakamura, H.. Microwave drying of monolithic refractories. Tech. Rep.; Nippon Steel; 2008.
- [10] Jenkins, J., Piper, A., Proctor, J.. Important considerations for refractory dryouts, startups & shutdowns. In: 2011 Sulfur Recovery Symposium in Vail, CO, Brimstone STS Limited. 2011, p. 3–15.
- [11] Luikov, A.V.. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies. Oxford; New York: Pergamon Press; 1966. ISBN 978-1-4832-0065-1. URL: <http://books.google.com/books?id=eQpRAAAAMAAJ>; oCLC: 594864031.
- [12] Bažant, Z.P., Thonguthai, W.. Pore pressure in heated concrete walls: theoretical prediction. *Magazine of Concrete Research* 1979;31(107):67–76. URL: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/mac.1979.31.107.67>. doi:10.1680/mac.1979.31.107.67.
- [13] Fey, K.G., Riehl, I., Wulf, R., Gross, U.. First heat-up of 1d multi-layer walls and 2d geometries consisting of refractory concrete. *International Journal of Thermal Sciences* 2017;116:159–171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.11.021>. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2016.11.021.
- [14] Palmer, G., Cobos, J., Millard, J., Howes, T.. The accelerated drying of refractory concrete – part ii: Numerical modelling. 2014,.
- [15] Fey, K.G., Riehl, I., Wulf, R., Gross, U.. Experimental and numerical investigation of the first heat-up of refractory concrete. *International Journal of Thermal Sciences* 2016;100:108–125. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1290072915002719>. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2015.09.010.
- [16] Bažant, Z.P., Jirásek, M.. Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures; vol. 225. Dordrecht: Springer Netherlands; 2018. ISBN 978-94-024-1136-2 978-94-024-1138-6. URL: <http://link.springer.com/10.>

1007/978-94-024-1138-6. doi:10.1007/978-94-024-1138-6.

- [17] Gong, Z.X., JluJumdar, A.S.. A model for kiln-dryins of refractory concrete slabs. *Drying Technology* 1993;11(7):1617–1639. URL: <https://doi.org/10.1080/07373939308916921>. doi:10.1080/07373939308916921.
- [18] Roy, J., Chandra, S., Maitra, S.. Nanotechnology in castable refractory. *Ceramics International* 2019;45(1):19 – 29. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218327408>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.261>.
- [19] Sako, E.Y., Pandolfelli, V.C.. Artigo revisão - A relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho. *Cerâmica* 2014;60(353):127–143.
- [20] Gomes, D.T.. Concretos refratários fosfatados para refino de petróleo: caracterização, propriedades e adequação ao uso. Ph.D. thesis; 2018. URL: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10778>.
- [21] Salomão, R., Bittencourt, L.R.M., Pandolfelli, V.C.. Aditivos de secagem para concretos refratários: pó de alumínio e fibras poliméricas. *Cerâmica* 2008;54(330):259–267. URL: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132008000200017&lng=pt&tlng=pt. doi:10.1590/S0366-69132008000200017.
- [22] OUMMADI, S., Nait-Ali, B., Alzina, A., Victor, J.L., Lounay, Y., Mirdrikvand, M., et al. Distribution of water in ceramic green bodies during drying. *Journal of the European Ceramic Society* 2019;39(10):3164 – 3172. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221919302298>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.04.005>.
- [23] Innocentini, M.D.M., Cardoso, F.A., Akyiوشي, M.M., Pandolfelli, V.C.. Drying Stages during the Heating of High-Alumina, Ultra-Low-Cement Refractory Castables. *Journal of the American Ceramic Society* 2003;86(7):1146–1148. URL: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03438.x>. doi:10.1111/j.1151-2916.2003.tb03438.x.

- [24] Meunier, P., Ermtraud, P. Methods to Assess the Drying Ability of Refractory Castables; chap. 163. John Wiley Sons, Ltd. ISBN 9781118837009; 2014, p. 959–964. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118837009.ch163>. doi:10.1002/9781118837009.ch163. arXiv:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118837009.ch163>.
- [25] Antonovič, V., Szczerba, J., Keriene, J., Stonys, R., Boris, R.. Refractory Materials for Biofuel Boilers. Frontiers in Bioenergy and Biofuels 2017;URL: <https://www.intechopen.com/books/frontiers-in-bioenergy-and-biofuels/refractory-materials-for-biofuel-boilers>. doi:10.5772/65550.
- [26] Cardoso, F.A., Innocentini, M.D., Akiyoshi, M.M., Pandolfelli, V.C.. Effect of curing time on the properties of cac bonded refractory castables. Journal of the European Ceramic Society 2004;24(7):2073 – 2078. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221903003716>. doi:[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00371-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00371-6).
- [27] Reed, J.S., Reed, J.S.. Principles of ceramics processing. 2nd ed ed.; New York: Wiley; 1995. ISBN 978-0-471-59721-6.
- [28] Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E.. The properties of gases and liquids. 1987.
- [29] Ozawa, M., Uchida, S., Kamada, T., Morimoto, H.. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission. Construction and Building Materials 2012;37:621 – 628. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181200462X>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070>; non Destructive Techniques for Assessment of Concrete.
- [30] Palmer, G., Cobos, J., Millard, J., Howes, T.. The accelerated drying of refractory concrete – part i: A review of current understanding. 2014,.
- [31] Mizobe, A., Ide, K., Iwashita, K., Murakami, K.. Temperature and pressure in monolithic refractory during drying process. J Tech, Assoc Refr

2008;(28):279–283.

- [32] Gong, Z.X., Mujumdar, A.S.. Development of drying schedules for one-side-heating drying of refractory concrete slabs based on a finite element model. *Journal of the American Ceramic Society* 1996;79(6):1649–1658. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08777.x>. doi:10.1111/j.1151-2916.1996.tb08777.x.
- [33] Gong, Z.X., Mujumdar, A.S.. Review of r&d in drying of refractories. *Drying Technology* 2007;25(12):1917–1925. URL: <https://doi.org/10.1080/07373930701727200>. doi:10.1080/07373930701727200.
- [34] Classical Irreversible Thermodynamics. In: Lebon, G., Jou, D., Casas-Vázquez, J., editors. *Understanding Non-equilibrium Thermodynamics: Foundations, Applications, Frontiers*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-74252-4; 2008, p. 37–68. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74252-4_2. doi:10.1007/978-3-540-74252-4_2.
- [35] Ulm, F.J., Coussy, O., Bažant, Z.P.. The “Chunnel” Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete. *Journal of Engineering Mechanics* 1999;125(3):272–282. URL: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281999%29125%3A3%28272%29>. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:3(272).
- [36] Abdel-Rahman, A.K., Ahmed, G.N.. Computational heat and mass transport in concrete walls exposed to fire. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 1996;29(4):373–395. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407789608913798>. doi:10.1080/10407789608913798.
- [37] Ichikawa, Y., England, G.. Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures. *Nuclear Engineering and Design* 2004;228(1-3):245–259. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549303002942>. doi:10.1016/j.nucengdes.2003.06.011.
- [38] Chung, J.H., Consolazio, G.R., McVay, M.C.. Finite element stress analysis of a reinforced high-strength concrete column in se-

- vere fires. *Computers & Structures* 2006;84(21):1338–1352. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794906001283>. doi:10.1016/j.compstruc.2006.03.007.
- [39] Dwaikat, M., Kodur, V.. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems. *Fire Safety Journal* 2009;44(3):425–434. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711208001239>. doi:10.1016/j.firesaf.2008.09.001.
- [40] Gong, Z.X., Mujumdar, A.S.. The influence of an impermeable surface on pore steam pressure during drying of refractory concrete slabs. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1995;38(7):1297–1303. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001793109400239R>. doi:10.1016/0017-9310(94)00239-R.
- [41] Jacob Fish, T.B.. *A first course in finite elements*. John Wiley Sons Ltd; 2007. ISBN 9780470035801,9780470510841,0470035803.
- [42] Langtangen, H.P., Logg, A.. *Solving PDEs in Python*. Cham: Springer International Publishing; 2016. ISBN 978-3-319-52461-0 978-3-319-52462-7. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-52462-7>. doi:10.1007/978-3-319-52462-7.
- [43] Logg, A., Wells, G.N.. DOLFIN: Automated finite element computing. *ACM Transactions on Mathematical Software* 2010;37(2):1–28. URL: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1731022.1731030>. doi:10.1145/1731022.1731030.
- [44] Langtangen, H.P., Mardal, K.A.. *Introduction to Numerical Methods for Variational Problems*. Springer International Publishing; 2019. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23788-2>. doi:10.1007/978-3-030-23788-2.
- [45] Luz, A., Moreira, M., Wöhrmeyer, C., Parr, C., Pandolfelli, V.. Drying behavior optimization of dense refractory castables by adding a permeability enhancing active compound. *Ceramics International* 2019;45(7, Part A):9048–9060. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884219302615>. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.088>.

1016/j.ceramint.2019.01.242.

- [46] Pileggi, R., Pandolfelli, V., Paiva, A., Gallo, J.. Novel rheometer for refractory castables. *American Ceramic Society Bulletin* 2000;79(1):54–58.
- [47] Innocentini, M.D.M., Cardoso, F.A., Akiyoshi, M.M., Pandolfelli, V.C.. Drying stages during the heating of high-alumina, ultra-low-cement refractory castables. *Journal of the American Ceramic Society* 2003;86(7):1146–1148. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03438.x>.
- [48] Santos, A., Paiva, A., Da Luz, A., Pandolfelli, V.C.. Influence of $MgCl_2$ and $CaCl_2$ salts on MgO hydration behaviour. *Ceramica* 2018;64:20 – 29. doi:10.1590/0366-69132018643692198. (InPortuguese).
- [49] Akiyoshi, M., Christoforo, A., Da Luz, A., Pandolfelli, V.C.. Thermal conductivity modeling based on physical and chemical properties of refractories. *Ceramics International* 2016;43. doi:10.1016/j.ceramint.2016.11.091.
- [50] Arroyo, F., Christoforo, A., Salvini, V., Pelissari, P.I., Pandolfelli, V.C., Luz, A., et al. Development of plaster foam for thermal and acoustic applications. *Construction and Building Materials* 2020;362. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120800.
- [51] Innocentini, M., Silva, M., Menegazzo, B., Pandolfelli, V.C.. Permeability of refractory castables at high temperatures. *Journal of the American Ceramic Society* 2004;84:645 – 647. doi:10.1111/j.1151-2916.2001.tb00715.x.
- [52] Innocentini, M., Salomão, R., Ribeiro, C., Cardoso, F., Pandolfelli, V.C., Rettore, R., et al. Permeability of fiber-containing refractory castables - part 1. *American Ceramic Society Bulletin* 2002;81:34 – 38.
- [53] Moreira, M.H.. *Uso de Modelo Numérico para a Otimização das Curvas de Secagem de Concretos Aluminosos*. 2019. Monografia (Bacharel em Engenharia de Materiais), UFSCar (Universidade Federal de São Carlos), São Carlos, Brazil.
- [54] Oliveira, C.R.. *Efeito da Temperatura e de Aditivos de Secagem na Permeabilidade de Concretos Refratários*. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), PPG-CEM UFSCar, São Carlos, Brazil.

- [55] Moreira, M., Luz, A., Cunha, T., Lemaistre, H., Auvray, J., Parr, C., et al. Practical numerical simulation and experimental setup for speeding up the drying behavior of calcium aluminate cement (cac)-bonded refractory castables. Proceedings of UNITECR 2019; 2019,.
- [56] Da Luz, A., Moreira, M., Cunha, T., Pandolfelli, V.. Secagem de concretos refratários densos -novas estratégias para sua avaliação (drying of dense refractory castables -new strategies for its evaluation). 63° Congresso Brasileiro de Cerâmica; 2019,.
- [57] Ahrens, J., Geveci, B., Law, C.. Paraview: An end-user tool for large data visualization. Visualization Handbook 2005;.
- [58] Cummings, E.M.. Modeling the cryosphere with FEniCS. arXiv:160902190 [physics] 2016;URL: <http://arxiv.org/abs/1609.02190>; arXiv: 1609.02190.
- [59] Alnæs, M., Blechta, J., Hake, J., Johansson, A., Kehlet, B., Logg, A., et al. The FEniCS Project Version 1.5. <p>Archive of Numerical Software 2015;Vol 3. URL: <http://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/ans/article/view/20553>. doi:10.11588/ans.2015.100.20553.
- [60] Santos, M., Moreira, M., Campos, M., Pelissari, P.I., Angélico, R., Sako, E., et al. Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses. Ceramics International 2018;44. doi:10.1016/j.ceramint.2018.04.092.
- [61] Santos, M.R.. Análise térmica e energética do revestimento refratário de painéis de aço via modelos computacionais. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), PPG-CEM UFSCar, São Carlos, Brazil.