



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA



RICARDO SOARES GOMEZ

ESTUDO TEÓRICO DE UM FORNO INTERMITENTE À GÁS NATURAL, PARA A
INDÚSTRIA CERÂMICA: MODELAGEM E ANÁLISE TÉRMICA
TRANSIENTE

CAMPINA GRANDE – PB

2019

RICARDO SOARES GOMEZ

**ESTUDO TEÓRICO DE UM FORNO INTERMITENTE À GÁS NATURAL, PARA A
INDUSTRIA CERÂMICA: MODELAGEM E ANÁLISE TÉRMICA
TRANSIENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

CAMPINA GRANDE – PB

2019

G633e

Gomez, Ricardo Soares.

Estudo teórico de um forno intermitente à gás natural, para a indústria cerâmica: modelagem e análise térmica transiente / Ricardo Soares Gomez. – Campina Grande, 2019.

191 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".

Referências.

1. Material Cerâmico. 2. Secagem. 3. Queima. 4. Energia. 5. Eficiência Térmica. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 666:66.021.4:621.43.018.3(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MARIA ANTONIA DE SOUSA CRB 15/398

ESTUDO TEORICO DE UM FORNO INTERMITENTE À GAS NATURAL, PARA INDUSTRIA CERÂMICA:
MODELAGEM E ANALISE TÉRMICA TRANSIENTE.

RICARDO SOARES GOMEZ

Dissertação Aprovada em 08/08/2019 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

CPF: 436.676.604-30

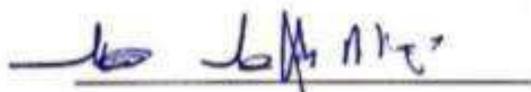
(ORIENTADOR)



Drª. Josedite Saraiva de Souza

CPF: 075.243.857-30

(EXAMINADOR EXTERNO)



Dr. José Jefferson da Silva Nascimento

CPF: 569.851.694-49

(EXAMINADOR EXTERNO)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à toda minha família, em especial meus pais, Rosana Soares e Ricardo Gomez, por todo apoio, ensinamentos e amor incondicional, e por não medirem esforços para me proporcionar a melhor educação possível.

À minha noiva Viviane Ramos de Azevêdo, fazendo-se sempre presente com muito incentivo, carinho, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me proporcionou o dom da vida, por estar sempre ao meu lado, dando-me sabedoria, humildade, coragem e principalmente perseverança nas adversidades encontradas pelo caminho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela oportunidade, paciência, dedicação e ensinamentos transmitidos durante todo o tempo que trabalhamos juntos.

Aos meus amigos de curso e grupo de pesquisa, em especial Túlio Rafael, pela amizade e ensinamentos.

À FAPESQ, CAPES, CNPQ e FINEP pelo suporte financeiro.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

RESUMO

Secagem e queima de produtos cerâmicos são processos que necessitam de elevado consumo de energia. Tornar tais processos mais eficientes pode melhorar a qualidade do produto, reduzir o consumo energético e tempo de processamento e, conseqüentemente, promover ganhos econômicos e ambientais. Desta forma, este trabalho tem por objetivo quantificar teoricamente as transferências de calor que ocorrem em um forno cerâmico intermitente operando com gás natural durante as etapas de aquecimento e resfriamento, com e sem isolamento térmico. Toda a formulação matemática proposta é baseada nos princípios da conservação da energia (primeira lei da termodinâmica e lei de Fourier). Todo o estudo é feito via procedimentos matemáticos implementados no software Excel e planejamento experimental. Resultados de perdas de calor, distribuição de temperatura no isolamento térmico e ganho energético são apresentados e analisados. Verificou-se que a maior perda de calor ocorre por radiação nas paredes laterais do equipamento, e que é necessária uma quantidade considerável de energia para aquecer as paredes laterais, base e teto do forno. A fibra de vidro, atuando como isolamento térmico, é o material que proporciona uma maior redução na temperatura superficial externa máxima e um maior ganho energético, quando comparado com o forno sem isolamento térmico. Do planejamento experimental fatorial, foi possível obter modelos matemáticos preditivos que quantificam a influência da espessura e demais propriedades termofísicas do material isolante no ganho energético e na temperatura superficial externa máxima do forno.

Palavras-chave: Material Cerâmico, Secagem, Queima, Energia, Eficiência Térmica.

ABSTRACT

Drying and firing of ceramic products are processes that require high energy consumption. Making these processes more efficient can improve product quality, reduce energy consumption and processing time and, consequently, promote economic and environmental gains. In this sense, this work aims to theoretically quantify the heat transfer that occur in an intermittent ceramic kiln operating with natural gas during the heating and cooling stages, with and without thermal insulation. All proposed mathematical formulation is based on the principles of energy conservation (first law of thermodynamics and Fourier law). All the study is done via mathematical procedures implemented in Excel software and experimental design. Results of heat losses, temperature distribution in the thermal insulation and energy gain are presented and analyzed. It was verified that the greatest heat loss occurs by radiation in the sidewalls of the equipment, and that a considerable amount of energy is required to heat the sidewalls, base and ceiling of the kiln. The fiberglass, acting as thermal insulation, is the material that provides a greater reduction in the maximum external surface temperature and a greater energetic gain, when compared to the kiln without thermal insulation. From the factorial experimental design method, it was possible to obtain predictive mathematical models that quantify the influence of the thickness and other thermophysical properties of the insulation material on the energy gain and the maximum external surface temperature of the kiln.

Keywords: Ceramic Material, Drying, Burning, Energy, Thermal Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva de secagem.	37
Figura 2.2 - Curva da taxa de secagem.....	37
Figura 2.3 - Curva de secagem e taxa de secagem com apenas um período de taxa decrescente.	38
Figura 2.4 - Curva de queima genérica de produtos cerâmicos em forno intermitente.....	40
Figura 2.5 - Curva de queima genérica de produtos cerâmicos em forno tipo túnel.....	41
Figura 2.6 - Representação de um Forno Intermitente.	42
Figura 2.7 - Distribuição de pressão em um forno contínuo.	44
Figura 3.1 - Forno cerâmico intermitente em estudo (a) e vista em corte (b).	50
Figura 3.2 - Esquema da localização dos termopares nas paredes laterais direita (a) e esquerda (b) do forno.	51
Figura 3.3 - Corte do forno e volumes de controle na parede lateral, base e teto do mesmo.....	53
Figura 3.4 - Considerações para análise do forno com isolamento térmico.....	59
Figura 3.5 - Volume de controle usado na discretização.....	62
Figura 4.1 - Temperatura superficial externa do forno em função do tempo.....	74
Figura 4.2 - Temperatura próxima a superfície interna do forno em função do tempo.....	75
Figura 4.3 - Temperaturas superficiais interna e externa da parede do forno, e ambiente nas vizinhanças do forno em função do tempo.....	76
Figura 4.4 - Perda de calor do forno em função do tempo.	76
Figura 4.5 - Comparação entre as perdas de calor pelas paredes laterais e pelo conjunto base/teto do forno em função do tempo.....	77
Figura 4.6 - Fluxo de calor por unidade de área perdido pelo forno em função do tempo.	78
Figura 4.7 - Comparação entre os fluxos de calor por unidade de área perdidos pelas paredes laterais e pelo conjunto base/teto do forno em função do tempo.	78
Figura 4.8 - Taxas de transferência de calor no forno sem isolamento térmico.....	79
Figura 4.9 - Taxa com que a energia é fornecida ao forno em função do tempo.	80
Figura 4.10 - Energia fornecida acumulada em função do tempo.....	81
Figura 4.11 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.	85

Figura 4.12 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	86
Figura 4.13 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	86
Figura 4.14 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	87
Figura 4.15 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.....	88
Figura 4.16 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	88
Figura 4.17 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	89
Figura 4.18 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	89
Figura 4.19 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.....	90
Figura 4.20 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	91
Figura 4.21 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	91
Figura 4.22 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	92
Figura 4.23 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.....	93
Figura 4.24 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	93
Figura 4.25 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	94
Figura 4.26 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	94

Figura 4.27 - Perda de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.....	95
Figura 4.28 - Perda de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	96
Figura 4.29 - Perda de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	96
Figura 4.30 - Perda de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	97
Figura 4.31 - Perda de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.....	97
Figura 4.32 - Perda de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra vidro.....	98
Figura 4.33 - Perda de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	98
Figura 4.34 - Perda de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	99
Figura 4.35 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.....	100
Figura 4.36 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	100
Figura 4.37 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	101
Figura 4.38 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras silicato de cálcio.....	101
Figura 4.39 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.....	102
Figura 4.40 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	102
Figura 4.41 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	103

Figura 4.42 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	103
Figura 4.43 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.	104
Figura 4.44 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.....	105
Figura 4.45 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.....	105
Figura 4.46 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.....	106
Figura 4.47 - Energia fornecida total em função da espessura do isolamento térmico.	106
Figura 4.48 - Ganho energético em função da espessura do isolamento térmico.	107
Figura 4.49 - Temperatura superficial externa máxima em função da espessura do isolamento térmico.....	109
Figura 4.50 - Influência da condutividade térmica e emissividade na temperatura superficial externa máxima.....	118
Figura 4.51 - Influência da espessura do isolamento e condutividade térmica na temperatura superficial externa máxima.....	119
Figura 4.52 - Influência da emissividade e espessura do isolamento na temperatura superficial externa máxima.....	119
Figura 4.53 - Influência do calor específico e massa específica na temperatura superficial externa máxima.	120
Figura 4.54 - Influência da espessura do isolamento e emissividade no ganho energético.	121
Figura 4.55 - Influência da emissividade e condutividade térmica no ganho energético.....	122
Figura 4.56 - Influência da condutividade térmica e espessura do isolamento no ganho energético.	122
Figura 4.57 - Influência do calor específico e massa específica no ganho energético.	123
Figura A.1 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	136
Figura A.2 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	136

Figura A.3 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	137
Figura A.4 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	137
Figura A.5 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	138
Figura A.6 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	138
Figura A.7 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	139
Figura A.8 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	139
Figura A.9 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	140
Figura A.10 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	140
Figura B.1 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	141
Figura B.2 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	141
Figura B.3 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	142
Figura B.4 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	142
Figura B.5 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	143

Figura B.6 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	143
Figura B.7 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	144
Figura B.8 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	144
Figura B.9 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	145
Figura B.10 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	145
Figura C.1 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	146
Figura C.2 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.....	146
Figura C.3 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.....	147
Figura C.4 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	147
Figura C.5 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	148
Figura C.6 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.....	148
Figura C.7 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.....	149
Figura C.8 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	149

Figura C.9 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.....	150
Figura C.10 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.....	150
Figura C.11 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.....	151
Figura C.12 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	151
Figura C.13 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	152
Figura C.14 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.....	152
Figura C.15 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.....	153
Figura C.16 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	153
Figura C.17 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	154
Figura C.18 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.....	154
Figura C.19 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.....	155
Figura C.20 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	155
Figura C.21 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	156
Figura C.22 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.	156
Figura C.23 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.....	157

Figura C.24 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	157
Figura C.25 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	158
Figura C.26 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.	158
Figura C.27 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.	159
Figura C.28 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	159
Figura C.29 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	160
Figura C.30 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.	160
Figura C.31 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.	161
Figura C.32 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	161
Figura C.33 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	162
Figura C.34 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.	162
Figura C.35 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.	163
Figura C.36 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	163
Figura C.37 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.	164
Figura C.38 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.	164

Figura C.39 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.....	165
Figura C.40 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.	165
Figura D.1 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica.	166
Figura D.2 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra de vidro.	166
Figura D.3 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de lã de rocha.....	167
Figura D.4 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de silicato de cálcio.	167
Figura D.5 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica.	168
Figura D.6 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra de vidro.	168
Figura D.7 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de lã de rocha.....	169
Figura D.8 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de silicato de cálcio.	169
Figura D.9 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica.	170
Figura D.10 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra de vidro.	170
Figura D. 11 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de lã de rocha.....	171
Figura D.12 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de silicato de cálcio.	171
Figura D.13 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica.	172

Figura D.14 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra de vidro.	172
Figura D.15 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de lã de rocha.....	173
Figura D.16 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de silicato de cálcio.	173
Figura D.17 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica.	174
Figura D.18 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra de vidro.	174
Figura D.19 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de lã de rocha.....	175
Figura D.20 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de silicato de cálcio.	175
Figura D.21 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica.	176
Figura D.22 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra de vidro.	176
Figura D.23 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de lã de rocha.....	177
Figura D.24 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de silicato de cálcio.	177
Figura D.25 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica.	178
Figura D.26 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra de vidro.	178
Figura D.27 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de lã de rocha.....	179
Figura D.28 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de silicato de cálcio.	179

Figura D.29 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica.	180
Figura D.30 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra de vidro.	180
Figura D.31 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de lã de rocha.....	181
Figura D.32 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de silicato de cálcio.	181
Figura D.33 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica.	182
Figura D.34 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra de vidro.	182
Figura D.35 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de lã de rocha.....	183
Figura D.36 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de silicato de cálcio.	183
Figura D.37 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica.	184
Figura D.38 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra de vidro.	184
Figura D.39 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de lã de rocha.....	185
Figura D.40 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de silicato de cálcio.	185
Figura E.1 - Influência da emissividade e espessura do isolamento na perda de energia por convecção.	186
Figura E.2 - Influência da emissividade e condutividade térmica do isolamento na perda de energia por convecção.	186
Figura E.3 - Influência da condutividade térmica e espessura do isolamento na perda de energia por convecção.	187

Figura E.4 - Influência do calor específico e da massa específica do isolamento térmico na perda de energia por convecção.	187
Figura E.5 - Influência da espessura e da emissividade do isolamento na perda de energia por radiação.....	188
Figura E.6 - Influência da emissividade e condutividade térmica do isolamento na perda de energia por radiação.....	188
Figura E.7 - Influência da condutividade térmica e da espessura do isolamento na perda de energia por radiação.....	189
Figura E.8 - Influência do calor específico e da massa específica do isolamento na perda de energia por radiação.....	189
Figura E.9 - Influência da espessura e da emissividade do isolamento na energia acumulada no isolamento.....	190
Figura E.10 - Influência da emissividade e da condutividade térmica do isolamento na energia acumulada no isolamento.	190
Figura E.11 - Influência da condutividade térmica e da espessura do isolamento na energia acumulada no isolamento.	191
Figura E.12 - Influência do calor específico e da massa específica do isolamento na energia acumulada no isolamento.	191

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais vantagens e desvantagens de cada tipo de forno utilizado na indústria cerâmica.	43
Tabela 3.1 – Condutividade térmica (k) em função da temperatura de operação e faixa de aplicação para cada tipo de isolamento térmico.	60
Tabela 3.2 - Demais propriedades dos isolamentos térmicos.	60
Tabela 3.3 - Coeficientes das equações discretizadas em função do volume de controle.	65
Tabela 3.4 - Condição de convergência em função do valor de C.	68
Tabela 3.5 - Níveis reais e codificados das variáveis de entrada em estudo.	72
Tabela 3.6 - Matriz de planejamento fatorial do tipo 2^{5-1} com um experimento no ponto central.	73
Tabela 4.1 - Tamanho representativo de malha em função da espessura do isolamento térmico.	82
Tabela 4.2 - Resultado do estudo de convergência de malha para a variável ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento.	83
Tabela 4.3 - Resultado do estudo de independência do passo de tempo para a variável ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento.	84
Tabela 4.4 - Matriz de planejamento e resultados obtidos.	110
Tabela 4.5 - Níveis de significância dos fatores sobre as variáveis de resposta.	111
Tabela 4.6 - Coeficientes estatisticamente significativos para cada variável de resposta.	112
Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Q_{conv}	115
Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Q_{rad}	115
Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Q_{acu}	116
Tabela 4.10 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta $T_{s2,ext,max}$	116
Tabela 4.11 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Ganho Energético.	117

LISTA DE SÍMBOLOS

$a_E, a_p, a_p^0, a_w, S_u, S_p$	Coeficientes	[-]
A	Área	[m ²]
$A_{\text{base/teto}}$	Área do conjunto base/teto	[m ²]
c_p	Calor específico	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
$c_{p_{\text{ar}}}$	Calor específico do ar	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
$c_{p_{\text{refratário}}}$	Calor específico do tijolo refratário	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
C	Parâmetro de condição de convergência de malha	[-]
$\dot{E}_{\text{ac}} = \frac{dE_{\text{ac}}}{dt}$	Taxa de energia acumulada no sistema	[W]
$\dot{E}_{\text{ac}_{\text{iso}}}$	Taxa de energia acumulada no isolamento térmico	[W]
\dot{E}_{ent}	Taxa de energia que entra no volume de controle	[W]
\dot{E}_{g}	Taxa de energia que é gerada no volume de controle	[W]
\dot{E}_{sai}	Taxa de energia que sai do volume de controle	[W]
$\dot{E}_{\text{fornecida}}$	Taxa com que a energia é fornecida para o forno	[W]
$E_{\text{fornecida}}$	Energia fornecida durante o processo de aquecimento do forno	[J]
$E_{\text{fornecida}_{\text{iso}}}$	Energia fornecida durante o processo de aquecimento do forno com isolamento térmico	[J]
g	Aceleração da gravidade	[m s ⁻²]
\bar{h}_c	Coeficiente de convecção	[W m ⁻² K ⁻¹]
\bar{h}_r	Coeficiente de radiação	[W m ⁻² K ⁻¹]
ICM	Índice de Convergência de Malha	[-]
k_e	Condutividade térmica na face leste do volume de controle	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
k_f	Condutividade térmica do fluido (ar ambiente)	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
k_{f1}	Condutividade térmica na face oeste do 1º volume de controle	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
k_{f2}	Condutividade térmica na face leste do último volume de controle	[W m ⁻¹ K ⁻¹]

k_{iso}	Condutividade térmica do isolamento térmico	$[W m^{-1} K^{-1}]$
k_s	Condutividade térmica da areia	$[W m^{-1} K^{-1}]$
k_w	Condutividade térmica na face leste do volume de controle	$[W m^{-1} K^{-1}]$
l	Tamanho representativo de malha	$[mm]$
L	Comprimento característico (altura da parede lateral externa do forno)	$[m]$
L_{iso}	Espessura do isolamento térmico	$[mm]$
m_{ar}	Massa do ar contida no interior do forno	$[kg]$
$m_{base/teto}$	Massa de tijolo refratário no conjunto base/abóbada do forno	$[kg]$
$m_{paredes lat.}$	Massa de tijolo refratário das paredes laterais do forno	$[kg]$
M_{ar}	Massa molecular do ar	$[kg/kmol]$
N	Número de elementos de malha	$[-]$
\overline{Nu}_L	Nusselt médio	$[-]$
Pr	Número de Prandtl	$[-]$
p	Ordem aparente das malhas	$[-]$
$q_{aquecer_{ar}}$	Taxa de energia para aquecer o ar no interior do forno	$[W]$
$q_{aquecer_{base/teto}}$	Taxa de energia para aquecer o conjunto base/teto do forno	$[W]$
$q_{aquecer_{paredes lat.}}$	Taxa de energia para aquecer as paredes laterais do forno	$[W]$
$q_{aquecer_{peças}}$	Taxa de energia para aquecer as peças no interior do forno	$[W]$
$q_{perdido}$	Calor perdido	$[W]$
$q_{perdido_{base/teto}}$	Calor perdido pelo conjunto base/teto do forno	$[W]$
$q_{perdido_{paredes lat.}}$	Calor perdido pelas paredes laterais do forno	$[W]$
$q_{entra_{iso}}$	Taxa com que a energia entra no isolamento térmico	$[W]$
$q_{sai_{iso}}$	Taxa com que a energia sai do isolamento térmico	$[W]$
q_{conv}	Perda de calor por convecção	$[W]$

q_{rad}	Perda de calor por radiação	[W]
$Q_{\text{entra,iso}}$	Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento	[J]
Q_{conv}	Energia perdida por convecção ao longo do processo de aquecimento	[J]
Q_{rad}	Energia perdida por radiação ao longo do processo de aquecimento	[J]
Q_{acu}	Energia acumulada no isolamento térmico na etapa de aquecimento	[J]
R	Constante universal dos gases	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
Ra_L	Número de Rayleigh	
S	Termo fonte	[W m ⁻³]
T	Tempo	[s]
T_{int}	Temperatura no interior do forno	[°C]
T_{med}	Temperatura média na parede do forno	[°C]
$T_{\text{med,iso}}$	Temperatura média do isolamento térmico	[°C]
$T_{\text{s,int}}$	Temperatura superficial interna	[°C]
$T_{\text{s,ext}}$	Temperatura superficial externa	[°C]
$T_{\text{s2,ext}}$	Temperatura superficial externa ao isolamento térmico	[°C]
$T_{\text{s2,ext,max}}$	Temperatura superficial externa máxima ao isolamento	[°C]
$T_{\text{amb}} = T_{\infty}$	Temperatura ambiente	[°C]
T_{viz}	Temperatura da vizinhança	[°C]
T_f	Temperatura de película	[°C]
T_E	Temperatura no volume de controle E no instante $t + \Delta t$	[°C]
T_P	Temperatura no volume de controle P no instante $t + \Delta t$	[°C]
T_P^0	Temperatura no volume de controle P no instante t	[°C]
T_W	Temperatura no volume de controle W no instante $t + \Delta t$	[mm]
δx_{PE}	Distância entre os centroides P e E	[mm]
δx_{WP}	Distância entre os centroides W e P	[mm]
δx_{Pe}	Distância entre o centroide P e a face e	[mm]

δx_{wP}	Distância entre a face w e o centroide P	[mm]
Δx	Comprimento do volume de controle P	[mm]
α	Difusividade térmica	[m ² s ⁻¹]
β	Coefficiente de expansão volumétrica	[K ⁻¹]
ε	Emissividade	[-]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² s ⁻¹]
ρ	Massa específica	[kg m ⁻³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W m ⁻² K ⁻⁴]
ϕ	Variável de resposta no estudo de convergência de malha	[MJ]
ϕ_{ext}^{21}	Solução extrapolada para a variável de resposta utilizada no estudo de convergência de malha	[MJ]

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	28
INTRODUÇÃO	28
1.1 Objetivo geral	30
1.2 Objetivos específicos	30
CAPÍTULO 2	32
REVISÃO DA LITERATURA	32
2.1 Cerâmica	32
2.1.1 Histórico	32
2.1.2 Processo de manufatura.....	34
2.1.3 Curva de secagem.....	36
2.1.4 Curva de queima.....	40
2.2 Fornos	41
2.2.1 Tipos de fornos.....	41
2.2.1.1 Forno intermitente	42
2.2.1.2 Forno contínuo	43
2.2.2 Combustíveis usados em fornos	45
2.2.3 Consumo energético dos fornos	46
2.3 Estado da arte	47
CAPÍTULO 3	50
MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 Problema físico	50
3.2 Procedimento Experimental.....	51
3.3 Formulação matemática	52
3.3.1 Forno sem isolamento térmico	52
3.3.2 Forno com isolamento térmico.....	59
3.4 Planejamento experimental	71
CAPÍTULO 4	74
RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1 Forno sem isolamento térmico.....	74
4.2 Forno com isolamento térmico	81

4.3 Planejamento experimental.....	109
CAPÍTULO 5.....	124
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	124
5.1 Conclusões.....	124
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
APÊNDICES.....	135
APÊNDICE A – Balanço de energia global no isolamento térmico para diferentes malhas.....	136
APÊNDICE B – Gráficos de convergência de malha.....	141
APÊNDICE C – Temperatura em função do tempo para diversas posições no interior do isolamento térmico.....	146
APÊNDICE D – Temperatura em função do tempo para diversas posições no interior do isolamento térmico.....	166
APÊNDICE E – Superfícies de resposta para as variáveis Q_{conv} , Q_{rad} e Q_{acu}	186

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A cerâmica vermelha, classe à qual pertence o tijolo usado na construção civil, acompanha a humanidade desde tempos remotos, sendo considerado por muitos como o material artificial mais antigo produzido pelo homem (HEIMKE; GRISS, 1980). A maioria dos materiais cerâmicos são classificados nos seguintes grupos: vidros, argilas, refratários, abrasivos, cimentos e as cerâmicas avançadas (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012). Os principais produtos da indústria cerâmica vermelha são os tijolos furados, tijolos maciços, lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos.

As propriedades térmicas e mecânica dos produtos cerâmicos são influenciadas tanto pela composição da argila utilizada, como pela microestrutura da peça, que por sua vez é obtida em função de parâmetros do processamento.

As principais etapas do processo de produção de produtos cerâmicos são: preparação da matéria-prima, conformação e processamento térmico (secagem e queima). A secagem é um processo termodinâmico, através do qual a redução da umidade ocorre pelo fornecimento de energia ao material na forma de calor. O transporte de água do interior para a superfície do material pode ocorrer na fase líquida e / ou vapor, dependendo do tipo de produto e da porcentagem de umidade presente no mesmo (ALMEIDA, 2009). No processo de secagem, a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar são parâmetros importantes que devem ser controlados para evitar falhas, tais como rachaduras e deformações. Essas falhas afetam a qualidade da peça cerâmica, gerando prejuízos econômicos para as indústrias cerâmicas (BRITO et al., 2016).

Após a etapa de secagem, a peça moldada é submetida ao processo de queima com o intuito de lhe conferir rigidez e resistência mecânica. A temperatura de queima é da ordem de 750 a 900°C para tijolos, de 900 a 950°C para telhas e 950 a 1200°C para tubos cerâmicos (SILVA, 2009). Após a queima, a peça é resfriada sob condições controladas. Assim, após o resfriamento, os produtos passam por um controle de qualidade que consiste em uma inspeção visual para descartar as peças quebradas, trincadas, lascadas ou queimadas em excesso (ALMEIDA, 2009).

Os equipamentos térmicos onde as etapas de secagem e queima são realizadas são chamados de fornos. A estrutura destes equipamentos é feita de material refratário, que são cerâmicas com característica de suportar temperaturas acima de 3000°C. Mesmo em tais níveis de temperatura, estes materiais são capazes de manter a resistência mecânica e os níveis de isolamento necessários para o processamento de peças cerâmicas (GUPTA, 2016).

Os fornos utilizados na indústria de cerâmica vermelha podem ser classificados em dois grupos: intermitentes ou contínuos (tipo túnel). Nos fornos intermitentes, a peça cerâmica é colocada em uma determinada posição e permanece lá até que a temperatura desejada seja alcançada, sendo resfriada até a temperatura ambiente e então retirada, geralmente através da mesma porta pela qual foi colocada no interior do equipamento. Nos fornos contínuos, a secagem e a queima são feitas continuamente, sem interrupção para colocar ou retirar as peças; enquanto uma quantidade de peças atinge o final do processo, outra quantidade igual ou semelhante está iniciando o processo (MELCHIADES, 2012).

O processo de produção de produtos cerâmicos requer um alto consumo de energia. Crasta (2006), em pesquisa realizada na Itália, mostra que o custo energético necessário para a produção de produtos cerâmicos representa cerca de 23% do custo médio total de produção, evidenciando que o custo energético tem um peso bastante significativo sobre o preço do produto acabado. Além do custo, tem-se a questão ambiental, haja vista que a energia é fornecida pela queima de combustíveis que, durante a reação de combustão, emitem gases poluentes na atmosfera. Diante do exposto, é crucial desenvolver maneiras de aumentar a eficiência energética do processamento de produtos cerâmicos, tanto pela questão financeira quanto pela questão ambiental.

Os isolantes térmicos são materiais caracterizados pela sua capacidade de retardar a transferência de calor, característica útil em diversos processos industriais. Esses materiais têm em comum a baixa condutividade térmica, uma propriedade que quantifica a taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão térmica (BERGMAN et al., 2011). Entre as principais funções do isolamento térmico, estão:

- Conservação de energia através da redução da perda ou do ganho de calor;
- Controlar a temperatura superficial de fornos e outros equipamentos para conforto e proteção pessoal;
- Evitar a condensação do vapor de água em superfícies frias, como dutos de ar condicionado e água gelada;

- Aumentar a eficiência operacional dos sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado, refrigeração, encanamento e vapor, encontrados em instalações comerciais e industriais;
- Evitar ou reduzir danos ao equipamento devido a corrosão atmosférica ou a exposição ao fogo.

Embora pesquisas indiquem que a energia perdida nos fornos depende das propriedades termofísicas dos materiais isolantes e da espessura do isolamento (CHEN; CHUNG; LIU, 2005; HADAŁA; MALINOWSKI; RYWOTYCKI, 2017), trabalhos que quantifiquem a influência do tipo e espessura do isolamento térmico no ganho energético e o seu efeito na temperatura superficial externa do forno são escassos (GOMEZ et al., 2019a; GOMEZ et al., 2019b), especialmente na indústria cerâmica, o que permitem novas pesquisas nesta linha de trabalho.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar energeticamente um forno/secador do tipo intermitente, operando com gás natural como combustível, para a indústria cerâmica, quantificando as transferências de calor que ocorrem ao longo dos processos transientes de aquecimento e resfriamento.

1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos pode-se citar:

- a) Desenvolver uma modelagem matemática transiente para estudar energeticamente um forno secador intermitente para a indústria cerâmica operando com gás natural como combustível;
- b) Desenvolver um código computacional no software Excel para calcular as trocas térmicas entre o forno e a vizinhança, baseando-se na primeira lei da termodinâmica.
- c) Desenvolver modelagem matemática, sua solução numérica e código computacional no software Excel para calcular as trocas térmicas entre o forno com isolamento térmico nas paredes laterais e a vizinhança, baseando-se na primeira lei da termodinâmica e no método numérico dos volumes finitos.

- d) Quantificar as transferências de calor que ocorrem em um forno cerâmico intermitente durante as etapas de aquecimento e resfriamento.
- e) Desenvolver um estudo de convergência de malha representando o isolamento térmico, baseado na extrapolação de Richardson, conhecido como Índice de Convergência de Malha (ICM).
- f) Verificar a influência do tipo e espessura do isolamento térmico na distribuição de temperatura no isolamento térmico, nos coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação, na perda de calor por convecção e radiação pelas paredes laterais, na taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico, na energia que deve ser fornecida para o forno, na temperatura superficial externa máxima e no ganho energético, quando comparado com o forno sem isolamento térmico;
- g) Desenvolver um planejamento experimental para avaliar a influência da espessura, condutividade térmica, massa específica, calor específico e emissividade do isolamento térmico e de suas interações nas energias perdidas por convecção e por radiação ao longo do processo de aquecimento, na energia acumulada no isolamento térmico durante a etapa de aquecimento, na temperatura superficial externa máxima e no ganho energético do equipamento.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cerâmica

Cerâmica ou material cerâmico compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas (SILVA et al., 2016). Materiais cerâmicos são materiais obtidos a partir da queima da argila e são largamente utilizados na construção civil.

Segundo Brongniart (1844), a argila é a matéria prima mais difundida na superfície da terra, sendo a mais fácil de trabalhar e moldar, além de permitir diversas aplicações práticas e artísticas. Essas características justificam o fato de a cerâmica ter aparecido em diversas civilizações, em períodos diferentes e em todos os continentes, já no final do período paleolítico (BOCH; NIEPCE, 2010).

2.1.1 Histórico

Descobertas indicam que as primeiras cerâmicas surgiram em Dolni Vestonice (sítio arqueológico da República Checa) em aproximadamente 26000 a.C., em seguida na Sibéria em 12000 a.C., China em 11.000 a.C. e Mesopotâmia em 8.000 a.C (VANDIVER, 1990; MARGUERON, 2003; BOCH; NIEPCE, 2010).

A disseminação da cerâmica foi observada tanto na Ásia, quanto no Oriente Médio e Europa no final do período Neolítico, entre 7.000 e 6.000 a.C. (BOCH; NIEPCE, 2010). Este fato coincide com o período em que o homem passa de nômade para a fase sedentária, ou seja, deixa de viver se deslocando de um lugar para o outro buscando moradia, alimento e outros recursos essenciais para sua sobrevivência e passa a se fixar em um lugar, transição essa que foi possível graças à agricultura, caça, pesca e criação de gado. Com esse novo estilo de vida, os seres humanos sentiram

a necessidade de armazenar água, alimento e sementes, utilizando casca de árvore, crânio de animais e, posteriormente, vasilhas cerâmicas para este fim (KAWAGUTI, 2005).

Também foi nesse período que o homem teve a necessidade de criar espaços em busca de abrigo para se defender dos predadores, dos rigores da natureza e de seus próprios semelhantes de tal forma que a sua sobrevivência dependia da segurança destes refúgios. Desta época, surgiram os primeiros tijolos e telhas cerâmicas, que ainda são largamente empregados na construção civil.

Foram os romanos, pelas necessidades crescentes de construção devido a sua constante expansão territorial, os que primeiro estabeleceram a fabricação de cerâmicas como atividade industrial (CORRIA ARADAS, 1996). Durante o período imperial, eram utilizados telhas cozidas e tijolos queimados de boa qualidade nas construções (SANTOS, 2001). A cerâmica também teve grande importância no comércio da Roma Antiga, onde os artefatos cerâmicos de elevada qualidade eram transportados por longas distâncias. Isso era possível graças a capacidade de alguns produtores em satisfazer uma clientela de classe média-alta que não estava contente com os produtos locais (RAEPSAET, 2012). Kawaguti (2005) constata que muito dos conhecimentos relacionados a fabricação de produtos cerâmicos se perderam no obscurantismo da Idade Média.

O grande incêndio de Londres, ocorrido em 1666, fez com que os materiais cerâmicos voltassem a ter grande importância nas edificações. Na época do incêndio, Londres ainda tinha uma arquitetura medieval, com ruas estreitas e casas muito próximas umas das outras. As casas eram feitas de madeira do carvalho com as paredes e tetos cobertos de alcatrão, que evita a umidade da chuva, porém, tornando suas estruturas mais vulneráveis ao fogo. Todos esses fatores influenciaram para a uma das maiores catástrofes da capital inglesa. Após esse acontecimento fatídico, as casas passaram a ser reconstruídas com telhas e tijolos cerâmicos com cimento.

Até o final do século XIX, o sistema de produção de produtos cerâmicos não sofreu grandes mudanças. Até esse período a produção era manual, a secagem era feita ao sol e a queima era realizada em fornos de campanha (ou caieira), um tipo de forno intermitente com baixo rendimento térmico. O sistema produtivo começou a evoluir significativamente a partir da Revolução Industrial e da introdução da primeira máquina a vapor, a partir da qual foi possível mecanizar a operação de preparação e extrusão da argila, além de aumentar a eficiência e capacidade produtiva (SANTOS, 2001).

Outro avanço tecnológico considerável para a indústria cerâmica foi o surgimento do primeiro forno anular tipo Hoffman. Tal sistema de queima, revolucionário para a época, foi capaz

de racionalizar a produção, reduzindo-se drasticamente o consumo térmico dos fornos. Com este tipo de forno, foi possível controlar e regular a alimentação de combustível e a quantidade de ar necessário para a combustão, além de aproveitar os gases de combustão para o pré-aquecimento das peças cerâmicas (SANTOS, 2001).

2.1.2 Processo de manufatura

As principais etapas do processo de produção de produtos cerâmicos são: preparação da matéria-prima, conformação e processamento térmico (secagem e queima).

No processo de manufatura de materiais cerâmicos, água é adicionada à argila para aumentar a sua plasticidade e permitir que peças sejam moldadas facilmente em diferentes formas sem rachar (SILVA et al., 2011, 2012, 2016). Após a moldagem, a peça deve passar pela etapa de secagem, que consiste em um processo termodinâmico de transferência de calor e remoção de umidade em materiais porosos (SILVA et al., 2016). Pelo fato de o processo de secagem promover variações volumétricas na peça moldada, esta água precisa ser retirada cuidadosamente e de forma homogênea para evitar a formação de trincas, torções e outros tipos de defeitos (BATISTA; NASCIMENTO; LIMA, 2009).

A secagem é a etapa do processo de manufatura de produtos cerâmicos que precede a queima e utiliza uma quantidade apreciável de energia térmica para evaporar a água que foi adicionada durante o processo de moldagem (ALMEIDA et al., 2013; BRITO et al., 2016). É importante que as peças cerâmicas sejam submetidas ao processo de secagem para conferi-las resistência e consistência necessárias durante a etapa de queima (CADÉ; NASCIMENTO; LIMA, 2005). Se a umidade do material não for removida na etapa de secagem, a temperatura extrema no forno irá forçar a saída da água durante o processo de queima, aumentando os riscos de formação de defeitos e poderá levar até a explosão do produto (SILVA et al., 2011; ALMEIDA et al., 2014).

A etapa de secagem requer maior tempo e cuidado quando comparado com outras etapas do processo de produção de produtos cerâmicos (ITAYA et al., 2005). O principal parâmetro para se obter um processo de secagem otimizado é a taxa de secagem (BATISTA; NASCIMENTO; LIMA, 2008). Taxas de secagem mais elevadas encurtam o tempo de processo, aumentando a produtividade, porém provocam maiores variações de volume nas peças que podem resultar no aparecimento de defeitos. A correta determinação e o controle deste parâmetro em cada instante de

tempo do processo podem prevenir rachaduras, fissuras, deformações excessivas e empenamentos (ALMEIDA et al., 2014; SILVA et al., 2016), que comprometem a qualidade do produto final.

De acordo com a literatura (REED, 1995; ITAYA; HASATANI, 1996; AUGIER et al., 2002; CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009, SILVA et al., 2011, 2012; ALMEIDA et al., 2014; KHALILI; BAGHERIAN; KHISHEH, 2014; ARAÚJO; DELGADO; BARBOSA DE LIMA, 2016; ARAÚJO et al., 2017; BRITO et al., 2016), as variáveis operacionais que influenciam no processo de secagem são: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, tempo, forma, espessura, relação área/volume, granulometria, umidade inicial e propriedades do material cerâmico. O entendimento de tais variáveis é importante para determinação da curva ideal de secagem para cada tipo de produto. A forma com que cada variável operacional influencia na secagem de produtos cerâmicos foi objetivo de estudo de diversas pesquisas, como segue:

- Os mecanismos de transferência de massa, calor e o fenômeno do encolhimento (shrinkage) são mais intensos em peças com umidade inicial alta e, principalmente, em materiais cerâmicos de granulometria fina (REED, 1995; ITAYA; HASATANI, 1996; BATISTA et al., 2008, 2009, SILVA et al., 2011, 2012; ALMEIDA et al., 2014);
- Maior temperatura e menor umidade relativa do ar de secagem implicam em uma maior taxa de secagem e, conseqüentemente, menor tempo total de secagem (BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2012; ALMEIDA et al., 2014; KHALILI et al., 2014);
- Quanto maior a velocidade do ar de secagem, maior é o gradiente de temperatura no material cerâmico (ARAÚJO et al., 2016);
- Quanto maior o tempo de secagem menor será o teor médio de umidade, em qualquer ponto dentro do sólido (SILVA et al., 2011, 2012; ALMEIDA et al., 2014; KHALILI et al., 2014);
- A forma do corpo interfere na cinética de secagem. Quanto maior a relação área/volume, mais rápida será a secagem (CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009, SILVA et al., 2012, 2016; KHALILI et al., 2014);
- Maiores níveis do teor de umidade inicial implicam em maiores índices de retração volumétrica (BATISTA et al., 2008, 2009);
- As difusividades térmica e de massa influenciam fortemente nas transferências de calor e massa, respectivamente, durante a secagem, sendo responsáveis pela velocidade com que cada processo ocorre (SILVA et al., 2016);

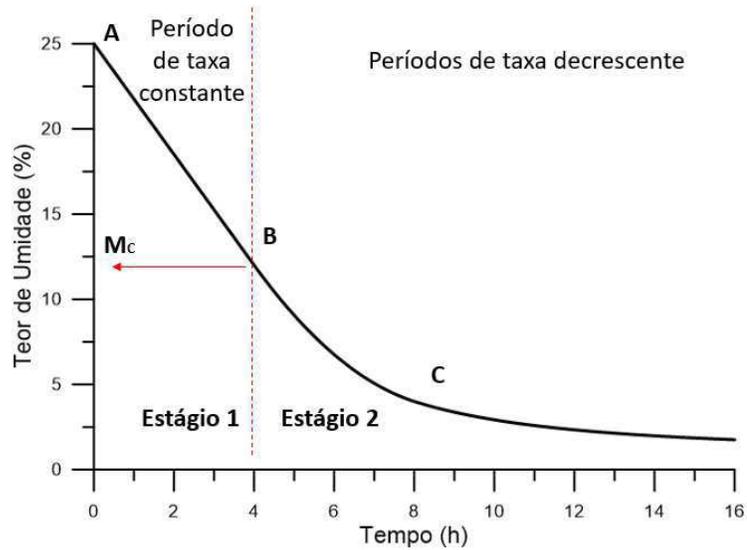
- As áreas próximas aos vértices (cantos) do produto cerâmico apresentam as maiores taxas de transferência de calor e massa (AUGIER et al., 2002; CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009, SILVA et al., 2012, 2011; ALMEIDA et al., 2014; KHALILI et al., 2014; ARAÚJO et al., 2016, 2017; BRITO et al., 2016). Tais regiões estão mais susceptíveis a formação de defeitos;
- Como mencionado anteriormente, a temperaturas do ar de secagem elevadas e umidades relativas baixas são condições operacionais que influenciam numa secagem mais rápida do material. Estes efeitos são, por sua vez, mais acentuados que os gerados pela relação área/volume e pelo teor de umidade inicial (BATISTA et al., 2008, 2009). É válido ressaltar que, quando a temperatura e a umidade relativa do ambiente de secagem são as mesmas para peças cerâmicas diferentes, o teor de umidade inicial e a relação área/volume dominam a cinética de secagem (BATISTA et al., 2008, 2009).

2.1.3 Curva de secagem

Diversos autores relatam que a curva de secagem pode ser dividida em um estágio de taxa constante e um estágio de taxa decrescente (FORTES; OKOS, 1980; BROSNAN; ROBINSON, 2003; KOWALSKI, 2012; FORD, 2013; KHALILI et al., 2014; ARAÚJO et al., 2016). Se o teor de umidade for plotado em função do tempo de processamento, obtém-se uma curva de secagem semelhante à Figura 2.1. A curva da taxa de secagem, obtida através do coeficiente angular da curva de secagem em cada instante de tempo, é muito útil na análise do processo de secagem (KOWALSKI, 2012) e apresenta um comportamento semelhante ao ilustrado na Figura 2.2. Pelas Figuras 2.1 e 2.2, observa-se que a curva de secagem pode ser dividida em três períodos distintos (FORD, 2013):

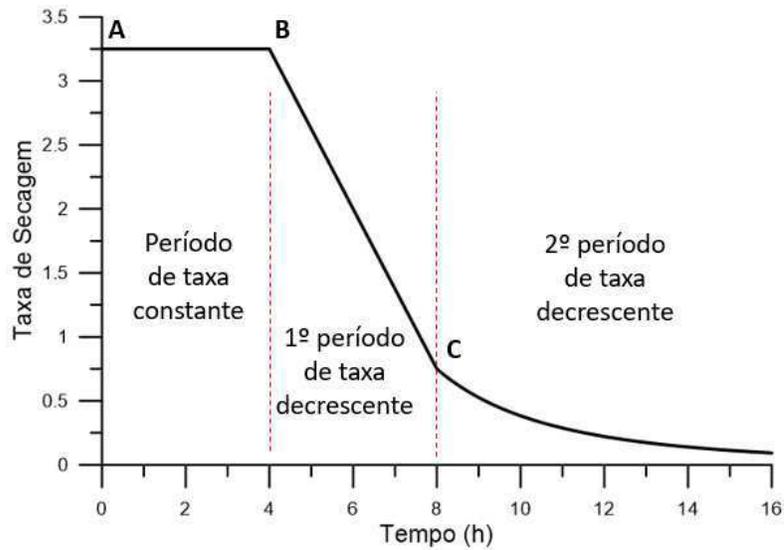
- Período de taxa constante, no qual a taxa de evaporação da água contida no produto a ser secado independe do teor de umidade;
- Primeiro período de taxa decrescente, em que a taxa de secagem é uma função linear do teor de umidade.
- Segundo período de taxa decrescente, no qual a taxa de secagem apresenta uma relação curvilínea com o teor de umidade.

Figura 2.1 - Curva de secagem.



Fonte: Adaptado de Ford (2013).

Figura 2.2 - Curva da taxa de secagem.



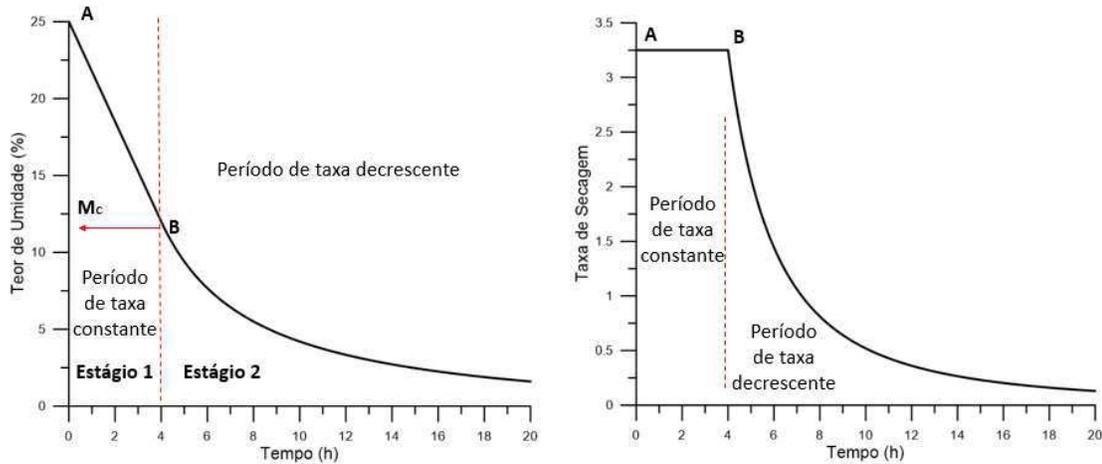
Fonte: Adaptado de Ford (2013).

Em alguns casos, dependendo das condições de secagem e do tipo de material, não é possível diferenciar o primeiro e o segundo período de taxa decrescente de tal forma que a curva de secagem é dividida em um período de taxa constante e um único período de taxa decrescente (Figura 2.3).

Quando a curva da taxa de secagem intercepta o eixo das abcissas (Figura 2.2), significa que a transferência líquida de umidade do produto para o meio de secagem é nula e, conseqüentemente, o equilíbrio é atingido.

O teor de umidade no ponto B nas Figuras 2.1 e 2.2 é conhecido como o teor crítico de umidade (M_c). Além de ser o ponto de transição entre o estágio de taxa constante e o estágio de taxa decrescente, o ponto B é caracterizado pela redução significativa do fenômeno de encolhimento do produto a ser secado. Por isso, quando o produto cerâmico ultrapassa o ponto B, a secagem pode ser conduzida sem medo de produzir grandes deformações, trincas, empenamentos ou outros tipos de falhas provenientes do processo de secagem (BROSNAN; ROBINSON, 2003; KHALILI et al., 2014). Naturalmente esta informação é fortemente dependente das condições de secagem.

Figura 2.3 - Curva de secagem e taxa de secagem com apenas um período de taxa decrescente.



Fonte: Adaptado de Ford (2013).

No período de taxa constante, a taxa de evaporação da umidade é função das condições externas (FORD, 2013). A taxa de evaporação na superfície é determinada pela taxa de difusão do vapor de água através da película estacionária de ar no entorno do material. A taxa de difusão, por sua vez, é proporcional a diferença entre a pressão parcial do vapor de água na superfície do material e a pressão parcial de vapor do ar de secagem (ARAÚJO et al., 2016). Além disso, a taxa de difusão cresce com o aumento da velocidade do ar de secagem devido a elevação dos coeficientes de transferência de massa e calor por convecção (ARAÚJO et al., 2016).

Durante o primeiro estágio de secagem, a superfície do material se comporta como uma superfície de água livre de tal forma que a água fluindo do interior do objeto até a superfície ocorre em uma taxa suficiente para manter a superfície úmida (FORD, 2013). A magnitude do primeiro estágio de secagem depende das diferenças de temperatura e de umidade relativa entre o ar de secagem e a superfície úmida do sólido. Além disso, depende da área do material exposta ao ar de secagem, da geometria e dos coeficientes de transferência de calor e massa (ARAÚJO et al., 2016).

Se a secagem é acelerada de forma demasiada no primeiro estágio de secagem, ocorrerá uma notável e imediata redução da taxa de secagem no segundo estágio, devido ao ressecamento da superfície, além de deformação indesejada, formação de rachadura e demais falhas (ITAYA; HASATANI, 1996). Dessa forma, no período de taxa constante é comum empregar as mais baixas temperaturas e mais elevadas umidades relativas do processo de secagem. É importante ressaltar que cessado o primeiro estágio, a estratégia de secagem muda, e o encolhimento é reduzido drasticamente nos períodos de taxa decrescente (BROSNAN; ROBINSON, 2003), dependendo das condições operacionais do ar de secagem.

Após o ponto B ser alcançado (Figuras 2.1 e 2.2), inicia-se o primeiro período de taxa decrescente. Em tal período de secagem, água líquida ainda se move do interior para a superfície do produto e a evaporação ainda ocorre a partir da superfície, embora a mesma não mais se comporte como água livre (FORD, 2013). Dessa forma, a taxa de difusão dentro do objeto a ser secado controla a taxa de secagem (BROSNAN; ROBINSON, 2003), dependendo fortemente das condições de transporte de umidade dentro do material (KOWALSKI, 2012). Por este fato, aliado com a redução significativa do encolhimento após ultrapassado o teor crítico de umidade (M_c), é comum aumentar a temperatura e a velocidade do ar para acelerar o processo de secagem (BROSNAN; ROBINSON, 2003).

No segundo período de taxa decrescente, a água residual nos capilares próxima a superfície e a água da superfície são totalmente removidas (BROSNAN; ROBINSON, 2003). Desta forma, a evaporação passa a ocorrer dentro do sólido e o vapor atinge a superfície através da difusão através dos poros (FORD, 2013). A taxa de difusão dentro do objeto a ser secado continua controlando a taxa real de eliminação da umidade. Outra característica do segundo estágio de secagem é o aumento contínuo da temperatura do produto, a partir da temperatura de bulbo úmido até a temperatura do meio de secagem (KOWALSKI, 2012).

2.1.4 Curva de queima

O processo de queima de materiais cerâmicos em fornos, contínuos ou não, deve seguir uma curva de queima pré-estabelecida. A curva de queima relaciona a temperatura da peça com o tempo de processamento (ou comprimento do forno para o tipo túnel), indicando a taxa na qual a peça deverá ser aquecida ou resfriada e a temperatura de operação em cada instante de tempo.

As Figuras 2.4 e 2.5 ilustram, respectivamente, curvas de queima típicas para produtos cerâmicos em forno intermitente e forno tipo túnel. À medida que a cerâmica é aquecida ou resfriada, ela é submetida a processos de expansão e compressão. A presença de reações, decomposições e mudanças de fase afetam significativamente as taxas na qual a peça é expandida e comprimida durante o processo de queima. Caso o gradiente de temperatura no processo de queima provoque tensões térmicas superiores ao limite permitido pelo material, o mesmo poderá trincar, rachar ou romper, impossibilitando o seu uso em uma aplicação específica. Esse gradiente de temperatura elevado pode ser provocado tanto por taxas de aquecimento e resfriamento elevadas ou por uma queima não uniforme.

Figura 2.4 - Curva de queima genérica de produtos cerâmicos em forno intermitente.

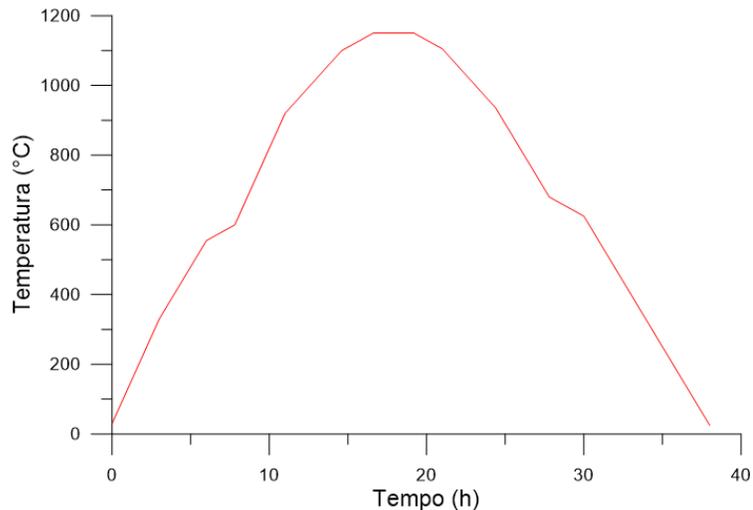
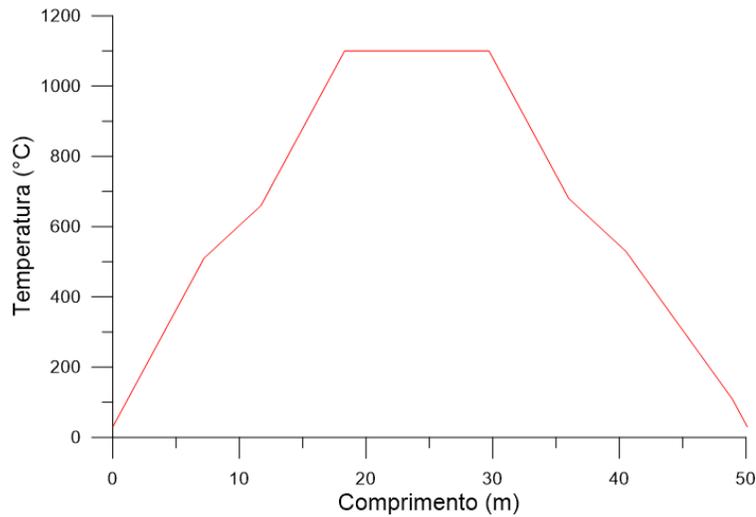


Figura 2.5 - Curva de queima genérica de produtos cerâmicos em forno tipo túnel.



Quando as taxas de contração e expansão do material são elevadas, as taxas de variação de temperatura no forno devem ser mínimas para reduzir tensões internas. Já para o caso em que as taxas de contração e expansão do material são baixas, as taxas de aquecimento e resfriamento no forno podem ser maiores. As propriedades que afetam a resistência as tensões térmicas são o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão volumétrica, o coeficiente de Poisson e, em alguns casos, a condutividade térmica, a difusividade térmica e a emissividade do material (KINGERY; BOWEN; UHLMANN, 1976).

Para cada temperatura em uma curva de queima, há uma taxa de aquecimento e resfriamento crítica de tal forma que, se a mesma for ultrapassada, certamente acontecerá perdas de qualidade do produto. Otimizar uma curva de queima para determinado material significa conhecer tais taxas de aquecimento e resfriamento críticas para cada temperatura e produto. Desta forma, é importante que a curva de queima seja a mais curta possível, sem comprometer a qualidade do produto, reduzindo custos com consumo de energia e aumentando a produtividade do processo (DINGER, 2010).

2.2 Fornos

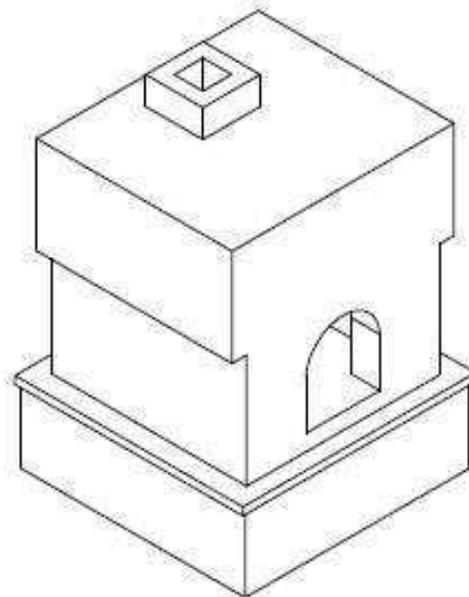
2.2.1 Tipos de fornos

Forno pode ser definido como uma estrutura dentro da qual é possível aquecer materiais à elevadas temperaturas. Na indústria cerâmica, esses equipamentos são feitos de material refratário, que são cerâmicas capazes de manter sua resistência e integridade física à elevadas temperaturas (acima de 3000°C). Os fornos podem ser classificados em dois grandes grupos: fornos intermitentes ou contínuos (tipo túnel).

2.2.1.1 Forno intermitente

A característica que define os fornos intermitentes, representado na Figura 2.6, é o fato de a carga a ser aquecida é colocada em certa posição e permanecer lá durante todo o processo de aquecimento, queima e resfriamento, sendo então retirada, geralmente através da mesma porta pela qual foi colocada no interior do equipamento. São especialmente empregados para queimas de pequenas séries de diversas formas e medidas, haja vista que são de grande flexibilidade, permitindo ciclos curtos ou longos, dependendo das características do produto a queimar.

Figura 2.6 - Representação de um Forno Intermitente.



2.2.1.2 Forno contínuo

Fornos contínuos (tipo túnel) tem como principal característica o seu elevado comprimento. As peças são deslocadas de forma lenta por toda a extensão do forno, de tal forma que o processo de pré-aquecimento, queima e resfriamento são feitos de maneira contínua. É importante ressaltar que nesse tipo de forno, o resfriamento acontece até a temperatura ambiente e a peça é retirada por uma porta diferente da qual entrou (geralmente localizada no final do equipamento). A Tabela 2.1 indica as principais vantagens e desvantagens de cada tipo de forno utilizado na indústria cerâmica (REMMEY, 1994; SANTOS, 2001; KAWAGUTI, 2005).

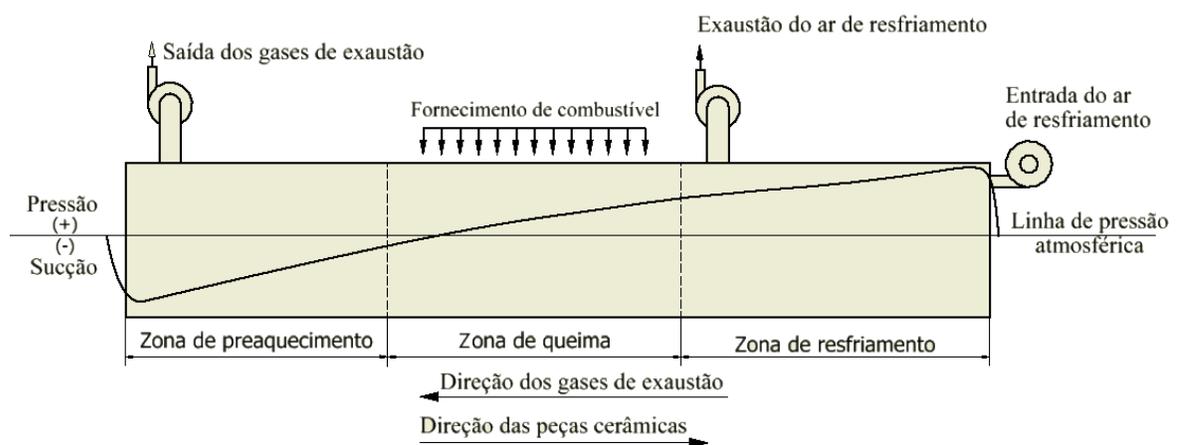
Tabela 2.1 - Principais vantagens e desvantagens de cada tipo de forno utilizado na indústria cerâmica.

Classificação do forno	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Intermitente	<ul style="list-style-type: none">- Concepção simples;- Maior flexibilidade da produção;- Custo de construção mais baixo;- Tempo de construção mais baixo;- Manutenção sem parada da produção;- Melhor reação as flutuações de mercado e sua demanda.	<ul style="list-style-type: none">- Menor rendimento térmico;- Maior ciclo de queima;- Não há aproveitamento dos gases de exaustão;- Aquecimento irregular;- Maior necessidade de mão-de-obra para operação.
Contínuo	<ul style="list-style-type: none">- Maior rendimento térmico;- Menor ciclo de queima;- Controle e aproveitamento dos gases de exaustão;- Aquecimento mais homogêneo;- Menor necessidade de mão-de-obra.	<ul style="list-style-type: none">- Concepção mais complexa;- Menor flexibilidade de produção;- Custo de construção mais elevado;- Tempo de construção mais elevado;- Parada de produção para manutenção;- Baixa reação às flutuações de mercado e sua demanda.

Segundo Remmey (1994), fornos contínuos, em geral, necessitam de metade do combustível que seria utilizado por fornos intermitentes para queimar a mesma quantidade de produto com uma mesma curva de queima. Segundo o autor, os dois principais fatores para que isso seja possível, são:

- As paredes dos fornos contínuos não necessitam serem aquecidas em cada ciclo, na verdade, em determinadas situações, elas permanecem aquecidas por anos. Desta forma, o calor fornecido para aquecer as paredes laterais dos fornos contínuos é, em grande parte, armazenado, consumindo uma quantidade consideravelmente menor de energia térmica quando comparado com os fornos intermitentes, cujas paredes devem ser aquecidas sempre que for adicionado um novo lote de peças.
- A razão mais importante para elevar a eficiência dos fornos contínuos é o fato de as peças se deslocarem no sentido contrário ao fluxo dos gases de exaustão (contracorrente), intensificando as trocas térmicas entre os produtos e os gases. Esse fenômeno só é possível se houver um gradiente de pressão positivo no sentido da entrada das peças até a região central do forno, como indicado na Figura 2.7, haja vista que o escoamento do fluido tende a ocorrer no sentido da região de maior pressão para a região de menor pressão.

Figura 2.7 - Distribuição de pressão em um forno contínuo.



Fonte: Adaptado de Remmey (1994)

Fornos contínuos geralmente são projetados para uma curva de queima específica, fazendo com que tal tipo de forno seja menos flexível para queimar produtos de materiais e tamanhos distintos, quando comparado com fornos intermitentes. Desta forma, apesar de não apresentar uma elevada eficiência térmica, os fornos intermitentes têm retomado seu espaço devido a necessidade de comercializar produtos personalizados e de maior valor agregado (SANTOS, 2001).

2.2.2 Combustíveis usados em fornos

Para produção da energia térmica necessária nos processos de secagem e queima de materiais cerâmicos, é necessário queimar algum tipo de combustível (combustão). Esse combustível reage com gás oxigênio (O_2), na presença de uma energia de ativação, gerando gás carbônico (CO_2), água (H_2O) e outros componentes, além de liberar calor para o ambiente (reação exotérmica).

Diversos tipos de combustíveis podem ser utilizados em fornos cerâmicos, tais como: biomassa (na forma de resíduo de madeira e lenha), óleo combustível e gás natural (DADAM, 2005). Dentre eles, destaca-se o gás natural, que é uma mistura de hidrocarbonetos leves de origem fóssil e se encontra na fase gasosa nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). O gás natural apresenta como principais características o fato de ser mais leve que o ar, inodoro, incolor, não-tóxico, além de apresentar elevado poder calorífico. O gás natural é considerado uma fonte limpa de energia, quando comparado com outros combustíveis, pelo fato de liberar menor quantidade de dióxido carbônico em sua queima. Outras vantagens do gás natural são (REMMEY, 1994; SANTOS, 2001; KAWAGUTI, 2005; MELCHIADES, 2012):

- Elevada eficiência energética;
- Não necessita de espaço para estocagem;
- Não ser atingido pela falta de matéria-prima (comparado com a lenha);
- Operação mais segura, desde que aplicadas as normas pertinentes;
- Facilidade de combustão completa;
- Maior controle no processo produtivo;
- Admite grande variação do fluxo volumétrico
- Temperatura de operação mais homogênea e constante;
- Menor custo para manipulação do gás;
- Menor consumo de energia;

- Menor custo de manutenção do sistema;
- Menor corrosão dos equipamentos;
- Proteção ambiental (no que se refere ao desmatamento e uso de lenha);
- Redução do uso do transporte rodo-ferro-hidroviário do combustível;
- Pagamento após o consumo;
- Isento de enxofre;
- Baixa produção de particulados.

Na Europa, poucos são os países que possuem reservas significativas de gás natural, porém extensos gasodutos atravessam praticamente todo o continente levando gás para os mais diversos segmentos de mercado (ALVES; MELCHIADES; BOSCHI, 2008). Um exemplo disso é a província de Castellón, onde a construção do gasoduto, em meados de 1980, mudou o cenário energético local, tornando o gás natural o combustível mais utilizado na produção de produtos cerâmicos, além de possibilitar a utilização de fornos com maior eficiência energética, aumentando a produtividade do processo de produção (MEZQUITA et al., 2014).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia do Brasil, no período compreendido entre 1973 e 2016, a participação do gás natural na matriz energética mundial variou de 16% (MME, 2015), para 21,8% (MME, 2017) indicando um crescimento substancial e seguindo trajetória contrária ao petróleo, cuja tendência é diminuir a participação no contexto energético mundial.

2.2.3 Consumo energético dos fornos

Com o avanço tecnológico, aprimoramento das técnicas referentes ao processo produtivo e consequente aumento da produtividade, os custos com energia representam atualmente uma grande parcela do custo total de produção das indústrias. A secagem é aplicada, entre outros, para o processamento de alimentos, têxteis, papel, madeira, cerâmica, minerais, produtos farmacêuticos e representa cerca de 10 a 25% do consumo nacional de energia dos Estados Unidos para processos industriais (DEFRAEYE, 2014).

Crasta (2006), em pesquisa desenvolvida na Itália, mostra que os gastos com energia em indústrias cerâmicas representam cerca de 23% do custo médio total de produção. Alves, Melchiades e Boschi (2007) realizaram levantamento detalhado do consumo elétrico e térmico (gás natural) de uma indústria brasileira de revestimentos cerâmicos, concluindo que os setores de

secagem e queima juntos são responsáveis por aproximadamente 95% do consumo energético total, representando aproximadamente 87% do custo energético total. Alves, Melchíades e Boschi (2008) indicam, ainda, que o processo de secagem de revestimentos cerâmicos tem uma participação de cerca de 30% no consumo de energia térmica, enquanto que o processo de queima é responsável pelos outros 70%.

Brosnan e Robinson (2003) e Reed (1995) indicam que, se forem tomados cuidados especiais durante a etapa de secagem, é possível reduzir o custo de energia térmica, além da obtenção de um produto de melhor qualidade.

O avanço tecnológico, aliado com a chegada do gás natural na província de Castellón, em meados da década de 1980, permitiu uma redução de 40% no consumo térmico específico em um período de 10 anos (MEZQUITA et al., 2014).

Além dos aspectos econômicos, o consumo energético está diretamente relacionado ao meio ambiente e, conseqüentemente, a melhoria da eficiência energética traz consigo ganhos ambientais. Esse conjunto de fatores tem levado muitas empresas a se preocuparem de uma forma mais efetiva com a questão energética, buscando alternativas para aumentar sua eficiência.

Almeida (2009) estudou numérica e experimentalmente a secagem de tijolos cerâmicos vazados em secadores industriais contínuo tipo túnel de fluxo cruzado. O autor verificou, através da eficiência energética, que o secador proporciona um grande desperdício de energia (mais de 90%) durante o processo de secagem. O mesmo sugere que a energia perdida por exaustão poderia ser reutilizada no início do processo de secagem, produção de energia elétrica, além do aquecimento e resfriamento de ambientes.

2.3 Estado da arte

Análise térmica em fornos pode proporcionar, tanto para projetistas como para operadores, ferramentas de tomada de decisão para tornar os processos de secagem e queima mais eficientes. Por exemplo, conhecendo-se as distribuições de temperaturas nas superfícies internas e externas do forno, bem como as condições de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar em seu entorno, é possível quantificar as transferências de calor que ocorrem ao longo dos processos de aquecimento e resfriamento. Com isto, é possível propor alternativas para obtenção de produtos de melhor qualidade, bem como para redução do tempo de processamento e do consumo energético.

Diversos estudos de análises térmicas em fornos podem ser encontrados na literatura (DUGWELL; OAKLEY, 1988; YU, 1994; CHEN et al., 2005; ABBASSI; KHOSHMANESH, 2008; SOUZA et al., 2008; NICOLAU; DADAM, 2009; CAVALCANTI et al., 2010; HAN; CHANG; HUH, 2011; MEZQUITA et al., 2014; OBA; POSSAMAI; NICOLAU, 2014; REFAEY et al., 2017, 2018; SOUSSI et al., 2017; HADAŁA et al., 2017; MILANI et al., 2017).

Yu (1994) desenvolveu um modelo matemático transiente para fornos túneis. Utilizando o modelo, o autor foi capaz de prever diversos parâmetros do processo, tais como: distribuição de temperatura nas peças, consumo energético, perdas de calor, taxa com que a energia é acumulada, etc. De acordo com o pesquisador, os resultados obtidos estão com boa concordância com a situação prática.

Souza et al. (2008) monitoraram as temperaturas nas paredes de um forno para queima de produtos cerâmicos, avaliando o comportamento térmico do forno durante todo o processo de produção, levando-se em consideração as diversas formas de transferência de calor. Observou-se que a perda de calor por radiação é superior a perda de calor por convecção. Além disto, os autores concluíram que um aumento na espessura da parede da cúpula ou um revestimento externo refratário na mesma, minimizaria a perda de calor nesta superfície tanto por convecção como por radiação.

Nicolau e Dadam (2009) desenvolveram um modelo matemático para fornos túneis utilizando balanços de massa e energia. O balanço térmico permitiu estimar a distribuição de energia no forno, a energia perdida para a vizinhança e a energia que pode ser reutilizada em outros processos. Os resultados foram comparados com os valores medidos, apresentando boa concordância.

Cavalcanti (2010) quantificou as perdas de calor existentes em um forno abóbada (intermitente) com revestimento, concluindo que a perda de calor por convecção é muito baixa quando comparada à perda de calor por radiação. O autor atribui esse fato à elevada temperatura superficial do forno e as baixas velocidades do vento na vizinhança (0,8 m/s).

Mezquita (2014) e Soussi (2017) quantificaram o consumo de energia quando parte dos gases da zona de resfriamento em fornos tipo túnel são recuperados na câmara de queima ao invés de serem exauridos para a atmosfera. Em ambos os trabalhos, os autores encontraram boa concordância entre os resultados teóricos e experimentais e concluíram que a recuperação dos gases proporciona economia de energia para o processo.

Hadala (2017) quantificou as perdas de calor pelas paredes laterais de um forno intermitente durante o aquecimento e tratamento térmico de peças metálicas. A distribuição de temperatura nas paredes do forno foi calculada resolvendo a equação de condução de calor em cada elemento utilizando método dos elementos finitos. Após analisar seis configurações de paredes e quatro tipos de modos de operação, os autores concluíram que as perdas de calor dependem do tipo e da espessura do isolamento térmico nas paredes e do modo de operação do forno.

Gomez et al. (2019) quantificam as transferências de calor que ocorrem em um forno cerâmico intermitente durante as etapas de aquecimento e resfriamento, com e sem isolamento térmico. Resultados indicam que a maior perda de calor ocorre por radiação nas paredes laterais do equipamento, e que é necessária uma quantidade considerável de energia para aquecer as paredes laterais, base e teto do forno. Além disto, a utilização de 25 mm de espessura de fibra cerâmica nas paredes laterais do forno foi suficiente para proporcionar um ganho energético de aproximadamente 35% e uma redução na temperatura superficial externa de 249,34 para 74,47°C, quando comparado com o forno sem isolamento térmico.

CAPÍTULO 3

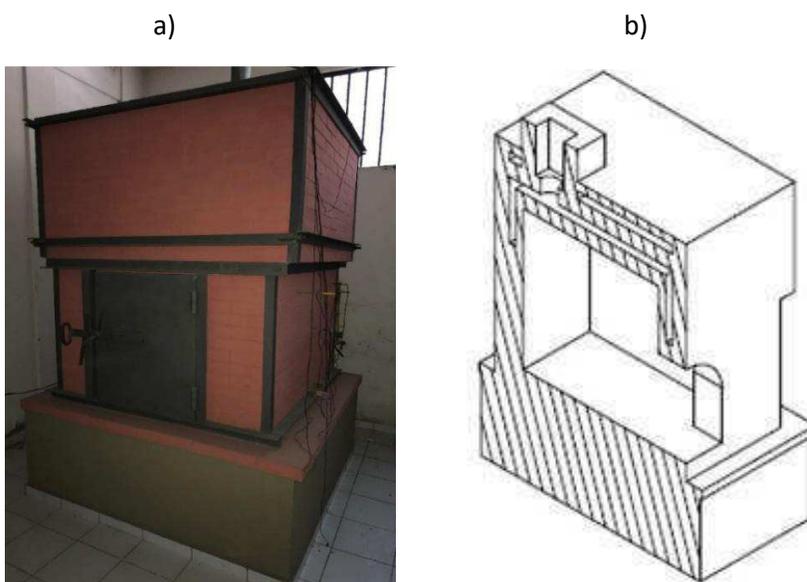
MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Problema físico

Este trabalho apresenta uma análise térmica do forno/secador ilustrado na Figura 3.1. O equipamento foi construído com tijolos refratários e utiliza gás natural como combustível. O gás natural circula por canais retangulares nas paredes laterais, base e teto do forno, sem entrar em contato com os materiais que são colocados em seu interior. O forno mede 1,90 m de altura, 1,64 m de profundidade e 1,62 m de largura.

As medidas internas do forno são as seguintes: 1,13 m de profundidade e 1,15 m de largura. Como o teto é em forma de abóbada, mede 1,20 m na parte mais alta e 0,82 m na parte mais baixa. A área de transferência de calor pelas paredes laterais e pelo conjunto base/teto são de 6,48 m² e 4,50 m², respectivamente. O volume interno do forno é de 1,84 m³. Detalhes de construção do equipamento podem ser encontrados em Melchíades (2012).

Figura 3.1 - Forno cerâmico intermitente em estudo (a) e vista em corte (b).



3.2 Procedimento Experimental

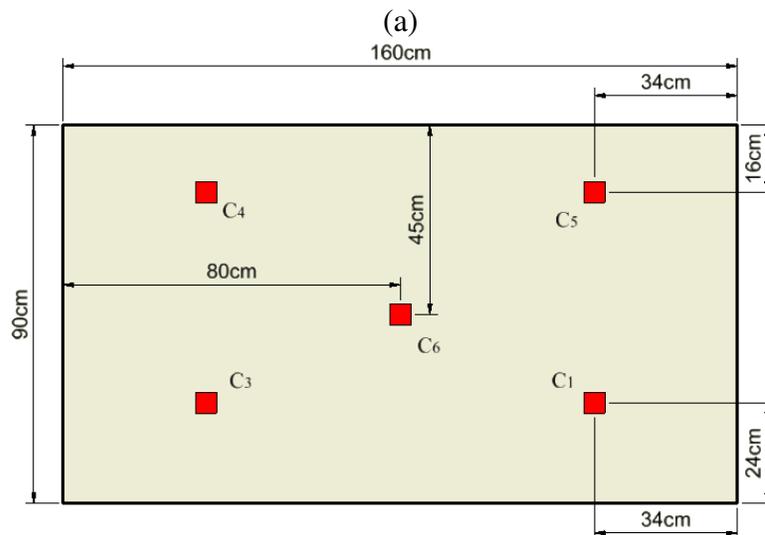
Na presente pesquisa, utilizam-se dados experimentais de temperatura em diversos pontos do forno ao longo do tempo, obtidos por Melchíades (2012).

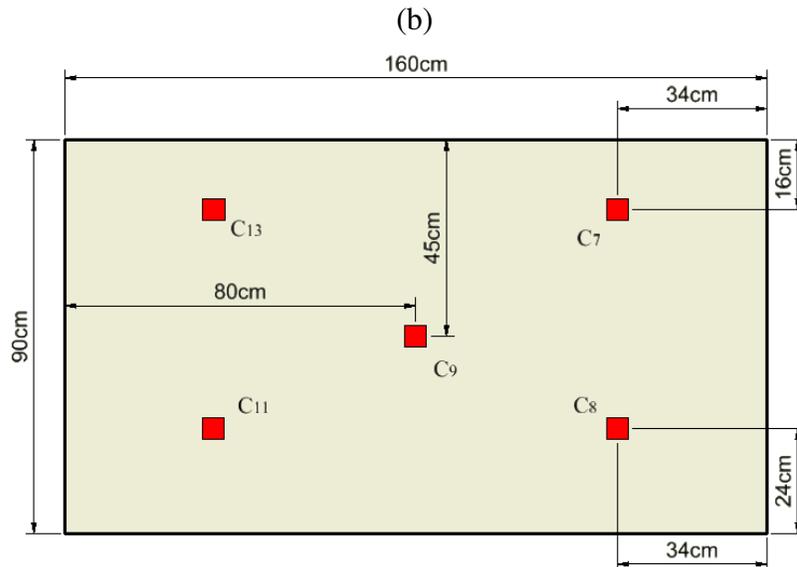
Durante os processos de aquecimento e resfriamento do forno sem isolamento, foram monitoradas as temperaturas nas superfícies laterais internas e externas do forno. O forno permaneceu ligado por 14 horas (840 minutos, etapa de aquecimento). Em seguida, ocorreu a fase de resfriamento, a qual durou 44 horas e 5 minutos (MELCHÍADES, 2012).

Para obtenção das temperaturas no forno, foram utilizados 11 termopares tipo K (liga Ni-Cr), sendo 10 nas paredes laterais e um na chaminé. A Figura 3.2 ilustra um esquema da localização dos termopares nas paredes laterais direita e esquerda do forno. Para medição da temperatura nas paredes externas ao forno, foi utilizado um Termômetro Digital, modelo TI – 890, realizando medições em 10 pontos bem distribuídos em duas das quatro paredes laterais do forno. Também foi monitorado as condições do ambiente externo onde o forno foi colocado em operação. Para tal, foram utilizados medidores de temperatura e umidade relativa do ar (termohigrômetro).

Os dados de temperatura foram coletados em intervalos de aproximadamente 15 minutos, totalizando 234 intervalos de tempo, a partir do instante em que o mesmo foi colocado em funcionamento. O armazenamento e gerenciamento de dados coletados foi realizado via software *LabView*.

Figura 3.2 - Esquema da localização dos termopares nas paredes laterais direita (a) e esquerda (b) do forno.





Fonte: Adaptado de Melchíades (2012).

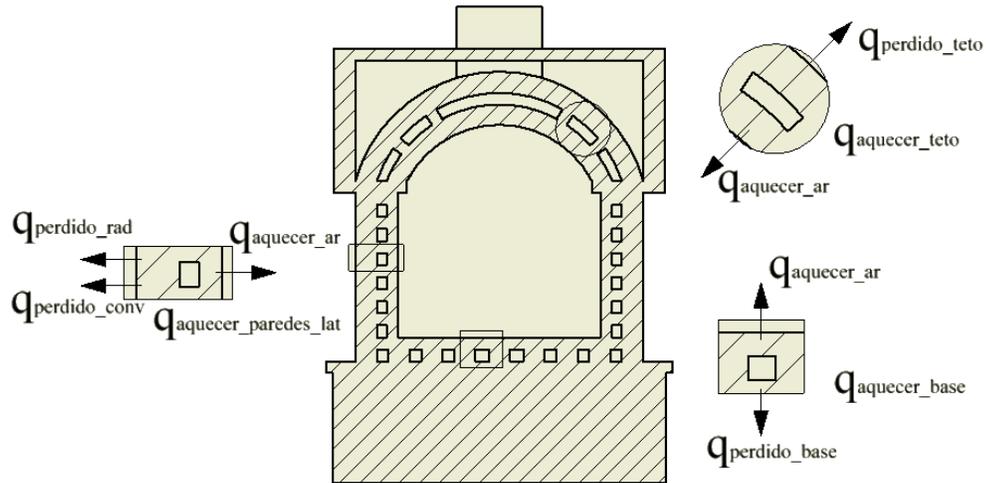
3.3 Formulação matemática

Agora, é apresentado todo o desenvolvimento matemático para calcular as transferências de calor que ocorrem no forno com e sem isolamento térmico. Tais procedimentos são baseados nos conhecimentos da termodinâmica clássica, transferência de calor e método numérico dos volumes finitos.

3.3.1 Forno sem isolamento térmico

Para esta análise, considere a Figura 3.3, que ilustra as diferentes parcelas de transferência de calor envolvidas no processo. A figura ilustra um corte do forno/secador analisado, em que é possível verificar os canais por onde passam os gases da combustão, bem como pequenos volumes de controle nas paredes laterais, base e teto do forno, que indicam as orientações das transferências de calor.

Figura 3.3 - Corte do forno e volumes de controle na parede lateral, base e teto do equipamento.



A partir da primeira lei da termodinâmica (lei da conservação da energia) obtém-se o balanço de energia no forno, o qual é representado pela Equação 3.1, na forma de taxa temporal.

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g = \frac{dE_{ac}}{dt} = \dot{E}_{ac} \quad (3.1)$$

onde os termos do lado esquerdo da equação representam, respectivamente, a taxa de energia que entra no volume de controle, a taxa de energia que sai do volume de controle e a taxa de energia que é gerada. \dot{E}_{ac} é a taxa de energia acumulada no sistema.

Para o caso do forno sem isolamento, tem-se que o balanço de energia pode ser representado pela Equação 3.2, como segue:

$$\dot{E}_{fornecida} = \frac{dE_{ac}}{dt} + q_{perdido} \quad (3.2)$$

Com isso, tem-se que a taxa com que a energia é fornecida, $\dot{E}_{fornecida}$, proveniente da combustão do gás natural, é dada pela soma da taxa com que a energia é acumulada no forno ($\frac{dE_{ac}}{dt}$) com o fluxo de calor perdido ($q_{perdido}$).

A taxa com que a energia é acumulada no forno é obtida pela soma das parcelas de energia para aquecer as peças, o ar no interior do forno, as paredes laterais e o conjunto base/teto do forno, como indicado na Equação 3.3.

$$\frac{dE_{ac}}{dt} = q_{aquecer_{peças}} + q_{aquecer_{ar}} + q_{aquecer_{paredes\ lat.}} + q_{aquecer_{base/teto}} \quad (3.3)$$

Desde que o experimento foi realizado sem peças no interior do forno (MELCHÍADES, 2012), tem-se que a parcela $q_{aquecer_{peças}} = 0$.

Já o fluxo de calor perdido, $q_{perdido}$, é dado pela soma das taxas de transferência de calor perdidas pelas quatro faces laterais do forno, e a taxa de transferência de calor perdida pelo conjunto base/teto do forno, conforme Equação 3.4.

$$q_{perdido} = q_{perdido_{paredes\ lat.}} + q_{perdido_{base/teto}} \quad (3.4)$$

A taxa de energia para aquecer o ar no interior do forno em cada instante de tempo é obtida pela Equação 3.5, como segue:

$$q_{aquecer_{ar}} = m_{ar} \times c_{p_{ar}} \times \frac{\Delta T_{int}}{\Delta t} \quad (3.5)$$

onde m_{ar} é a massa de ar contida no interior do forno, $c_{p_{ar}}$ é o calor específico do ar, ΔT_{int} é a variação da temperatura interna do forno em um dado intervalo de tempo Δt .

Para obtenção do calor específico do ar no interior do forno, $c_{p_{ar}}$, para cada instante de tempo, foram realizadas interpolações com valores fornecidos por Bergman et al. (2011) para o ar atmosférico.

Considerando o ar como um gás ideal, tem-se que a massa de ar, m_{ar} , pode ser calculada pela equação de Clapeyron (Equação 3.6), como segue:

$$PV = \frac{m_{ar}}{M_{ar}} \times RT \quad (3.6)$$

onde P é a pressão, V é o volume no interior do forno, R é a constante universal dos gases ($R = 8,31 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$), T é a temperatura em Kelvin e M a massa molecular do gás.

Considerando que o forno estava fechado durante todo o experimento, admite-se que a massa de ar contida no interior do forno não varia com o tempo. Desta forma, a massa de ar pode ser calculada no instante de tempo $t = t_0 = 0 \text{ s}$ em que a temperatura ambiente e a pressão atmosférica têm seus valores conhecidos. De acordo com o sistema de aquisição de dados, a temperatura T_0 para o experimento foi de $299,06 \text{ K}$. A pressão atmosférica de Campina Grande - PB, cidade onde se encontra o forno, com altitude de 551 m , pode ser aproximada por $94,77 \text{ kPa}$. Como a massa molar, M , do ar atmosférico é $28,97 \text{ kg/kmol}$ (MORAN; SHAPIRO; BOETTNER, 2000) e o volume no interior do forno é $1,84 \text{ m}^3$, obtem-se pela resolução da Equação 3.6 que a massa de ar no interior do forno é $2,03 \text{ kg}$.

As taxas de energia para aquecer as paredes laterais e o conjunto base/teto do forno são representadas pelas Equações 3.7 e 3.8, respectivamente, como segue:

$$Q_{\text{aquecer}_{\text{paredes lat.}}} = m_{\text{paredes lat.}} \times c_{p_{\text{refratário}}} \times \frac{\Delta T_{\text{med}}}{\Delta t} \quad (3.7)$$

$$Q_{\text{aquecer}_{\text{base/teto}}} = m_{\text{base/teto}} \times c_{p_{\text{refratário}}} \times \frac{\Delta T_{\text{med}}}{\Delta t} \quad (3.8)$$

onde as massas $m_{\text{paredes lat.}}$ e $m_{\text{base/teto}}$ são calculadas pelo produto da massa específica do tijolo refratário com o seu respectivo volume. Os valores utilizados para massa específica e calor específico do tijolo refratário foram 2500 kg/m^3 e 840 J/kgK .

A coleta de dados das temperaturas no forno foi feita em intervalos de 15 minutos ($\Delta t = 900 \text{ s}$). Já a variação da temperatura média no forno é dada pela Equação 3.9.

$$\Delta T_{\text{med}} = T_{\text{med}_{t+\Delta t}} - T_{\text{med}_t} \quad (3.9)$$

As temperaturas médias nos instantes de tempo t e $t+\Delta t$ são obtidas pelas Equações 3.10 e 3.11, respectivamente.

$$T_{med_t} = \frac{T_{s,int_t} + T_{s,ext_t}}{2} \quad (3.10)$$

$$T_{med_{t+\Delta t}} = \frac{T_{s,int_{t+\Delta t}} + T_{s,ext_{t+\Delta t}}}{2} \quad (3.11)$$

onde $T_{s,int}$ e $T_{s,ext}$ são as temperaturas superficiais interna e externa das paredes laterais do forno, respectivamente.

A energia perdida pelas paredes laterais do forno foi dividida em duas parcelas: perda de calor por convecção, q_{conv} , e perda de calor por radiação, q_{rad} , conforme Equação 3.12.

$$q_{perdido_{paredes\ lat.}} = q_{conv} + q_{rad} \quad (3.12)$$

A perda de calor por convecção é dada pela Equação 3.13.

$$q_{conv} = A \times \bar{h}_c \times (T_{s,ext} - T_{\infty}) \quad (3.13)$$

onde $A = 6,48 \text{ m}^2$ é a soma das áreas das paredes laterais externas do forno, \bar{h}_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, $T_{s,ext}$ é a temperatura da superfície externa e T_{∞} é a temperatura do fluido que está em contato com a parede do forno (ar ambiente).

O coeficiente de transferência de calor por convecção é uma constante de proporcionalidade que resume as condições nas camadas mais próximas à superfície, sendo dependente das propriedades termofísicas do fluido (densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico), da geometria da superfície e da natureza do escoamento (convecção forçada ou natural, regime laminar ou turbulento). Este parâmetro pode ser obtido pelo número de Nusselt médio (Equação 3.14), como segue:

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h}_c \times L}{k_f} \quad (3.14)$$

onde L é o comprimento característico que, para o caso em estudo, corresponde à altura da parede lateral externa do forno e k_f é a condutividade térmica do fluido (ar ambiente).

Como não há presença de fontes externas para promover o movimento do fluido que está em contato com o forno, tem-se que a natureza do escoamento é por convecção natural (ou livre). Desta forma, o escoamento é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferenças de massas específicas causadas por variações de temperatura no fluido (BERGMAN et al., 2011).

Modelando as paredes laterais do forno como placas planas verticais e considerando escoamento laminar ($10^4 \leq Ra_L \leq 10^9$), utilizou-se a correlação recomendada por Churchill e Chu (1975) para calcular o número de Nusselt médio (Equação 3.15), como segue:

$$\bar{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.15)$$

onde Pr é o número de Prandtl, que representa a razão entre as difusividades de momento e térmica de um fluido, e Ra_L é o número de Rayleigh, definido pela Equação 3.16.

$$Ra_L = \frac{g \times \beta \times (T_{s,ext} - T_\infty) L^3}{\nu \times \alpha} \quad (3.16)$$

onde g é a aceleração da gravidade, $\beta = 1/T_f$ é o coeficiente de expansão volumétrica, $T_{s,ext}$ e T_∞ são as temperaturas da superfície externa do forno e ambiente, respectivamente. L é o comprimento característico, ν é a viscosidade cinemática e α é a difusividade térmica do fluido.

Os valores dos parâmetros k_f , Pr, β , ν e α são tabelados em função do tipo e da temperatura do fluido. Para cada instante de tempo, tais valores foram obtidos através de interpolações levando-se em consideração a temperatura de película (T_f), que corresponde a temperatura média entre a temperatura ambiente e a temperatura da superfície lateral externa do forno (Equação 3.17), como expressado a seguir:

$$T_f = \frac{T_{s,ext} + T_\infty}{2} \quad (3.17)$$

A perda de calor por radiação é dada pela Equação 3.18, como segue:

$$q_{rad} = A \times \varepsilon \times \sigma \times (T_{s,ext}^4 - T_{viz}^4) \quad (3.18)$$

onde A é a soma das áreas das paredes laterais externas do forno, ε é a emissividade da superfície do tijolo refratário ($\varepsilon = 0,75$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K}^4)$), $T_{s,\text{ext}}$ e T_{viz} são as temperatura absolutas da superfície externa do forno e da vizinhança, respectivamente.

A perda de calor por radiação também é comumente expressa de forma similar a perda de calor por convecção, como mostra a Equação 3.19.

$$q_{\text{rad}} = A \times \bar{h}_r \times (T_{s,\text{ext}} - T_{\text{viz}}) \quad (3.19)$$

onde, a partir da Equação 3.18, o coeficiente de transferência de calor por radiação, \bar{h}_r , é dado pela Equação 3.20.

$$\bar{h}_r = \varepsilon \times \sigma \times (T_{s,\text{ext}} + T_{\text{viz}})(T_{s,\text{ext}}^2 - T_{\text{viz}}^2) \quad (3.20)$$

Para determinação da energia térmica perdida pelo conjunto base/teto, o sistema foi modelado como um sólido semi-infinito, que fornece uma idealização útil para a resposta transiente de um sólido finito, como uma placa espessa (BERGMAN et al., 2011). Para tal modelagem, considera-se que as temperaturas em pontos distantes, tanto abaixo da base como acima da abóbada (parte curva) do forno, estão essencialmente não influenciadas pela mudança nas condições superficiais. Utilizando o caso de temperatura na superfície constante, mais apropriado para a análise aqui apresentada, tem-se que a perda de calor pelo conjunto base/teto é dada pela Equação 3.21, como segue:

$$q_{\text{perdido}}_{\text{base/teto}} = \frac{k_s \times A_{\text{base/teto}} \times (T_{\text{med}} - T_{\infty})}{\sqrt{\pi \alpha \times \Delta t}} \quad (3.21)$$

onde $k_s = 0,16 \text{ W}/\text{mK}$ é a condutividade térmica do material, $A_{\text{base/teto}} = 4,50 \text{ m}^2$ é a área do conjunto base/teto, $\alpha = k_s / (\rho c_p) = 1,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ é a difusividade térmica do material e T_{med} representa a temperatura média da base e do teto do forno, sendo calculada pela Equação 3.10.

Para o caso em estudo, foram utilizadas as propriedades térmicas da areia, material predominante empregado no preenchimento da base do forno e na região entre a abóboda e o teto do forno. A areia foi utilizada com o objetivo de reduzir as perdas de calor para o meio ambiente.

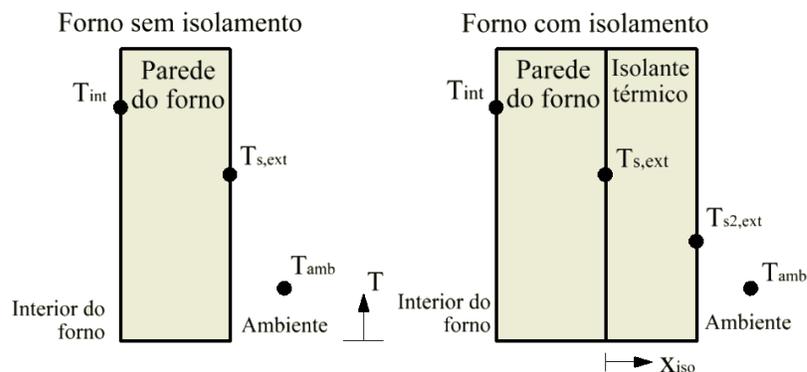
As Equações 3.1-3.21 foram resolvidas em cada um dos 234 instantes de tempo dos processos de aquecimento e resfriamento do forno sem isolamento, utilizando o software Microsoft Excel. Como resultado, foram determinadas todas as taxas de transferências de calor que ocorrem ao longo das fases de aquecimento e resfriamento do forno. Além disto, foi calculada a energia total e a taxa com que a energia é fornecida pelos gases de combustão, na forma de calor, em função do tempo de processamento.

3.3.2 Forno com isolamento térmico.

Além de realizar a análise térmica do forno tal qual foi construído (sem isolamento térmico), este trabalho também tem por objetivo verificar a influência do tipo e da espessura do isolamento térmico, aplicado nas paredes laterais externas do forno cerâmico intermitente, nas transferências de calor, distribuição de temperatura e ganho energético que a configuração proporciona para o sistema quando comparado com o forno sem isolamento térmico.

Nesta análise, foi considerado que as temperaturas nas superfícies externa ($T_{s,ext}$) e interna (T_{int}) das paredes laterais do forno com isolamento térmico, durante a etapa de aquecimento, são equivalentes aquelas obtidas para o experimento realizado com o forno sem isolamento térmico (Figura 3.4). Tal consideração garante que a curva de queima seja a mesma para ambos os casos analisados.

Figura 3.4 - Considerações para análise do forno com isolamento térmico.



Com essa nova configuração, a temperatura externa do isolamento, $T_{s2,ext}$, é desconhecida, não permitindo a determinação da quantidade de calor perdida por convecção e radiação para o ambiente externo. Portanto, a mesma deve ser determinada.

Foram analisados quatro tipos de isolamentos térmicos para aplicação no forno. Para seleção destes, foram levados em consideração fatores como disponibilidade no mercado, faixa de aplicação de temperatura, cujo limite superior deve ser maior que 300°C, e informações referentes às principais propriedades necessárias para os cálculos aqui desenvolvidos. A Tabela 3.1 apresenta a condutividade térmica em função da temperatura de operação bem como a faixa de aplicação recomendada para cada tipo de isolamento térmico (ISAR, 2018; SULFAX, 2018). A Tabela 3.2 indica a massa específica, calor específico e emissividade de cada material isolante (DO et al., 2007; WATLOW, 2018; THERMOWORKS, 2018; ISOVER, 2018), que por sua vez, não dependem da temperatura.

Tabela 3.1 – Condutividade térmica (k) em função da temperatura de operação e faixa de aplicação para cada tipo de isolamento térmico.

k (W/mK)	Temperatura de operação (°C)									Faixa de Aplicação
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	
Fibra Cerâmica - LD - 1200	0,0630	0,0665	0,0700	0,0735	0,0770	0,0828	0,0885	0,0943	0,1000	até 1200°C
Silicato de Cálcio	0,0450	0,0480	0,0510	0,0540	0,0570	0,0595	0,0620	0,0650	0,0680	até 650°C
Lã de Rocha - PSE - 48	0,0280	0,0330	0,0380	0,0440	0,0500	0,0560	0,0620	0,0710	0,0800	até 500°C
Fibra de Vidro - PSI-40	0,0280	0,0300	0,0330	0,0370	0,0410	0,0470	0,0530	0,0600	-	-200 até 350°C

Tabela 3.2 - Demais parâmetros termo-físicos dos isolamentos térmicos.

Tipo de isolamento térmico	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)	Emissividade
Fibra cerâmica - LD - 1200	275	1110	0,75
Silicato de cálcio	240	958	0,9
Lã de rocha - PSE - 48	48	840	0,94
Fibra de vidro - PSI-40	40	837	0,75

Para isto, considerou-se que o calor transferido dentro do isolante térmico se dá por condução pura. Neste caso, a equação diferencial geral para a transferência de calor por condução unidimensional em regime transiente é regida pela Equação 3.22, como segue:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (3.22)$$

onde ρ , c_p , k , T e S são a massa específica, calor específico, condutividade térmica, temperatura e o termo fonte, respectivamente, do isolamento térmico. Para o caso de transferência de calor, o termo fonte representa a taxa com que a energia é gerada por unidade de volume (PATANKAR, 1980).

Para esta análise, as seguintes condições inicial e de contorno foram utilizadas para modelar a transferência de calor no isolamento térmico:

- Condição Inicial:

$$T(x, t = 0) = T_{s,ext}(t = 0) = 28,26^\circ\text{C} \quad (3.23)$$

- Condição de contorno na parede do forno ($x=0$):

$$T(x = 0, t) = T_{s,ext}(t) \quad (3.24)$$

- Condição de contorno na superfície externa do isolamento ($x=L$):

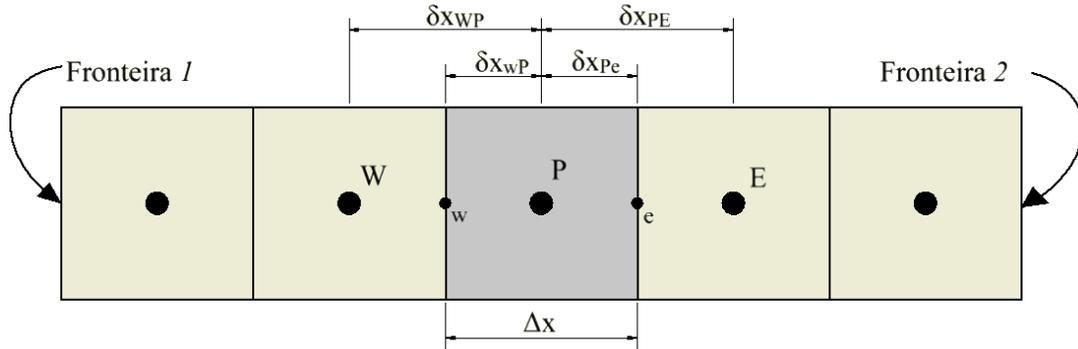
$$q_{f2}'' = -k_{iso} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = (\bar{h}_c + \bar{h}_r)(T_{s2,ext} - T_{amb}) \quad (3.25)$$

onde $T_{amb} = T_\infty = T_{viz}$.

O método numérico utilizado para resolver a Equação 3.22 foi baseado na formulação em volumes finitos. Tal método consiste em dividir o domínio em sub-domínios ou volumes de controle discretos e integrar a equação diferencial (Equação 3.22) sob cada um desses sub-domínios e no tempo, com o objetivo de obter um conjunto de equações algébricas relacionando os volumes de controle do domínio. Para isto, considere o domínio do isolamento térmico sendo dividido em

cinco volumes de controle, conforme ilustrado na Figura 3.5. O centróide do volume de controle analisado, neste caso o terceiro, é sempre identificado pela letra P. Os centróides dos volumes de controle oeste e leste deste são identifica-dos por W e E, respectivamente. De maneira similar, as faces oeste e leste do volume de controle analisado são identificados por \underline{w} e \underline{e} . A distância entre as faces \underline{w} e \underline{e} é identificada por Δx , e representa o comprimento do volume de controle P. As distâncias entre os centroides W e P, e entre P e E são identificadas por δx_{WP} e δx_{PE} , respectivamente. Similarmente, as distâncias entre a face \underline{w} e o centróide P e entre P e a face \underline{e} são identificadas por δx_{wP} e δx_{Pe} , respectivamente.

Figura 3.5 - Volume de controle usado na discretização.



A discretização foi feita de tal forma que a face oeste do primeiro volume de controle e a face leste do último volume de controle coincidam com as fronteiras do domínio, $x = 0$ e $x = L$, respectivamente, garantindo que todos os volumes de controle são inteiros e de mesmo tamanho (Δx).

Integrando a Equação 3.22 sobre um dado volume de controle unidimensional central e ao longo de um intervalo de tempo de t até Δt , pode-se escrever:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e S dx dt \quad (3.26)$$

Como se trata de um problema transiente, o esquema da discretização pode ser feito de forma explícita, implícita ou totalmente implícita. Detalhes destes métodos podem ser encontrados em

Patankar (1980) e Smith (1985). Nesta pesquisa, foi empregado o esquema totalmente implícito, por ser incondicionalmente estável (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

- **Primeiro volume de controle**

Desconsiderando o termo fonte e resolvendo as integrais da Equação 3.26 para o primeiro volume de controle, pode-se escrever:

$$\rho c_p \Delta x (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) = \left(\frac{k_e (T_E - T_P)}{\delta_{x_{PE}}} - \frac{k_{f1} (T_P - T_{s,ext})}{\delta_{x_{WP}}} \right) \Delta t \quad (3.27)$$

Fazendo $T_P^{t+\Delta t} = T_P$ e $T_P^t = T_P^0$ e rearranjando a Equação 3.27, tem-se que a equação discretizada pelo método dos volumes finitos para o primeiro volume de controle é dada pela Equação 3.28, como segue:

$$\left(\frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} + \frac{k_e}{\delta_{x_{PE}}} + \frac{k_{f1}}{\delta_{x_{WP}}} \right) T_P = \frac{k_e}{\delta_{x_{PE}}} T_E + \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} T_P^0 + \frac{k_{f1}}{\delta_{x_{WP}}} T_{s,ext} \quad (3.28)$$

onde k_{f1} e $T_{s,ext}$ são, respectivamente, a condutividade térmica e a temperatura do isolamento térmico na face em contato com a parede do forno ($x = 0$).

- **Volumes de controle centrais**

Desconsiderando o termo fonte e resolvendo as integrais da Equação 3.26 para os volumes de controle centrais, tem-se:

$$\rho c_p \Delta x (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) = \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta t \quad (3.29)$$

Considerando funções de interpolação lineares para a temperatura, e fazendo $T_P^{t+\Delta t} = T_P$ e $T_P^t = T_P^0$, pode-se escrever:

$$\frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} (T_P - T_P^0) = \frac{k_e (T_E - T_P)}{\delta_{x_{PE}}} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{\delta_{x_{WP}}} \quad (3.30)$$

Rearranjando, tem-se que a equação discretizada para os volumes de controle centrais é dada pela Equação 3.31, como segue:

$$\left(\frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} + \frac{k_e}{\delta x_{PE}} + \frac{k_w}{\delta x_{WP}}\right) T_P = \frac{k_e}{\delta x_{PE}} T_E + \frac{k_w}{\delta x_{WP}} T_W + \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} T_P^0 \quad (3.31)$$

- **Último volume de controle**

Desconsiderando o termo fonte, resolvendo as integrais da Equação 3.26 e considerando funções de interpolação lineares para a temperatura, tem-se como resultado a seguinte equação para o último volume de controle:

$$\rho c_p \Delta x (T_P - T_P^0) = \left(\frac{k_{f2} (T_{s2,ext} - T_P)}{\delta x_{Pe}} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{\delta x_{WP}} \right) \Delta t \quad (3.32)$$

A temperatura superficial externa ao isolamento, $T_{s2,ext}$, pode ser escrita em função do fluxo de calor perdido pelo isolamento térmico (q_{f2}''), como segue:

$$q_{f2}'' = - \frac{k_{f2} (T_{s2,ext} - T_P)}{\delta x_{Pe}} \Leftrightarrow T_{s2,ext} = T_P - \frac{q_{f2}'' \delta x_{Pe}}{k_{f2}} \quad (3.33)$$

Substituindo a expressão de $T_{s2,ext}$ obtida na Equação 3.33 na condição de contorno da superfície externa do isolamento (Equação 3.25) e rearranjando os termos, tem-se que o fluxo de calor perdido pelo isolamento térmico (q_{f2}'') é dado pela Equação 3.34, como segue:

$$q_{f2}'' = \frac{(\bar{h}_c + \bar{h}_r)(T_P - T_{amb})}{1 + \frac{(\bar{h}_c + \bar{h}_r) \delta x_{Pe}}{k_{f2}}} \quad (3.34)$$

Substituindo a temperatura superficial externa ao isolamento (Equação 3.33) em função do fluxo de calor perdido pelo isolamento térmico (Equação 3.34) na Equação 3.32 e rearranjando os termos, tem-se que a equação discretizada pelo método dos volumes finitos para o último volume de controle é dada pela Equação 3.35.

$$\left(\frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} + \frac{k_w}{\delta x_{WP}} + \frac{\bar{h}_c + \bar{h}_r}{1 + \frac{(\bar{h}_c + \bar{h}_r) \delta x_{PE}}{k_{f2}}} \right) T_P = \frac{k_w}{\delta x_{WP}} T_W + \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t} T_P^0 + \frac{\bar{h}_c + \bar{h}_r}{1 + \frac{(\bar{h}_c + \bar{h}_r) \delta x_{PE}}{k_{f2}}} T_{amb} \quad (3.35)$$

Como se pode observar, ambos os lados das equações discretizadas (Equações 3.28, 3.31 e 3.35) contêm temperaturas no novo passo de tempo, característica do esquema de discretização totalmente implícito. Desta forma, um sistema de equações algébricas, com uma equação para cada volume de controle, deve ser resolvido em cada passo de tempo do processo.

Considerando os coeficientes de T_E , T_W , T_P^0 , e T_P como a_E , a_W , a_P^0 e a_P tem-se que as equações discretizadas para cada volume de controle podem ser escritas, de maneira geral, de acordo com a Equação 3.36.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_P^0 T_P^0 + S_u \quad (3.36)$$

onde

$$a_P = a_E + a_W + a_P^0 - S_P \quad (3.37)$$

Os valores dos coeficientes a_E , a_W , a_P^0 , S_u e S_P para cada volume de controle estão listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Coeficientes das equações discretizadas para cada tipo de volume de controle.

Volume de controle	a_E	a_W	a_P^0	S_u	S_P
Primeiro	$\frac{k_e}{\delta x_{PE}}$	0	$\frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$	$\frac{k_{f1}}{\delta x_{WP}} T_{s,ext}$	$-\frac{k_{f1}}{\delta x_{WP}}$
Centrais	$\frac{k_e}{\delta x_{PE}}$	$\frac{k_w}{\delta x_{WP}}$	$\frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$	0	0
Último	0	$\frac{k_w}{\delta x_{WP}}$	$\frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}$	$\frac{\bar{h}_c + \bar{h}_r}{1 + \frac{(\bar{h}_c + \bar{h}_r) \delta x_{PE}}{k_{f2}}} T_{amb}$	$-\frac{\bar{h}_c + \bar{h}_r}{1 + \frac{(\bar{h}_c + \bar{h}_r) \delta x_{PE}}{k_{f2}}}$

As variáveis k_w , k_e , k_{f1} e k_{f2} são, respectivamente, as condutividades térmicas nas faces oeste, leste, oeste do primeiro volume de controle e leste do último volume de controle. Para efeito de simplificação, tais valores de condutividade térmica foram considerados como constantes para todos os volumes de controle em um dado instante de tempo, porém variando de um instante para outro em função da temperatura média do isolamento térmico, conforme Equação 3.38.

$$k_w(t) = k_e(t) = k_{f1}(t) = k_{f2}(t) = k(t) = f[T_{med,iso}(t)] \quad (3.38)$$

onde $T_{med,iso}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i(t)$ é a temperatura média do isolamento térmico no instante de tempo t , N é o número de volumes de controle e $T_i(t)$ é a temperatura no centro do volume de controle i no instante t . Assim, com o uso da Tabela 3.1 determina-se a condutividade térmica do isolamento em cada instante de tempo.

É importante ressaltar que a Equação 3.36 é aplicada a cada volume de controle. Isto gera um sistema de equações algébricas lineares que deve ser resolvido em cada instante de tempo. Para isto, habilitou-se o cálculo iterativo disponível no software Microsoft Excel.

Para garantir que os resultados obtidos fossem independentes do número de volumes de controle, fez-se um estudo de convergência de malha e refino do passo de tempo.

A análise de convergência de malha para o caso do forno com isolamento térmico foi realizada utilizando a metodologia proposta por Celik et al. (2008), baseando-se na extrapolação de Richardson (RICHARDSON, 1911; RICHARDSON; GAUNT, 1927). A extrapolação de Richardson é considerada a forma mais popular e confiável para a previsão de incertezas numéricas (CELIK et al., 2008; HEFNY; OOKA, 2009). Celik et al. (2008) fornecem diretrizes específicas para realizar estimativas de erros de discretização em simulações de fluidodinâmica computacional para situações que apresentem, ou não, dados experimentais para comparação. Utilizando tal metodologia é possível estimar a solução exata a partir da extrapolação das soluções das malhas existentes, bem como determinar a malha ideal através do cálculo do Índice de Convergência de Malha (ICM). Esta metodologia vem sendo empregado em diversos trabalhos relacionados com as mais diversas áreas da fluidodinâmica computacional (HEFNY; OOKA, 2009; AYDIN, 2012; ALMOHAMMADI et al., 2013; PAUDEL; SAENGER, 2017; VOLK; GHIA; STOLTZ, 2017; RODRIGUES; BÉTTEGA, 2018). Todo o procedimento para tal análise será descrito a seguir.

Inicialmente deve-se determinar um tamanho representativo de malha l , de acordo com a Equação 3.39.

$$l = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta V_i \right)^{1/3} \quad (3.39)$$

onde N é o número de elementos de malha utilizados para o cálculo computacional e ΔV é o volume ocupado pelo elemento i .

Para o caso de malhas unidimensionais, basta aplicar a Equação 3.40.

$$l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta x_i \quad (3.40)$$

onde Δx é o comprimento do volume de controle i .

Celik et al. (2008) recomendam fazer três malhas com um fator de refinamento $l_{\text{grosseiro}}/l_{\text{refinado}}$ maior que 1,3. Sejam l_1 e l_3 os tamanhos representativos das malhas mais refinada e mais grosseira, respectivamente. De posse desses parâmetros, foram definidos os parâmetros r_{21} e r_{32} pelas Equações 3.41 e 3.42, como segue:

$$r_{21} = \frac{l_2}{l_1} \quad (3.41)$$

$$r_{32} = \frac{l_3}{l_2} \quad (3.42)$$

Além disso, sejam ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 os resultados de uma dada variável para as respectivas malhas. Com isto, é possível calcular a ordem aparente p , necessária para o cálculo da solução extrapolada ($l = 0$), utilizando as Equações 3.43-3.45.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (3.43)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^{p-s}}{r_{32}^{p-s}} \right) \quad (3.44)$$

$$s = \text{sinal} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right) \quad (3.45)$$

onde $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$, $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$. Pela Equação 3.45, se $\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} > 0$, então $s = 1$. Similarmente, se $\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} < 0$, então $s = -1$.

As Equações 3.43-3.45 podem ser resolvidas utilizando um método iterativo. Observa-se que $q(p) = 0$ para $r_{21} = r_{32}$.

Para verificar a condição de convergência aparente da solução, faz-se uso da Equação 3.46, como segue:

$$C = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\phi_3 - \phi_2} \quad (3.46)$$

Baseado no valor de C , a condição de convergência pode ser classificada de acordo com a Tabela 3.4 (ALMOHAMMADI et al., 2013). Segundo Almohammadi et al. (2013), para que o método da extrapolação de Richardson seja válido, é necessário que se obtenha uma condição de convergência monotônica para a variável analisada.

Tabela 3.4 - Condição de convergência em função do valor de C .

Intervalo de variação	Condição de convergência
$C > 1$	Divergência monotônica
$0 < C < 1$	Convergência monotônica
$-1 < C < 0$	Convergência oscilatória
$C < -1$	Divergência oscilatória

Fonte: Adaptado de Almohamadi et al. (2013).

A solução extrapolada foi determinada de acordo com a Equação 3.47, como segue:

$$\phi_{\text{ext}}^{21} = \frac{(r_{21})^p \phi_1 - \phi_2}{(r_{21})^p - 1} \quad (3.47)$$

Os erros relativos aproximados entre as malhas, para a variável ϕ , foram determinados de acordo com as Equações 3.48 e 3.49:

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (3.48)$$

$$e_a^{32} = \left| \frac{\phi_2 - \phi_3}{\phi_2} \right| \quad (3.49)$$

Desta forma, os Índices de Convergência de Malha (ICM) foram calculados utilizando as Equações 3.50 e 3.51, como segue:

$$ICM_{21} = \frac{1,25e_a^{21}}{(r_{21})^{p-1}} \quad (3.50)$$

$$ICM_{32} = \frac{1,25e_a^{32}}{(r_{32})^{p-1}} \quad (3.51)$$

Para aplicar este método, é necessário garantir que as malhas estejam dentro do intervalo assintótico. Roache (1994) reporta que, em casos onde a solução exata não é conhecida, a fórmula dada pela Equação 3.52 indica que o intervalo assintótico foi atingido.

$$ICM_{32} = (r_{21})^p ICM_{21} \quad (3.52)$$

Para esta análise, considerou-se como variável de resposta (ϕ) o ganho de energia por condução pelo isolamento térmico, ou energia que entra no isolamento térmico, na fase de aquecimento do forno ($Q_{entra_{iso}}$), calculado utilizando o método de integração numérica conhecido como regra dos trapézios composta (repetida), conforme Equação 3.53.

$$Q_{entra_{iso}} = \int_{t=a}^{t=b} q_{entra_{iso}}(t) dt = \frac{(b-a)}{n} \times \left\{ \left[\frac{q_{entra_{iso}}(a) + q_{entra_{iso}}(b)}{2} \right] + \sum_{i=1}^{n-1} q_{entra_{iso}}(t_i) \right\} \quad (3.53)$$

onde

$$q_{entra_{iso}} = -k_{iso}A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad (3.54)$$

onde a é o instante de tempo inicial ($a = 0$ s), b é o instante de tempo em que o forno é desligado ($b = 840$ min) e n representa o número de passos de tempo na etapa de aquecimento. $q_{entra_{iso}}(a)$, $q_{entra_{iso}}(b)$ e $q_{entra_{iso}}(i)$ são as taxas com que a energia entra no isolamento térmico nos instantes de tempo a , b e i , respectivamente.

Como forma de garantir que os resultados numéricos obtidos são confiáveis, faz-se útil calcular o balanço global de energia no isolamento térmico (Equação 3.55). Isso garante que a taxa com que a energia entra no isolamento ($q_{entra_{iso}}$) é igual a taxa com que a energia sai do isolamento ($q_{sai_{iso}}$) mais a taxa com que a energia é acumulada no isolamento ($\dot{E}_{ac_{iso}}$) em cada passo de tempo. Assim, pode-se escrever:

$$q_{entra_{iso}}(t) - [q_{sai_{iso}}(t) + \dot{E}_{ac_{iso}}(t)] = 0 \quad (3.55)$$

Substituindo os termos para cada variável na Equação 3.55, obtém-se a Equação 3.56.

$$-k_{iso}A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} - \left[(\bar{h}_c + \bar{h}_r) \times A \times (T_{s2,ext} - T_{amb}) + \rho_{iso} \times A \times L_{iso} \times c_{p_{iso}} \times \frac{\Delta T_{med_{iso}}}{\Delta t} \right] = 0 \quad (3.56)$$

onde k_{iso} , ρ_{iso} , $c_{p_{iso}}$, L_{iso} são a condutividade térmica, massa específica, calor específico e espessura do isolamento térmico, respectivamente, conforme Tabelas 3.1 e 3.2.

Para quantificar a influência do isolamento térmico na eficiência do forno, faz-se uso da variável Ganho Energético, que pode ser calculada pela Equação 3.57, como segue:

$$\text{Ganho Energético} = \left(1 - \frac{E_{fornecida_{iso}}}{E_{fornecida}} \right) \cdot 100\% \quad (3.57)$$

onde $E_{\text{fornecida}}$ e $E_{\text{fornecida}_{\text{iso}}}$ são as energias fornecidas durante o processo de aquecimento para o forno sem e com isolamento térmico, respectivamente. O parâmetro $\dot{E}_{\text{fornecida}_{\text{iso}}}$ é dado por:

$$\dot{E}_{\text{fornecida}_{\text{iso}}} = \frac{dE_{\text{ac}}}{dt} + q_{\text{perdido}_{\text{base/teto}}} + q_{\text{sai}_{\text{iso}}} + \dot{E}_{\text{ac}_{\text{iso}}} \quad (3.58)$$

Para determinar tais valores, faz-se necessário calcular a integral definida das variáveis $\dot{E}_{\text{fornecida}}$ (Equação 3.2) e $\dot{E}_{\text{fornecida}_{\text{iso}}}$ (Equação 3.58) no intervalo de tempo de aquecimento do forno.

Utilizando a regra dos trapézios composta (repetida), tem-se que a energia fornecida acumulada, $E_{\text{fornecida}}$, durante o processo de aquecimento do forno pode ser determinado de acordo com a Equação 3.59, como segue:

$$E_{\text{fornecida}} = \int_{t=a}^{t=b} \dot{E}_{\text{fornecida}}(t) dt = \frac{(b-a)}{n} \times \left\{ \left[\frac{\dot{E}_{\text{fornecida}}(a) + \dot{E}_{\text{fornecida}}(b)}{2} \right] + \sum_{i=1}^{n-1} \dot{E}_{\text{fornecida}}(t_i) \right\} \quad (3.59)$$

onde a é o instante de tempo inicial ($a = 0$ s), b é o último instante de tempo da etapa de aquecimento do forno e n representa o número de passos de tempo na fase de aquecimento. $\dot{E}_{\text{fornecida}}(a)$, $\dot{E}_{\text{fornecida}}(b)$ e $\dot{E}_{\text{fornecida}}(i)$ são as taxas com que a energia é fornecida nos instantes de tempo a , b e i , respectivamente. $E_{\text{fornecida}_{\text{iso}}}$ pode ser calculada de maneira análoga à Equação 3.59.

3.4 Planejamento experimental

Com o objetivo de avaliar a influência da espessura do isolamento térmico (L_{iso}) e de cada uma das propriedades termofísicas do material isolante (ρ , k , c_p , ϵ) e de suas interações nas variáveis de resposta em estudo, foi desenvolvido um planejamento experimental fatorial.

As variáveis de resposta avaliadas no planejamento experimental foram as energias perdidas por convecção (Q_{conv}) e por radiação (Q_{rad}) ao longo do processo de aquecimento, a energia acumulada no isolamento térmico (Q_{acu}) durante a etapa de aquecimento, a temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,\text{ext,max}}$) e o ganho energético proporcionado pela aplicação do isolamento

térmico. Desta forma, será possível determinar quais variáveis e efeitos de interação exercem maior influência em cada variável de resposta analisada.

As variáveis de entrada do planejamento experimental bem como os níveis reais e codificados estão apresentadas na Tabela 3.5, em que (-1) e (+1) significam o menor e maior nível, respectivamente, e (0) significa o nível do ponto central. O intervalo de variação das propriedades ρ , k , c_p e ε do isolamento térmico foram determinados a partir de uma revisão de diversos materiais empregados como isolamento térmico na literatura. O intervalo de variação da espessura do isolamento térmico foi definido para a região em que se considera haver uma melhor relação custo-benefício da aplicação do material isolante no forno em estudo, conforme resultados obtidos a partir da análise anterior.

Tabela 3.5 - Níveis reais e codificados das variáveis de entrada em estudo.

Variáveis de entrada	Níveis		
	-1	0	+1
ρ (kg/m ³)	15	207,5	400
k (W/mK)	0,015	0,0575	0,1
c_p (J/kgK)	800	1550	2300
ε	0,04	0,5	0,96
L_{iso} (mm)	1	13	25

Como metodologia, desenvolveu-se um planejamento experimental fatorial do tipo 2^{5-1} com um no ponto central, totalizando 17 experimentos.

É importante ressaltar que o número de ensaios recomendados no ponto central é 3 (RODRIGUES; IEMMA, 2009). Porém, por se tratar de uma análise numérica, em que não há variações nos resultados quando se utiliza as mesmas variáveis de entrada (considerando uma mesma metodologia, tamanho de malha e passo de tempo), foi empregado apenas um experimento no ponto central. A matriz de planejamento mostrada na Tabela 3.6 lista os 17 experimentos na chamada ordem padrão.

A partir dos resultados obtidos da matriz de planejamento experimental, foi utilizado o programa *STATISTICA*[®] 7 para calcular os efeitos principais e de interação das variáveis de entrada

nas variáveis de resposta, auxiliar na análise de variância (ANOVA), bem como para obtenção dos modelos matemáticos e das superfícies de resposta.

Tabela 3.6 - Matriz de planejamento fatorial do tipo 2^{5-1} com um experimento no ponto central.

EXPERIMENTO	ρ (kg/m³)	k (W/mK)	c_p (J/kgK)	ε	L_{iso} (mm)
1	15 (-1)	0,015 (-1)	800 (-1)	0,04 (-1)	25 (1)
2	400 (1)	0,015 (-1)	800 (-1)	0,04 (-1)	1 (-1)
3	15 (-1)	0,1 (1)	800 (-1)	0,04 (-1)	1 (-1)
4	400 (1)	0,1 (1)	800 (-1)	0,04 (-1)	25 (1)
5	15 (-1)	0,015 (-1)	2300 (1)	0,04 (-1)	1 (-1)
6	400 (1)	0,015 (-1)	2300 (1)	0,04 (-1)	25 (1)
7	15 (-1)	0,1 (1)	2300 (1)	0,04 (-1)	25 (1)
8	400 (1)	0,1 (1)	2300 (1)	0,04 (-1)	1 (-1)
9	15 (-1)	0,015 (-1)	800 (-1)	0,96 (1)	1 (-1)
10	400 (1)	0,015 (-1)	800 (-1)	0,96 (1)	25 (1)
11	15 (-1)	0,1 (1)	800 (-1)	0,96 (1)	25 (1)
12	400 (1)	0,1 (1)	800 (-1)	0,96 (1)	1 (-1)
13	15 (-1)	0,015 (-1)	2300 (1)	0,96 (1)	25 (1)
14	400 (1)	0,015 (-1)	2300 (1)	0,96 (1)	1 (-1)
15	15 (-1)	0,1 (1)	2300 (1)	0,96 (1)	1 (-1)
16	400 (1)	0,1 (1)	2300 (1)	0,96 (1)	25 (1)
17	207,5 (0)	0,0575 (0)	1550 (0)	0,5 (0)	13 (0)

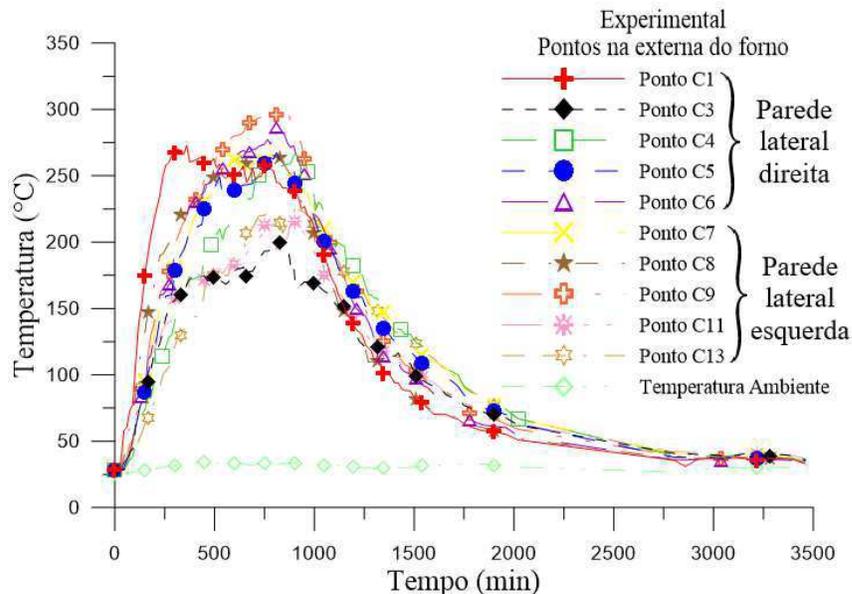
CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Forno sem isolamento térmico

Na Figura 4.1 apresenta-se as temperaturas obtidas nas paredes laterais externas do forno, bem como a temperatura ambiente nas vizinhanças do forno/secador, em função do tempo de processo. Da análise desta figura, pode-se observar que a temperatura máxima atingida foi de 303,7°C, no ponto C9, no instante 840 min de processo (Figura 3.2). Há uma variação de temperatura nas paredes externas do forno de 74°C, aproximadamente.

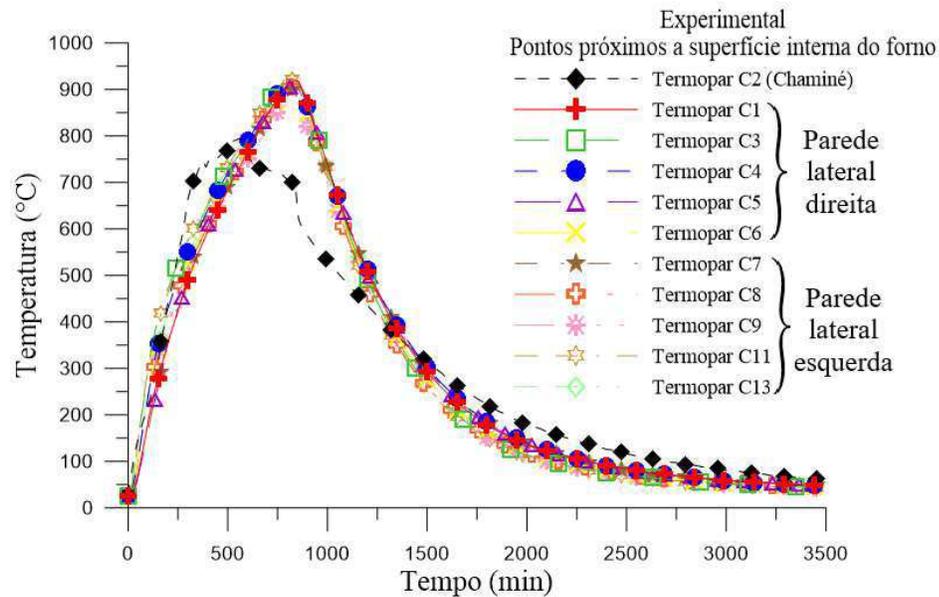
Figura 4.1 - Temperatura superficial externa do forno em função do tempo.



Na Figura 4.2 tem-se a temperatura superficial interna ao forno para diversos pontos, em função do tempo de processamento. Verifica-se que a temperatura máxima atingida no interior do forno foi de 941,62°C em $t = 825$ min. As temperaturas lidas nas várias partes do interior do forno estão muito próximas, com exceção àquela lida no termopar C2, localizado na chaminé. Isto mostra

uma grande uniformidade do aquecimento no interior do forno, que permite a secagem e queima adequadas, e a produção de produtos com melhor qualidade. Vale salientar que a fase de aquecimento durou 840 min.

Figura 4.2 - Temperatura próxima a superfície interna do forno em função do tempo.



A Figura 4.3 ilustra as temperaturas médias das superfícies interna e externa ao forno, bem como a temperatura do ar ambiente nas vizinhanças do forno/secador. Tais curvas foram utilizadas para a análise térmica aqui apresentada.

Na Figura 4.4 estão plotados os resultados da perda de calor do forno ao longo do processo. Da análise desta figura, observa-se que a maior perda de calor ocorre por radiação pelas paredes laterais (50%), seguido da perda por convecção (27%), também pelas paredes laterais, fazendo com que a perda de calor pelo conjunto base/teto seja a menos expressiva (23%). É importante ressaltar que os percentuais apresentados acima foram calculados para o instante de tempo $t = 840$ min, momento em que o forno foi desligado.

Figura 4.3 - Temperaturas superficiais interna e externa da parede do forno, e ambiente nas vizinhanças do forno em função do tempo.

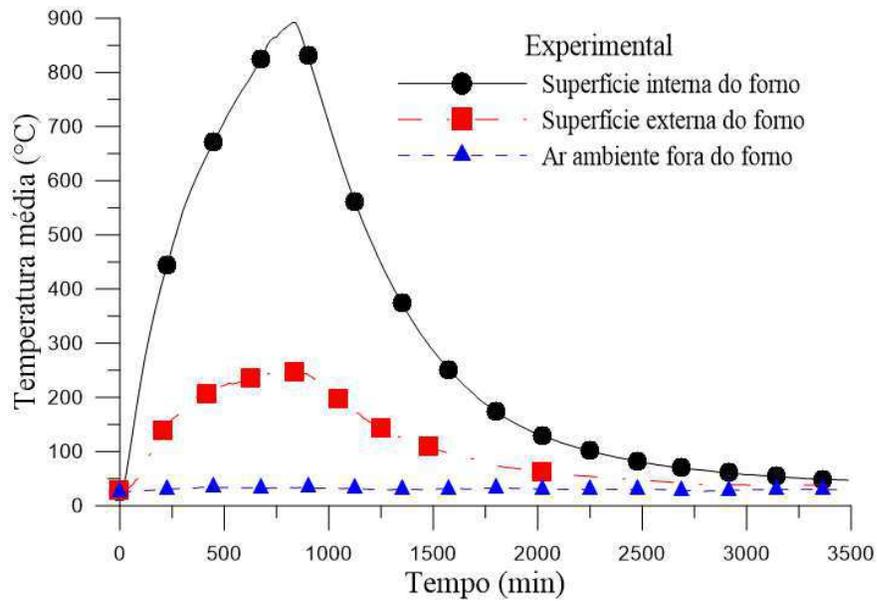
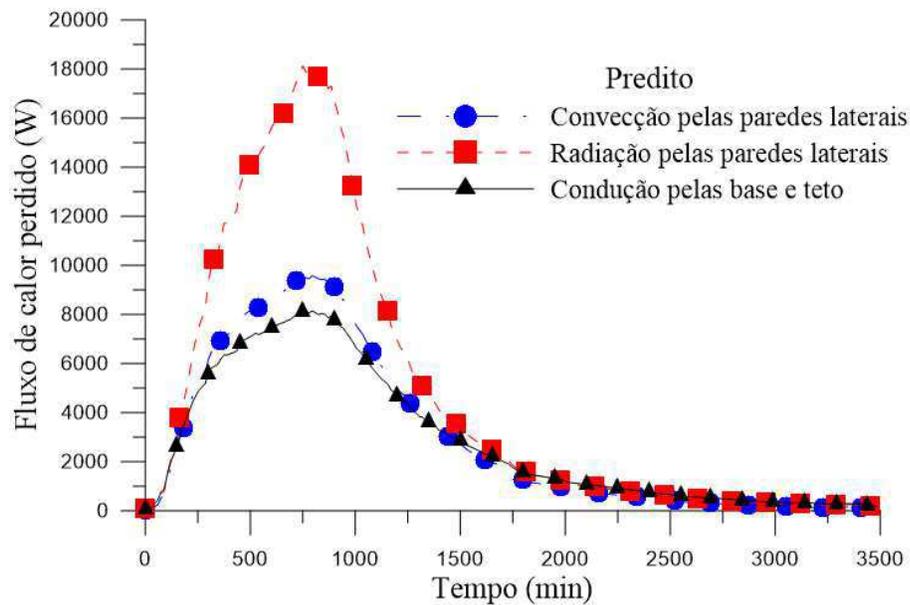


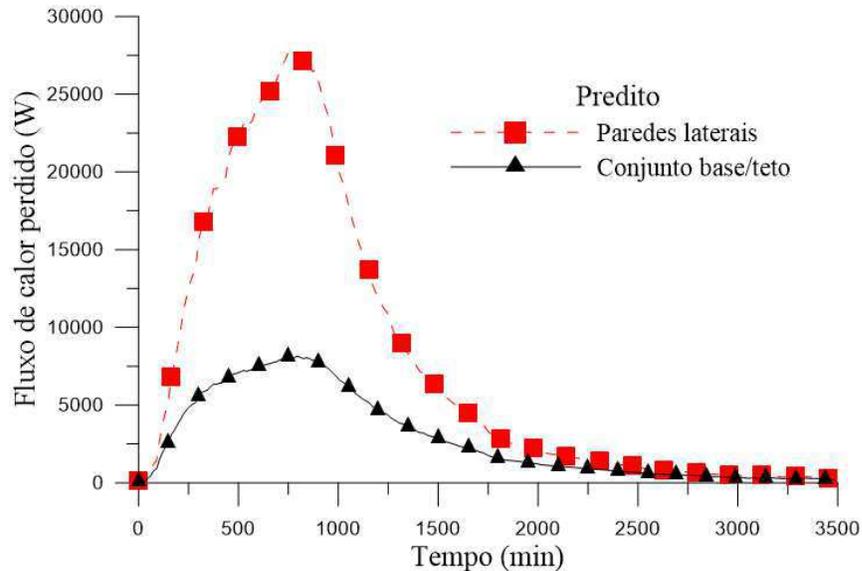
Figura 4.4 - Perda de calor do forno em função do tempo.



A Figura 4.5 ilustra a perda de calor pelas paredes laterais, base e teto do forno, previstas pela modelagem matemática proposta. A perda de calor pelas paredes laterais é obtida somando as perdas de calor por radiação e por convecção. Da análise desta figura, verifica-se que a perda de

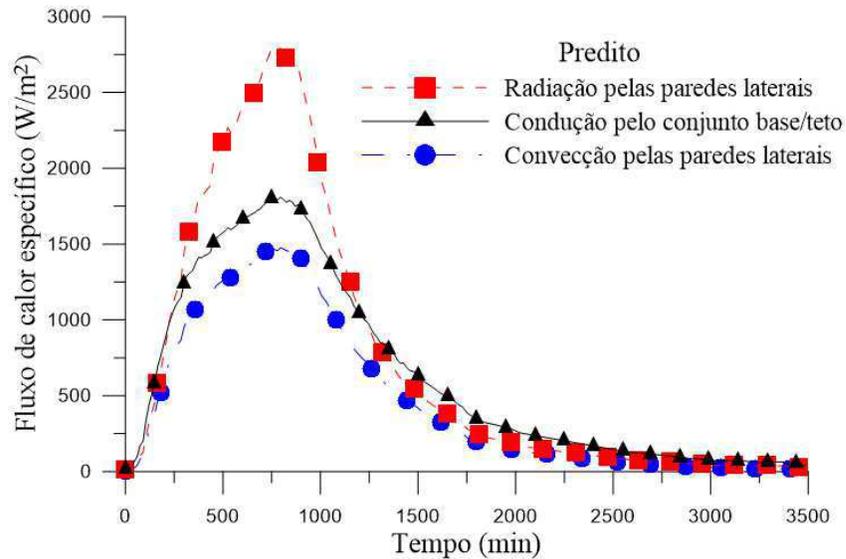
calor pelas paredes laterais é significativamente maior quando comparado com a perda de calor pelo conjunto base/teto, em boa parte do processo. Assim, para melhorar a eficiência do forno deve-se definir alternativas para reduzir a perda de calor pelas paredes laterais.

Figura 4.5 - Comparação entre as perdas de calor pelas paredes laterais e pelo conjunto base/teto do forno em função do tempo.



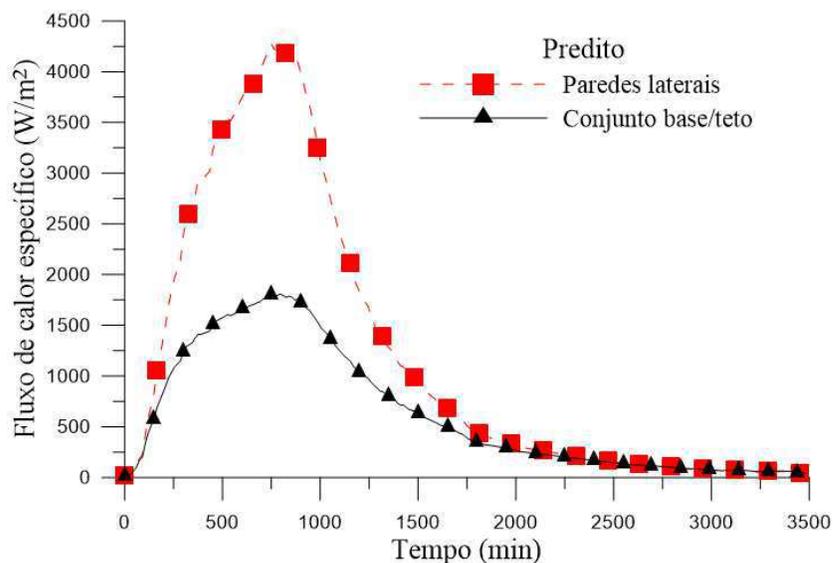
Na Figura 4.6 ilustra-se os fluxos de calor por unidade de área perdido pelas paredes laterais e pelo conjunto base/teto do forno. Da análise desta figura, observa-se que o fluxo de calor por unidade de área perdido pelo conjunto base/teto é superior ao fluxo de calor perdido por convecção pelas paredes laterais, embora a perda por convecção seja maior (Figura 4.4). Isso é explicado pelo fato de a área de transferência de calor das paredes laterais ser maior que a área do conjunto base/teto. O fluxo de calor por unidade de área perdido por radiação continua sendo o mais significativo, representando 46% do fluxo de calor específico total para o instante de tempo $t = 840$ min, seguido pela perda de calor por condução pelo conjunto base/teto (30%) e por convecção pelas paredes laterais (24%). Contudo, pode-se observar que as perdas de calor pelo conjunto base/teto supera as demais, para tempos superiores a 1250 min.

Figura 4.6 - Fluxo de calor por unidade de área perdido pelo forno em função do tempo.



Na Figura 4.7 ilustra-se que o fluxo de calor por unidade de área perdido pelas paredes laterais é significativamente maior quando comparado com a perda de calor pelo conjunto base/teto em boa parte do processo, representando 70% do fluxo de calor total por unidade de área para o instante de tempo $t = 840$ min.

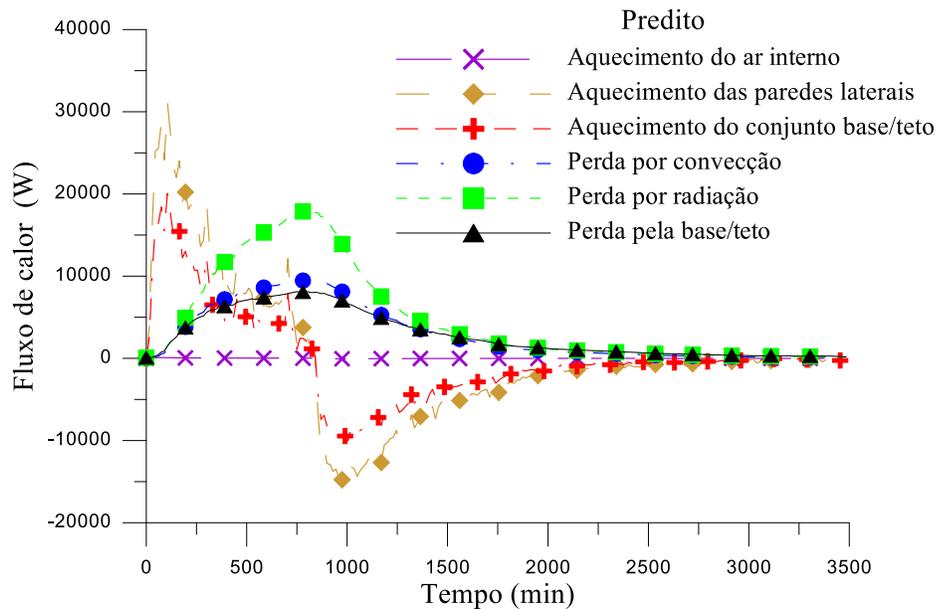
Figura 4.7 - Comparação entre os fluxos de calor por unidade de área perdidos pelas paredes laterais e pelo conjunto base/teto do forno em função do tempo.



A Figura 4.8 ilustra todas as taxas de transferência de calor que ocorrem ao longo dos processos de aquecimento e resfriamento do forno/secador. Observa-se que a taxa de transferência de calor para aquecer o ar no interior do forno é insignificante quando comparado com as taxas de transferência de calor necessárias para aquecer as paredes laterais e o conjunto base/teto. Isso acontece devido à elevada massa específica e calor específico do tijolo refratário, fazendo com que o mesmo apresente uma maior capacidade de armazenamento de energia térmica quando comparado com o ar atmosférico.

Observa-se também que, enquanto as perdas de calor apresentam valores positivos para todos os instantes de tempo do processo de aquecimento e resfriamento, as variáveis $q_{\text{aquecer}_{\text{paredes lat.}}}$ e $q_{\text{aquecer}_{\text{base/teto}}}$ apresentam valores negativos a partir de 840 min, aproximadamente, momento em que o sistema de aquecimento foi desligado. A partir deste momento inicia-se o processo de resfriamento do forno, fazendo com que as variações de temperatura média nas paredes do forno sejam menores que zero ($\Delta T_{med} < 0$), justificando assim os valores negativos encontrados para tais variáveis. Isto pode ser melhor verificado ao se observar as Equações 3.7 e 3.8.

Figura 4.8 - Taxas de transferência de calor no forno sem isolamento térmico.



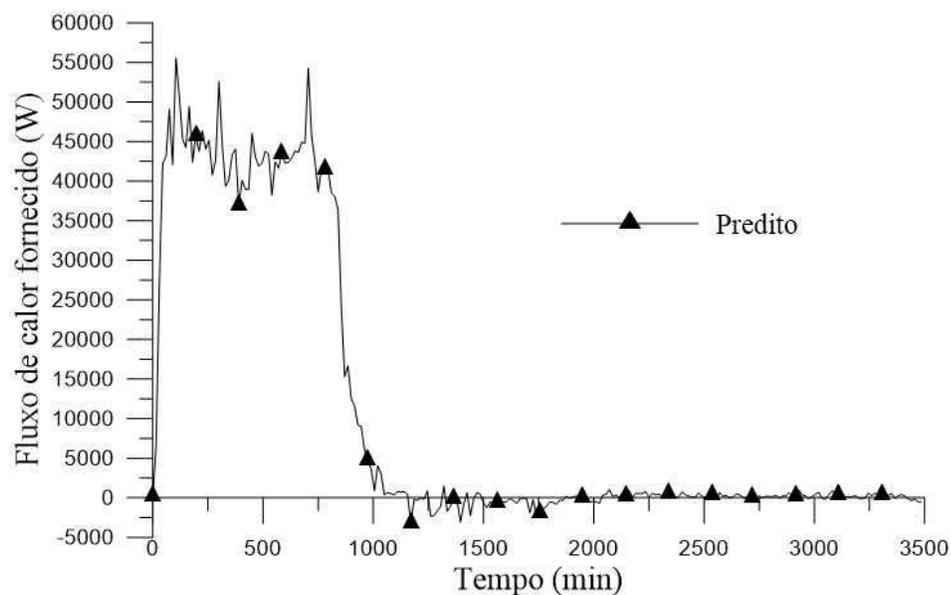
A Figura 4.9 ilustra a taxa de energia térmica fornecida ao forno em função do tempo que, de acordo com a Equação 3.2, é obtida pela soma de cada uma das parcelas das Equações 3.3 e 3.4, ou seja, a soma de todas as parcelas de transferência de calor mostradas na Figura 4.8.

Analisando a Figura 4.9, constata-se que a metodologia proposta está coerente com a realidade física do problema, haja vista que a taxa de energia que é fornecida, obtida pelo balanço de energia mostrado na Equação 3.2, se aproxima de zero para instantes de tempo posteriores ao desligamento do forno.

Percebe-se que há oscilações na taxa de energia na forma de calor que é fornecida durante o processo de aquecimento do forno. Possíveis causas para tais oscilações, são: precisão das medições, variações na vazão do gás ao longo do processo de aquecimento do forno, modelo de transferência de calor unidimensional adotado e perdas não mensuráveis tais como perdas de calor por conta de rachaduras no forno e inadequado fechamento da porta.

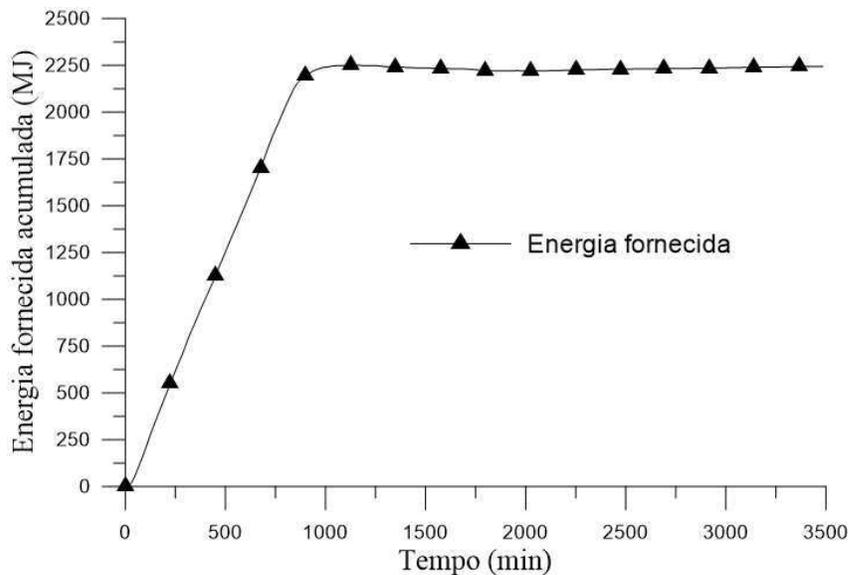
Verifica-se ainda que, aos 840 min, instante em que o aquecimento do forno é cessado, a energia fornecida ao forno, predita pelo modelo, não se reduz abruptamente para zero. As possíveis causas para isto podem ser atribuídas as considerações de uma distribuição linear de temperatura na parede do forno e de sólido semi-infinito no teto do forno.

Figura 4.9 - Taxa com que a energia é fornecida ao forno em função do tempo.



A Figura 4.10 apresenta a energia fornecida acumulada em função do tempo (Equação 3.59). Tal curva é obtida integrando no tempo a curva da taxa de energia fornecida (Figura 4.9). Observa-se que, embora a curva da taxa de energia fornecida apresente oscilações durante a etapa de aquecimento (Figura 4.9), a sua integral apresenta um comportamento de crescimento linear durante a etapa de aquecimento, resultado este esperado para funções positivas e constantes. Observa-se que, na etapa de resfriamento (após 1000 min) a energia fornecida acumulada na forma de calor permanece muito próximo de uma constante, como é de se esperar.

Figura 4.10 - Energia fornecida acumulada em função do tempo.



4.2 Forno com isolamento térmico

Para a análise do forno com isolamento térmico, foi realizado um estudo de convergência de malha representando o isolamento térmico utilizado nas paredes laterais do forno. Para cada espessura de isolamento térmico analisada, foram criadas três tipos de malhas, denominadas M_1 , M_2 e M_3 , com 20, 10 e 5 volumes de controle, respectivamente. A Tabela 4.1 apresenta o tamanho representativo de malha em função da espessura do isolamento térmico, sendo l_1 , l_2 e l_3 os tamanhos representativos das malhas M_1 , M_2 e M_3 , respectivamente. Com o objetivo de satisfazer as recomendações propostas por Celik et al. (2008), definiu-se o número de volumes de controle de cada malha de tal forma que $r_{21} = r_{32} = 2$. Vale ressaltar que todas as análises foram realizadas

utilizando o mesmo tipo de isolamento térmico (fibra cerâmica) e mesmo passo de tempo ($\Delta t = 0,1$ min).

Tabela 4.1 - Tamanho representativo de malha em função da espessura do isolamento térmico.

L (mm)	l₁	l₂	l₃
0,5	0,025	0,05	0,1
1,0	0,050	0,10	0,2
2,5	0,125	0,25	0,5
5,0	0,250	0,50	1,0
7,5	0,375	0,75	1,5
10,0	0,500	1,00	2,0
25,0	1,250	2,50	5,0
50,0	2,500	5,00	10,0
75,0	3,750	7,50	15,0
100,0	5,000	10,00	20,0

A variável de resposta utilizada para fazer a análise de convergência de malha foi o ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento do forno ($Q_{entra_{iso}}$), conforme Equação 3.53. Os valores desta variável, em função da malha e da espessura do isolamento térmico, estão reportados na Tabela 4.2.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do estudo de convergência de malha em função da espessura do isolamento térmico (L). Os valores de C na tabela indicam convergência monotônica para os casos em que $L \geq 7,5$ mm, haja vista que seus valores estão no intervalo entre 0 e 1, garantindo a aplicabilidade do método da extrapolação de Richardson para a variável de interesse no intervalo dado (ALMOHAMMADI et al., 2013). Já para $L \leq 5,0$ mm, observa-se que a convergência é oscilatória, pois $-1 < C < 0$. Celik et al. (2008) afirmam que a convergência oscilatória não deve ser considerada como um resultado insatisfatório, pois se $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$ ou $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ for muito próximo de zero, pode indicar que a solução exata já foi atingida, como aparenta ser o caso.

Observa-se que há redução na condição de convergência para todos os casos analisados, visto que $ICM_{21} < ICM_{32}$, indicando que a dependência foi reduzida com o refino da malha. A partir da

proximidade dos valores de ICM_{32} e $(r_{21})^p ICM_{21}$, é possível afirmar que o intervalo assintótico foi atingido e que a solução extrapolada está próxima da solução exata para esta variável, em todos os casos analisados (ROACHE, 1994). Observa-se também houve, para todos os valores de espessura, uma boa proximidade entre a solução extrapolada e as soluções para M_1 e M_2 . Desta forma, levando-se em consideração que, quanto mais refinado for a malha maior é o tempo total de simulação, escolheu-se as malhas com 10 volumes de controle (M_2) para demais análises.

Tabela 4.2 - Resultado do estudo de convergência de malha para a variável ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento.

L (mm)	ϕ_1 (MJ)	ϕ_2 (MJ)	ϕ_3 (MJ)	C	ϕ^{21}_{ext} (MJ)	ICM_{21}	ICM_{32}	$r^p ICM_{21}$
0,5	734,499	734,499	734,910	$-4,68 \times 10^{-6}$	734,499	$1,537 \times 10^{-14}$	$3,281 \times 10^{-9}$	$3,281 \times 10^{-9}$
1,0	644,938	644,938	645,317	$-3,05 \times 10^{-5}$	644,938	$6,831 \times 10^{-13}$	$2,240 \times 10^{-8}$	$2,240 \times 10^{-8}$
2,5	479,880	479,880	480,164	$-3,35 \times 10^{-4}$	479,880	$8,311 \times 10^{-11}$	$2,478 \times 10^{-7}$	$2,478 \times 10^{-7}$
5,0	343,535	343,535	343,659	$-3,01 \times 10^{-3}$	343,535	$4,120 \times 10^{-9}$	$1,368 \times 10^{-6}$	$1,368 \times 10^{-6}$
7,5	270,478	270,477	270,441	$2,10 \times 10^{-2}$	270,478	$7,666 \times 10^{-8}$	$3,645 \times 10^{-6}$	$3,645 \times 10^{-6}$
10,0	224,247	224,245	224,045	$6,22 \times 10^{-3}$	224,247	$4,337 \times 10^{-8}$	$6,978 \times 10^{-6}$	$6,978 \times 10^{-6}$
25,0	115,119	115,114	113,905	$3,98 \times 10^{-3}$	115,119	$2,088 \times 10^{-7}$	$5,246 \times 10^{-5}$	$5,246 \times 10^{-5}$
50,0	69,129	69,117	66,180	$3,99 \times 10^{-3}$	69,129	$8,485 \times 10^{-7}$	$2,127 \times 10^{-4}$	$2,127 \times 10^{-4}$
75,0	54,002	53,983	49,299	$4,20 \times 10^{-3}$	54,003	$1,917 \times 10^{-6}$	$4,570 \times 10^{-4}$	$4,568 \times 10^{-4}$
100,0	47,628	47,599	41,178	$4,55 \times 10^{-3}$	47,628	$3,511 \times 10^{-6}$	$7,715 \times 10^{-4}$	$7,710 \times 10^{-4}$

No Apêndice A apresenta-se o balanço global de energia em função do tempo utilizando 3 diferentes malhas, para cada uma das 10 espessuras de fibra cerâmica como isolamento térmico. Para todos os casos analisados, o balanço de energia não é satisfeito para as malhas de 5 volumes de controle na maioria dos instantes de tempo. Já as malhas de 10 e 20 volumes de controle apresentam valores inferiores a 10^{-9} para o balanço global de energia no isolamento térmico durante todo o processo de aquecimento (Equação 3.55), considerando um critério de convergência para o método numérico dos volumes finitos de 10^{-7} .

No Apêndice B apresenta-se os resultados obtidos para o ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento ($Q_{entra_{iso}}$) em função do tamanho representativo de malha (l), para cada uma das 10 espessuras de fibra cerâmica como isolamento

térmico. As soluções extrapoladas (ϕ_{ext}^{21}) estão indicadas pelos pontos em que as curvas interceptam o eixo das ordenadas no gráfico.

O próximo passo foi realizar uma análise de independência do passo de tempo, utilizando o mesmo tipo de isolamento térmico (fibra cerâmica), a mesma malha (M_2) e mesma variável de resposta ($Q_{entra_{iso}}$). Para tal análise, utilizou-se três passos de tempo distintos, conforme apresentado na Tabela 4.3. Observa-se, para todos os casos analisados, que o erro absoluto da variável de resposta entre os passos de tempo de 0,1 min e 1,0 min é consideravelmente menor quando comparado com o erro absoluto entre os passos de tempo de 1,0 min e 15,0 min. Desta forma, levando-se em consideração que, quanto menor for o passo de tempo utilizado, maior é o tempo total de simulação, adotou-se um passo de tempo de $\Delta t = 1$ min para demais análises.

Tabela 4.3 - Resultado do estudo de independência do passo de tempo para a variável ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento.

L (mm)	$\Delta t = 0,1$ min	$\Delta t = 1,0$ min	$\Delta t = 15,0$ min	$\varepsilon_{12} = \phi_1 - \phi_2$	$\varepsilon_{23} = \phi_2 - \phi_3$
	ϕ_1 (MJ)	ϕ_2 (MJ)	ϕ_3 (MJ)	(MJ)	(MJ)
0,5	734,4988	734,4964	734,5234	0,0023	-0,0270
1,0	644,9375	644,9352	644,9500	0,0023	-0,0148
2,5	479,8803	479,8781	479,8745	0,0022	0,0037
5,0	343,5346	343,5326	343,5181	0,0020	0,0145
7,5	270,4773	270,4754	270,4574	0,0019	0,0180
10,0	224,2455	224,2436	224,2243	0,0018	0,0193
25,0	115,1142	115,1128	115,0964	0,0014	0,0164
50,0	69,1169	69,1160	69,1041	0,0008	0,0119
75,0	53,9828	53,9815	53,9618	0,0013	0,0197
100,0	47,5987	47,5965	47,5634	0,0022	0,0331

No Apêndice C apresenta-se a temperatura em função do tempo para diversas posições no interior do isolamento térmico. Como foi proposto realizar uma análise para 4 tipos de materiais isolantes diferentes (fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio), com 10 espessuras diferentes para cada material, tem-se um total de 40 figuras no respectivo Apêndice.

No Apêndice D apresenta-se o perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo. Como foi proposto realizar uma análise para 4 tipos de materiais isolantes diferentes (fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio), com 10 espessuras diferentes para cada material, tem-se um total de 40 figuras no respectivo Apêndice. A partir dos resultados apresentados no Apêndice D, constata-se que, para qualquer instante de tempo, quão mais distante da parede do forno ($x = 0$ mm), menor é a temperatura. Este comportamento era esperado, haja vista que a transferência de calor ocorre da parede do forno ($x = 0$) para a extremidade oposta do isolamento térmico ($x = L_{iso}$), em contato com o ambiente. Também é possível observar que as curvas se aproximam de linhas retas à medida que o processo ocorre. Isto acontece porque a contribuição da taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico, quando comparado com o ganho de calor pela parede do forno, diminui nos instantes finais do aquecimento, como será comprovado adiante.

As Figuras 4.11-4.14 ilustram a temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente. Tais valores são calculados a partir da média aritmética das temperaturas obtidas nos centros de cada um dos 10 volumes de controle em cada instante de tempo.

Figura 4.11 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

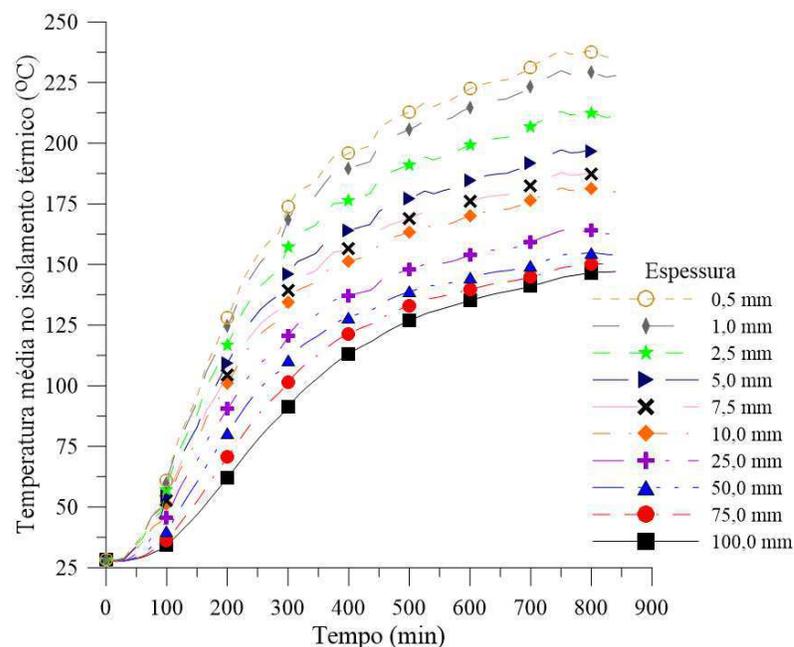


Figura 4.12 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

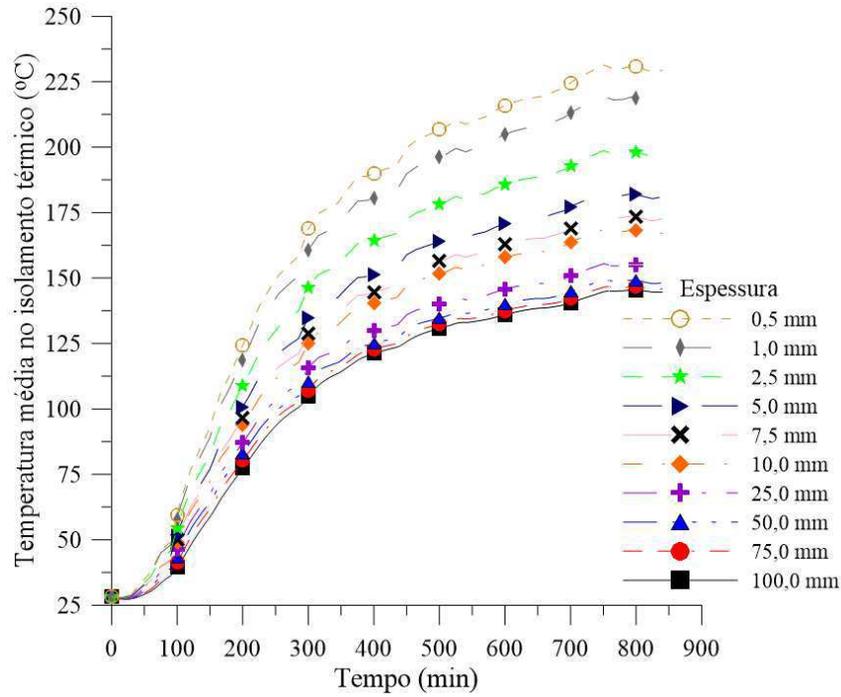


Figura 4.13 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

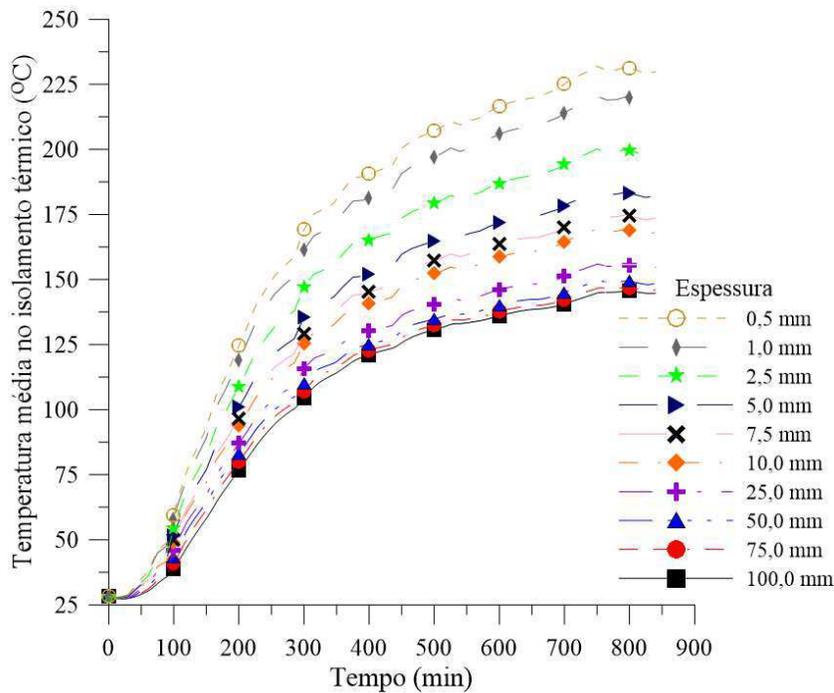
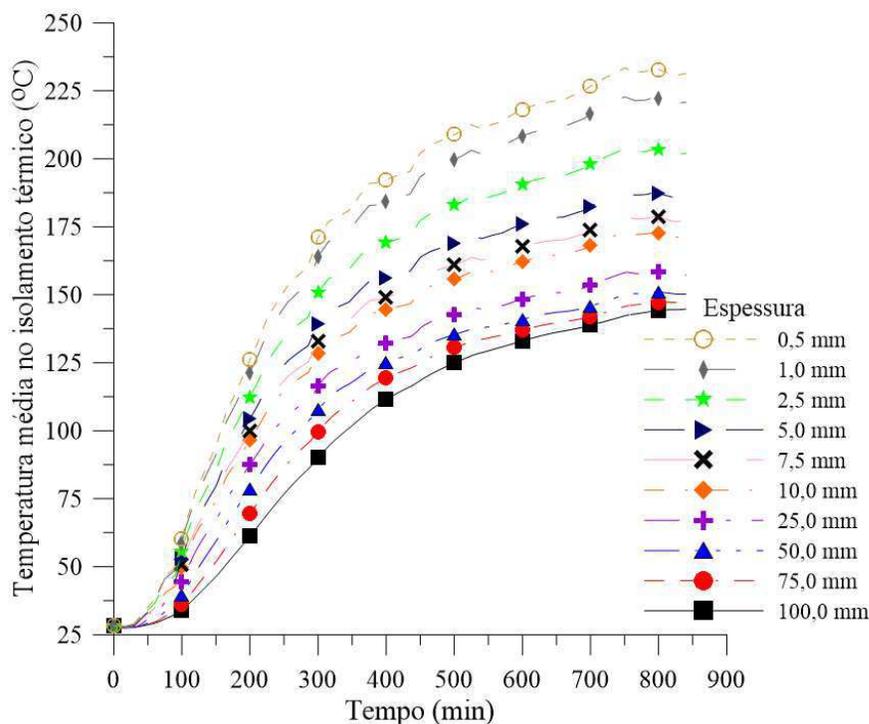


Figura 4.14 - Temperatura média no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



Tais resultados são imprescindíveis para a análise, haja vista que a condutividade térmica do material isolante para cada volume de controle em um dado instante de tempo é calculada de forma iterativa em função da temperatura média no isolamento térmico no seu respectivo instante de tempo (Equação 3.38). Pela análise destas figuras, constata-se que, independente da espessura do isolamento térmico, a temperatura média no mesmo tende a aumentar ao longo do processo de aquecimento, como é de se esperar. Além disso, observa-se que o aumento da espessura do material isolante promove uma diminuição na temperatura média no isolamento térmico e, conseqüentemente, redução na condutividade térmica do mesmo, conforme visto na Tabela 3.1.

As Figuras 4.15-4.18 ilustram a temperatura superficial externa ao isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

Figura 4.15 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

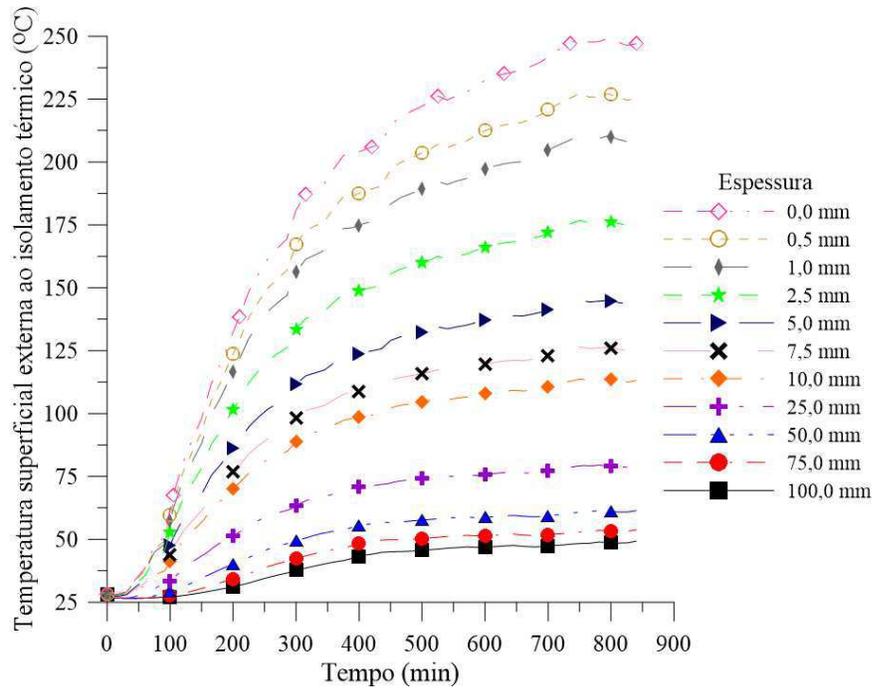


Figura 4.16 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

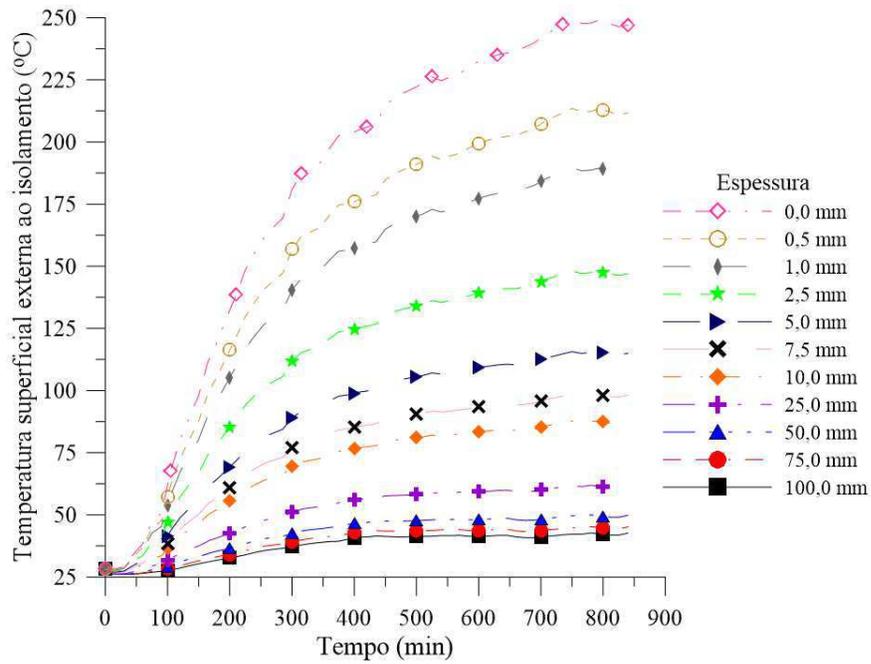


Figura 4.17 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

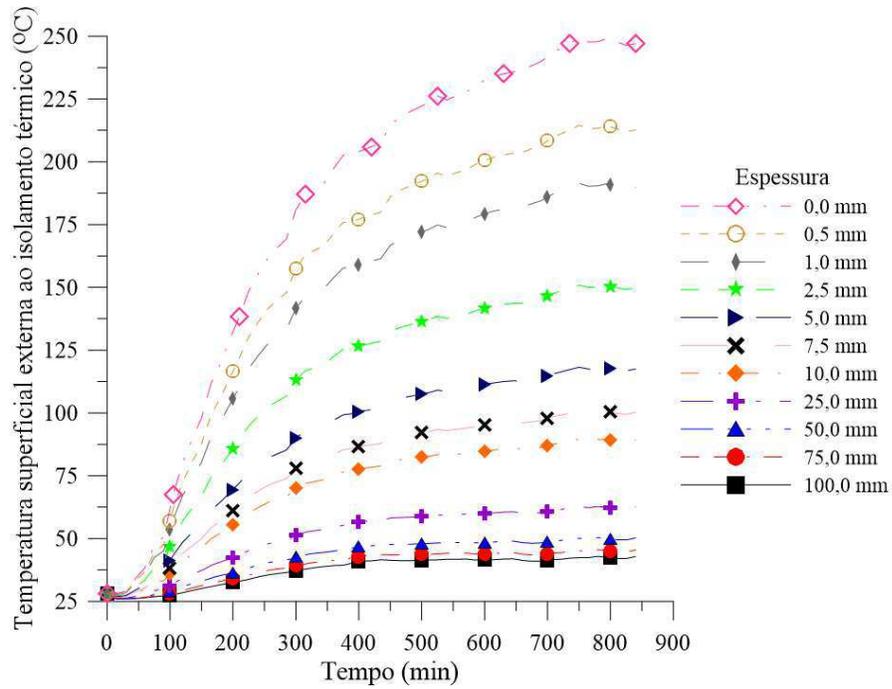
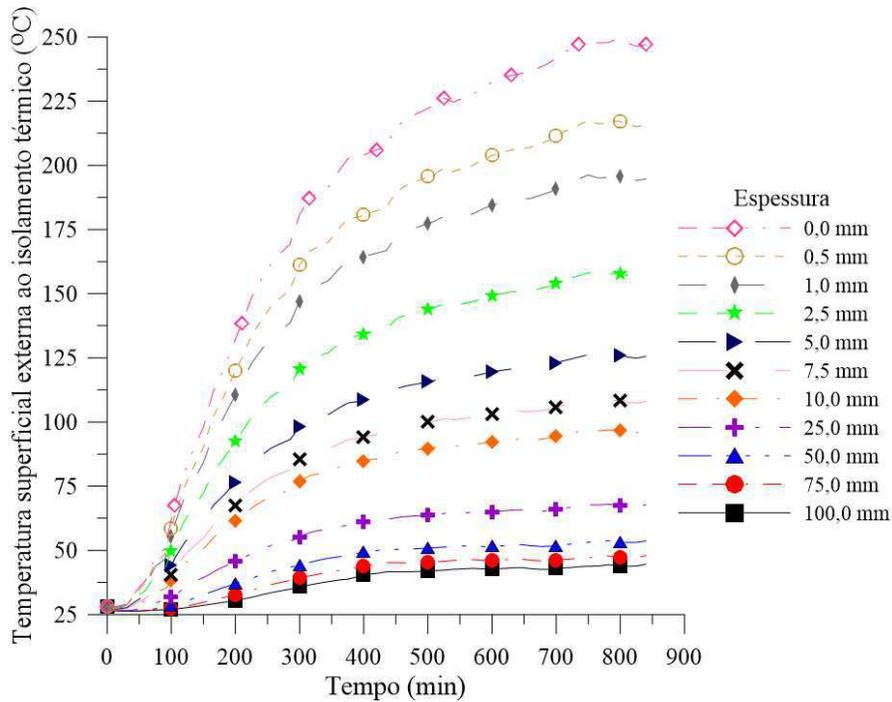


Figura 4.18 - Temperatura superficial externa ao isolamento durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



Pela análise destas figuras, é possível observar que a temperatura superficial externa ao isolamento térmico diminui com o aumento da espessura do material, comprovando que, quanto maior a espessura do material isolante, maior é a resistência térmica a transferência de calor. Desta forma, uma maior espessura de isolamento térmico implica em uma menor diferença entre a temperatura superficial externa e a temperatura ambiente, promovendo assim uma redução nas perdas de calor por convecção e por radiação pelas paredes laterais do forno, como será confirmado mais adiante. É importante ressaltar que a curva referente a espessura de 0 mm, nas Figuras 4.15-4.18, representa a distribuição da temperatura na parede externa do forno sem isolamento, sendo assim uma das condições de contorno do problema físico para o forno com isolamento térmico.

As Figuras 4.19-4.22 mostram os coeficientes de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

Figura 4.19 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

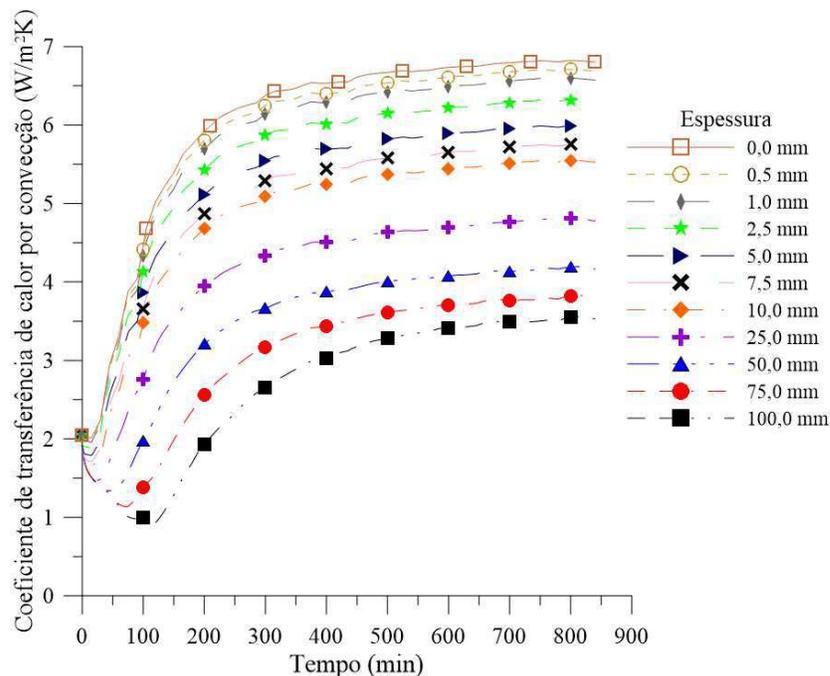


Figura 4.20 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

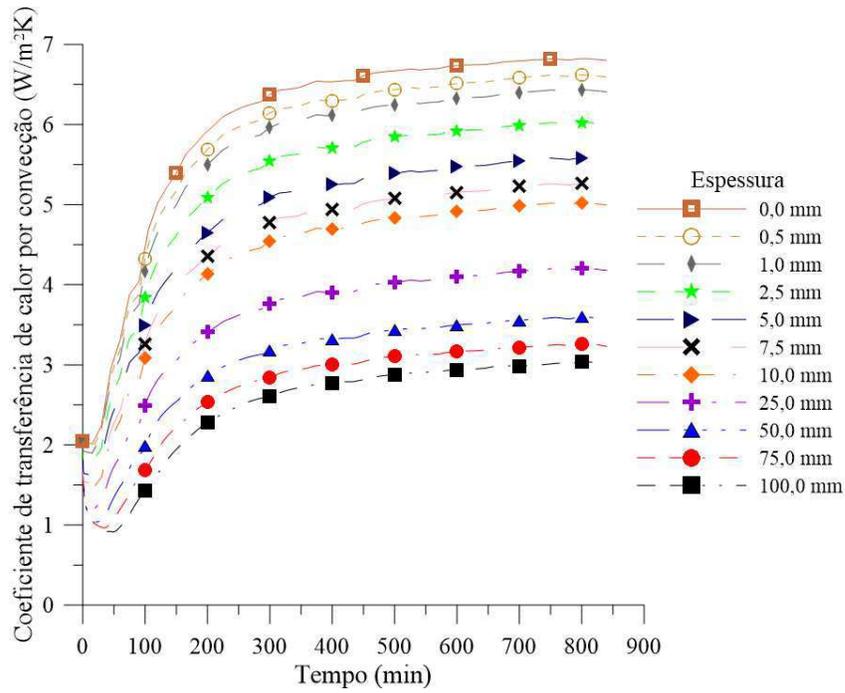


Figura 4.21 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

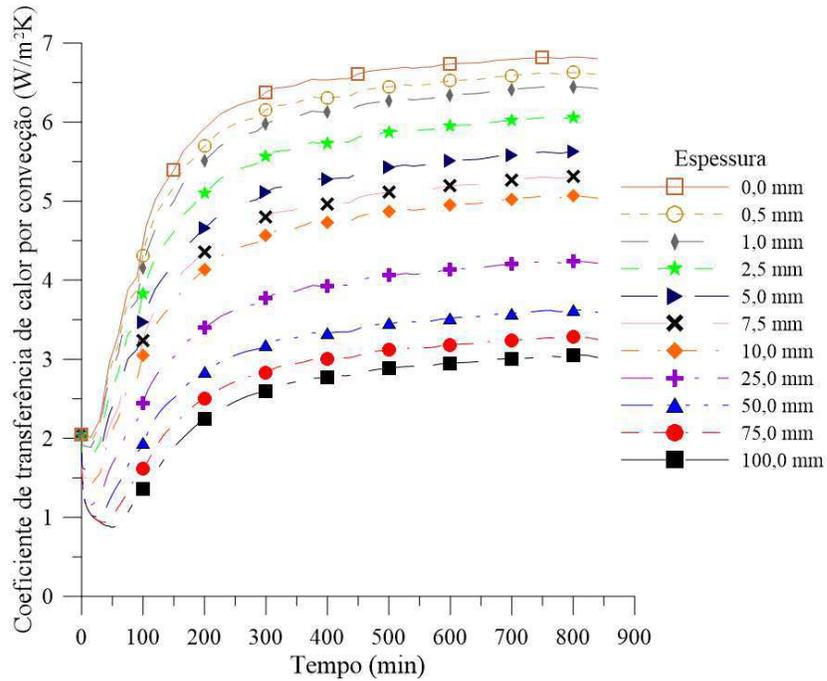
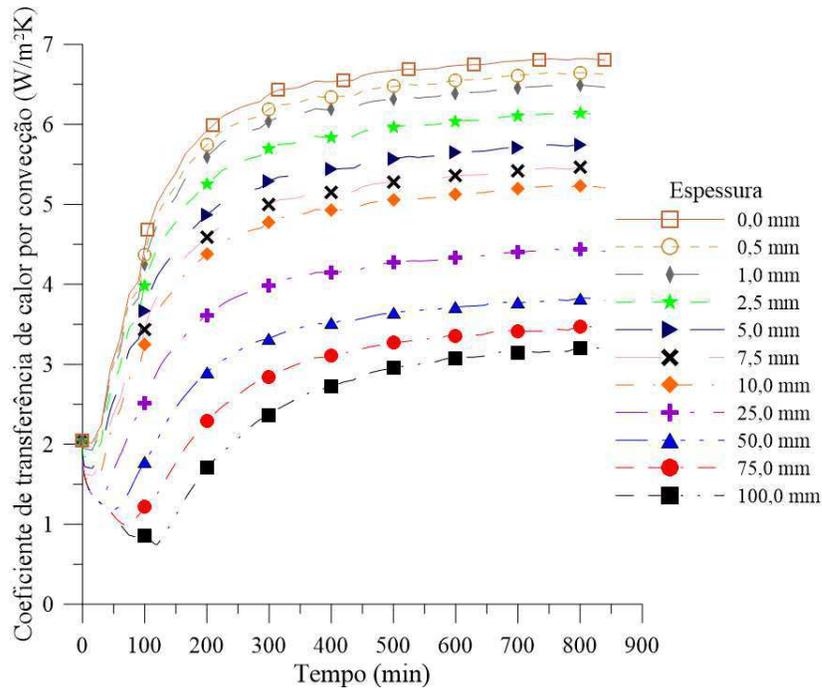


Figura 4.22 - Coeficiente de transferência de calor por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



As propriedades termofísicas viscosidade cinemática (ν), difusividade térmica (α), coeficiente de expansão volumétrica (β) e o número de Prandtl (Pr), tendem a aumentar o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção a medida em que a espessura do isolamento térmico é aumentada, devido à redução na temperatura de película (T_f). Em contrapartida, o aumento na espessura do isolamento térmico promove diminuição na condutividade térmica do fluido (k_f) e na diferença entre a temperatura superficial externa ao isolamento e a temperatura ambiente, como visto anteriormente, ambos contribuindo, de forma mais significativa, para uma redução do coeficiente de transferência de calor por convecção.

As Figuras 4.23-4.26 mostram os coeficientes de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

O coeficiente de transferência de calor por radiação depende fortemente das temperaturas da superfície externa do isolamento térmico e da vizinhança, como pode ser visto na Equação 3.20, fazendo com que a variação na espessura do isolamento térmico influencie de forma mais

significativa no seu valor quando comparado com o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Figura 4.23 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

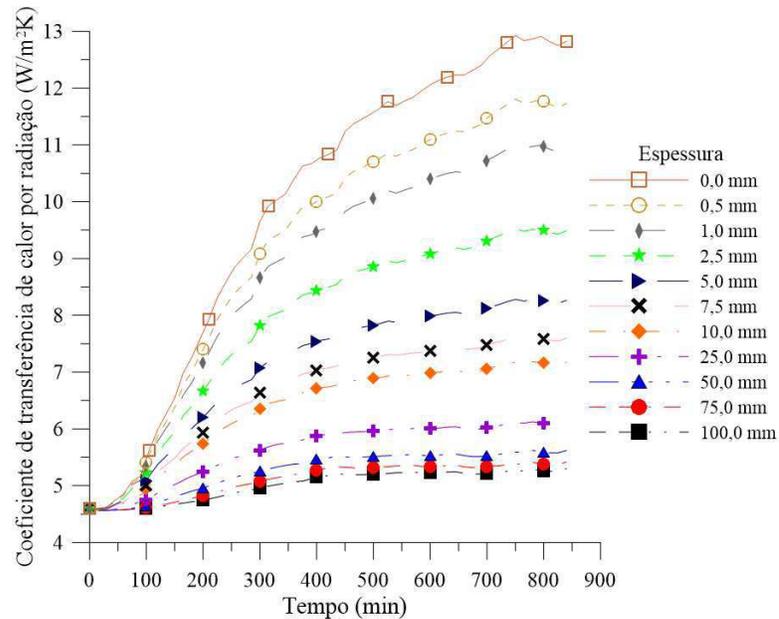


Figura 4.24 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

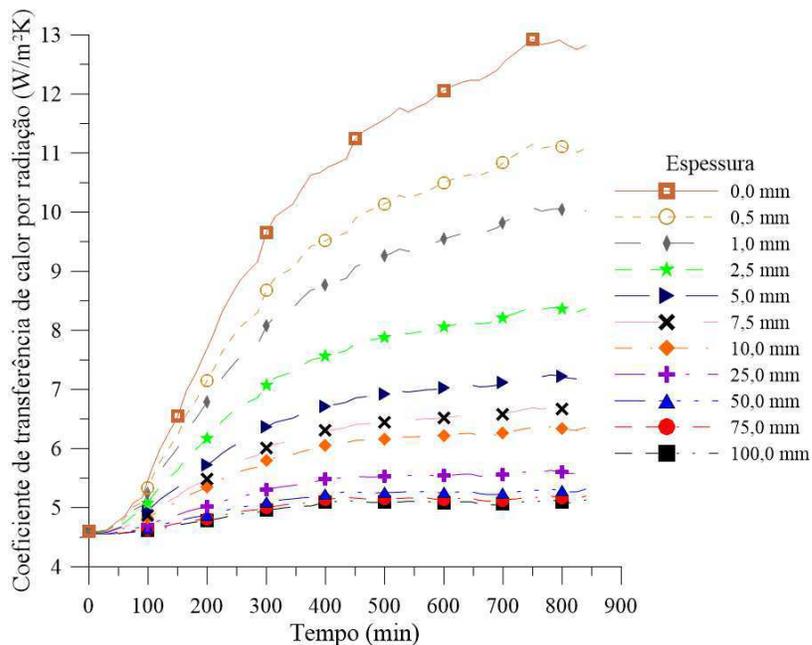


Figura 4.25 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

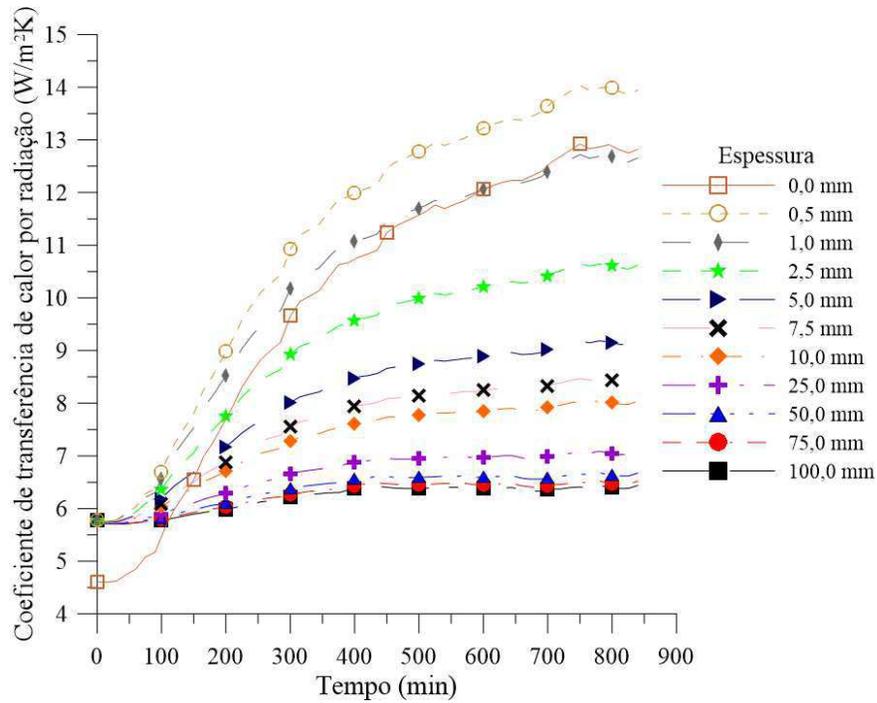
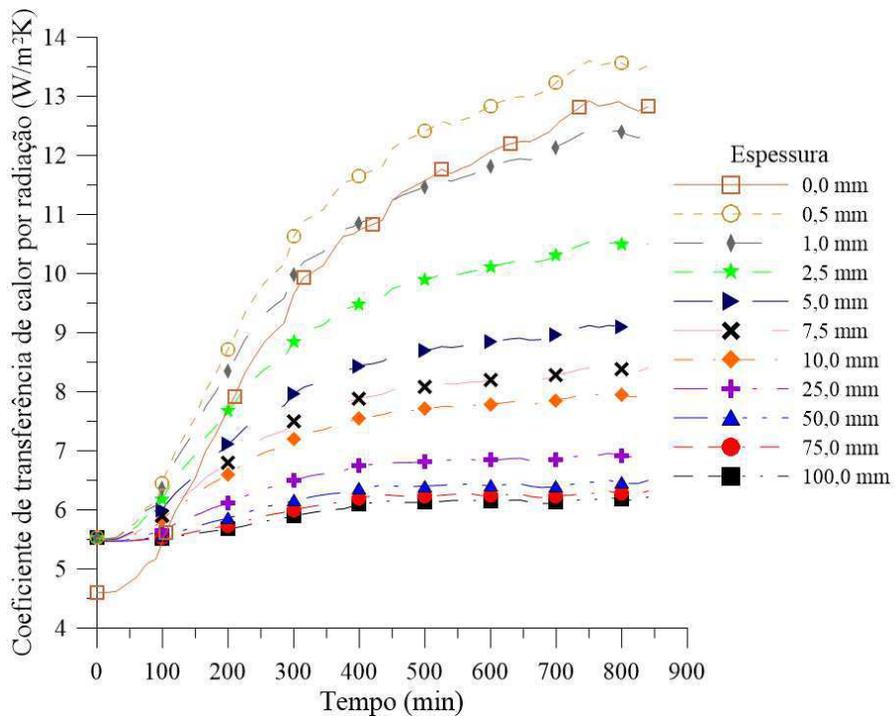


Figura 4.26 - Coeficiente de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



Da análise das Figuras 4.23 a 4.26, observa-se que para os casos em que se utiliza lã de rocha e silicato de cálcio como isolamento térmico, os coeficientes de transferência de calor por radiação no início do processo ($t = 0$ min) são maiores que para o forno sem isolamento térmico, representado pelas curvas com espessura igual a 0 mm. Isso acontece devido ao fato de que a emissividade de tais materiais (Tabela 3.2) são maiores que a emissividade do tijolo refratário ($\epsilon = 0,75$). Pela análise da Figura 4.25, observa-se que o coeficiente de transferência de calor por radiação é maior para uma espessura de 1 mm de lã rocha que para o forno sem isolamento térmico, em boa parte do processo (até $t = 600$ min). Já para o silicato de cálcio (Figura 4.26), a curva do coeficiente de transferência de calor por radiação para uma espessura de 1 mm intercepta a curva do forno sem isolamento térmico em $t = 450$ min. Nota-se também, para os dois casos, que os coeficientes de transferência de calor por radiação para espessura de 0,5 mm são superiores quando comparado com o forno sem isolamento térmico, ao longo de todo o processo de aquecimento.

As Figuras 4.27-4.30 ilustram o fluxo de calor perdido por convecção durante o processo de aquecimento, para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

Figura 4.27 – Fluxo de calor perdido por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

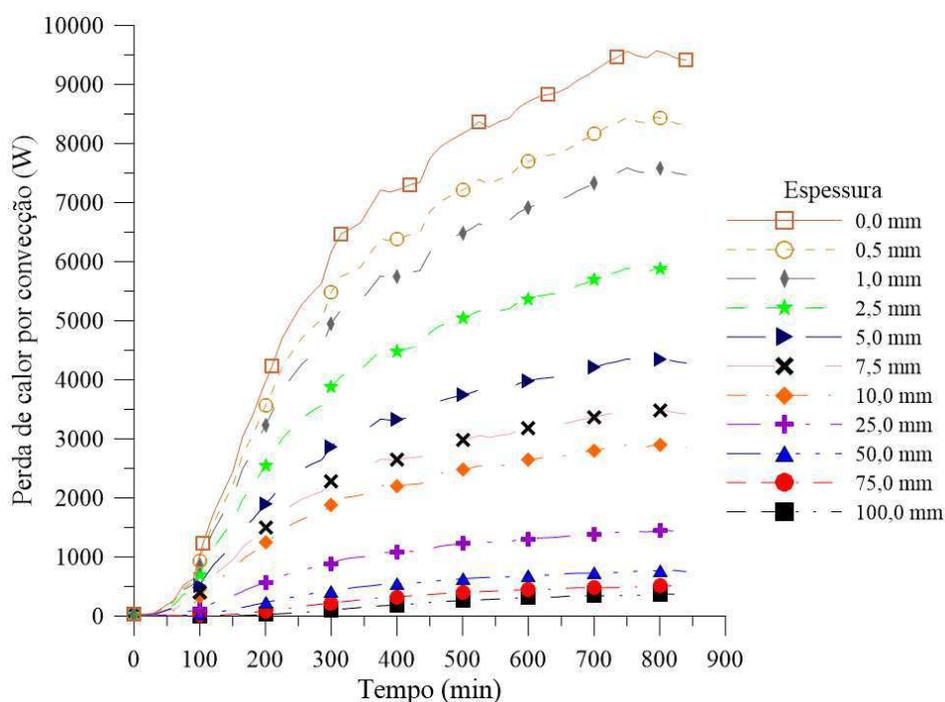


Figura 4.28 - Fluxo de calor perdido por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

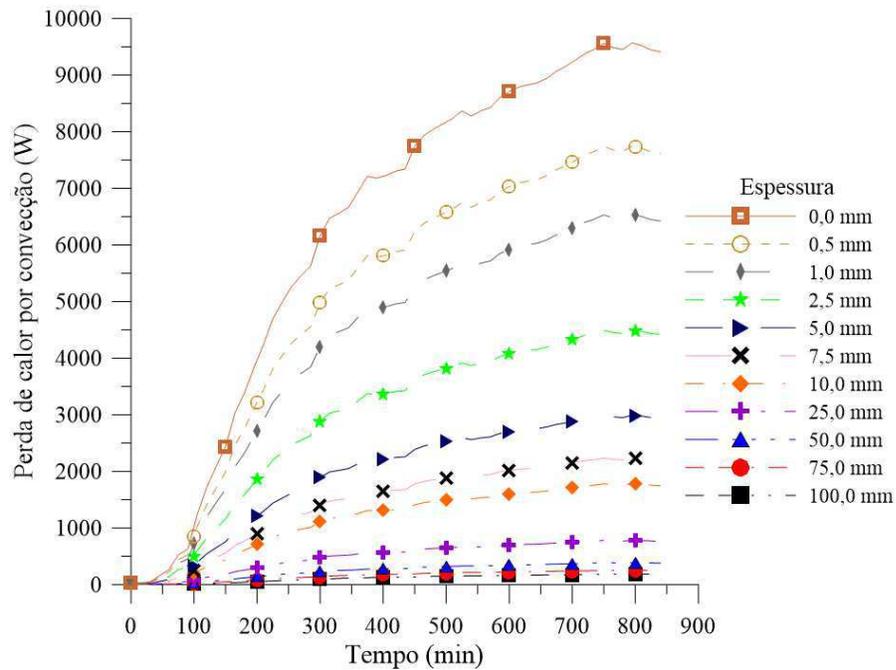


Figura 4.29 - Fluxo de calor perdido por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

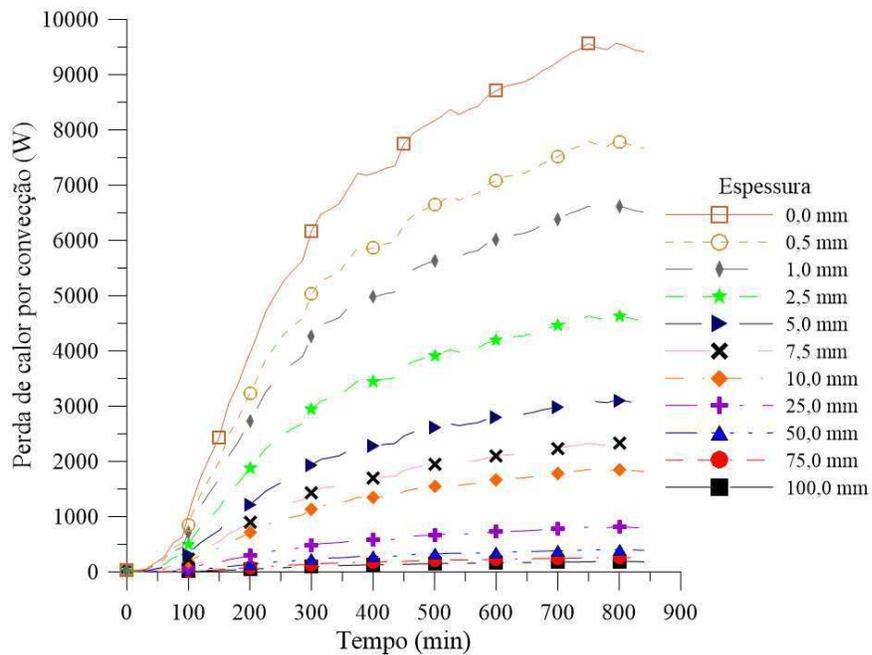
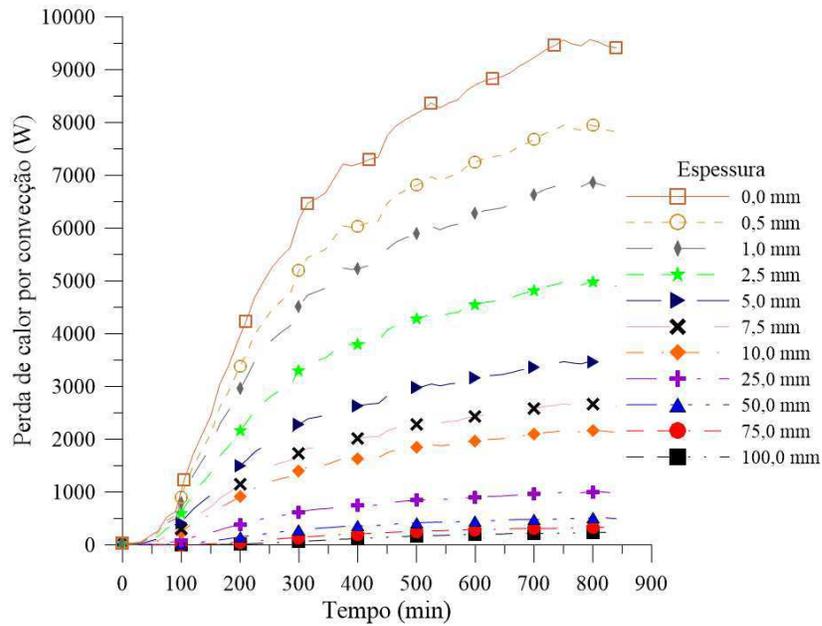


Figura 4.30 - Fluxo de calor perdido por convecção durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



Já nas Figuras 4.31-4.34 estão representadas as perdas de transferência de calor por radiação durante o processo de aquecimento, para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

Figura 4.31 - Fluxo de calor perdido por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

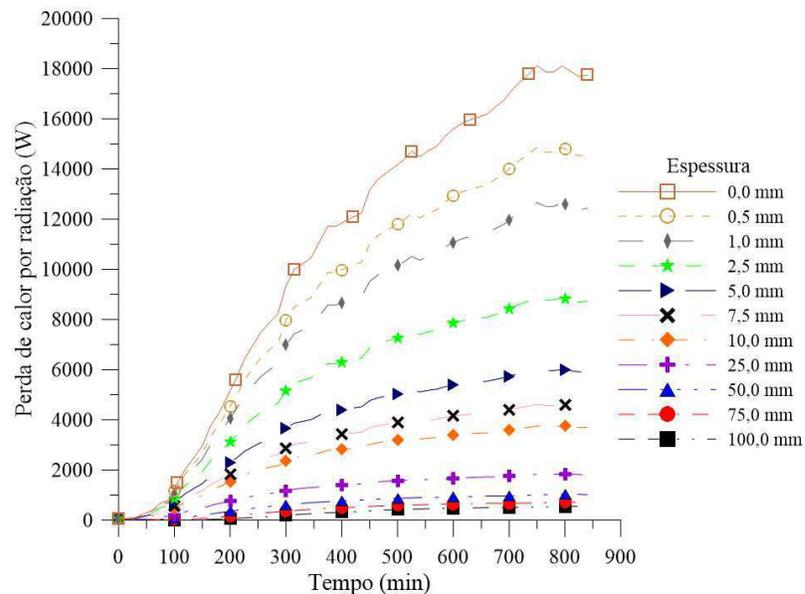


Figura 4.32 - Fluxo de calor perdido por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra vidro.

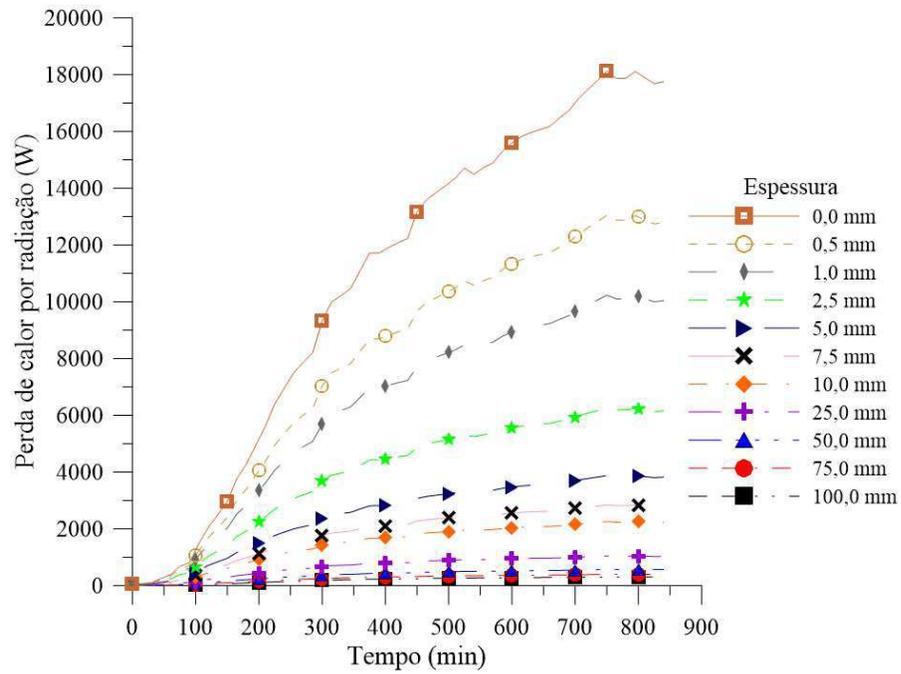


Figura 4.33 - Fluxo de calor perdido por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

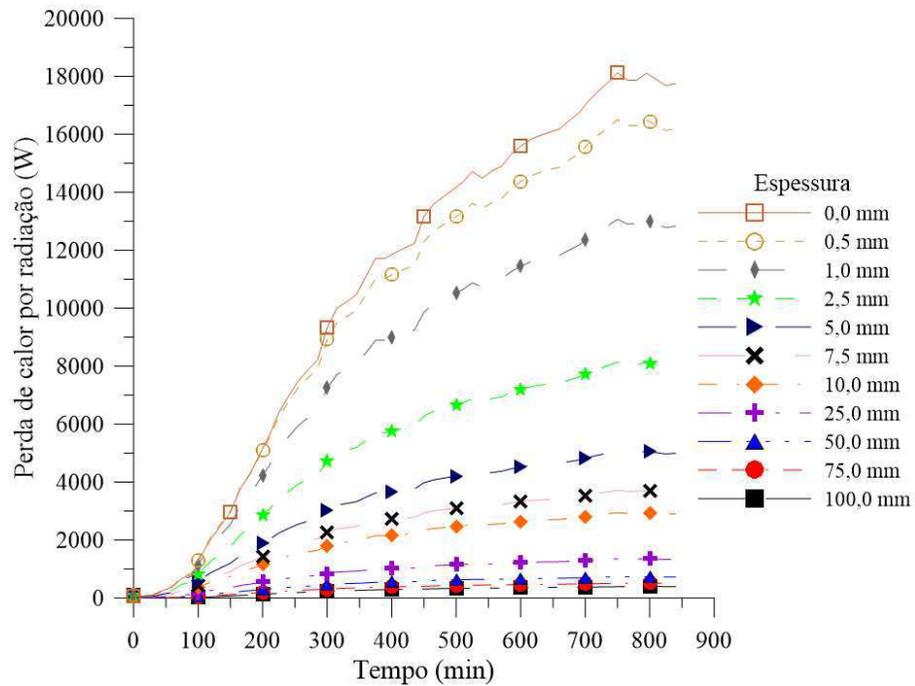
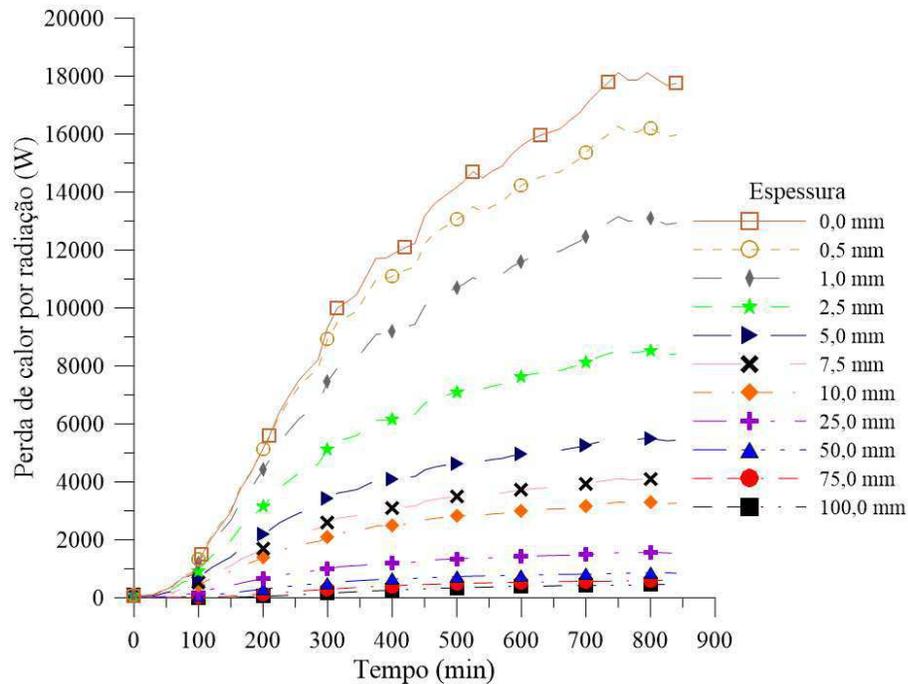


Figura 4.34 - Fluxo de calor perdido por radiação durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



Como era de se esperar, quanto maior a espessura de isolamento térmico nas paredes laterais do forno, menores são as perdas de calor por convecção e por radiação. Observa-se também que, para uma dada espessura de isolamento térmico, a perda de calor por radiação pelas paredes laterais é sempre maior que a perda de calor por convecção. Isso acontece porque o coeficiente de transferência de calor por radiação é maior que o coeficiente de transferência de calor por convecção ao longo de todo o processo de aquecimento do forno.

As Figuras 4.35-4.38 ilustram a taxa com que a energia é acumulada no isolamento durante o processo de aquecimento, para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

Pela análise destas figuras observa-se que, quanto maior é a espessura do isolamento, maior é a taxa com que a energia é acumulada no mesmo. Para uma mesma espessura de isolamento térmico em um dado instante de tempo, observa-se que a taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico é maior quando se utiliza fibra cerâmica. Isso acontece porque tanto a massa específica quanto o calor específico da fibra cerâmica são superiores as apresentadas pelos materiais isolantes analisados (Tabela 3.2), fazendo com que o mesmo tenha uma maior capacidade de absorver calor.

Figura 4.35 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

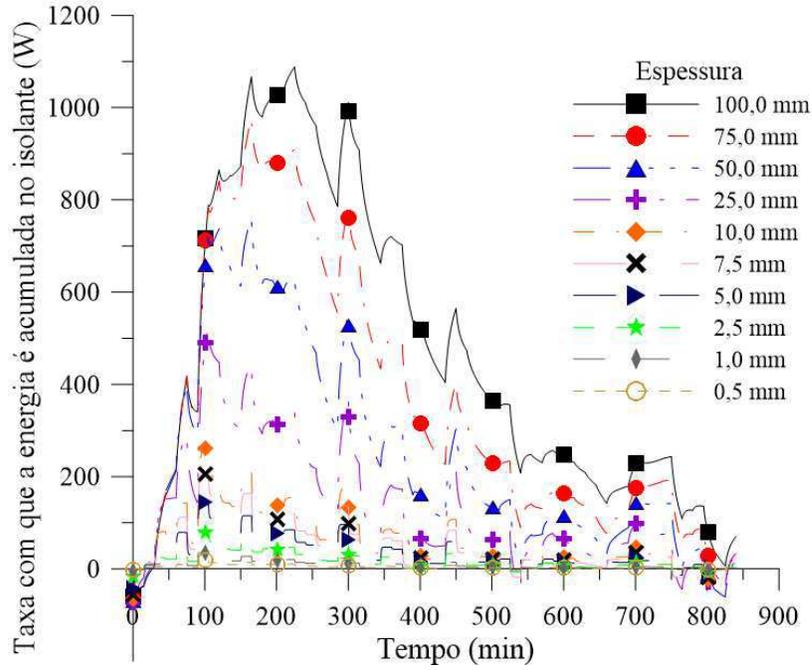


Figura 4.36 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

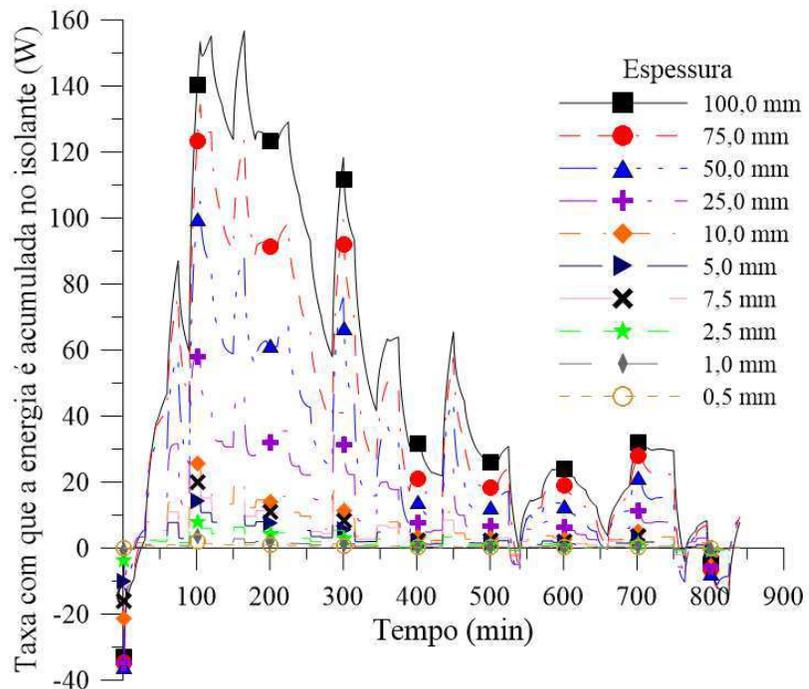


Figura 4.37 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

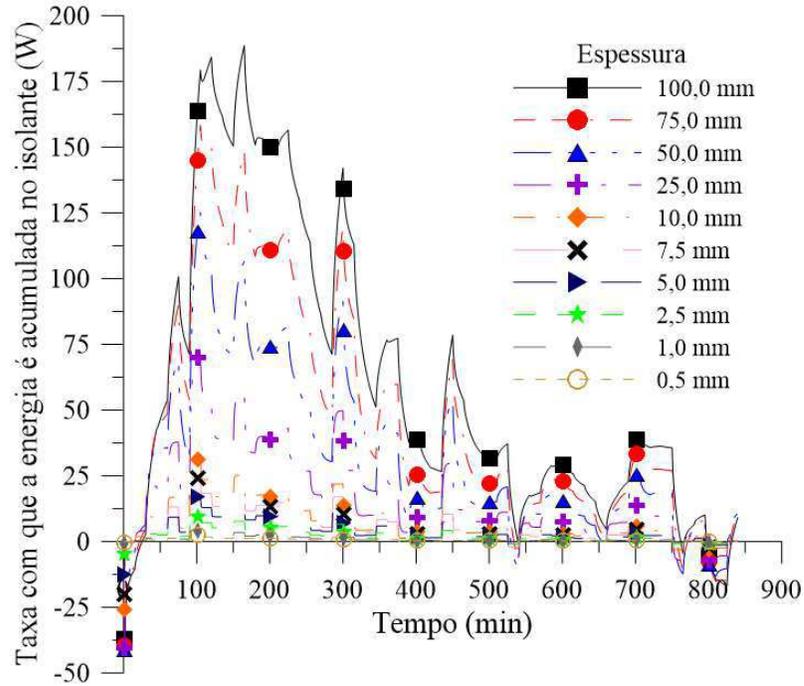
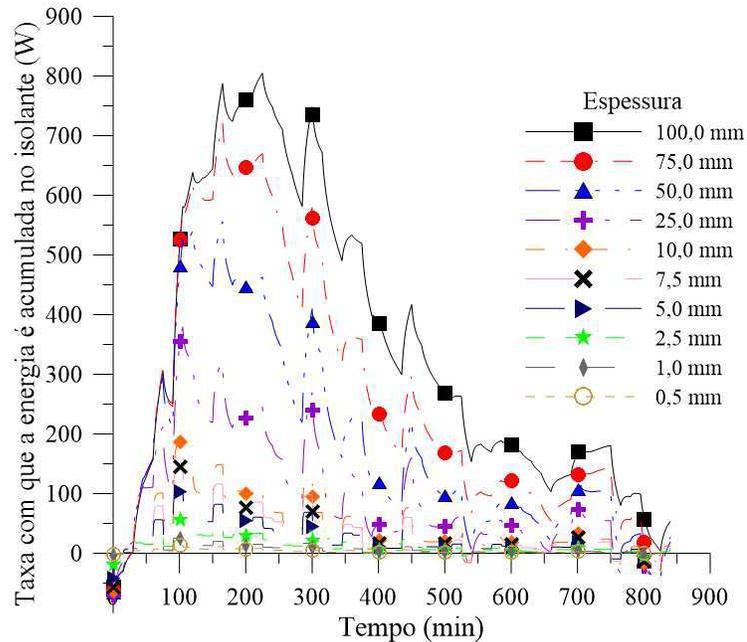


Figura 4.38 - Taxa com que a energia é acumulada no isolamento térmico durante o processo de aquecimento para diversas espessuras silicato de cálcio.



As Figuras 4.39-4.42 ilustram o fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento, para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

Figura 4.39 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

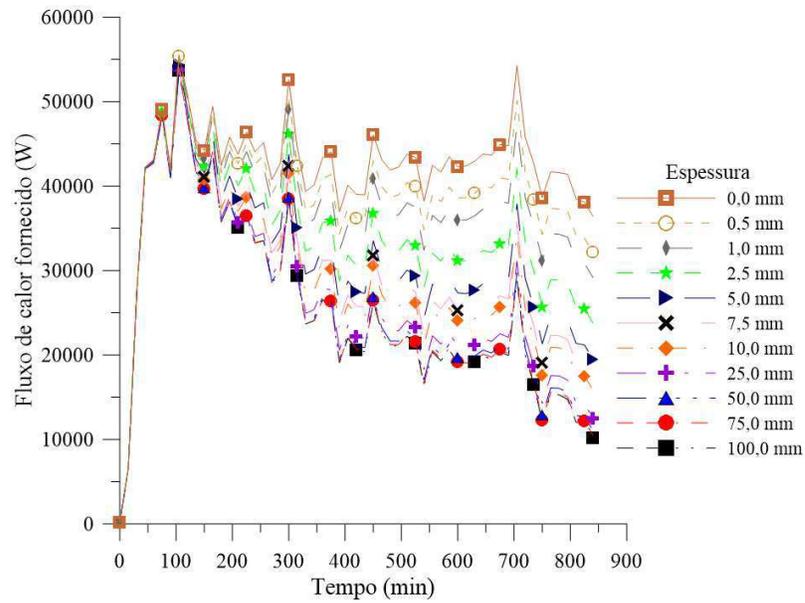


Figura 4.40 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

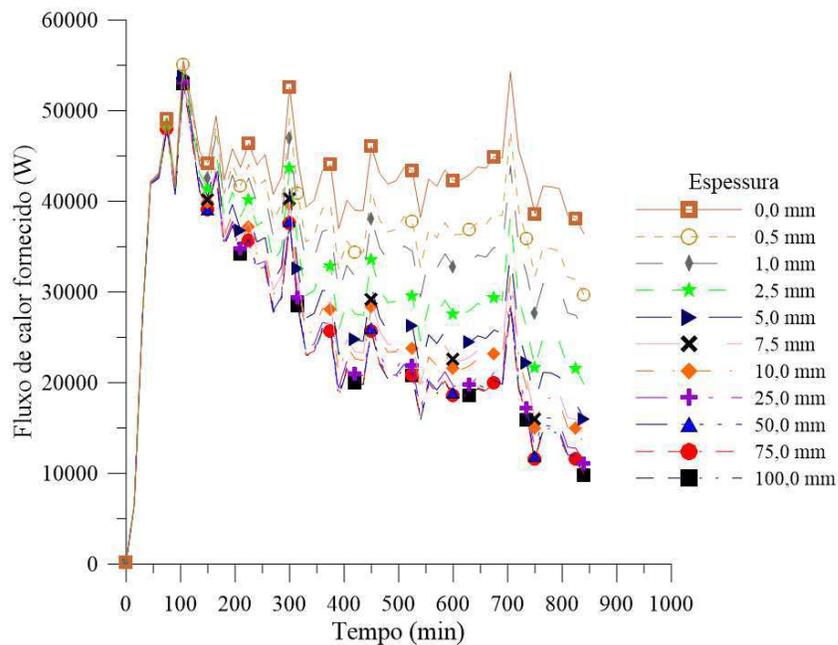


Figura 4.41 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

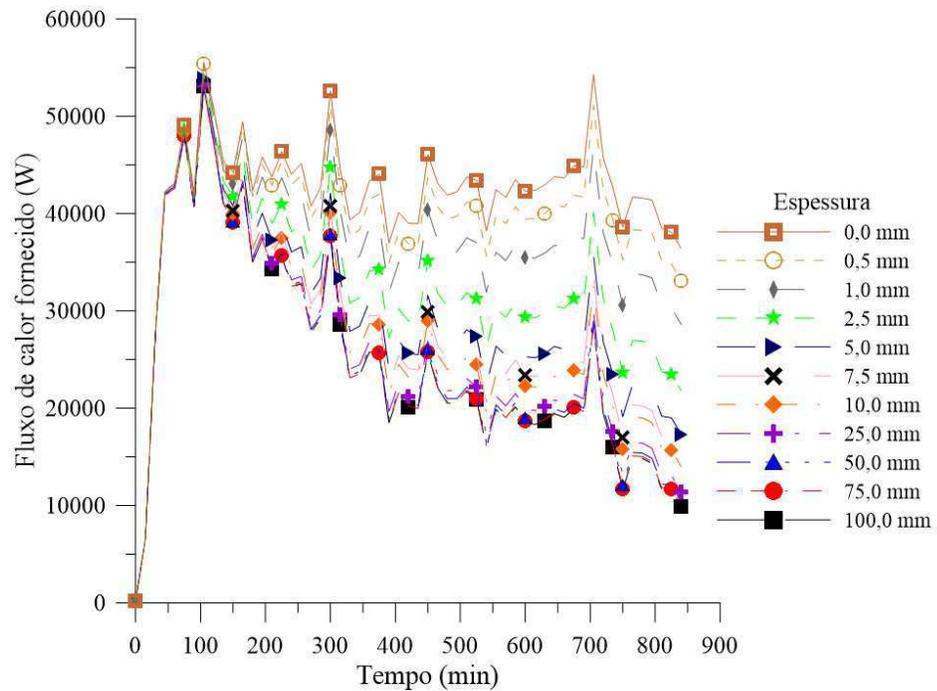
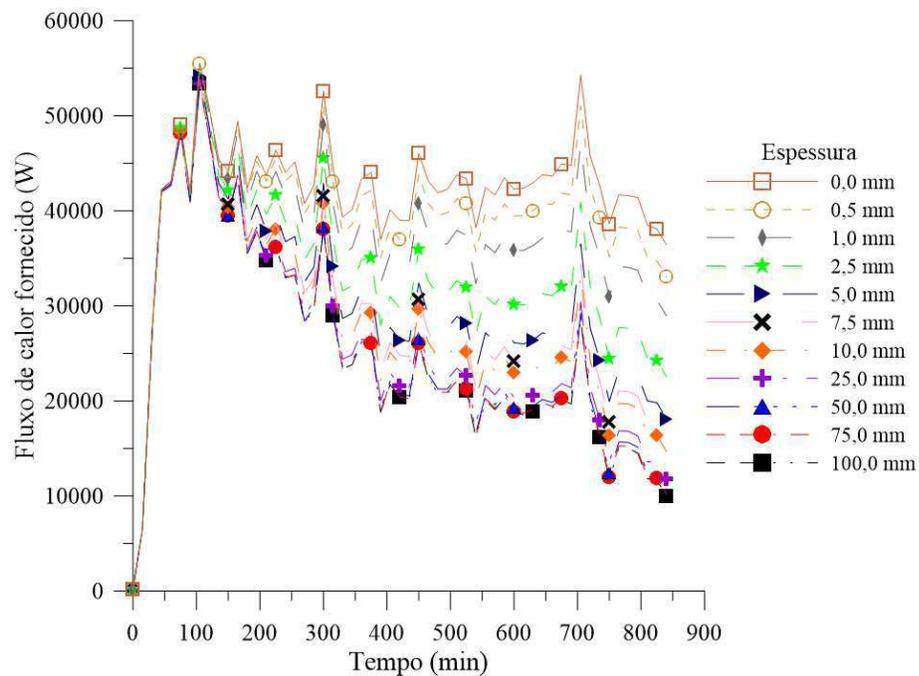


Figura 4.42 - Fluxo de calor fornecido para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



Pela análise destas figuras, é possível observar que até aproximadamente 100 minutos, as taxas de transferência de calor fornecidas para o forno são bem próximas. A partir desse instante, o fluxo de calor fornecido para o forno é fortemente influenciado pelo tipo e espessura do isolamento térmico. Quanto maior a espessura do isolamento térmico, menores são as taxas de energia que devem ser fornecidas para o forno de modo a manter uma mesma curva de queima durante a etapa de aquecimento.

Nas Figuras 4.43-4.46 estão evidenciadas as energias fornecidas acumulada para o forno durante o processo de aquecimento, para diversas espessuras de fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio, respectivamente.

Tais curvas são obtidas integrando as curvas dos fluxos de calor fornecido (Figuras 4.39-4.42) para cada tipo e espessura de isolamento térmico, durante todo o processo de aquecimento. Fica evidente que, quanto maior a espessura do isolamento térmico, menor é a energia que deve ser fornecida para o forno durante a etapa de aquecimento.

Figura 4.43 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra cerâmica.

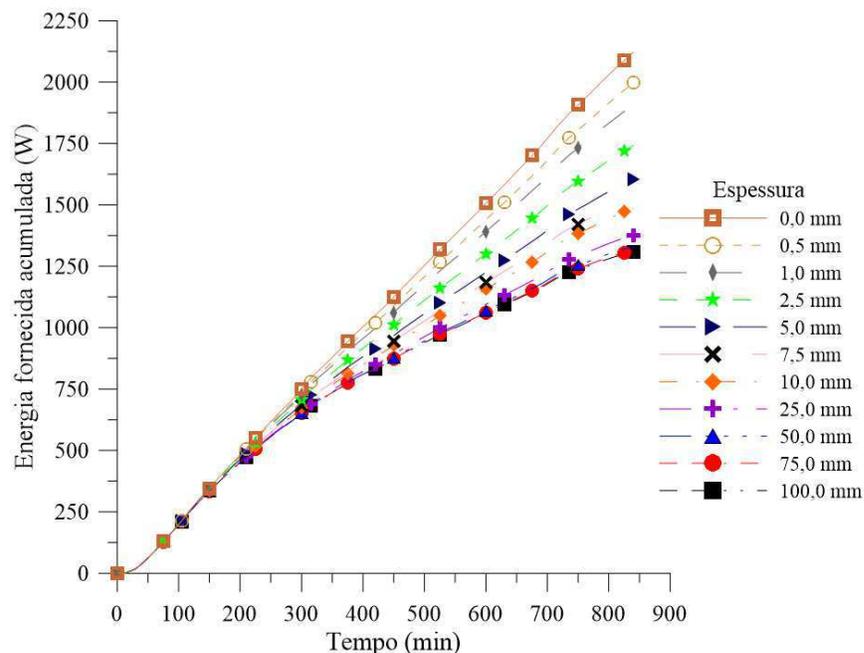


Figura 4.44 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de fibra de vidro.

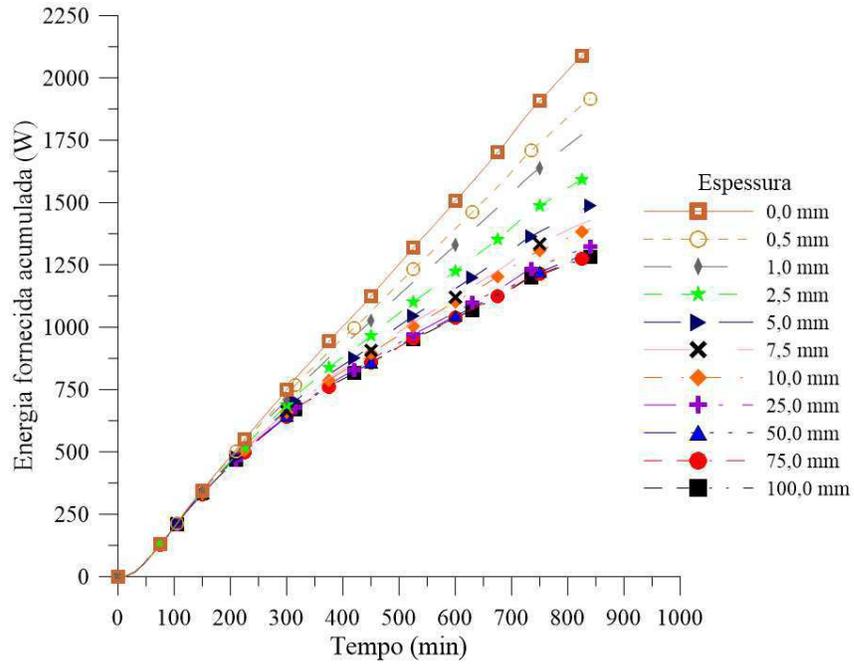


Figura 4.45 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de lã de rocha.

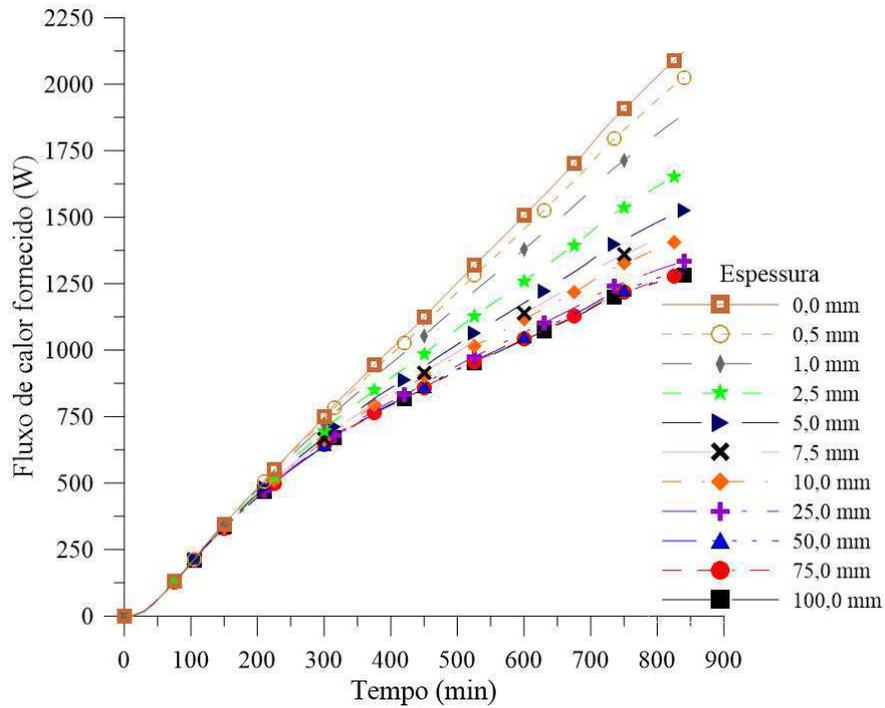
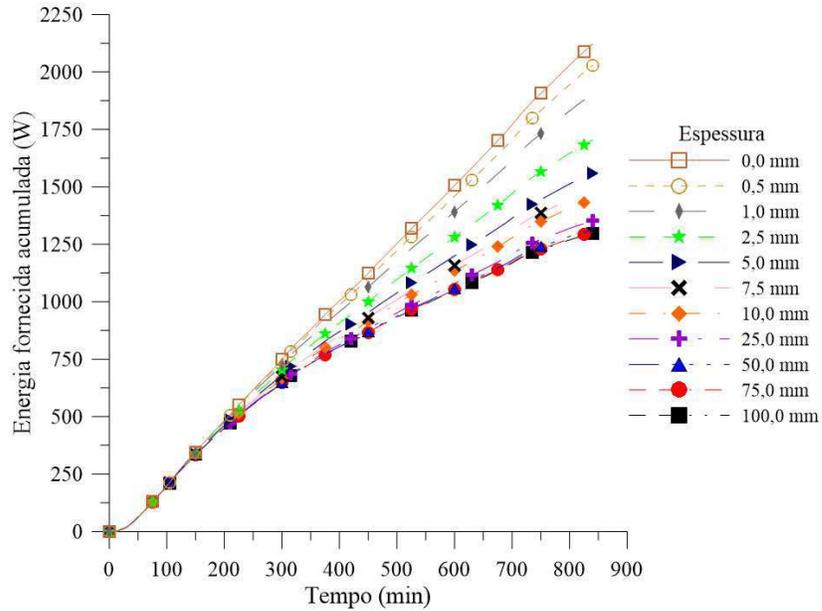


Figura 4.46 - Energia fornecida acumulada para o forno durante o processo de aquecimento para diversas espessuras de silicato de cálcio.



A Figura 4.47 ilustra a influência do tipo e espessura do isolamento térmico na energia fornecida total durante a etapa de aquecimento do forno. A partir deste resultado e utilizando a Equação 3.57, foi possível calcular o ganho energético em função do tipo e espessura do isolamento térmico, como indicado na Figura 4.48.

Figura 4.47 - Energia fornecida total em função da espessura do isolamento térmico.

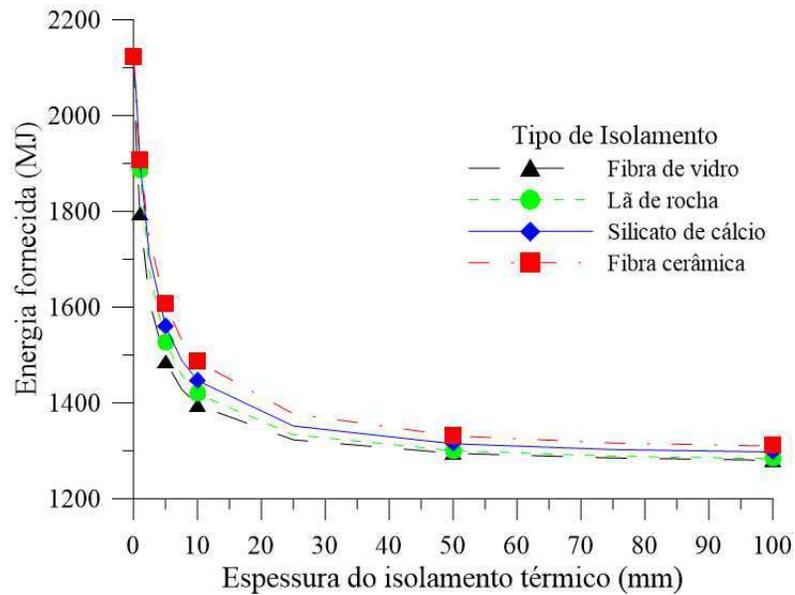
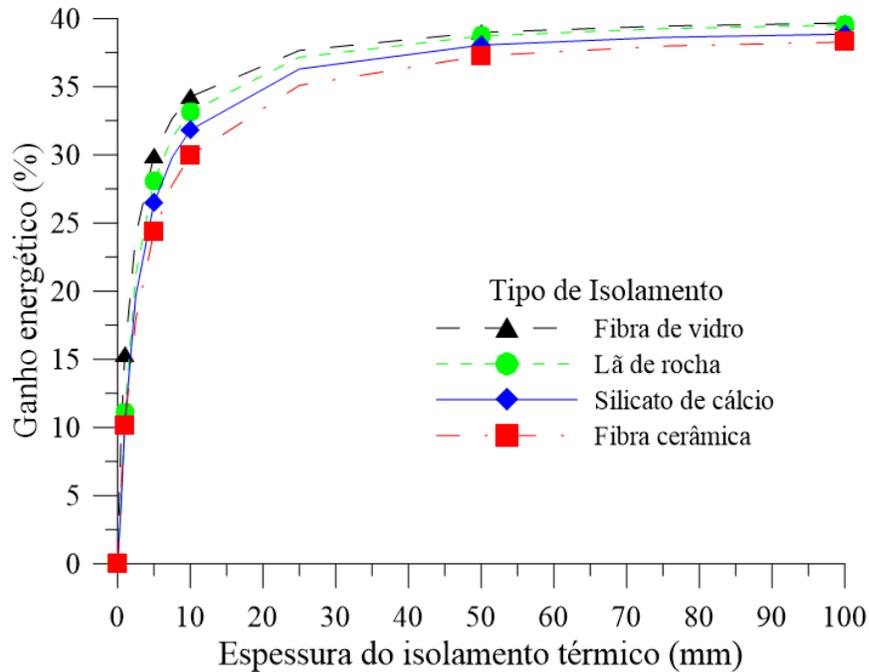


Figura 4.48 - Ganho energético em função da espessura do isolamento térmico.



Uma série de observações podem ser feitas a partir da análise das Figuras 4.47 e 4.48, como segue:

- Quanto maior a espessura do isolamento térmico, menor a energia que deve ser fornecida durante o processo de aquecimento do forno e, conseqüentemente, maior é o ganho energético. É importante ressaltar que a partir de um dado valor de espessura, o ganho energético cresce de forma insignificante com o aumento da espessura do isolamento térmico.
- A fibra de vidro é o isolante que proporciona um maior ganho energético para qualquer espessura analisada, seguido da lã de rocha, silicato de cálcio e por último da fibra cerâmica.
- Enquanto que 5,0 mm de fibra de vidro é suficiente para proporcionar um ganho energético de aproximadamente 29,9%, a mesma espessura para lã de rocha, silicato de cálcio e fibra cerâmica proporcionam, respectivamente, ganhos energéticos de 28,0%, 26,5% e 24,3%.
- Para baixas espessuras de isolamento, maior é a influência do tipo de isolante no ganho energético, enquanto que, para elevadas espessuras o ganho energético pouco é influenciado pelo tipo de isolante térmico escolhido. Para uma espessura de 2,5 mm, o

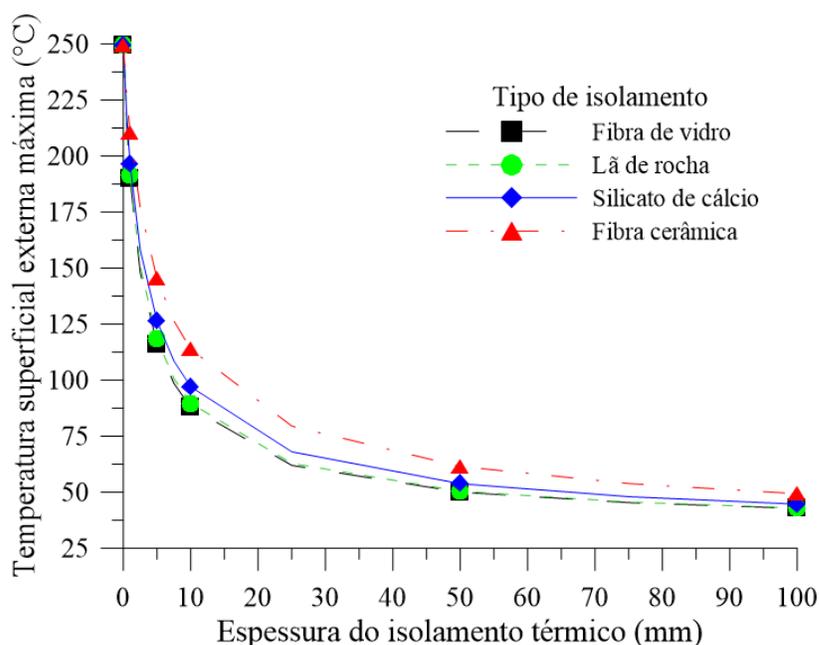
intervalo de variação do ganho energético é de 17,9% (fibra cerâmica) a 24,1% (fibra de vidro), ou seja, uma variação de 6,2%. Já para uma espessura de 100 mm, o intervalo de variação do ganho energético é de 38,3% (fibra cerâmica) a 39,7%, ou seja, uma variação de 1,4%.

- e) Os resultados aqui apresentados indicam que, quanto menor for a condutividade térmica (k) do material, maior será o ganho energético, como era de se esperar. A utilização de um isolante térmico com menor condutividade térmica implica em uma menor perda de calor e, conseqüentemente, uma menor energia deve ser fornecida para o forno, resultando em um maior ganho energético.

A Figura 4.49 ilustra a influência do tipo e espessura do isolamento térmico na temperatura superficial externa máxima obtida durante o processo de aquecimento do forno. Uma série de observações podem ser feitas a partir da análise dessa figura, como segue:

- a) Quanto maior a espessura do isolamento térmico, menor é a temperatura superficial externa máxima do forno.
- b) A fibra de vidro é o material isolante que proporciona uma maior redução na temperatura superficial externa máxima para qualquer espessura analisada, seguido da lã de rocha, silicato de cálcio e por último da fibra cerâmica.
- c) Enquanto que 2,5 mm de fibra de vidro é suficiente para reduzir a temperatura superficial externa máxima do forno de 249,3°C (sem isolamento térmico) para 148,1°C, os mesmos 2,5 mm de lã de rocha, silicato de cálcio e fibra cerâmica reduzem a temperatura superficial externa máxima para 150,9°C, 158,2°C e 176,8°C, respectivamente.
- d) Para espessuras acima de 5,0 mm, constata-se que, quanto maior a espessura do isolamento térmico, menor é a influência do tipo de isolamento térmico na temperatura superficial externa máxima. Para uma espessura de 5,0 mm, o intervalo de variação da temperatura superficial externa máxima é de 115,7°C (fibra de vidro) a 145,2°C (fibra cerâmica), ou seja, uma variação de 29,5°C. Já para uma espessura de 100 mm, o intervalo de variação da temperatura superficial externa máxima é de 42,8°C a 49,3°C, ou seja, uma variação de 6,5°C.
- e) Os resultados obtidos indicam que, quanto menor for a condutividade térmica (k) do material, menor é a temperatura superficial externa máxima.

Figura 4.49 - Temperatura superficial externa máxima em função da espessura do isolamento térmico.



4.3 Planejamento experimental

É importante ressaltar que, além da espessura (L_{iso}) e condutividade térmica (k) do isolamento térmico, as outras propriedades do material, tais como massa específica (ρ), calor específico (c_p) e emissividade (ϵ) também influenciam na perda de calor para o meio externo e no calor que fica armazenado no isolamento. Para avaliar a influência de cada uma dessas variáveis e de suas interações nas energias perdidas por convecção (Q_{conv}) e por radiação (Q_{rad}) ao longo do processo de aquecimento, na energia acumulada no isolamento térmico (Q_{acu}) durante a etapa de aquecimento, na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$) e no ganho energético, foi proposto um planejamento experimental e os resultados são apresentados a seguir.

Na Tabela 4.4 estão representados os valores das variáveis de entrada e de resposta para cada um dos experimentos do planejamento fatorial proposto.

Da análise desta tabela, nota-se que os experimentos 1, 10 e 6 apresentam os melhores resultados para o ganho energético e para redução na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$), enquanto que os experimentos 12 e 15 pouco influenciam no ganho energético e na

redução da temperatura superficial externa ($T_{s2,ext}$), quando comparados com o forno sem isolamento térmico.

Tabela 4.4 - Matriz de planejamento e resultados obtidos.

Exp	Variáveis Independentes					Variáveis – Resposta				
	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	c_p (J/kgK)	ϵ (-)	L_{iso} (mm)	Q_{conv} (MJ)	Q_{rad} (MJ)	Q_{acu} (MJ)	$T_{s2,ext,max}$ (°C)	Ganho Energético (%)
1	15	0,015	800	0,04	25	23,63	1,76	0,25	59,43	39,31
2	400	0,015	800	0,04	1	205,23	15,74	0,39	181,35	30,09
3	15	0,1	800	0,04	1	293,11	25,63	0,02	234,45	25,50
4	400	0,1	800	0,04	25	105,05	7,20	8,08	119,04	34,85
5	15	0,015	2300	0,04	1	205,28	15,74	0,04	181,36	30,10
6	400	0,015	2300	0,04	25	18,00	1,38	18,44	58,61	38,74
7	15	0,1	2300	0,04	25	106,80	7,32	0,87	119,26	35,10
8	400	0,1	2300	0,04	1	293,07	25,62	1,27	234,44	25,44
9	15	0,015	800	0,96	1	136,02	229,21	0,01	137,31	23,31
10	400	0,015	800	0,96	25	8,12	17,27	6,16	45,65	39,04
11	15	0,1	800	0,96	25	55,55	91,06	0,27	84,21	33,60
12	400	0,1	800	0,96	1	258,20	512,52	0,42	212,11	4,18
13	15	0,015	2300	0,96	25	8,76	18,49	0,67	45,77	39,21
14	400	0,015	2300	0,96	1	135,94	229,07	0,98	137,29	23,27
15	15	0,1	2300	0,96	1	258,21	512,54	0,05	212,12	4,20
16	400	0,1	2300	0,96	25	53,11	87,30	20,60	84,11	32,94
17	207,5	0,0575	1550	0,5	13	78,17	66,20	3,97	100,27	33,53

Os experimentos 1, 10 e 6 apresentam nível inferior para a variável de entrada condutividade térmica (k) e nível superior para a variável de entrada espessura do isolamento térmico (L_{iso}). Já os experimentos 12 e 15 apresentam nível superior para a variável de entrada condutividade térmica (k) e nível inferior para a variável de entrada espessura do isolamento térmico. Isso é mais um indicativo de que essas são as duas variáveis de entrada que mais influenciam no ganho energético e na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext}$).

A partir destes resultados, realizou-se uma análise estatística de variância utilizando-se o programa *STATISTICA*® 7. Com isso, foi possível calcular os níveis de significância “ α ” de cada uma das variáveis de entrada e suas respectivas interações em cada uma das variáveis de resposta. Níveis de significância menores que 0,05, foram considerados estatisticamente significativos. Na

Tabela 4.5 estão listados os níveis de significância dos fatores sobre as variáveis de resposta, os fatores considerados estatisticamente significativos são indicados com os valores em negrito e sublinhados. Desta forma, considerando os efeitos dos níveis em destaque, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que este fator de controle esteja influenciando na variável de resposta analisada.

Os níveis de significância representam a probabilidade de erro em se aceitar que determinado fator tem influência sobre a resposta estudada (GRASSI, 2014). Como exemplo, para o efeito da condutividade térmica (k) no ganho energético, esta probabilidade é de 0,0497%. Assim, como o valor do fator acima é menor que o valor pré-definido de 5%, o resultado é considerado estatisticamente significativo (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

Tabela 4.5 - Níveis de significância dos fatores sobre as variáveis de resposta.

Fatores	Níveis de significância (α) desconsiderando alguns fatores de interação				
	Q_{conv}	Q_{rad}	Q_{acu}	$T_{s2,ext,max}$	Ganho Energético
Média	<u>0,000004</u>	<u>0,000003</u>	<u>0,000002</u>	<u>0,000000</u>	<u>0,000000</u>
ρ	0,918661	0,946526	<u>0,000004</u>	0,983201	0,841467
k	<u>0,000991</u>	<u>0,000250</u>	0,126327	<u>0,000588</u>	<u>0,000497</u>
c_p	0,956012	0,972214	<u>0,000117</u>	0,992250	0,921176
ε	<u>0,019407</u>	<u>0,000006</u>	0,943183	<u>0,011406</u>	<u>0,000884</u>
L_{iso}	<u>0,000031</u>	<u>0,000014</u>	<u>0,000005</u>	<u>0,000020</u>	<u>0,000023</u>
$\rho \times c_p$	0,197551	<u>0,003509</u>	<u>0,000174</u>	0,199895	<u>0,029739</u>
$\rho \times L_{iso}$	0,921397	0,949657	<u>0,000007</u>	0,984279	0,862806
$k \times \varepsilon$	0,926133	<u>0,000379</u>	<u>0,000305</u>	0,999353	<u>0,011796</u>
$k \times L_{iso}$	0,171463	<u>0,002954</u>	0,176286	0,364296	<u>0,021838</u>
$c_p \times L_{iso}$	0,957002	0,974423	<u>0,000205</u>	0,992621	0,932243
$\varepsilon \times L_{iso}$	0,454090	<u>0,000024</u>	0,903047	0,565440	<u>0,001495</u>

A Tabela 4.6 resume os coeficientes estatisticamente significativos para cada variável de resposta, ou seja, os coeficientes dos fatores em que os níveis de significância (α) são menores que 0,05.

Com isso, os modelos matemáticos empíricos para as variáveis de resposta, codificados com os seus respectivos parâmetros estatísticos (Tabela 3.5), são apresentados nas Equações 4.1 a 4.5. Foram considerados somente os valores dos coeficientes estatisticamente significativos para um nível de significância (α) de 0,05.

Tabela 4.6 - Coeficientes estatisticamente significativos para cada variável de resposta.

Fatores	Coeficientes estatisticamente significativos ($\alpha < 0,05$)				
	Q_{conv}	Q_{rad}	Q_{acu}	$T_{s2,ext,max}$	Ganho Energético
Média	131,898	109,650	3,676	132,164	28,965
ρ	-	-	3,386	-	-
k	42,633	46,283	-	28,311	-4,204
c_p	-	-	1,709	-	-
ε	-21,016	99,817	-	-14,335	-3,713
L_{iso}	-87,879	-83,394	3,261	-57,148	7,919
$\rho \times c_p$	-	-25,987	1,573	-	1,584
$\rho \times L_{iso}$	-	-	3,018	-	-
$k \times \varepsilon$	-	42,390	1,400	-	-2,035
$k \times L_{iso}$	-	-27,036	-	-	1,729
$c_p \times L_{iso}$	-	-	1,521	-	-
$\varepsilon \times L_{iso}$	-	-75,258	-	-	3,309

$$Q_{conv}(MJ) = 131,898 + 42,633k - 21,016\varepsilon - 87,879L_{iso} \quad (4.1)$$

$$Q_{rad}(MJ) = 109,650 + 46,283k + 99,817\varepsilon - 83,394L_{iso} - 25,987\rho \cdot c_p + 42,390k \cdot \varepsilon - 27,036k \cdot L_{iso} - 75,258\varepsilon \cdot L_{iso} \quad (4.2)$$

$$Q_{acu}(MJ) = 3,676 + 3,386\rho + 1,709c_p + 3,261L_{iso} + 1,573\rho \cdot c_p + 3,018\rho \cdot L_{iso} + 1,400k \cdot \varepsilon + 1,521c_p \cdot L_{iso} \quad (4.3)$$

$$T_{s2,ext,max}(^{\circ}C) = 132,164 + 28,311k - 14,335\varepsilon - 57,148L_{iso} \quad (4.4)$$

$$GE(\%) = 28,965 - 4,204k - 3,713\varepsilon + 7,919L_{iso} + 1,584\rho \cdot c_p - 2,035k \cdot \varepsilon + 1,729k \cdot L_{iso} + 3,309\varepsilon \cdot L_{iso} \quad (4.5)$$

A partir dos modelos matemáticos apresentados anteriormente, é possível quantificar os efeitos principais e de interação das variáveis de entrada em cada uma das variáveis de resposta. Desta forma, torna-se possível prever o comportamento da variável de resposta conhecendo-se a espessura e as propriedades termofísicas do isolamento térmico.

Quanto maior for o valor do coeficiente de um determinado fator, maior é a sua contribuição para a variável de resposta. Observa-se que a espessura do isolamento térmico (L_{iso}) apresenta os maiores coeficientes para a maioria das variáveis de resposta (Q_{conv} , $T_{s2,ext,max}$, ganho energético), sendo superado pela emissividade (ε) no ganho de energia por radiação (Q_{rad}) e pela massa específica (ρ) na energia acumulada no isolamento térmico (Q_{acu}).

O sinal do coeficiente indica se o aumento de um dado fator (principal ou de interação) tende a aumentar (positivo) ou diminuir (negativo) o valor da variável de resposta. Para a variável espessura do isolamento térmico (L_{iso}), os sinais dos coeficientes indicam que o aumento de L_{iso} implica em um aumento nas variáveis de resposta Q_{acu} e ganho energético e uma redução nas variáveis de resposta Q_{conv} , Q_{rad} e $T_{s2,ext,max}$.

Observa-se que, após a espessura do isolamento térmico (L_{iso}), a condutividade térmica (k) é a variável que mais influencia no processo (maiores coeficientes). A sua redução implica em redução na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$) e nas perdas de energia por convecção (Q_{conv}) e por radiação (Q_{rad}) bem como um aumento no ganho energético. Observa-se que o efeito principal da condutividade térmica (k) não influencia na energia acumulada no isolamento térmico (Q_{acu}), porém o fator de interação $k \times \varepsilon$ tem certa contribuição na variável de resposta em questão.

As variáveis massa específica (ρ) e calor específico (c_p) do material isolante são as que menos influenciam nas variáveis de resposta, com exceção da energia acumulada no isolamento térmico

(Q_{acu}), em que os efeitos ρ , c_p e a interação $\rho \times c_p$ são estatisticamente significativos. Tal resultado é coerente fisicamente pois, quanto maior for os valores de ρ e c_p , maior é a capacidade do material de absorver energia na forma de calor.

Como mencionado anteriormente, para utilização dos modelos matemáticos apresentados anteriormente, deve-se utilizar os valores codificados para as variáveis de entrada, conforme Tabela 3.5, ou seja, os seus valores podem variar de -1 a +1. Caso se deseje estimar, por exemplo, o ganho energético proporcionado por um isolamento térmico com $L_{iso} = 25$ mm, $\rho = 207,5$ kg/m³, $k = 0,0235$ W/mk $c_p = 800$ J/kgK, $\varepsilon = 0,73$, utiliza-se a Equação 4.5 com os níveis codificados, como segue:

$$GE (\%) = 28,965 - 4,204 \cdot (-0,8) - 3,713 \cdot (0,5) + 7,919 \cdot (+1) + 1,584 \cdot (0) \cdot (-1) - 2,035 \cdot (-0,8) \cdot (0,5) + 1,729 \cdot (-0,8) \cdot (1) + 3,309 \cdot (0,5) \cdot (1) = 39,48 \quad (4.6)$$

Para as variáveis L_{iso} , ρ e c_p , os valores codificados são extraídos de forma direta da Tabela 3.5, de tal forma que os valores codificados são +1, 0 e -1, respectivamente. Já para as variáveis k e ε , foram feitas interpolações lineares, obtendo-se os valores codificados de -0,8 e 0,5, respectivamente.

Os principais resultados da análise de variância (ANOVA) para as variáveis de resposta Q_{conv} , Q_{rad} , Q_{acu} , $T_{s2,ext,max}$ e ganho energético estão resumidos nas Tabelas 4.7-4.11. Tais resultados são úteis para avaliar o coeficiente de correlação (R^2), a significância estatística e o ajuste dos modelos matemáticos obtidos a partir da metodologia de planejamento experimental.

A partir da análise das Tabelas 4.7-4.11, constata-se que todos os modelos apresentam coeficientes de correlação (R^2) muito satisfatórios e regressões estatisticamente significativas tendo em vista que o $F_{calculado} > F_{tabelado}$ ao nível de 95% de confiança. Além disto, os modelos também estão bem ajustados, visto que $F_{calculado} < F_{tabelado}$ para a falta de ajuste de todas as variáveis de resposta. É importante ressaltar que os valores de $F_{tabelado}$ para a regressão foram determinados utilizando os valores dos graus de liberdade de regressão e do resíduo, enquanto que os valores de $F_{tabelado}$ para a falta de ajuste foram determinados utilizando os valores dos graus de liberdade da falta de ajuste e do resíduo, conforme Rodrigues e Iemma (2009).

Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Q_{conv} .

Variável de Resposta: Perda de Energia por Convecção (MJ)					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (S.Q)	Graus de Liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	F_{Calculado} (QM/QM_{Res})	F_{Tabelado}
Efeito de k	29080,58	1	29080,58	58,93	3,41
Efeito de ε	7066,61	1	7066,61	14,32	3,41
Efeito de L_{iso}	123563,68	1	123563,68	250,38	3,41
Regressão	159710,87	3	53236,96	107,88	3,41
Resíduo	6415,51	13	493,50	1,00	3,41
Falta de Ajuste	6396,08	13	492,01	1,00	3,41
Erro Puro	19,43	0	-	-	-
Total	166126,38	16	-	-	-
Coefficiente de Correlação (R^2)	96,14%		-	-	-

Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Q_{rad} .

Variável de Resposta: Perda de Energia por Radiação (MJ)					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (S.Q)	Graus de Liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	F_{Calculado} (QM/QM_{Res})	F_{Tabelado}
Efeito de k	34274,39	1	34274,39	153,18	3,29
Efeito de ε	159414,80	1	159414,80	712,45	3,29
Efeito de L_{iso}	111272,31	1	111272,31	497,29	3,29
Efeito de $\rho \times c_p$	10805,18	1	10805,18	48,29	3,29
Efeito de $k \times \varepsilon$	28750,01	1	28750,01	128,49	3,29
Efeito de $k \times L_{iso}$	11695,07	1	11695,07	52,27	3,29
Efeito de $\varepsilon \times L_{iso}$	90621,32	1	90621,32	405,00	3,29
Regressão	446833,09	7	63833,30	285,28	3,29
Resíduo	2013,80	9	223,76	1,00	3,29
Falta de Ajuste	2002,91	9	222,55	0,99	3,29
Erro Puro	10,88	0	-	-	-
Total	448846,89	16	-	-	-
Coefficiente de Correlação (R^2)	99,55%		-	-	-

Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Q_{acu} .

Variável de Resposta: Energia Acumulada no Isolamento Térmico (MJ)					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (S.Q)	Graus de Liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	F_{Calculado} (QM/QM_{Res})	F_{Tabelado}
Efeito de ρ	183,39	1	183,39	380,65	3,29
Efeito de c_p	46,71	1	46,71	96,94	3,29
Efeito de L_{iso}	170,10	1	170,10	353,07	3,29
Efeito de $\rho \times c_p$	39,60	1	39,60	82,20	3,29
Efeito de $\rho \times L_{iso}$	145,75	1	145,75	302,53	3,29
Efeito de $k \times \varepsilon$	31,35	1	31,35	65,06	3,29
Efeito de $c_p \times L_{iso}$	37,00	1	37,00	76,79	3,29
Regressão	653,90	7	93,41	193,89	3,29
Resíduo	4,34	9	0,48	1,00	3,29
Falta de Ajuste	3,83	9	0,43	0,88	3,29
Erro Puro	0,51	0	-	-	-
Total	658,24	16	-	-	-
Coefficiente de Correlação (R^2)	99,34%		-	-	-

Tabela 4.10 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta $T_{s2,ext,max}$.

Variável de Resposta: Temperatura Superficial Externa Máxima ($^{\circ}C$)					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (S.Q)	Graus de Liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	F_{Calculado} (QM/QM_{Res})	F_{Tabelado}
Efeito de k	12824,06	1	12824,06	90,17	3,41
Efeito de ε	3288,04	1	3288,04	23,12	3,41
Efeito de L_{iso}	52253,79	1	52253,79	367,40	3,41
Regressão	68365,89	3	22788,63	160,23	3,41
Resíduo	1848,92	13	142,22	1,00	3,41
Falta de Ajuste	1838,49	13	141,42	0,99	3,41
Erro Puro	10,43	0	-	-	-
Total	70214,81	16	-	-	-
Coefficiente de Correlação (R^2)	97,37%		-	-	-

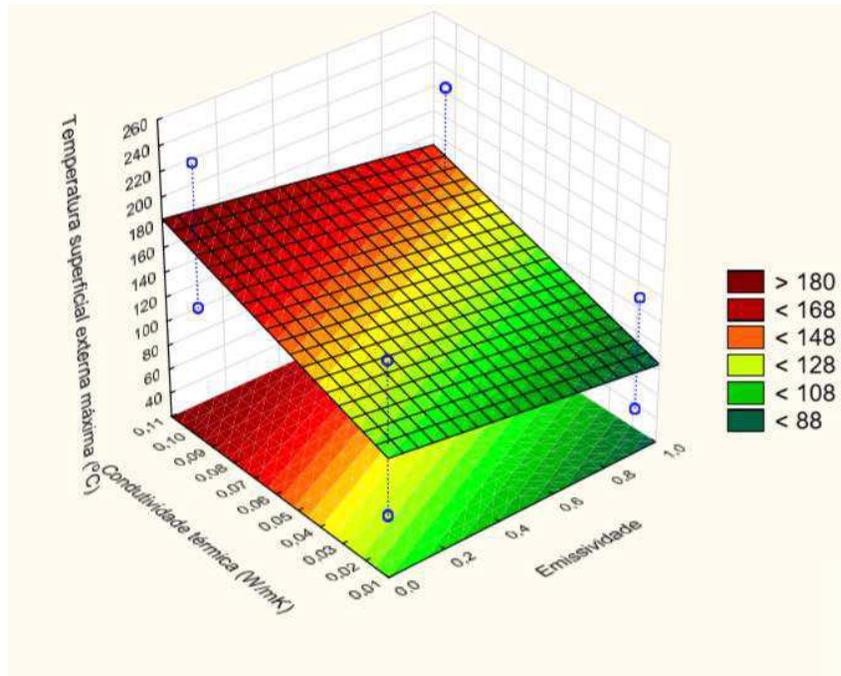
Tabela 4.11 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta Ganho Energético.

Variável de Resposta: Ganho Energético (%)					
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (S.Q)	Graus de Liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	F_{Calculado} (QM/QM_{Res})	F_{Tabelado}
Efeito de k	282,72	1	282,72	112,66	3,29
Efeito de ϵ	220,57	1	220,57	87,90	3,29
Efeito de L _{iso}	1003,30	1	1003,30	399,81	3,29
Efeito de $\rho \times c_p$	40,16	1	40,16	16,01	3,29
Efeito de k \times ϵ	66,27	1	66,27	26,41	3,29
Efeito de k \times L _{iso}	47,82	1	47,82	19,05	3,29
Efeito de $\epsilon \times$ L _{iso}	175,22	1	175,22	69,83	3,29
Regressão	1836,07	7	262,30	104,52	3,29
Resíduo	22,59	9	2,51	1,00	3,29
Falta de Ajuste	21,43	9	2,38	0,95	3,29
Erro Puro	1,15	0	-	-	-
Total	1858,66	16	-	-	-
Coefficiente de Correlação (R²)	98,78%		-	-	-

Como os modelos apresentados são bem ajustados, estatisticamente significativos e apresentam coeficientes de correlação (R²) muito satisfatórios, pode-se construir superfícies de resposta para analisar a influência das variáveis de entrada (duas a duas) nas variáveis de resposta.

A Figura 4.50 ilustra a superfície de resposta para a variável de resposta T_{s2,ext} em função das variáveis condutividade térmica (k) e emissividade (ϵ). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $\rho = 207,5 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1550 \text{ J/kgK}$ e L_{iso} = 13 mm. Pela análise desta figura, observa-se que a redução na condutividade térmica (k) e aumento na emissividade do isolamento térmico (ϵ) proporcionam redução na temperatura superficial externa máxima (T_{s2,ext,max}). Além disto, fica evidente que a condutividade térmica apresenta uma maior influência na variável de resposta, quando comparado com a emissividade do isolamento térmico.

Figura 4.50 - Influência da condutividade térmica e emissividade na temperatura superficial externa máxima.



Na Figura 4.51 está ilustrado a superfície de resposta para a variável de resposta $T_{s2,ext}$ em função das variáveis espessura do isolamento térmico (L_{iso}) e condutividade térmica (k). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $\rho = 207,5 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1550 \text{ J/kgK}$ e $\varepsilon = 0,5$. Pela análise desta figura, torna-se evidente que a redução na condutividade térmica (k) e aumento na espessura do isolamento térmico (L_{iso}) proporcionam reduções significativas na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$).

Na Figura 4.52 está ilustrado a superfície de resposta para a variável de resposta $T_{s2,ext,max}$ em função das variáveis emissividade (ε) e espessura do isolamento térmico (L_{iso}). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $\rho = 207,5 \text{ kg/m}^3$, $k = 0,0575 \text{ W/mK}$ e $c_p = 1550 \text{ J/kgK}$. Pela análise desta figura, observa-se que o aumento emissividade (ε) e na espessura do isolamento térmico (L_{iso}) proporcionam redução na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$). Além disto, fica evidente que a espessura do isolamento térmico apresenta uma maior influência na variável de resposta, quando comparado com a emissividade do isolamento térmico.

Figura 4.51 - Influência da espessura do isolamento e condutividade térmica na temperatura superficial externa máxima.

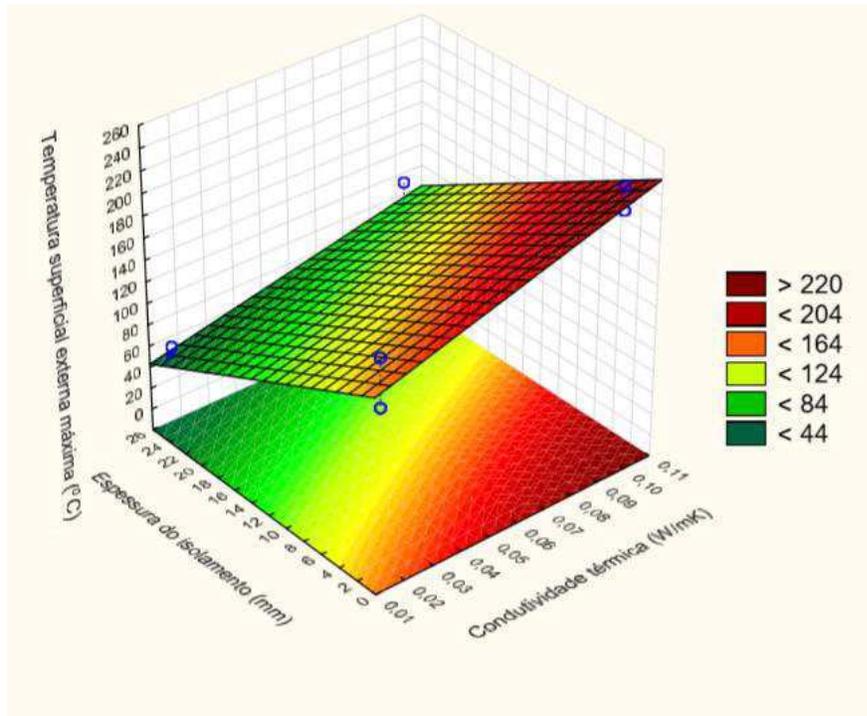
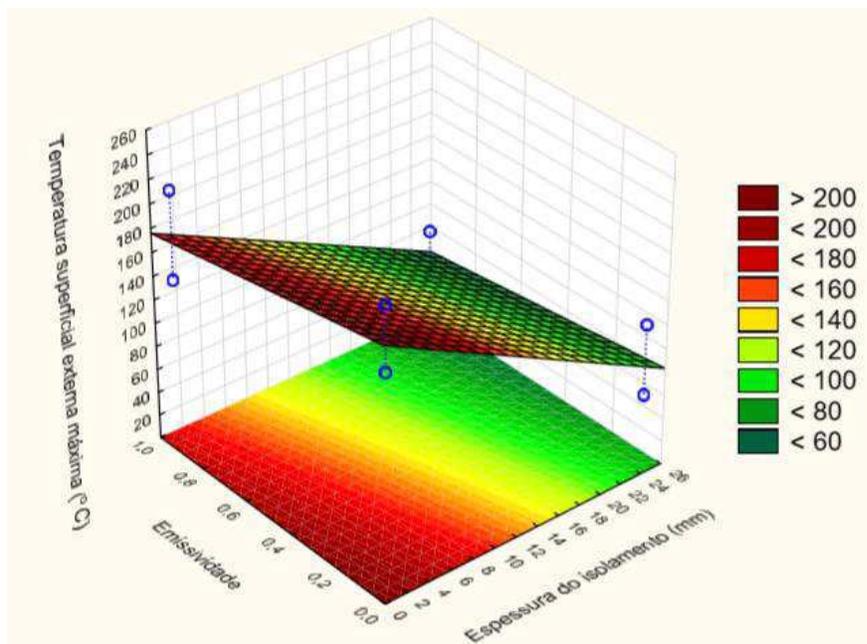
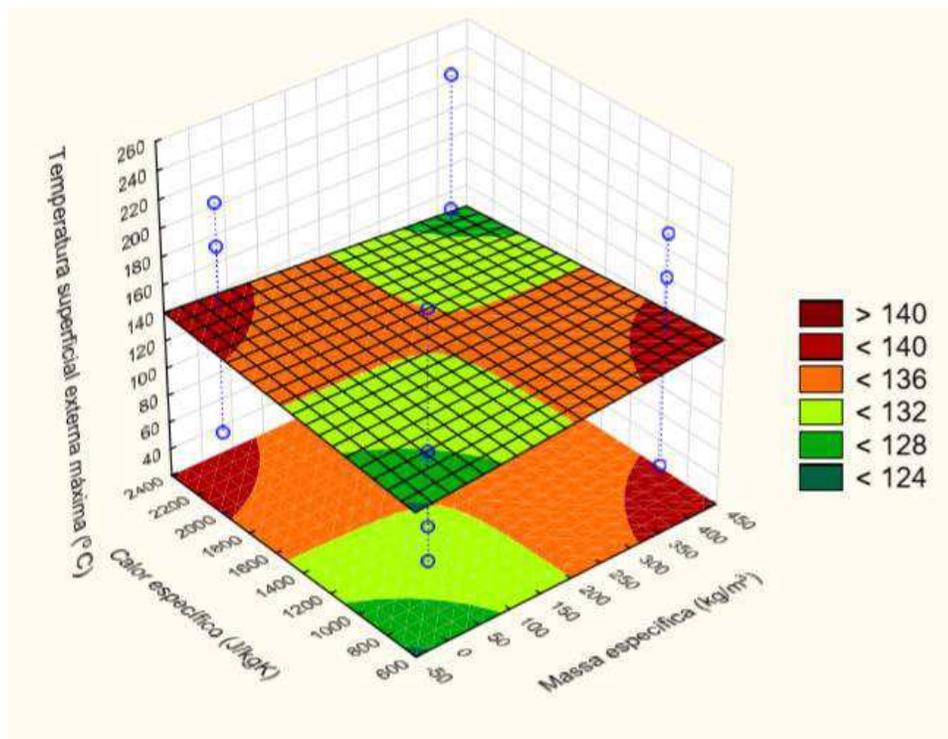


Figura 4.52 - Influência da emissividade e espessura do isolamento na temperatura superficial externa máxima.



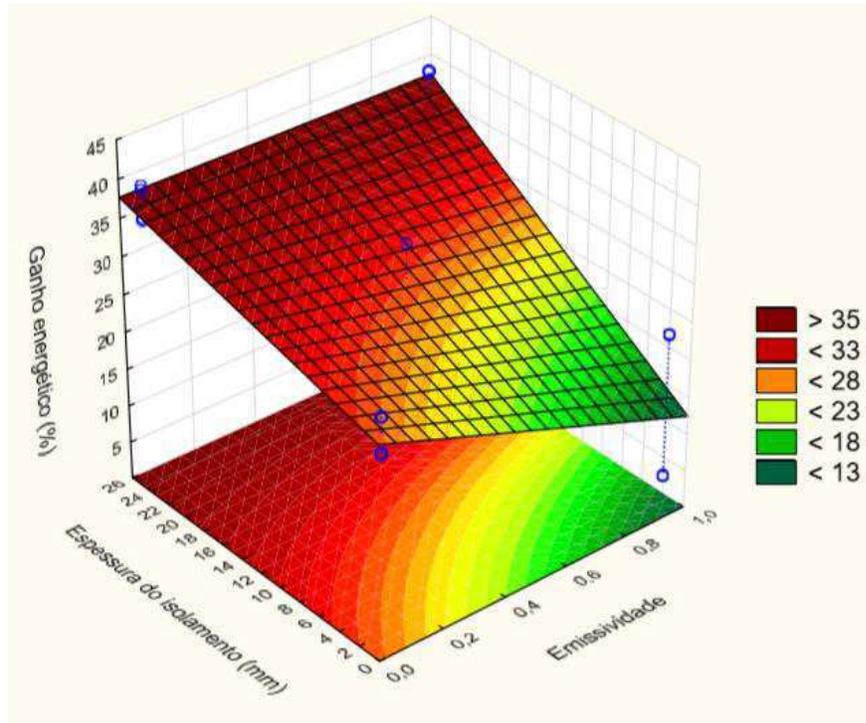
Na Figura 4.53 está ilustrado a superfície de resposta para a variável de resposta $T_{s2,ext,max}$ em função das variáveis calor específico (c_p) e massa específica (ρ). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $k = 0,0575$ W/mK, $\varepsilon = 0,5$ e $L_{iso} = 13$ mm. Pela análise desta figura, constata-se que as variáveis calor específico (c_p) e massa específica (ρ) do isolamento térmico pouco influenciam na temperatura superficial externa máxima.

Figura 4.53 - Influência do calor específico e massa específica na temperatura superficial externa máxima.



Na Figura 4.54 está ilustrado a superfície de resposta para a variável de resposta Ganho energético em função das variáveis espessura do isolamento térmico (L_{iso}) e emissividade (ε). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $\rho = 207,5$ kg/m³, $k = 0,0575$ W/mK e $c_p = 1550$ J/kgK.

Figura 4.54 - Influência da espessura do isolamento e emissividade no ganho energético.



Na Figura 4.55 está ilustrado a superfície de resposta para a variável de resposta ganho energético em função das variáveis emissividade (ϵ) e condutividade térmica (k). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $\rho = 207,5 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1550 \text{ J/kgK}$ e $L_{\text{iso}} = 13 \text{ mm}$.

Na Figura 4.56 está ilustrado a superfície de resposta para a variável de resposta $T_{s2,\text{ext,max}}$ em função das variáveis condutividade térmica (k) e espessura do isolamento térmico (L_{iso}). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $\rho = 207,5 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1550 \text{ J/kgK}$ e $\epsilon = 0,5$.

Na Figura 4.57 está ilustrado a superfície de resposta para a variável de resposta Ganho energético em função das variáveis calor específico (c_p) e massa específica (ρ). Para obtenção de tal superfície de resposta, fixou-se as demais variáveis de entrada no nível de ponto central, ou seja, $k = 0,0575 \text{ W/mK}$, $\epsilon = 0,5$ e $L_{\text{iso}} = 13 \text{ mm}$.

Figura 4.55 - Influência da emissividade e condutividade térmica no ganho energético.

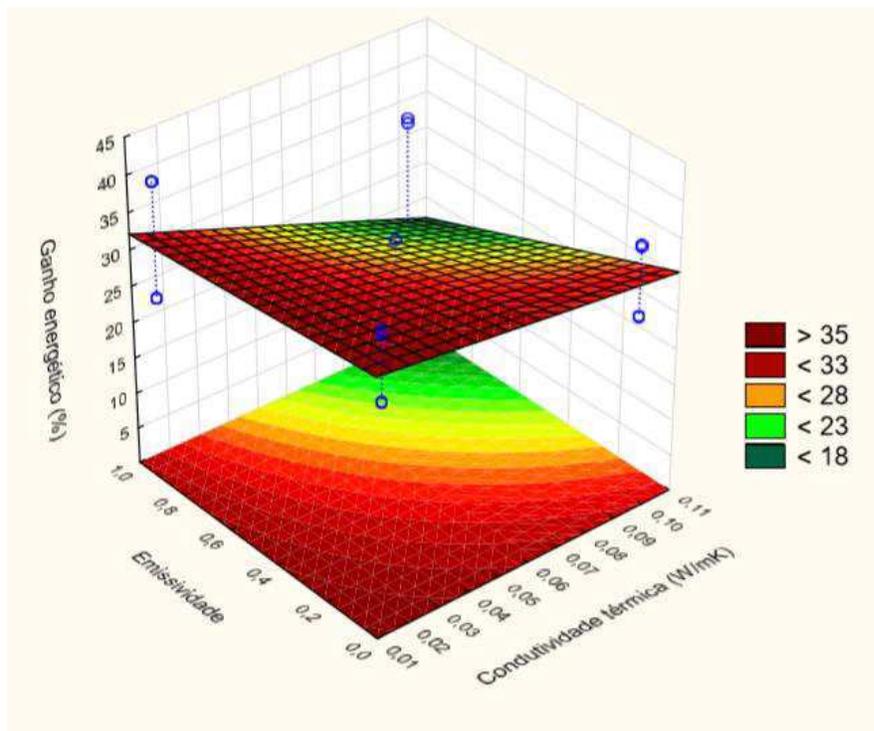
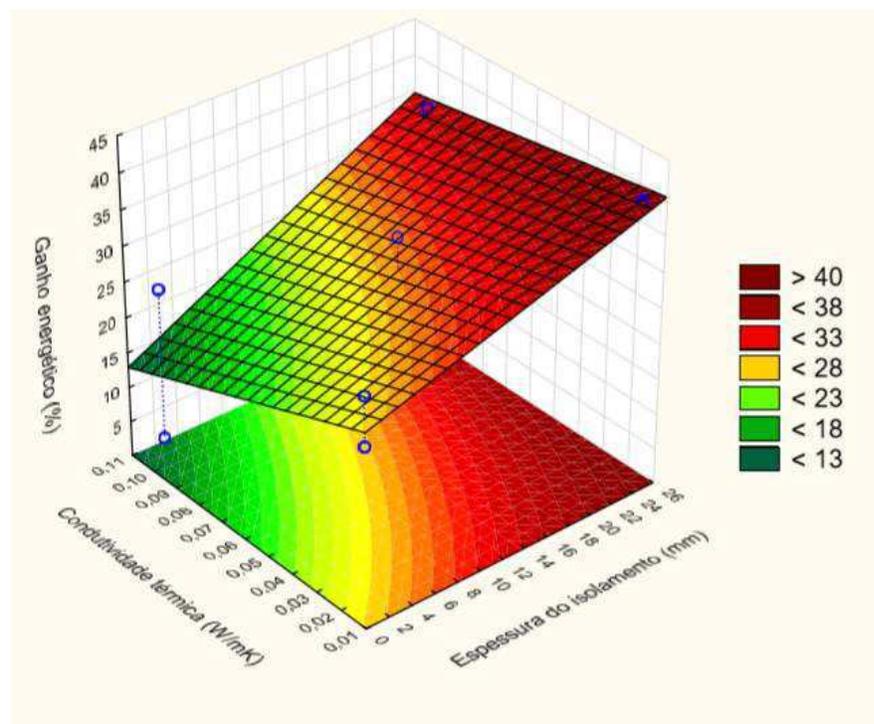
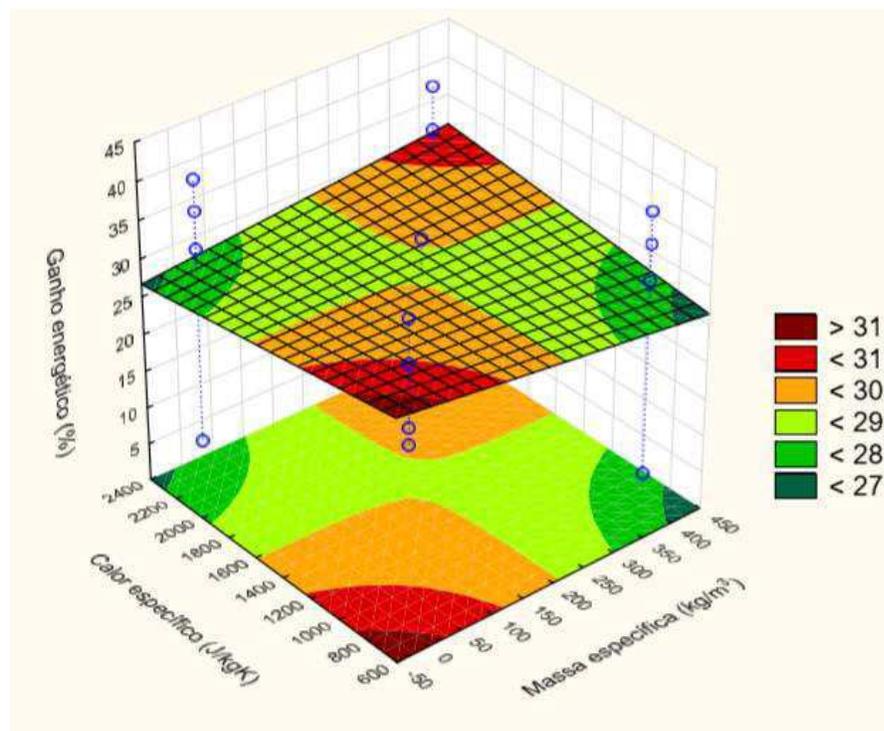


Figura 4.56 - Influência da condutividade térmica e espessura do isolamento no ganho energético.



Pela análise conjunta das Figuras 4.54-4.57, observa-se que a redução na condutividade térmica (k) e aumento na espessura do isolamento térmico (L_{iso}) proporcionam considerável aumento no ganho energético, quando comparado com o forno sem isolamento térmico. Constatase também que a redução na emissividade do isolamento térmico (ϵ) proporciona aumento no ganho energético, embora com menor intensidade quando comparado com os efeitos das variáveis k e L_{iso} . Além disto, observa-se que as variáveis calor específico (c_p) e massa específica (ρ) pouco influenciam no ganho energético do forno com isolamento térmico.

Figura 4.57 - Influência do calor específico e massa específica no ganho energético.



As superfícies de resposta para as variáveis de resposta perda de energia por convecção (Q_{conv}), perda de energia por radiação (Q_{rad}) e energia acumulada no isolamento térmico (Q_{acu}), ao longo do processo de aquecimento, encontram-se no Apêndice E deste trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Neste trabalho, estudou-se termicamente um forno/secador do tipo intermitente com e sem isolamento térmico, operando com gás natural como combustível, para indústria cerâmica, quantificando as transferências de calor que ocorrem ao longo dos processos transientes de aquecimento e resfriamento do forno.

Foram desenvolvidas e apresentadas modelagens matemáticas e código computacional para calcular as trocas térmicas entre o forno com isolamento térmico nas paredes laterais e a vizinhança, baseando-se na primeira lei da termodinâmica e no método numérico dos volumes finitos. Para assegurar a confiabilidade dos resultados numéricos obtidos, fez-se análises de convergência de malha e passo de tempo representando o isolamento térmico, baseado na extrapolação de Richardson, Índice de Convergência de Malha (ICM) e cálculos de erro absoluto.

Verificou-se a influência do tipo e espessura de isolamentos térmicos (fibra cerâmica, fibra de vidro, lã de rocha e silicato de cálcio) em diversos resultados, dentre eles na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$) e no ganho energético, quando comparado com o forno sem isolamento térmico.

Desenvolveu-se um planejamento experimental para avaliar a influência da espessura (L_{iso}), condutividade térmica (k), massa específica (ρ), calor específico (c_p) e emissividade (ϵ) do isolamento térmico e de suas interações nas energias perdidas por convecção (Q_{conv}) e por radiação (Q_{rad}) ao longo do processo de aquecimento, na energia acumulada no isolamento térmico (Q_{acu}) durante a etapa de aquecimento, na temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$) e no ganho energético.

A partir dos resultados obtidos e discussões feitas neste trabalho, pode-se concluir que:

- a) A metodologia proposta pode ser facilmente aplicada em processos semelhantes, tendo-se o conhecimento das temperaturas superficiais internas e externas do forno, assim como as condições de temperatura e velocidade do ar nas vizinhanças do forno.
- b) Para o forno sem isolamento térmico, as perdas de calor pelas paredes laterais, por radiação e convecção, são significativamente maiores quando comparadas com a perda de calor pelo conjunto base/teto do forno.
- c) A energia necessária para aquecer as paredes laterais, base e teto do forno são consideravelmente elevadas, principalmente nos instantes iniciais do processo de aquecimento.
- d) A metodologia proposta para análise do forno sem isolamento térmico foi satisfatória uma vez que a taxa de energia fornecida ao forno se aproxima de zero para instantes de tempo posteriores ao desligamento do equipamento.
- e) Para o forno com isolamento térmico, os resultados indicam que, quanto maior a espessura do isolamento térmico, menor é a temperatura superficial externa máxima e maior é o ganho energético, quando comparado com o forno sem isolamento térmico.
- f) Dos quatro tipos de isolamentos térmicos analisados inicialmente, a fibra de vidro é o material isolante que proporciona um maior ganho energético e, conseqüentemente, promove os maiores ganhos econômicos e ambientais.
- g) A fibra de vidro é o isolamento térmico que proporciona uma maior redução na temperatura superficial externa máxima, contribuindo para uma maior redução no desconforto térmico e nos riscos de acidentes por lesão corporal, quando em operação.
- h) A análise desenvolvida através do método do planejamento experimental foi importante para comprovar a suspeita de que a espessura (L_{iso}) e condutividade térmica (k) do isolamento térmico são as variáveis que mais influenciam na eficiência do processo. Ficou evidente que os efeitos principais das outras propriedades do material, tais como massa específica (ρ), calor específico (c_p), emissividade (ϵ) e os efeitos de interação também contribuem de forma significativa nas diversas variáveis de resposta analisadas para o forno com isolamento térmico.
- i) A partir da análise estatística de variância (ANOVA), foi possível determinar modelos matemáticos bem ajustados, com coeficientes de correlação (R^2) muito satisfatórios e regressões estatisticamente significativas para diversas variáveis de resposta, tais como:

energias perdidas por convecção (Q_{conv}) e por radiação (Q_{rad}) ao longo do processo de aquecimento, energia acumulada no isolamento térmico (Q_{acu}) durante a etapa de aquecimento; temperatura superficial externa máxima ($T_{s2,ext,max}$) e ganho energético.

Por fim, os resultados aqui apresentados podem ser utilizados como uma ferramenta de tomada de decisão na escolha do tipo de isolamento térmico e sua respectiva espessura que sejam capazes de proporcionar o ganho energético desejado para o forno, com uma melhor relação benefício/custo de instalação. É importante ressaltar que outros fatores devem ser levados em consideração na escolha do tipo de isolamento, tais como vida útil e o custo médio de manutenção.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para futuros trabalhos, pode-se citar:

- a) Desenvolver análises exergéticas para o forno com e sem isolamento térmico.
- b) Quantificar a influência da espessura e demais propriedades do isolamento térmico no ganho energético e na temperatura superficial externa máxima, utilizando-se novas temperaturas para o ambiente e interior do forno (curvas de queima distintas).
- c) Desenvolver modelagem matemática utilizando parede composta para analisar a influência da espessura e tipo de isolamento térmico, na etapa de resfriamento do forno, apresentando suas principais vantagens e desvantagens.
- d) Desenvolver planejamento experimental para quantificar a influência da espessura e propriedades do isolamento térmico no tempo total de resfriamento do forno.
- e) Avaliar o aquecimento e resfriamento de uma peça cerâmica durante os processos de secagem e queima para o forno/secador em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASSI, A.; KHOSHMANESH, K. Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 5–6, p. 450–459, 2008.
- ALMEIDA, G. S. Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- ALMEIDA, G. S.; FERNANDES, M. A. F.; FERNANDES, J. N.; NEVES, G. A.; BARBOSA DE LIMA, W. M. P.; LIMA, A. G. B. DE. Drying of industrial ceramic bricks: An experimental investigation in oven. **Defect and Diffusion Forum**, v. 353, p. 116–120, 2014.
- ALMEIDA, G. S.; SILVA, J. B.; SILVA, C. J.; SWARNAKAR, R.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: modeling and simulation applied to hollow bricks. **Applied Thermal Engineering**, v. 55, n. 1–2, p. 78–86, 2013.
- ALMOHAMMADI, K. M.; INGHAM, D. B.; MA, L.; POURKASHAN, M. Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine. **Energy**, v. 58, p. 483–493, 2013.
- ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Levantamento inicial do consumo de energias térmica e elétrica na indústria brasileira de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 1/2, p. 17–21, 2007.
- ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Consumo de gás natural na indústria de revestimentos cerâmicos brasileira (Consumption of natural gas in Brazilian ceramic tile industry). **Cerâmica**, v. 54, n. 331, p. 326–331, 2008.
- ARAÚJO, M. V.; DELGADO, J.; BARBOSA DE LIMA, A. G. On the Use of CFD in Thermal Analysis of Industrial Hollow Ceramic Brick. **Diffusion Foundations**, v. 10, p. 70–82, 2016.
- ARAÚJO, M. V.; SANTOS, R. S.; SILVA, R. M. DA; BARBOSA DE LIMA, A. G. Drying of Industrial Hollow Ceramic Brick: Analysis of the Moisture Content and Temperature Parameters.

Defect and Diffusion Forum, v. 380, p. 72–78, 2017.

AUGIER, F.; COUMANS, W. J.; HUGGET, A.; KAASSCHIETER, E. F. On the risk of cracking in clay drying. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, n. 1–2, p. 133–138, 2002.

AYDIN, M. C. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. **Advances in Engineering Software**, v. 45, n. 1, p. 159–166, 2012.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. **Matéria, Rio de Janeiro**, v. 14, n. 4, 2009.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 3, n. 1, p. 46–61, 2008.

BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of heat and mass transfer**. John Wiley & Sons, 2011.

BOCH, P.; NIEPCE, J.-C. **Ceramic Materials: Processes, Properties, and Applications**. John Wiley & Sons, 2010.

BRITO, M. K. T.; ALMEIDA, D. B. T.; LIMA, A. G. B.; ROCHA, L. A.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, V. A. B. Heat and Mass Transfer during Drying of Clay Ceramic Materials: A Three-Dimensional Analytical Study. **Diffusion Foundations**, v. 10, p. 93–106, 2016.

BRONGNIART, A. **Traité des arts céramiques ou des poteries considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie**. Bechet; Mathias, 1844.

BROSNAN, D. A.; ROBINSON, G. C. **Introduction to drying of ceramics: with laboratory exercises**. American Ceramic Society, 2003.

CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos. **Revista matéria**, v. 10, n. 3, p. 443–453, 2005.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and**

engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons, 2012.

CAVALCANTI, M. A. DE V.; MENDES, J. U. DE L.; TRINDADE FILHO, M. O. DA; MORAIS, D. S. G. DE; SILVA, R. M. DA; BEZERRA, H. A. D. Análise das perdas de calor de um forno abóbada com isolamento térmico. **VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, 2010.

CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in {CFD} applications. **Journal of fluids {Engineering-Transactions} of the {ASME}**, v. 130, n. 7, 2008.

CHEN, W.-H.; CHUNG, Y. C.; LIU, J. L. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 32, n. 5, p. 695–706, 2005.

CHURCHILL, S. W.; CHU, H. H. S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 18, n. 11, p. 1323–1329, 1975.

CORRIA ARADAS, M. E. Avaliação de um forno intermitente de cerâmica vermelha usando bagaço de cana como combustível. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

CRASTA, G. P. Costs and revenues of the italian ceramic industry. **Ceramic World Review**, v. 16, p.46-50, 2006.

DADAM, A. P. Análise térmica de um forno túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes—A review. **Applied Energy**, v. 131, p. 323–344, 2014.

DINGER, D. R. **Practical Pointers for Ceramists**. Vol 1 ed. C B Dinger, 2010.

DUGWELL, D. R.; OAKLEY, D. E. A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 31, n. 11, p. 2381–2390, 1988.

FORD, R. W. **Ceramics drying**. Elsevier, 2013.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. **Advances in Drying**, v. 1, p. 119–154, 1980.

GOMEZ, R. S.; LIMA, A. G. B.; PORTO, T. R.; OLIVEIRA, J. L.; ARAÚJO, M. V.; NASCIMENTO, J. J. S. Thermal Analysis in an Intermittent Ceramic Kiln. **Diffusion Foundations**, v. 20, p. 124–142, 2019a.

GOMEZ, R. S.; PORTO, T.; MAGALHÃES, H. L. F.; MOREIRA, G.; ANDRÉ, A. M.; MELO, R. B. F.; LIMA, A. G. B. Natural Gas Intermittent Kiln for the Ceramic Industry: A Transient Thermal Analysis. **Energies**, v. 12, n. 8, p. 1568, 2019b.

GRASSI, E. N. D. Comportamento termomecânico de minimolas superelásticas de NiTi: Influência de tratamentos térmicos. Dissertação (Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

GUPTA, R. C. **Fuels, Furnaces and Refractories**. first ed. ed. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2016.

HADAŁA, B.; MALINOWSKI, Z.; RYWOTYCKI, M. Energy losses from the furnace chamber walls during heating and heat treatment of heavy forgings. **Energy**, v. 139, p. 298–314, 2017.

HAN, S. H.; CHANG, D.; HUH, C. Efficiency analysis of radiative slab heating in a walking-beam-type reheating furnace. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 1265–1272, 2011.

HEFNY, M. M.; OOKA, R. CFD analysis of pollutant dispersion around buildings: Effect of cell geometry. **Building and Environment**, v. 44, n. 8, p. 1699–1706, 2009.

HEIMKE, G.; GRISS, P. Ceramic implant materials. **Medical and Biological Engineering and Computing**, v. 18, n. 4, p. 503–510, 1980.

ITAYA, Y.; HASATANI, M. R & D Needs-Drying of Ceramics. **Drying Technology**, v. 14, n. 6, p. 1301–1313, 1996.

ITAYA, Y.; UCHIYAMA, S.; HATANO, S.; MORI, S. Drying enhancement of clay slab by microwave heating. **Drying Technology**, v. 23, n. 6, p. 1243–1255, 2005.

KAWAGUTI, W. M. Estudo do comportamento térmico de um fornos intermitentes tipo paulistinha utilizados na indústria de cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

KHALILI, K.; BAGHERIAN, M.; KHISHEH, S. Numerical simulation of drying ceramic using finite element and machine vision. **Procedia Technology**, v. 12, p. 388–393, 2014.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to ceramics**. Wiley New York, 1976.

KOWALSKI, S. J. **Thermomechanics of drying processes**. Springer Science & Business Media, Heidelberg, 2012.

MARGUERON, J. **Les mésopotamiens**. Editions A&J Picard, Paris, 2003.

MELCHÍADES, A. C. B. Estudo teórico/experimental de um forno à gás natural para a indústria cerâmica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

MEZQUITA, A.; BOIX, J.; MONFORT, E.; MALLOL, G. Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery. **Applied Thermal Engineering**, v. 65, n. 1–2, p. 102–110, 2014.

MILANI, M.; MONTORSI, L.; STEFANI, M.; SAPONELLI, R.; LIZZANO, M. Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement. **Journal of environmental management**, v. 203, p. 1026–1037, 2017.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Grupo Gen-LTC, Rio de Janeiro, 2000.

NICOLAU, V. DE P.; DADAM, A. P. Numerical and experimental thermal analysis of a tunnel

kiln used in ceramic production. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 31, n. 4, p. 297–304, 2009.

OBA, R.; POSSAMAI, T. S.; NICOLAU, V. P. Thermal analysis of a tunnel kiln used to produce roof tiles. **Applied Thermal Engineering**, v. 63, n. 1, p. 59–65, 2014.

PATANKAR, S. **Numerical heat transfer and fluid flow**. CRC press, Boca Raton, Estados Unidos, 1980.

PAUDEL, S.; SAENGER, N. Grid refinement study for three dimensional CFD model involving incompressible free surface flow and rotating object. **Computers & Fluids**, v. 143, p. 134–140, 2017.

RAEPSAET, G. WV Harris, Rome's Imperial Economy. Twelve Essays. Oxford, University Press, 2011. **L'Antiquité Classique**, v. 81, n. 1, p. 508–509, 2012.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. John Wiley & Sons, New York, Estados Unidos, 1995.

REFAEY, H. A.; ABDEL-AZIZ, A. A.; ALI, R. K.; ABDELRAHMAN, H. E.; SALEM, M. R. Augmentation of convective heat transfer in the cooling zone of brick tunnel kiln using guide vanes: An experimental study. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 122, p. 172–185, 2017.

REFAEY, H. A.; ABDEL-AZIZ, A. A.; SALEM, M. R.; ABDELRAHMAN, H. E.; AL-DOSOKY, M. W. Thermal performance augmentation in the cooling zone of brick tunnel kiln with two types of guide vanes. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 130, p. 264–277, 2018.

REMMEY, G. B. **Firing ceramics**. World Scientific, River Edge, 1994.

RICHARDSON, L. F. IX. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character**1., v. 210, n. 459–470, p. 307–357, 1911.

RICHARDSON, L. F.; GAUNT, J. A. VIII. The deferred approach to the limit. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character**, v. 226, n. 636–646, p. 299–361, 1927.

ROACHE, P. J. Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, n. 3, p. 405–413, 1994.

RODRIGUES, J. P.; BÉTTEGA, R. Evaluation of multiphase CFD models for Dissolved Air Flotation (DAF) process. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 539, p. 116–123, 2018.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos—2ª edição—. **Campinas: Cárita Editora Espírita**, 2009.

SANTOS, G. M. DOS. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; BARBOSA DE LIMA, W. C. P.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. DE. Heat and mass diffusion including shrinkage and hygrothermal stress during drying of holed ceramics bricks. **Defect and Diffusion Forum**, v. 312, p. 971–976, 2011.

SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; NEVES, G. A.; LIMA, W. C. P. L.; FARIAS NETO, S. R. DE; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer and volume variations during drying of industrial ceramic bricks: an experimental investigation. **Defect and Diffusion Forum**, v. 326, p. 267–272, 2012.

SILVA, J. B. DA. Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados. , 2009.

SILVA, V. S.; DELGADO, J.; LIMA, W. M. P. B.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer in holed ceramic material using lumped model. **Diffusion Foundations**, v. 7, p. 30–52, 2016.

SMITH, G. D. **Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods**. Oxford university press, Oxford, Inglaterra, 1985.

SOUSSI, N.; KRIAA, W.; MHIRI, H.; BOURNOT, P. Reduction of the energy consumption of a

tunnel kiln by optimization of the recovered air mass flow from the cooling zone to the firing zone. **Applied Thermal Engineering**, v. 124, p. 1382–1391, 2017.

SOUZA, C. F.; MENDES, J. U. L.; SOUZA, L. G. M.; SALOMÃO, S. B.; SANTOS, R. D. Avaliação Térmica de um Forno Para Queima de Corpos Cerâmicos. **18º CBECIMAT**, Porto de Galinhas, 2008.

VANDIVER, P. B. Venuses and wolverines: the origins of ceramic technology, ca. 26 000 B. P. . **Ceramics and Civilization**, 5 pp. 1990. .

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics. **Finite Volume Method**, Essex, Longman Scientific & Technical, 1995.

VOLK, A.; GHIA, U.; STOLTZ, C. Effect of grid type and refinement method on CFD-DEM solution trend with grid size. **Powder Technology**, v. 311, p. 137–146, 2017.

YU, B. Dynamic modeling of a tunnel kiln. **Heat Transfer Engineering**, v. 15, n. 2, p. 39–53, 1994.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Balanço de energia global no isolamento térmico para diferentes malhas

Figura A.1 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

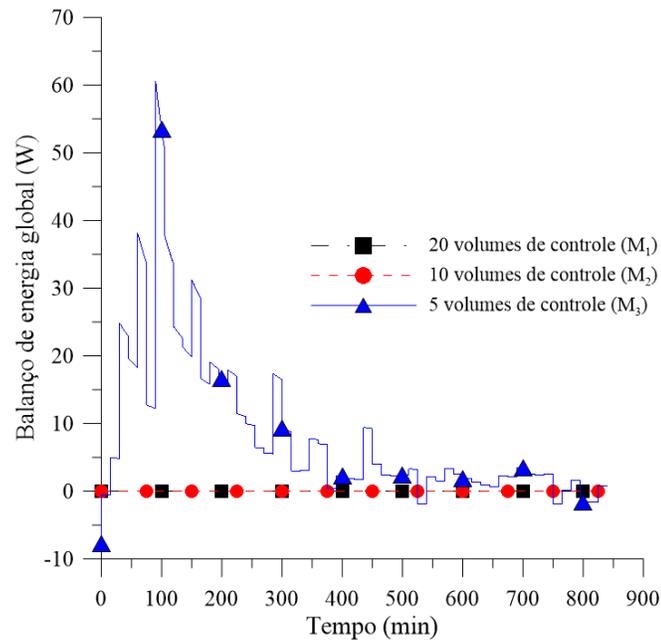


Figura A.2 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

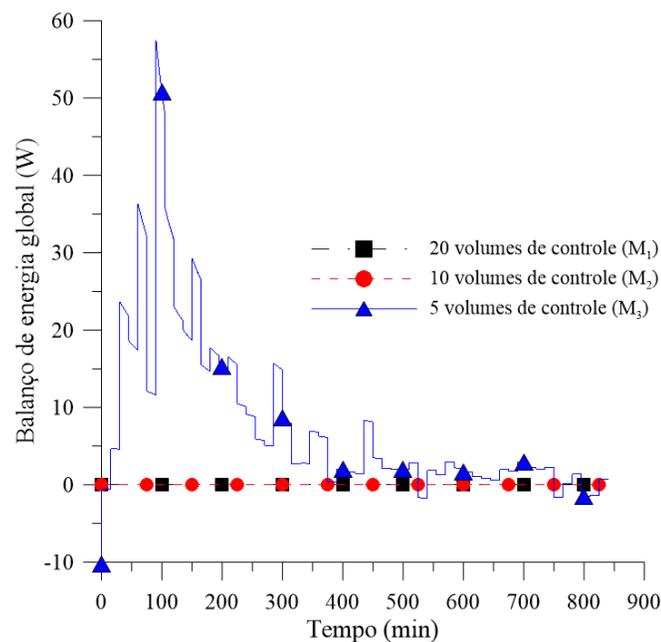


Figura A.3 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

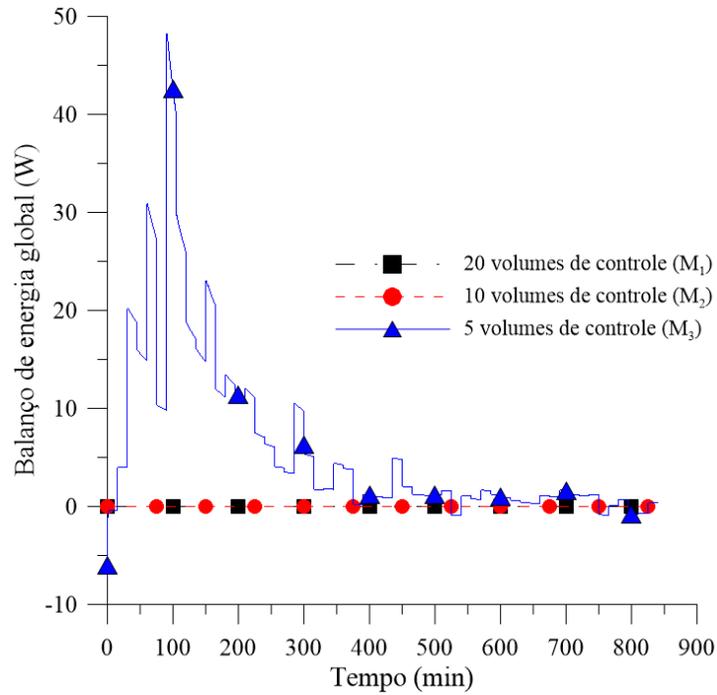


Figura A.4 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

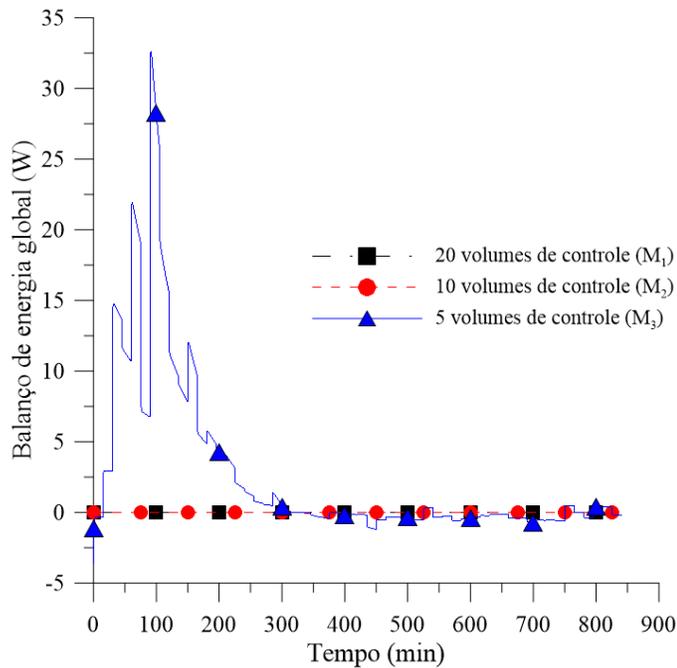


Figura A.5 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

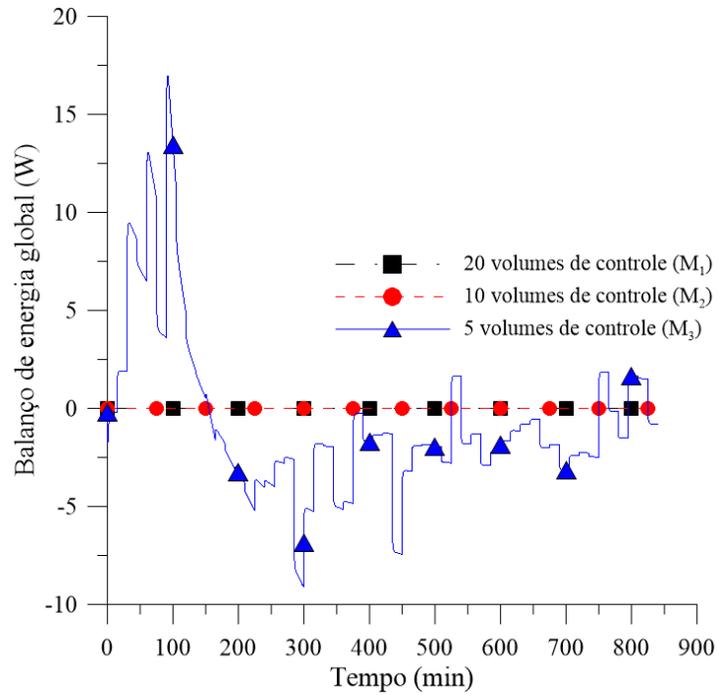


Figura A.6 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

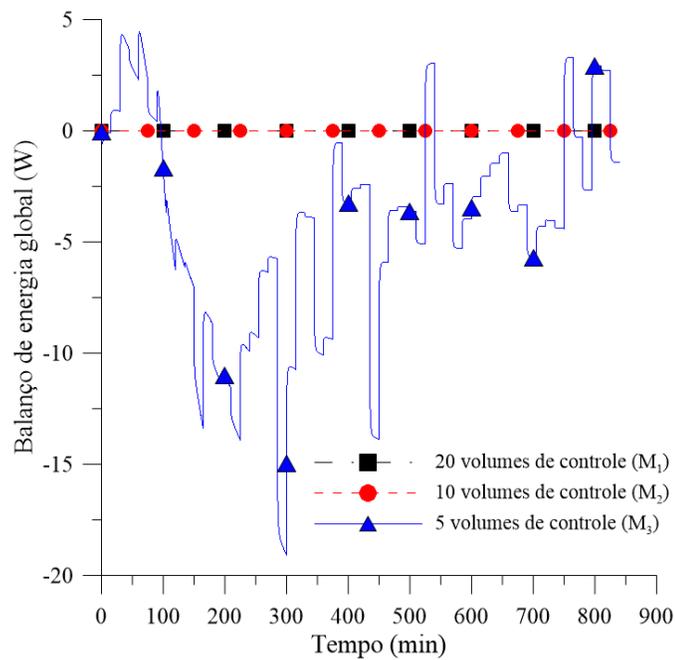


Figura A.7 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

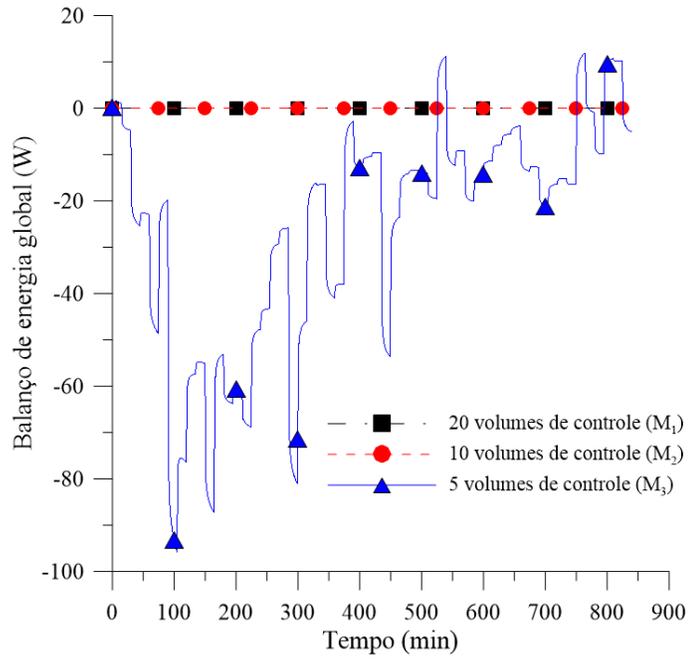


Figura A.8 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

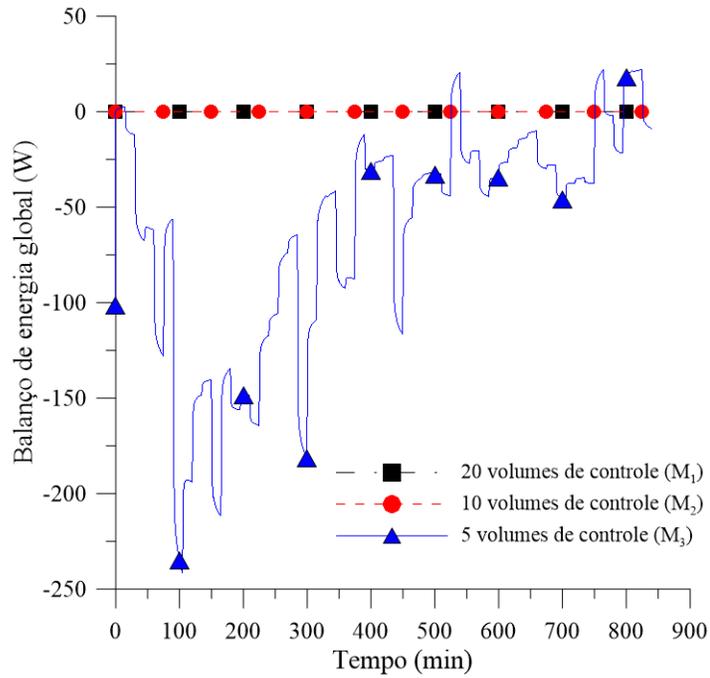


Figura A.9 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

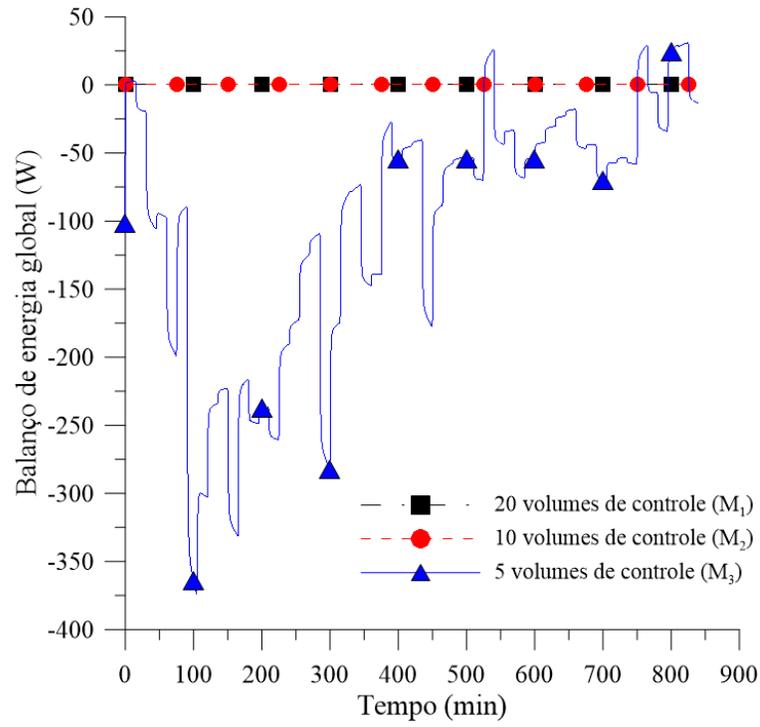
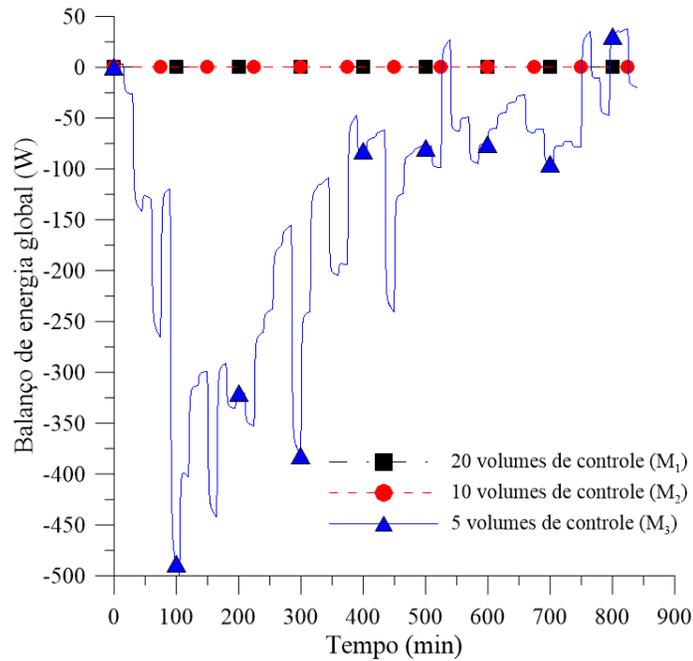


Figura A.10 - Balanço de energia global em função do tempo para diferentes malhas, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.



APÊNDICE B – Gráficos de convergência de malha

Figura B.1 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

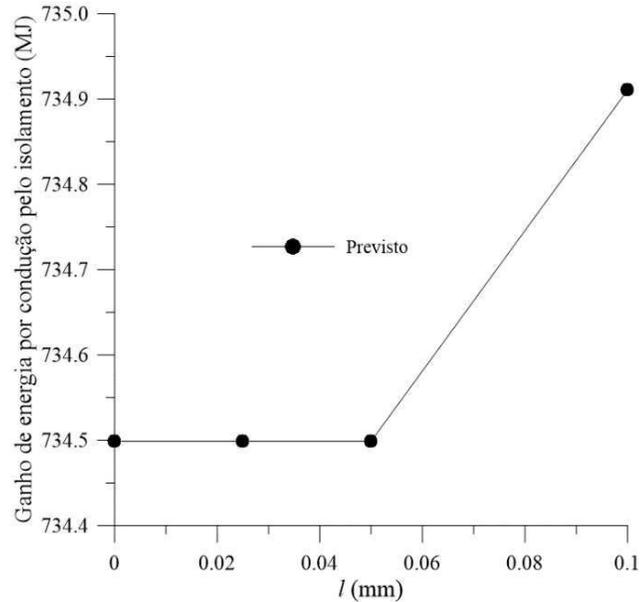


Figura B.2 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

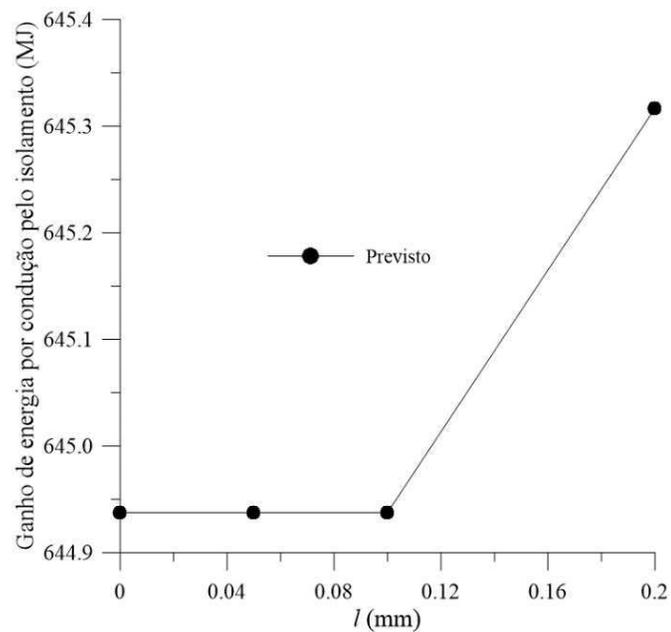


Figura B.3 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

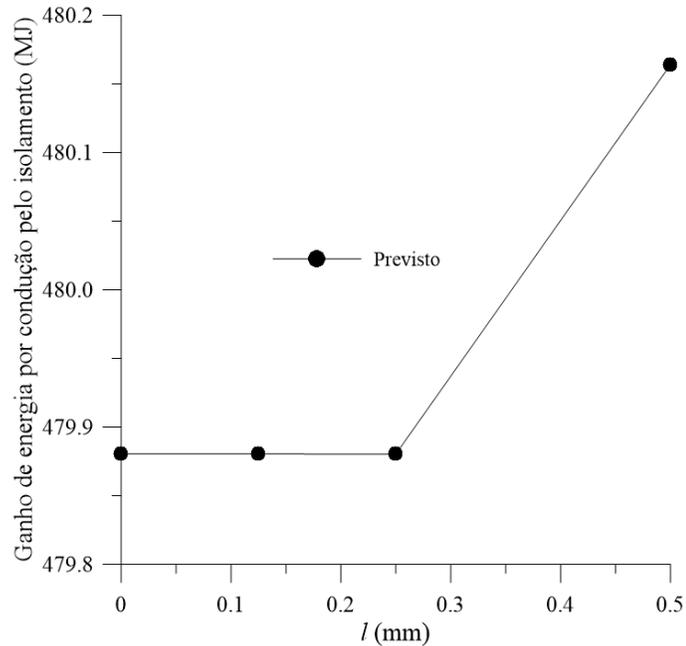


Figura B.4 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

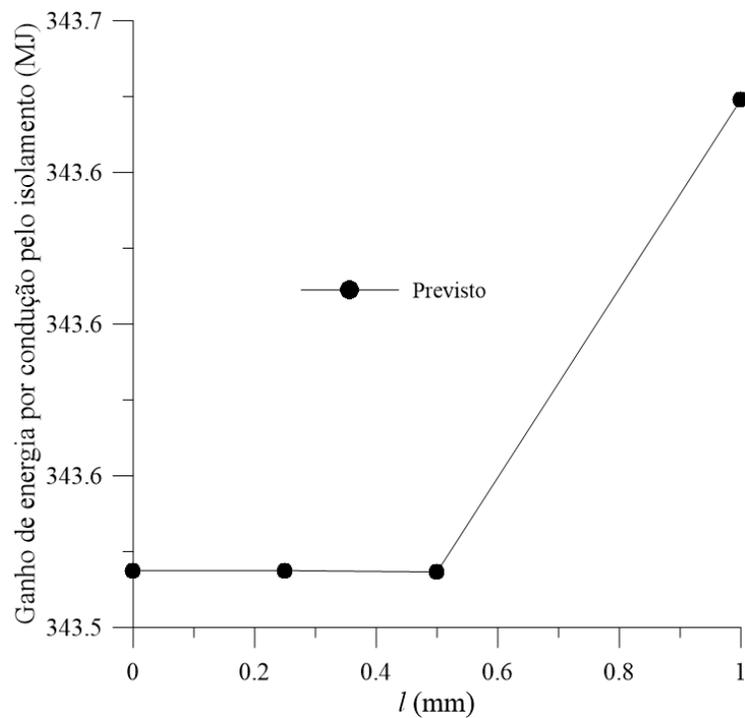


Figura B.5 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

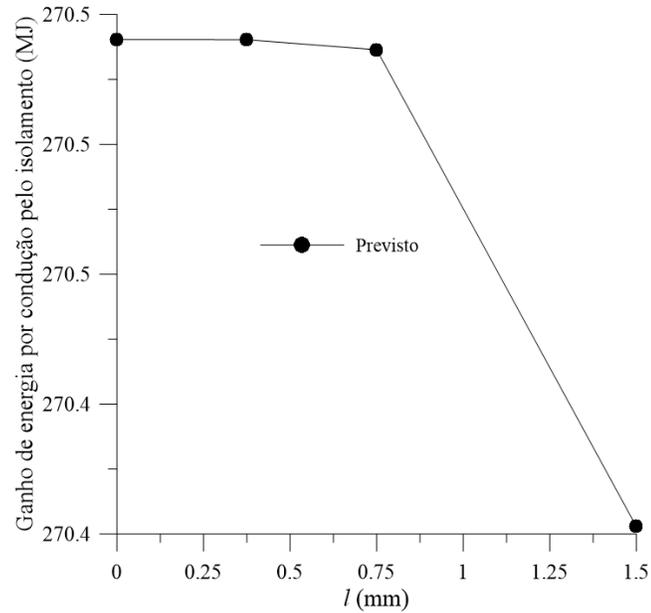


Figura B.6 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

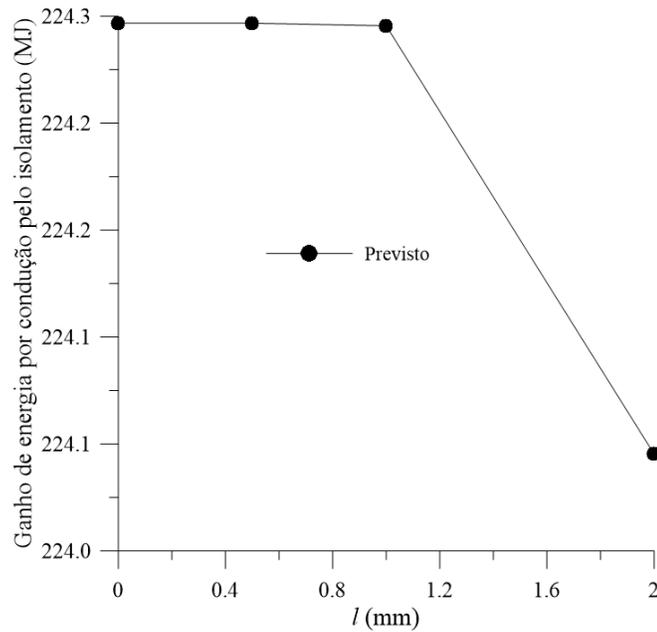


Figura B.7 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

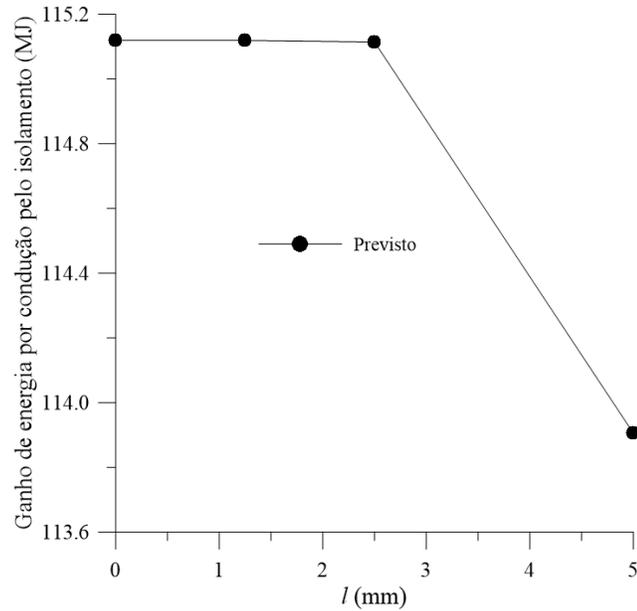


Figura B.8 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

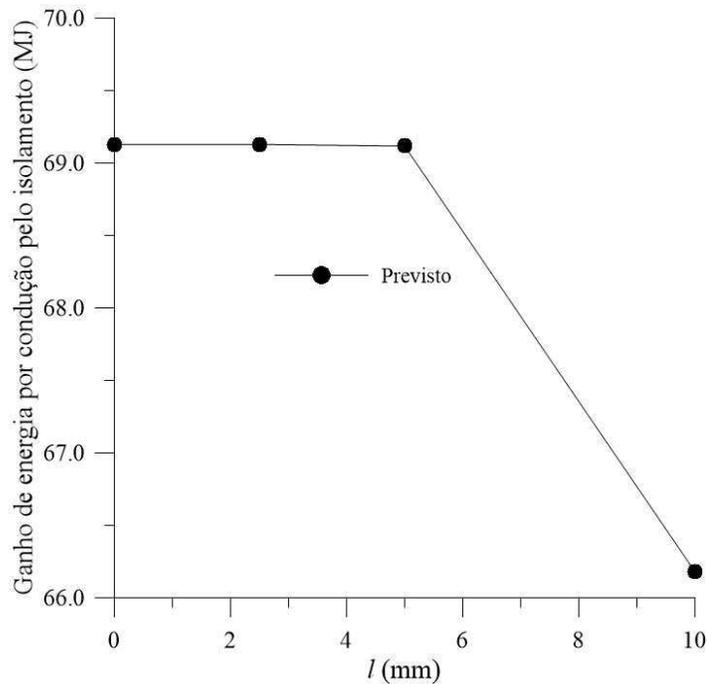


Figura B.9 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

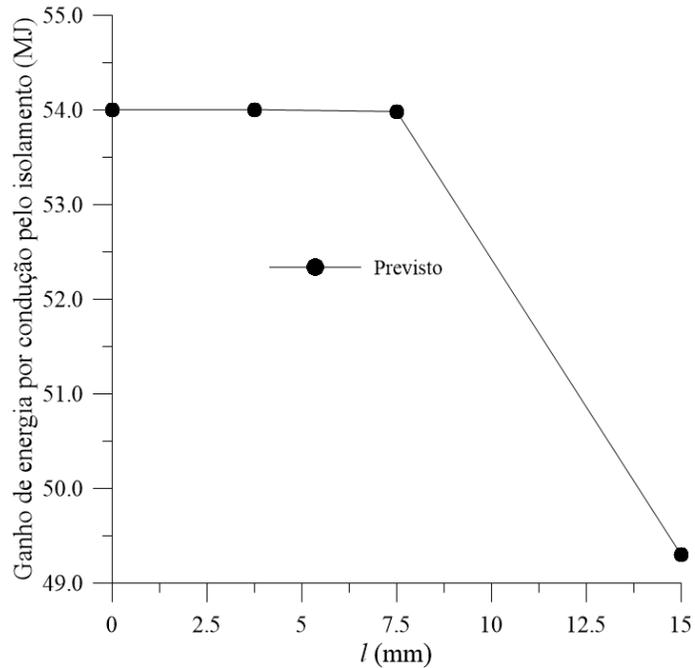
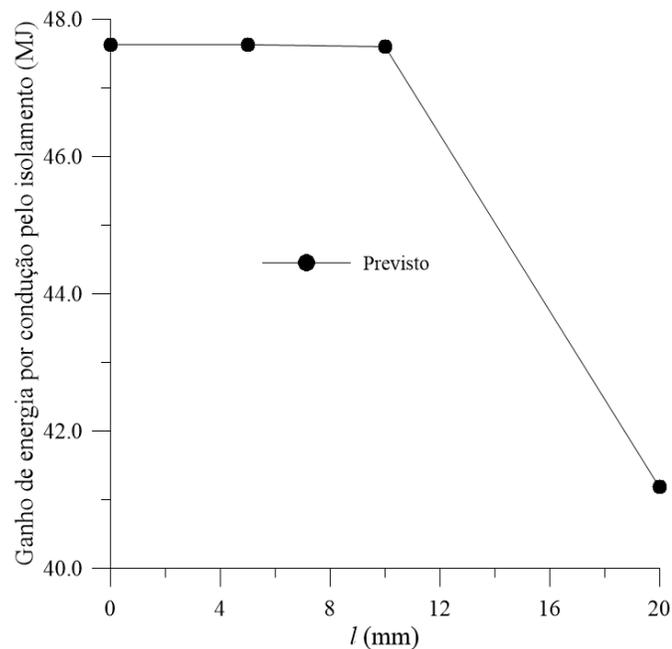


Figura B.10 - Ganho de energia por condução pelo isolamento térmico durante o processo de aquecimento em função do tamanho representativo de malha (l), utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.



APÊNDICE C – Temperatura em função do tempo para diversas posições no interior do isolamento térmico

Figura C.1 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

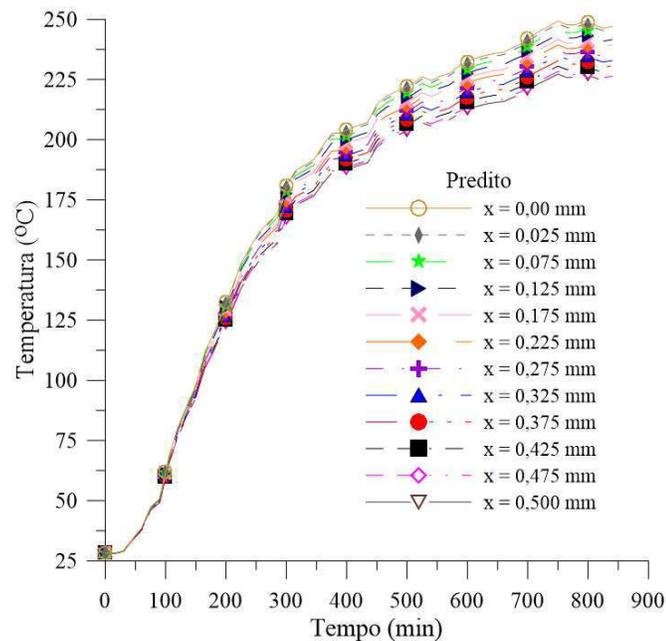


Figura C.2 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

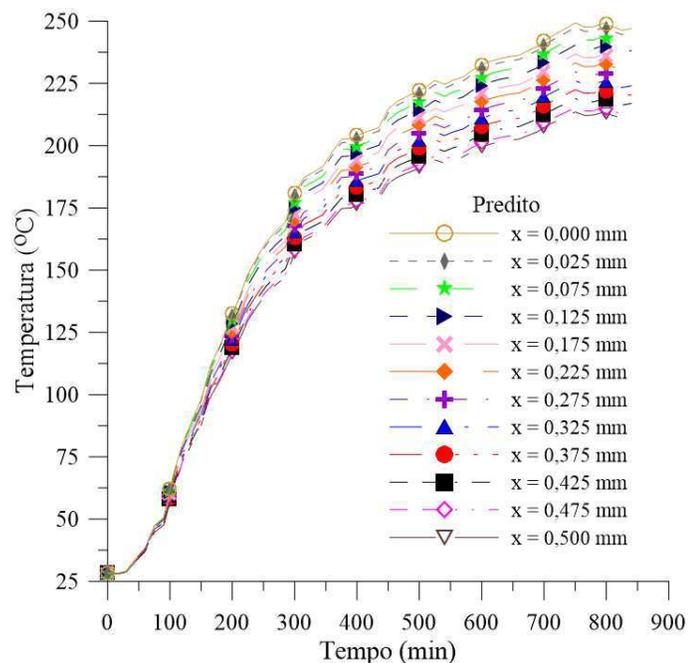


Figura C.3 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

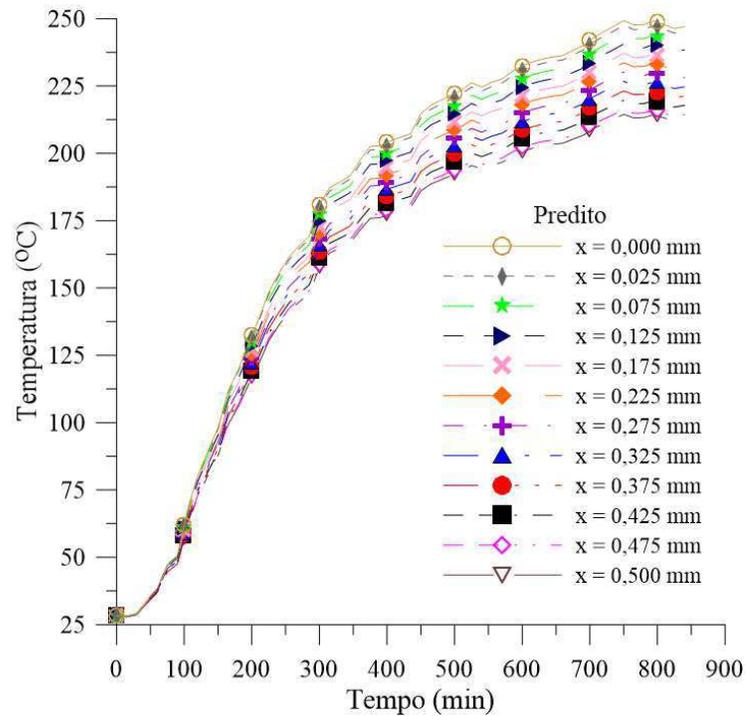


Figura C.4 - Temperatura em função do tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

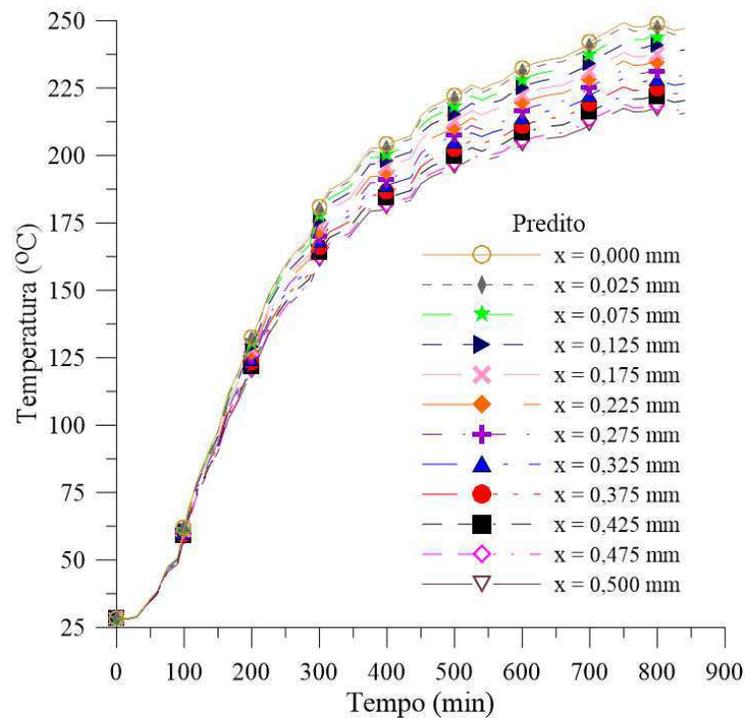


Figura C.5 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

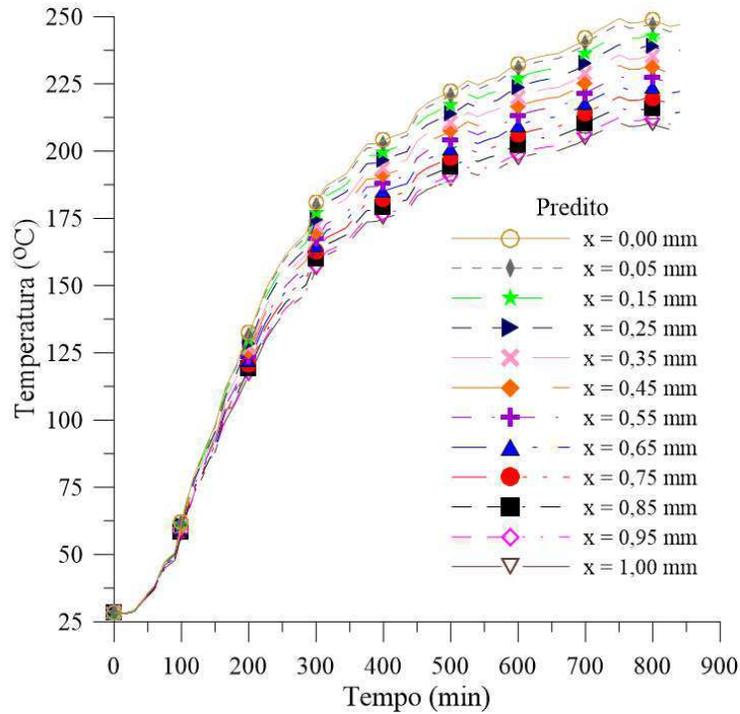


Figura C.6 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

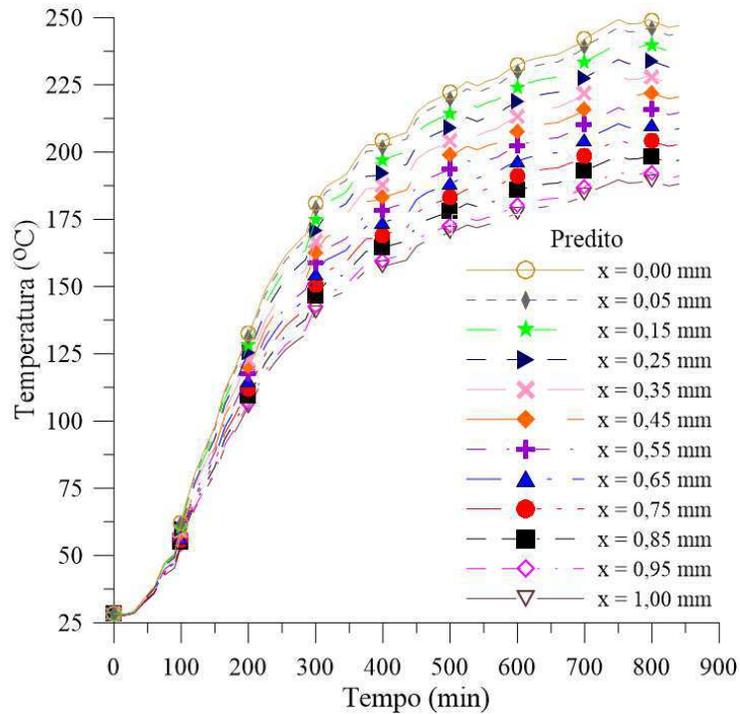


Figura C.7 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

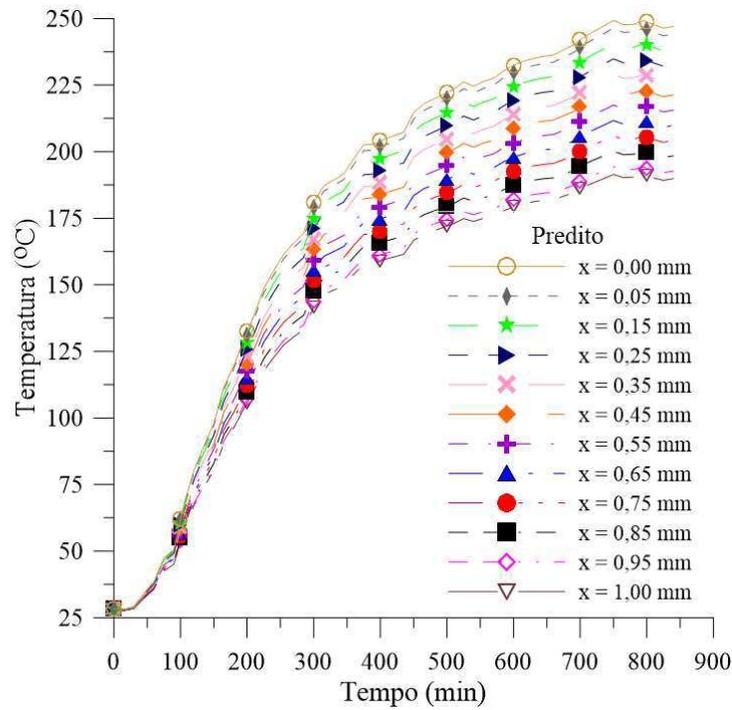


Figura C.8 - Temperatura em função do tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

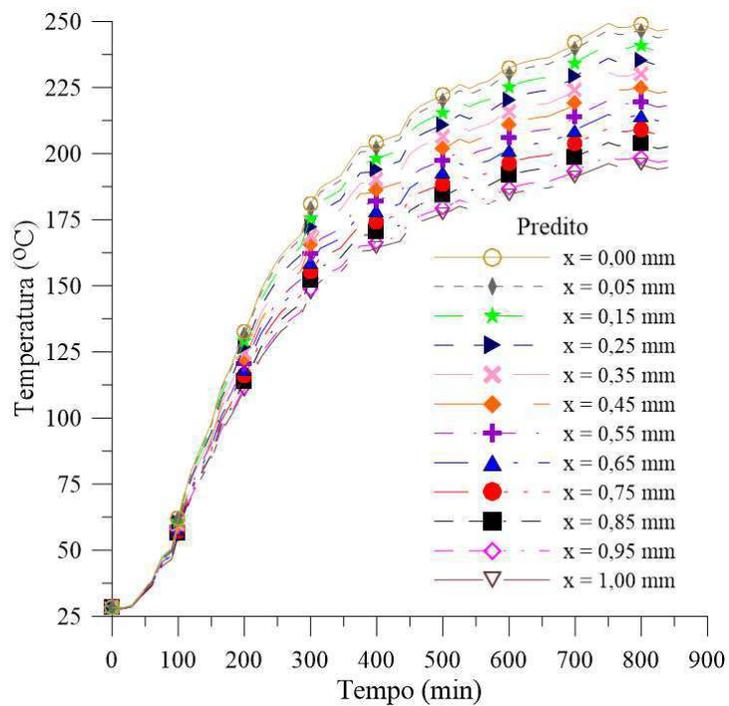


Figura C.9 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

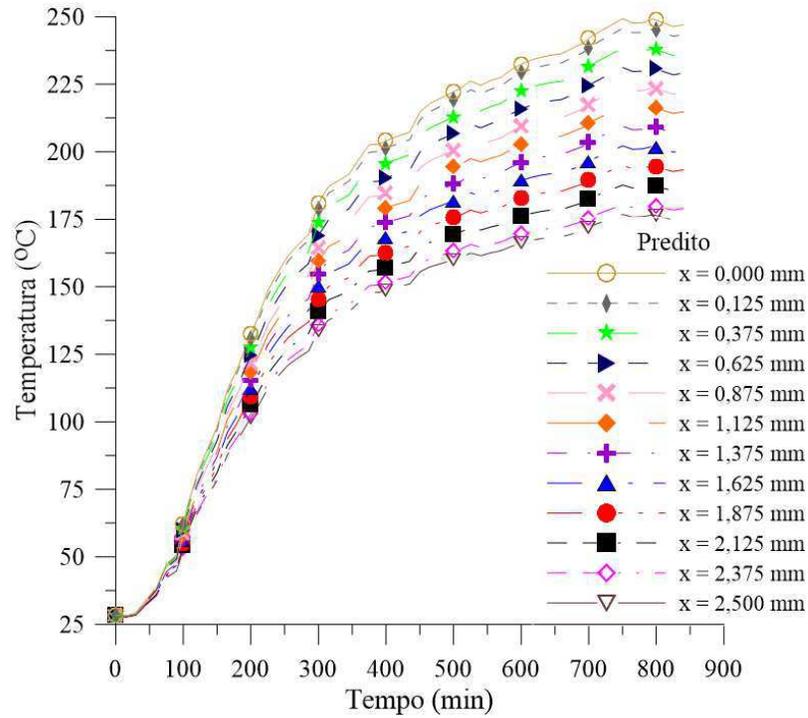


Figura C.10 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

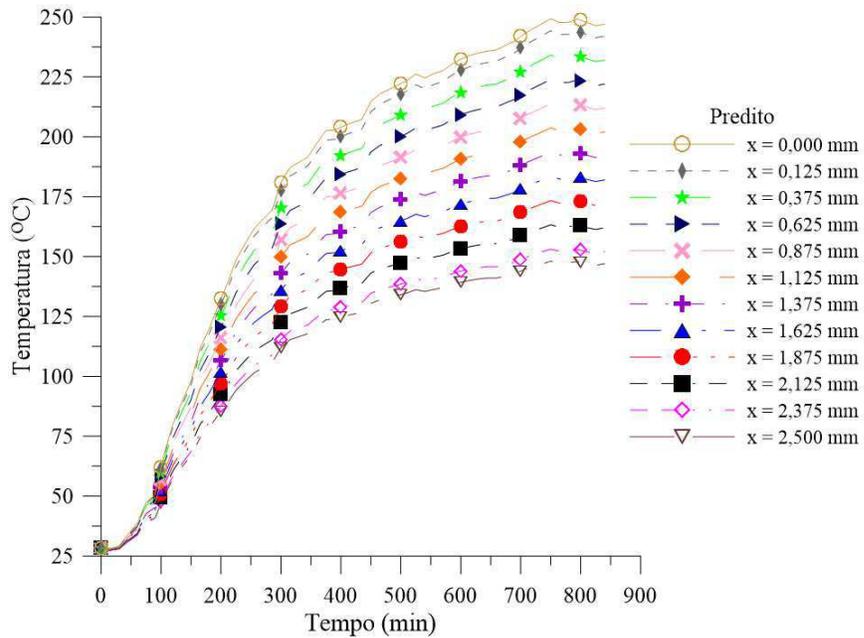


Figura C.11 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

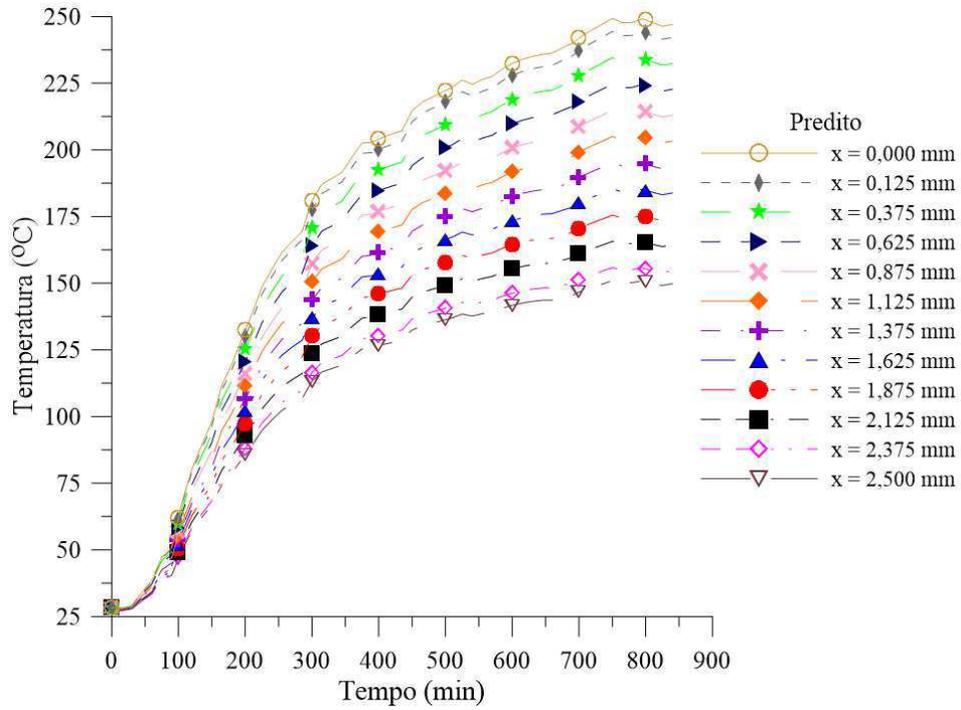


Figura C.12 - Temperatura em função do tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

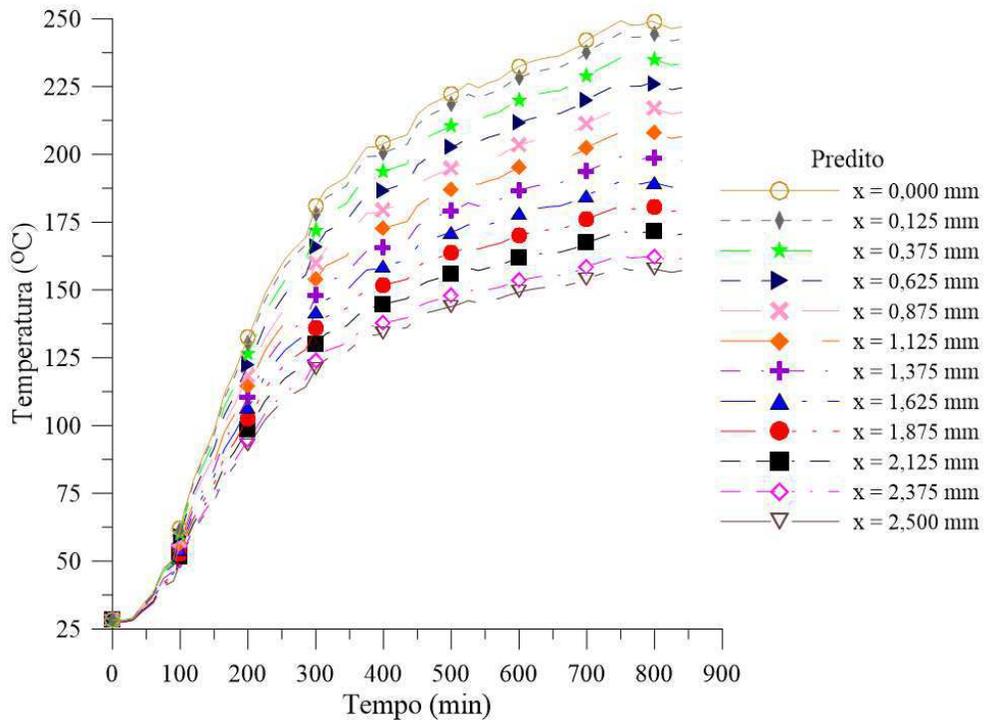


Figura C.13 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

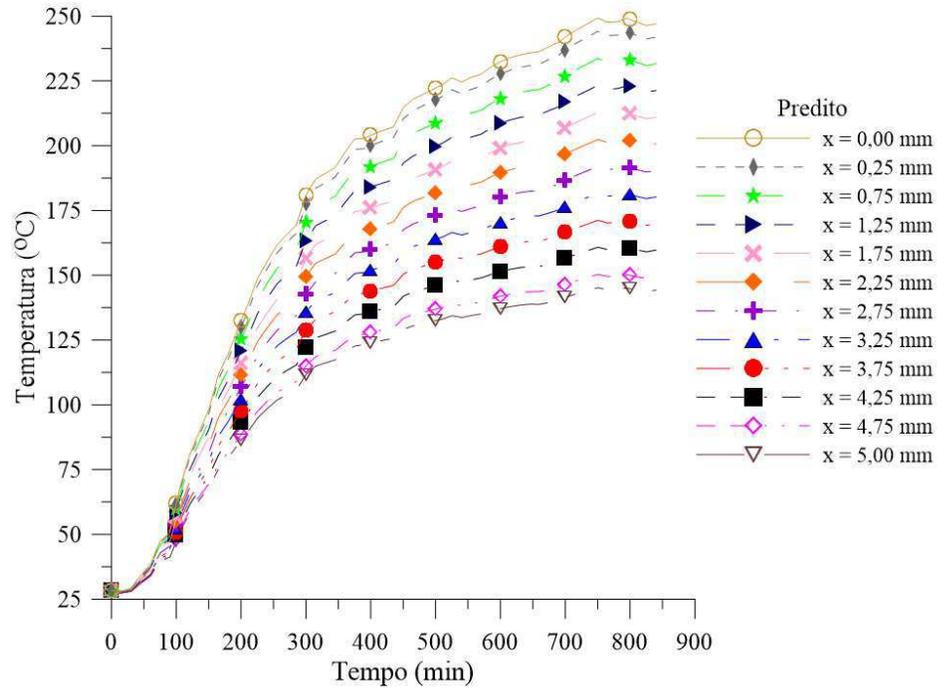


Figura C.14 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

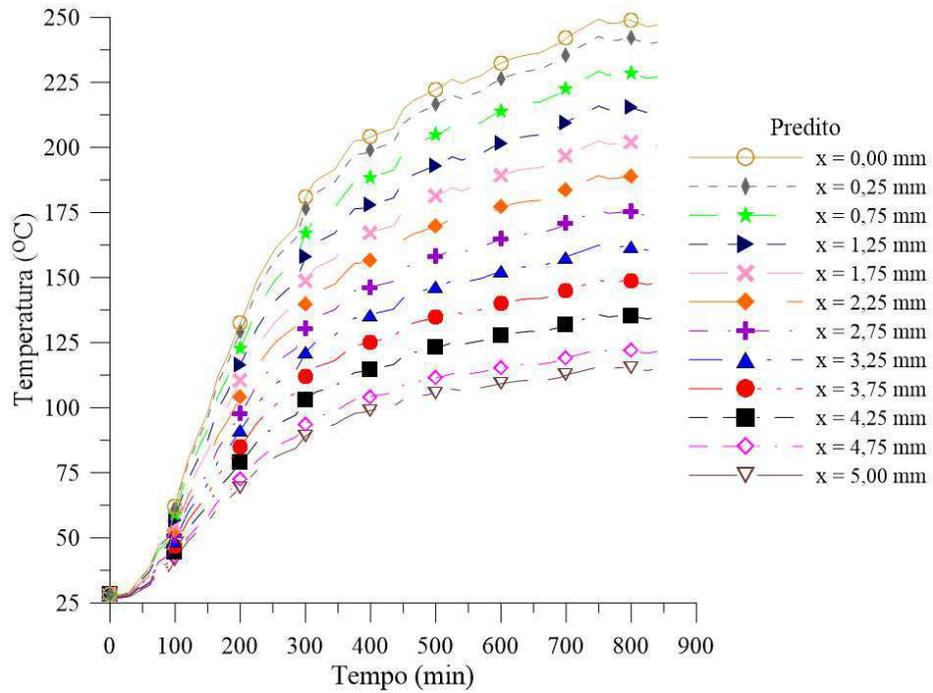


Figura C.15 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

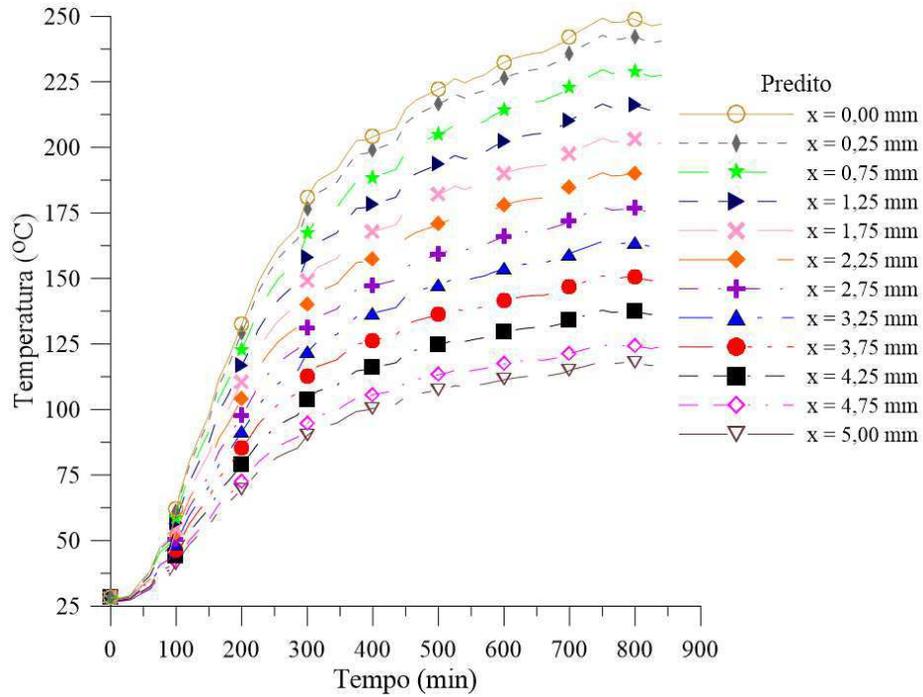


Figura C.16 - Temperatura em função do tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

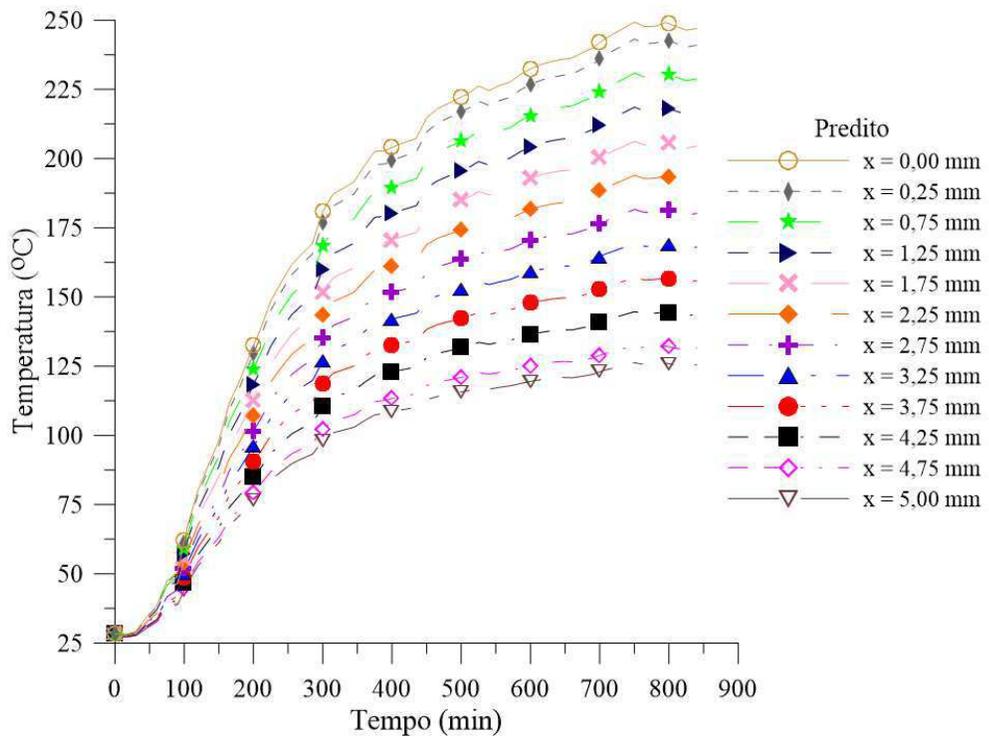


Figura C.17 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

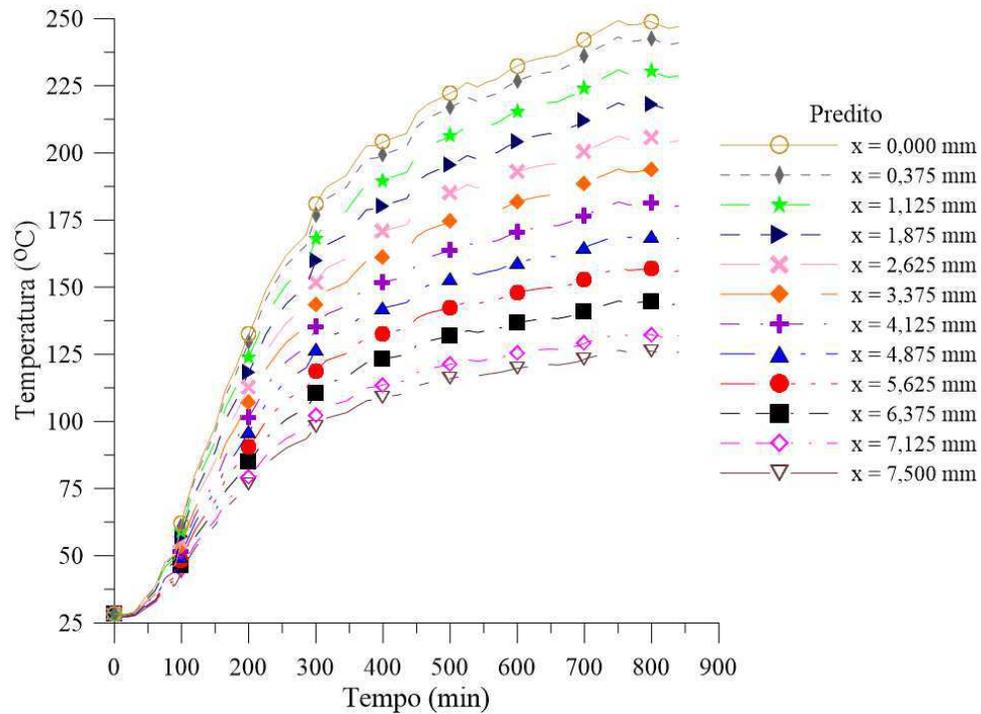


Figura C.18 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

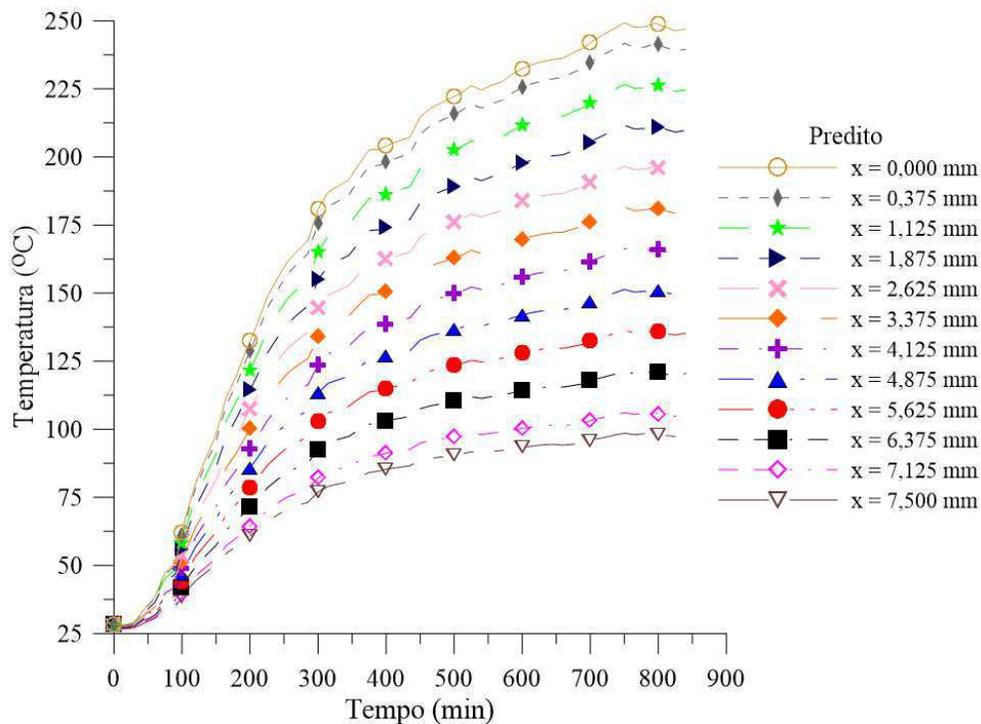


Figura C.19 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

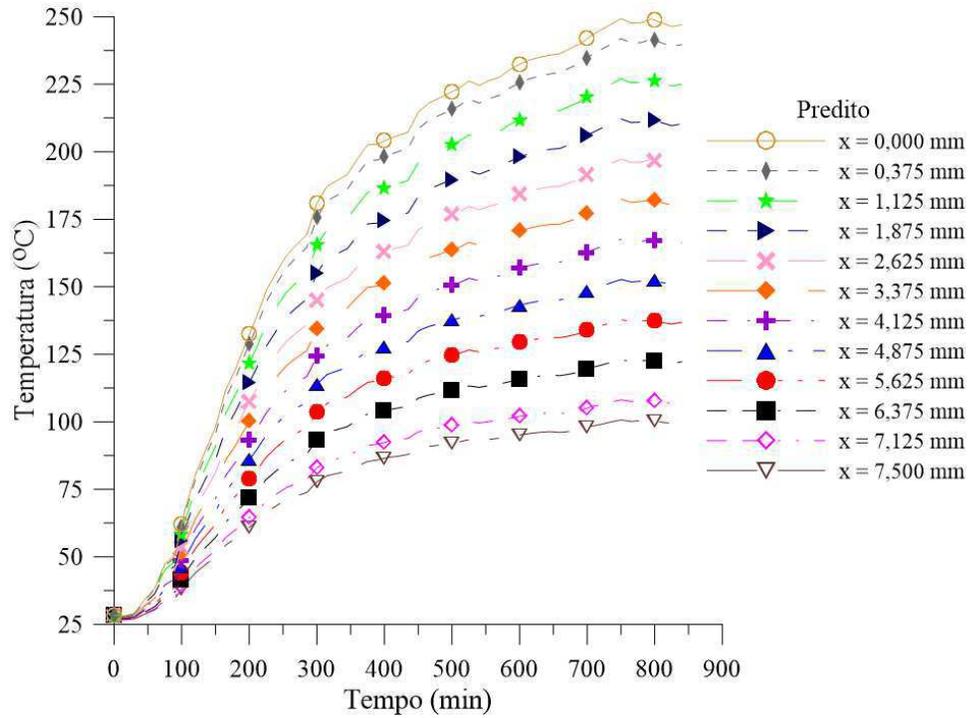


Figura C.20 - Temperatura em função do tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

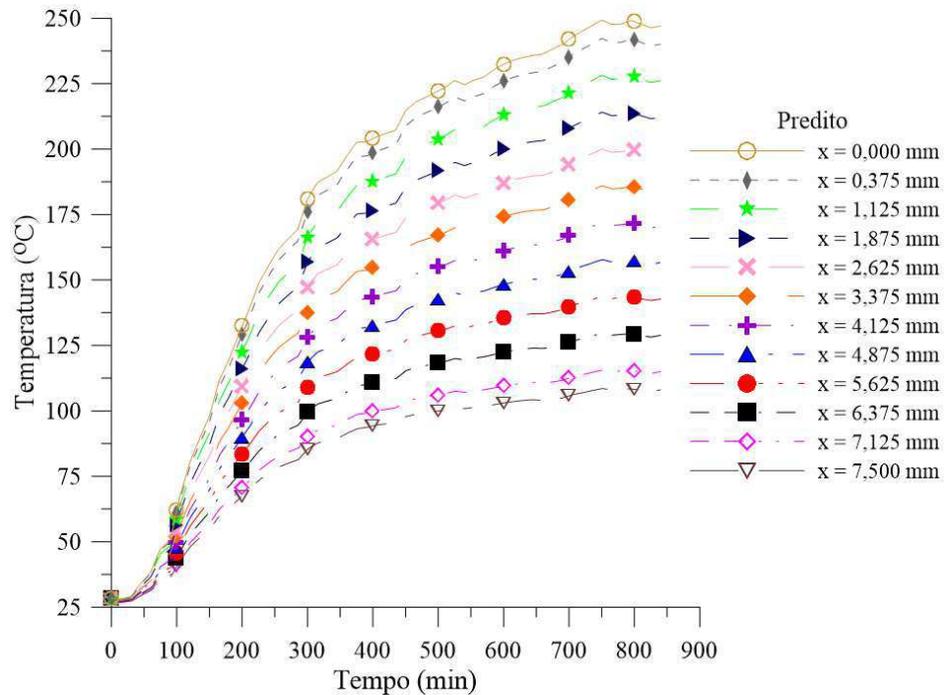


Figura C.21 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

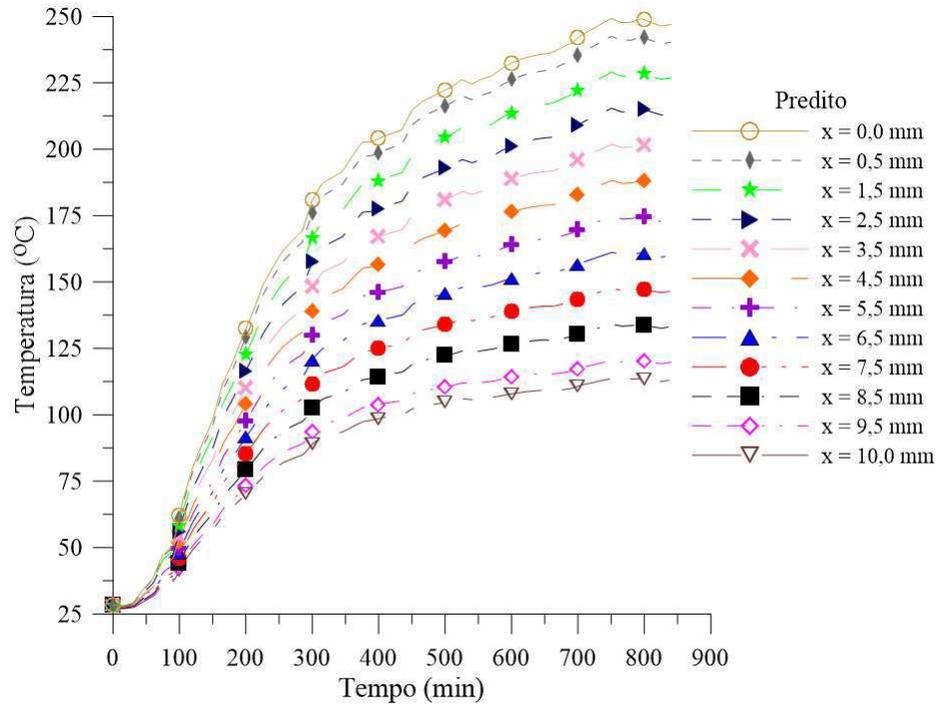


Figura C.22 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

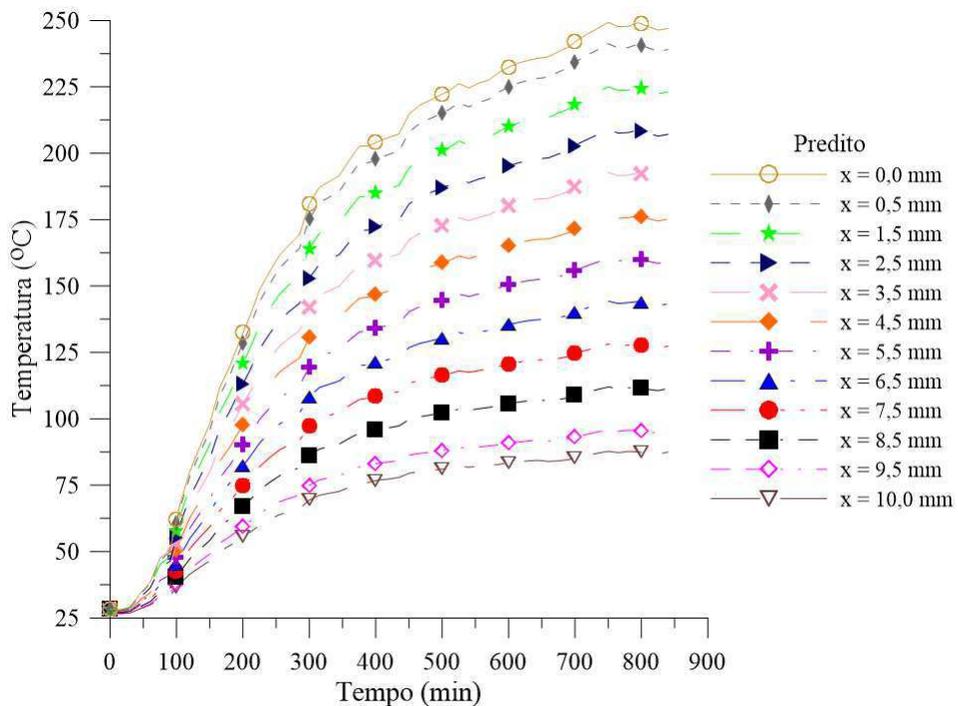


Figura C.23 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

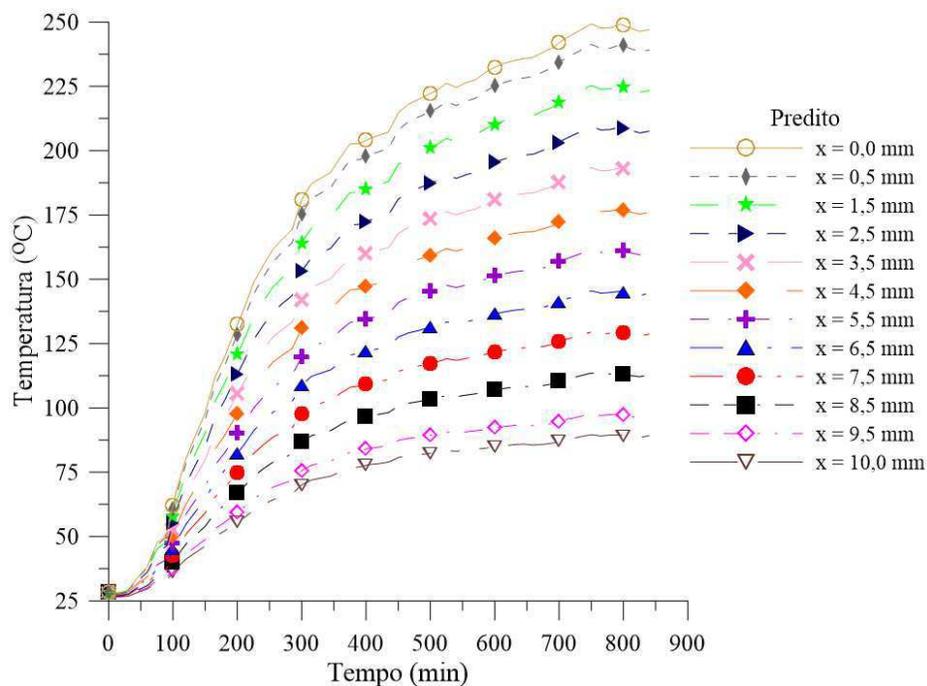


Figura C.24 - Temperatura em função do tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

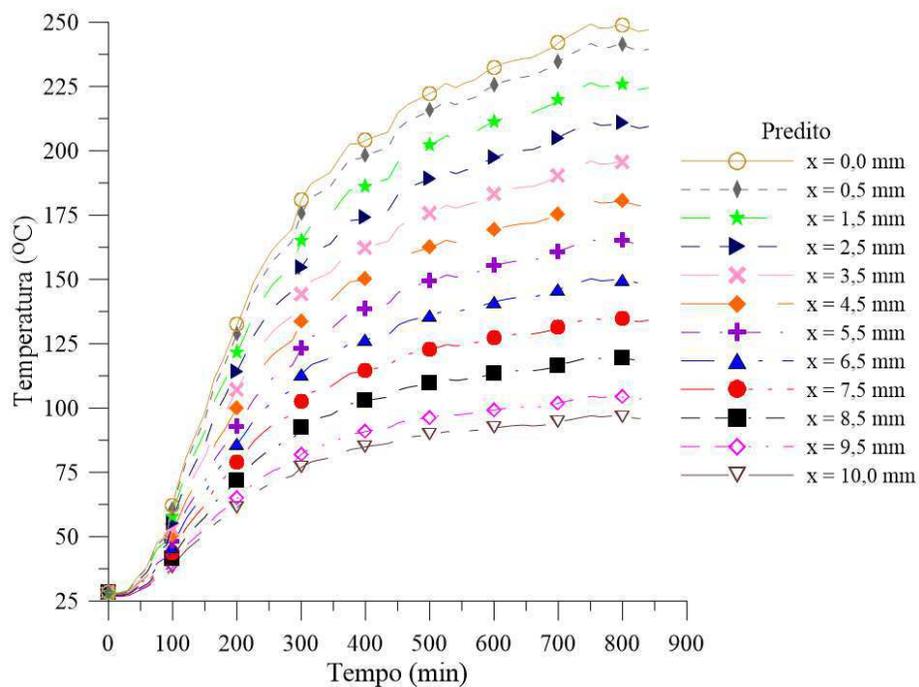


Figura C.25 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

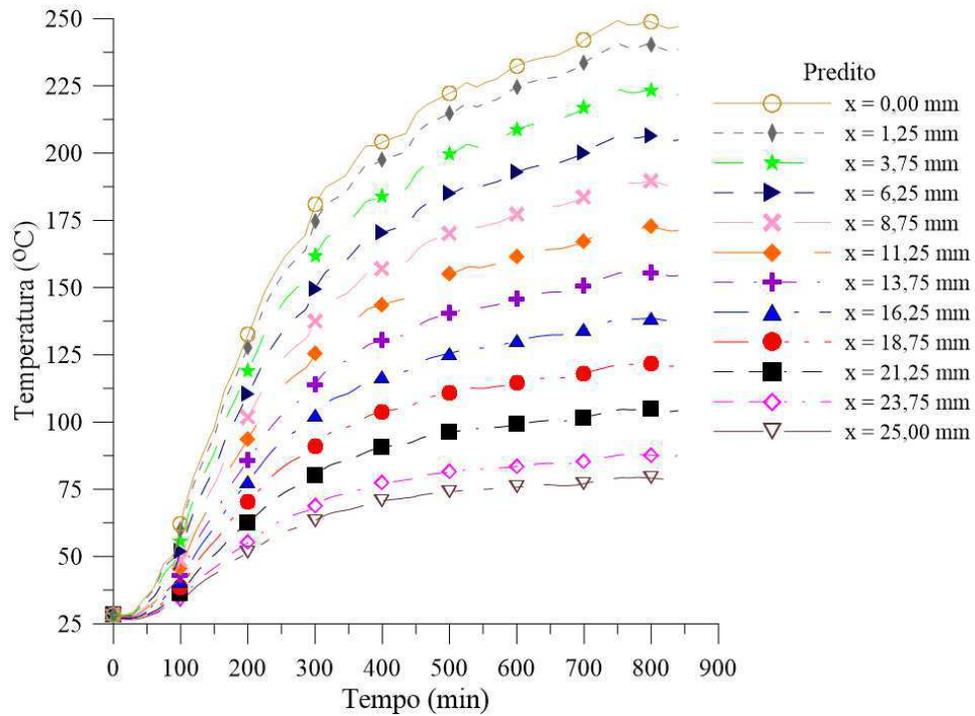


Figura C.26 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

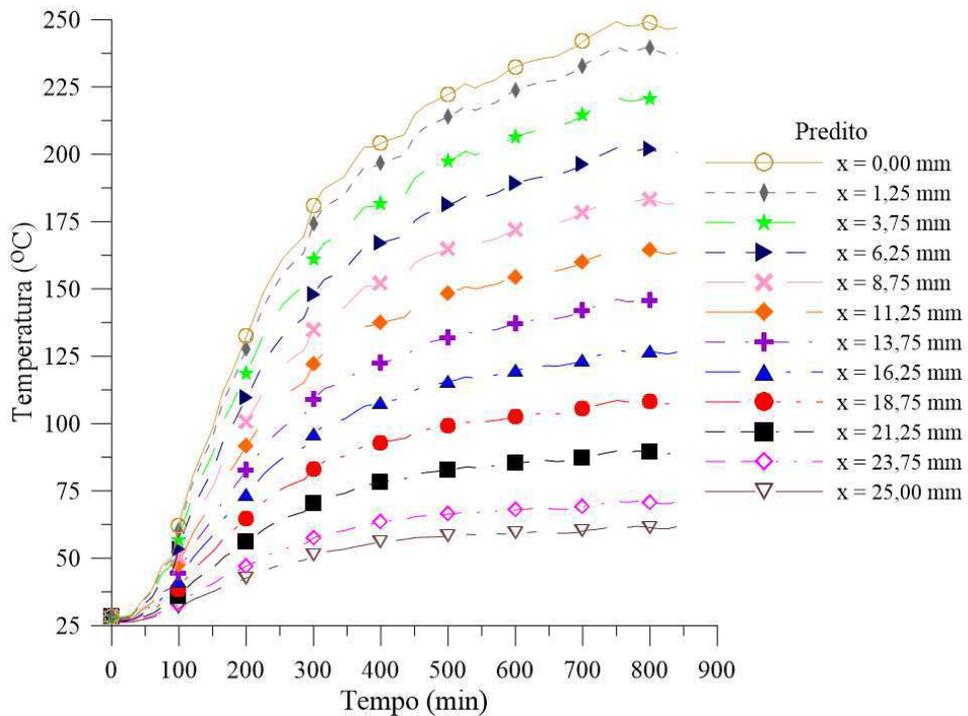


Figura C.27 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

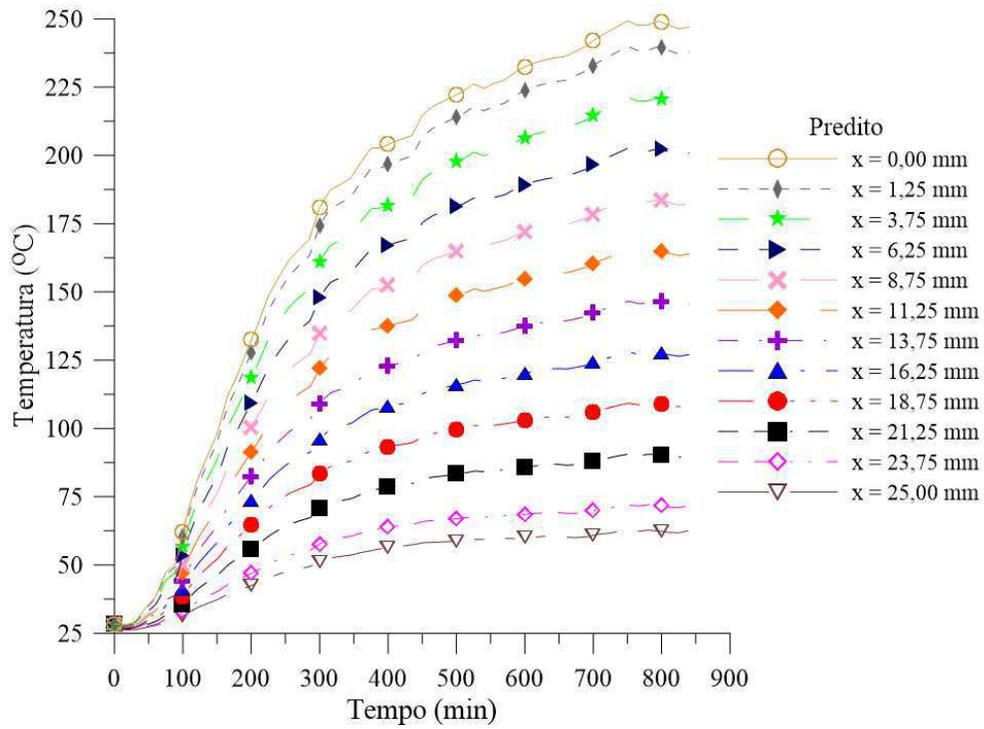


Figura C.28 - Temperatura em função do tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

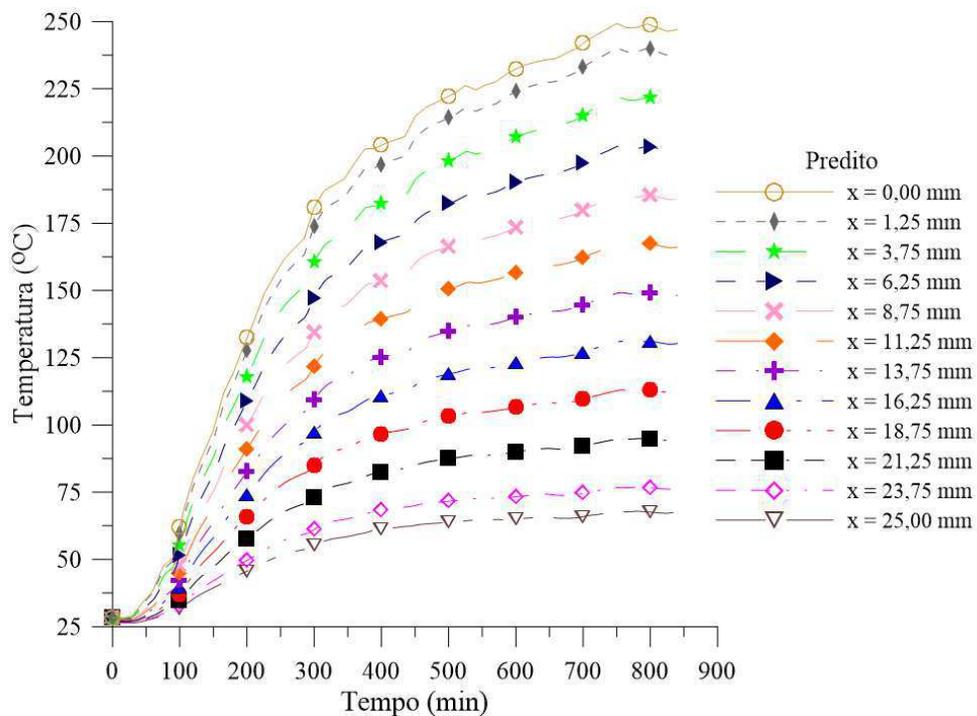


Figura C.29 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

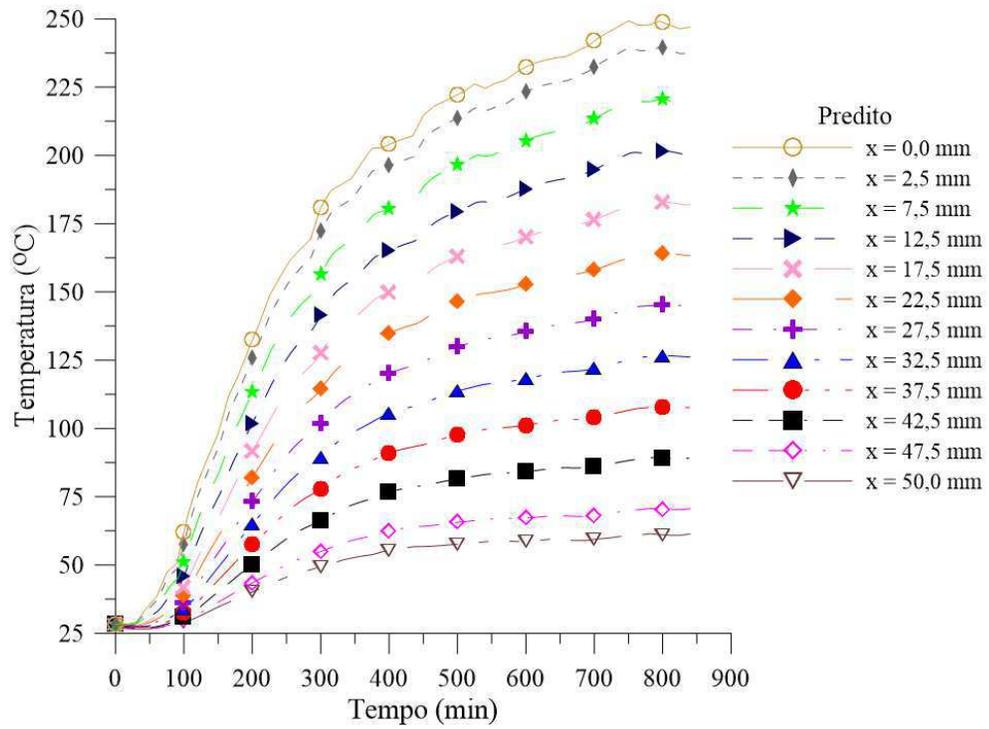


Figura C.30 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

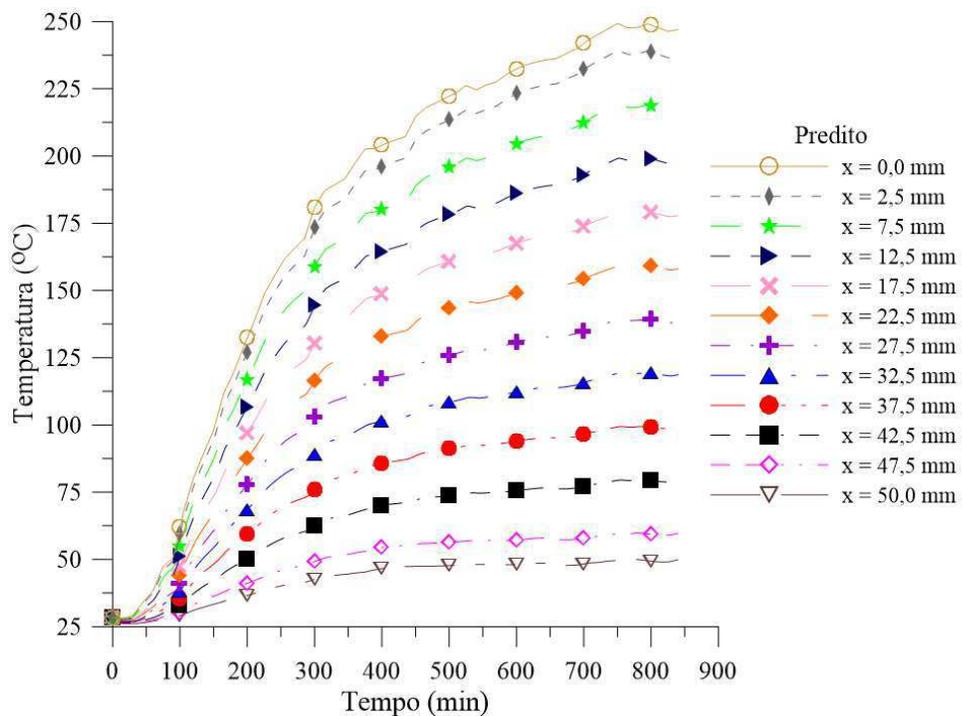


Figura C.31 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

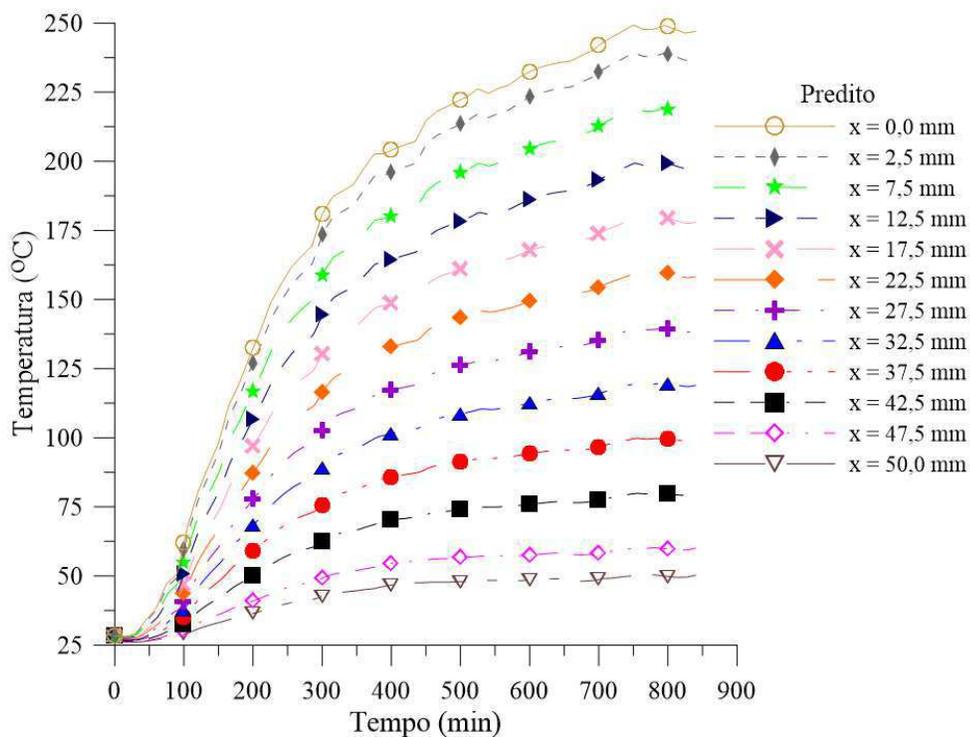


Figura C.32 - Temperatura em função do tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

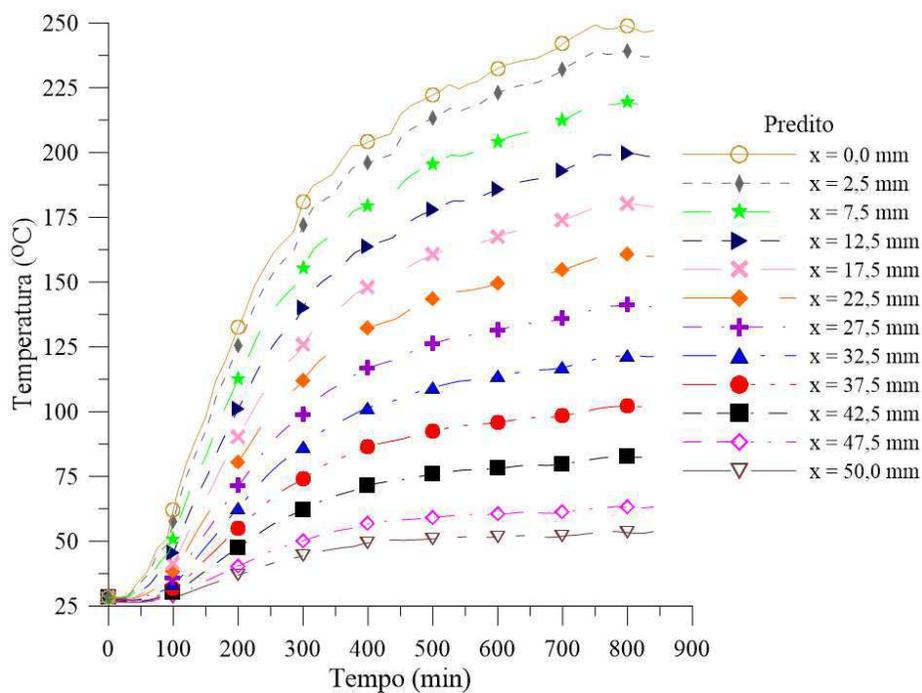


Figura C.33 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

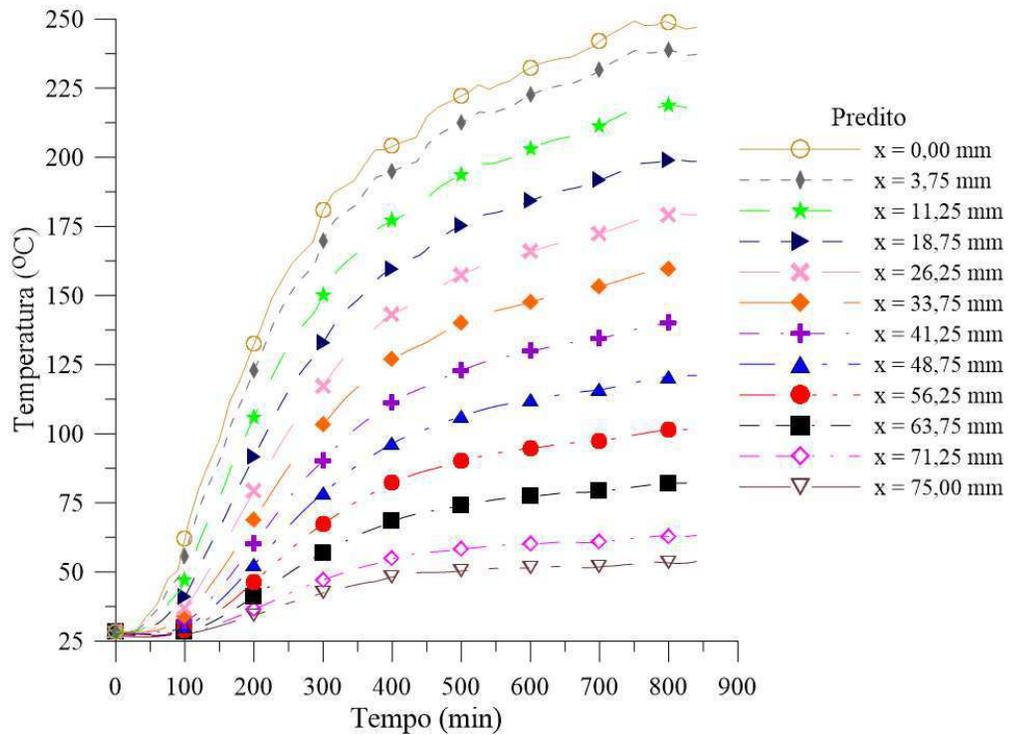


Figura C.34 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

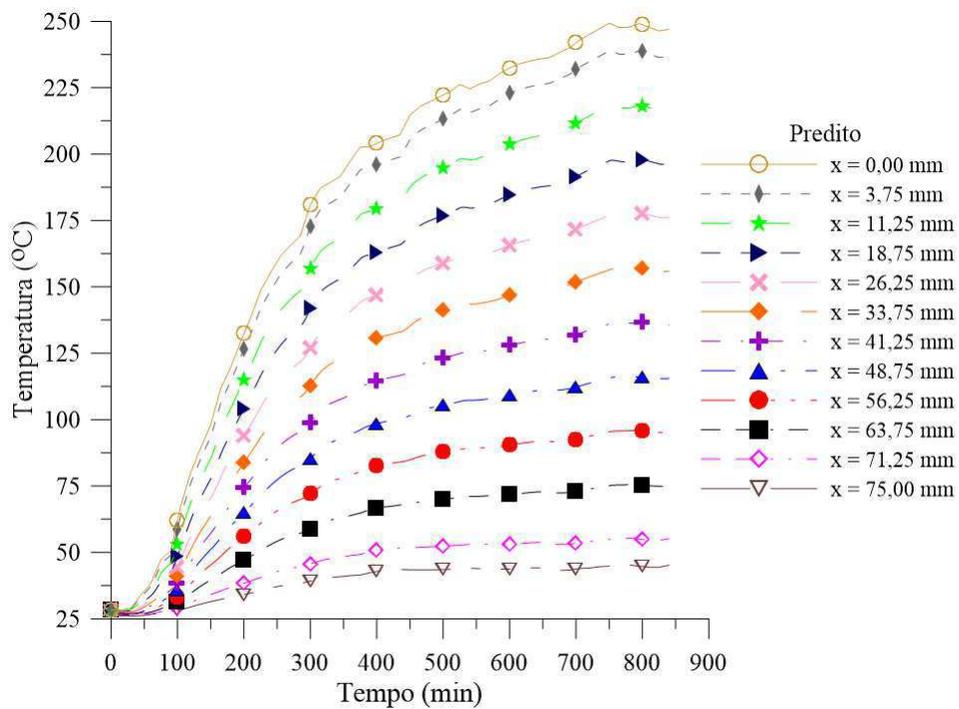


Figura C.35 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

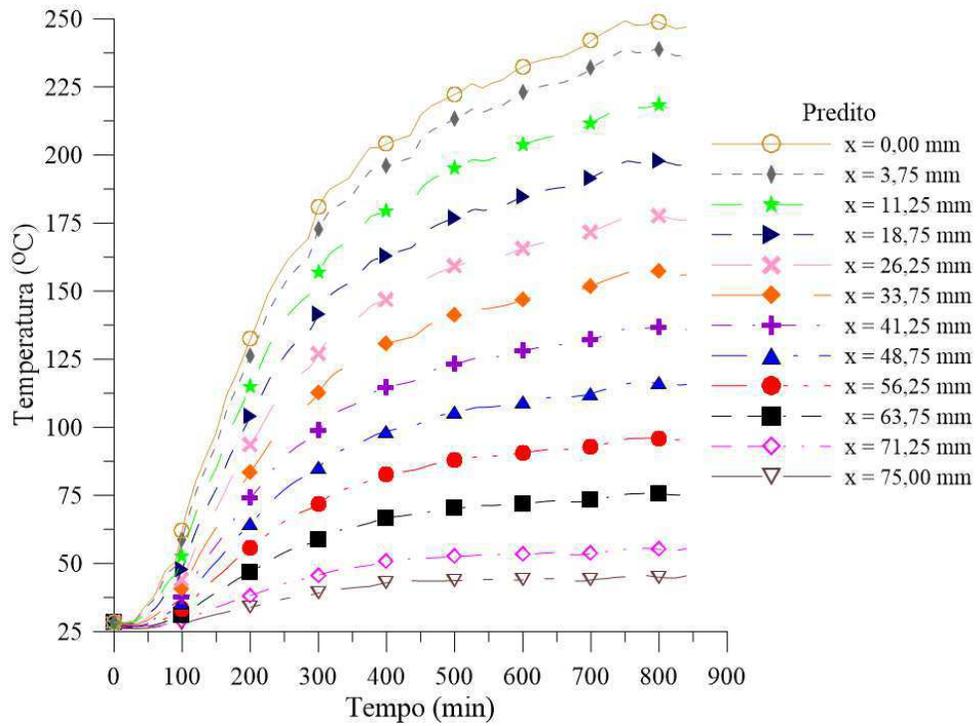


Figura C.36 - Temperatura em função do tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.

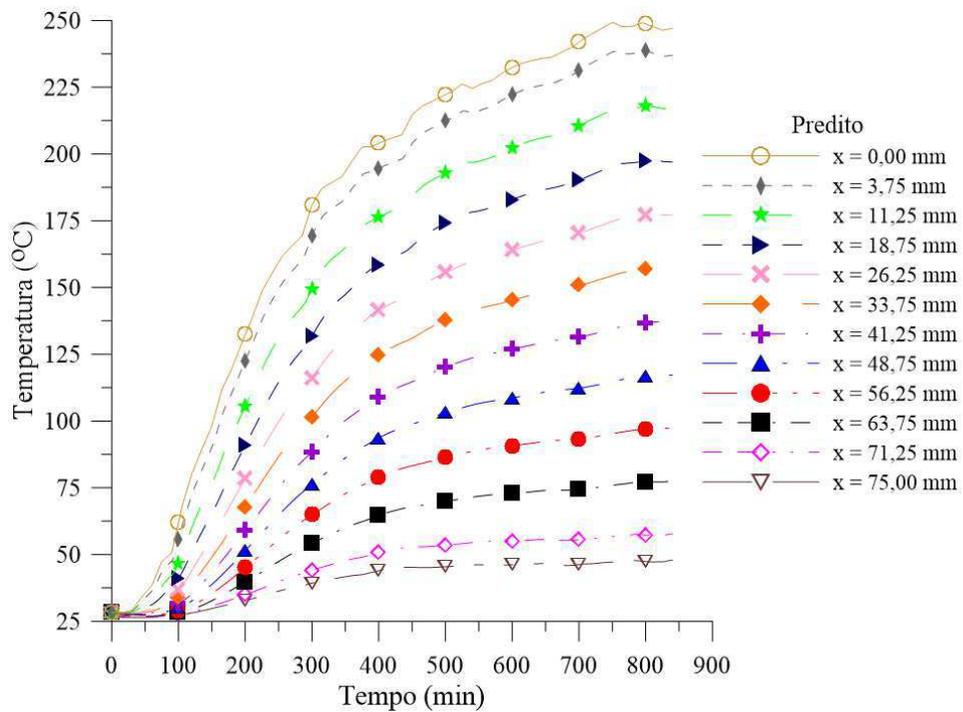


Figura C.37 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica como isolamento térmico.

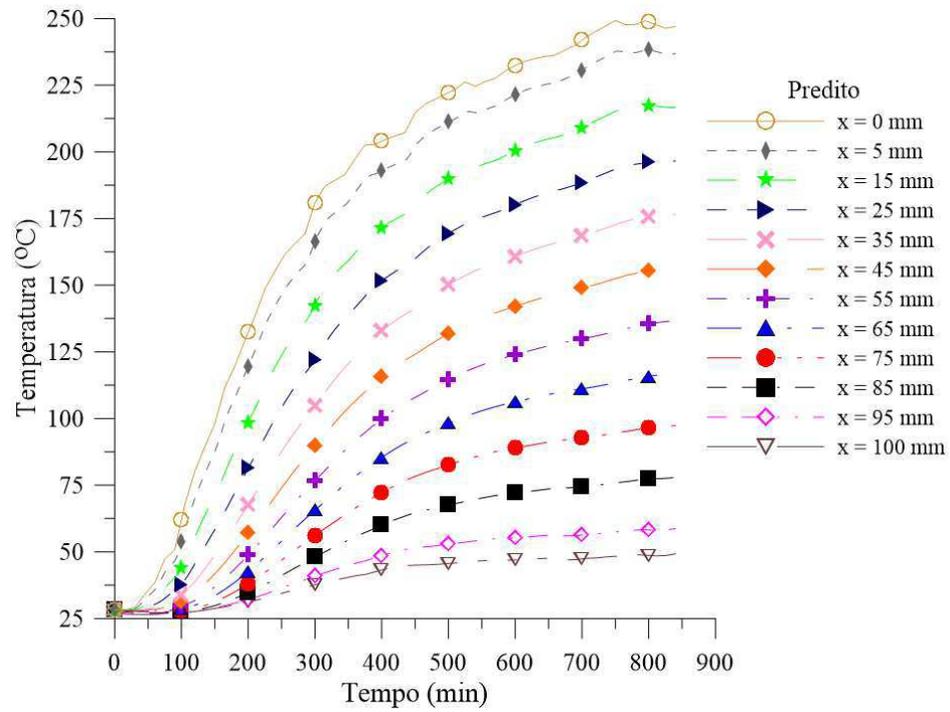


Figura C.38 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra de vidro como isolamento térmico.

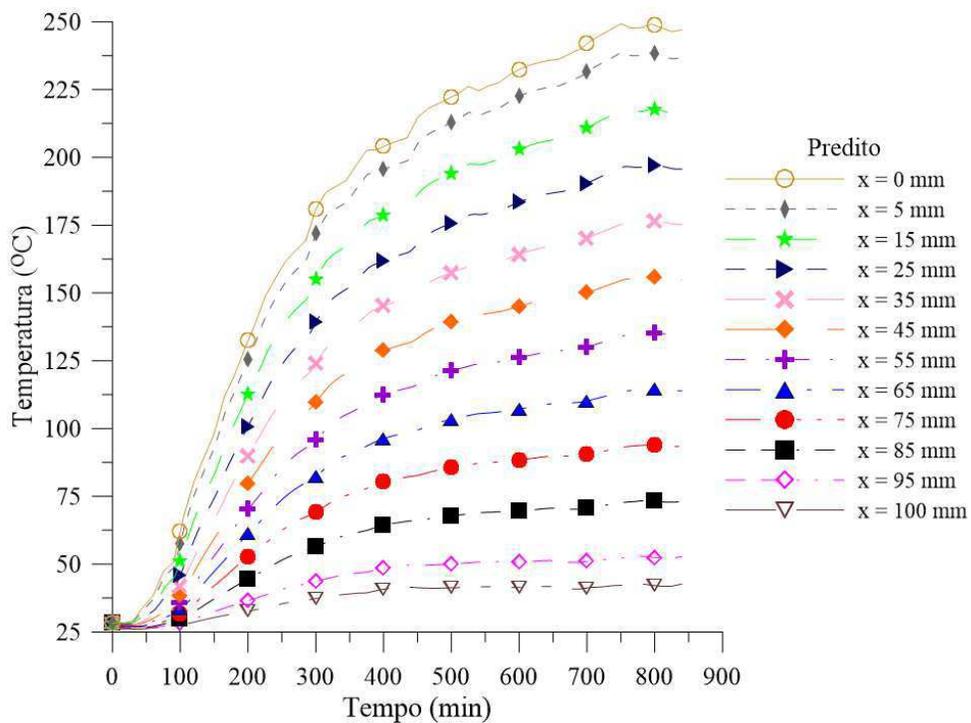


Figura C.39 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de lã de rocha como isolamento térmico.

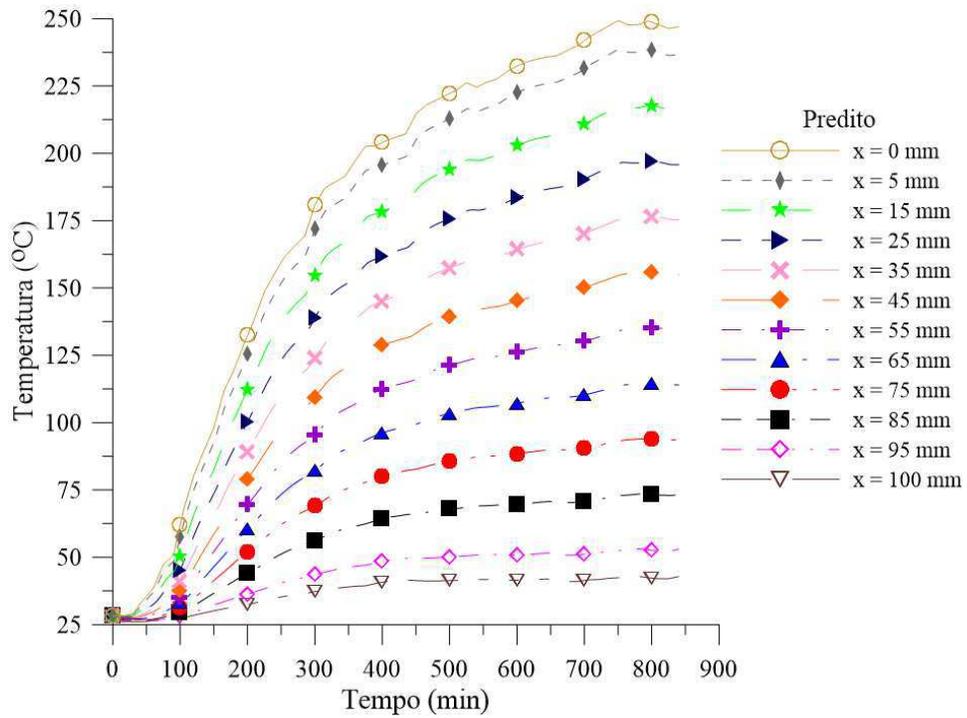
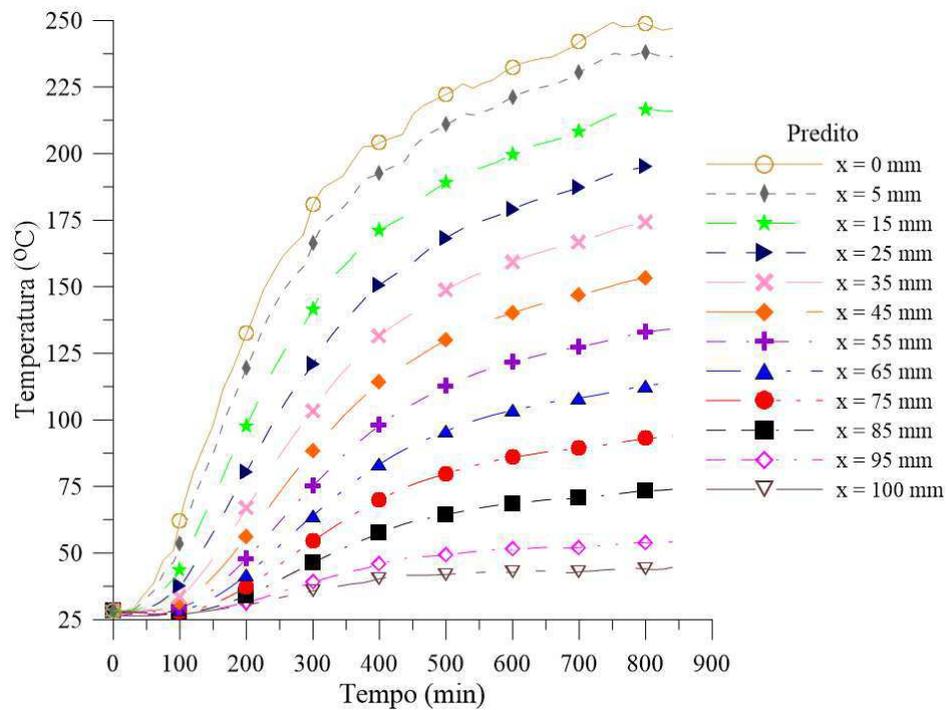


Figura C.40 - Temperatura em função do tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de silicato de cálcio como isolamento térmico.



APÊNDICE D – Temperatura em função do tempo para diversas posições no interior do isolamento térmico

Figura D.1 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra cerâmica.

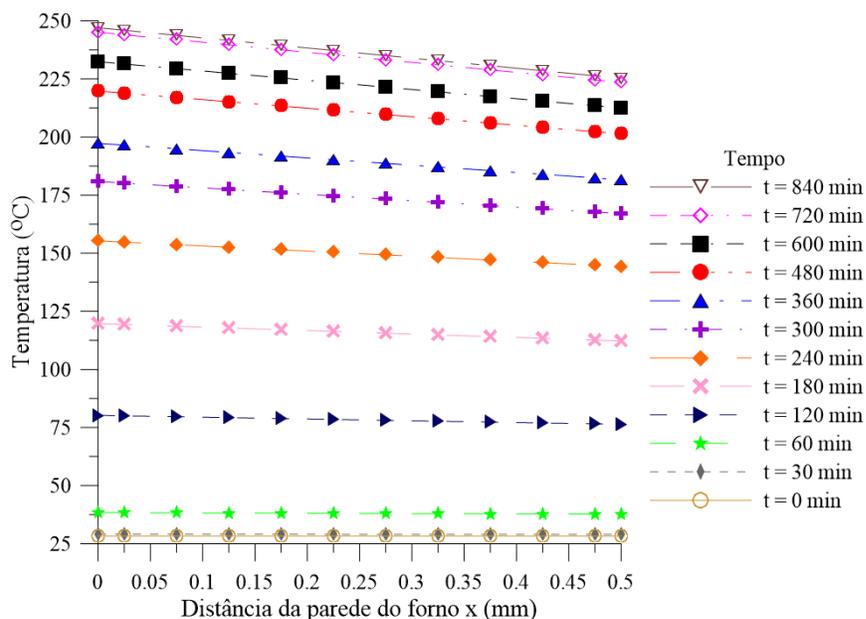


Figura D.2 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de fibra de vidro.

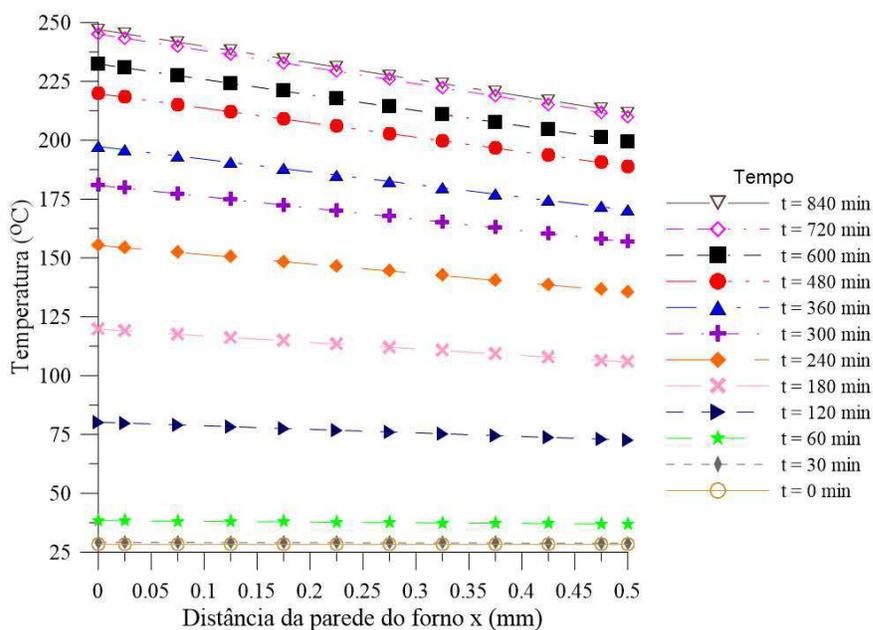


Figura D.3 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de lã de rocha.

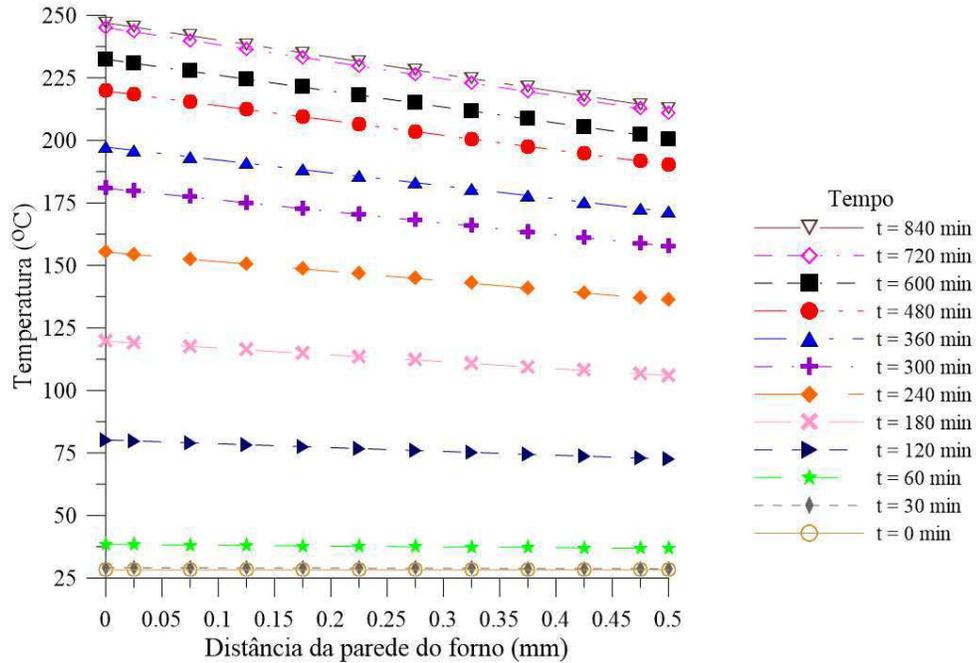


Figura D.4 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 0,5 mm de espessura de silicato de cálcio.

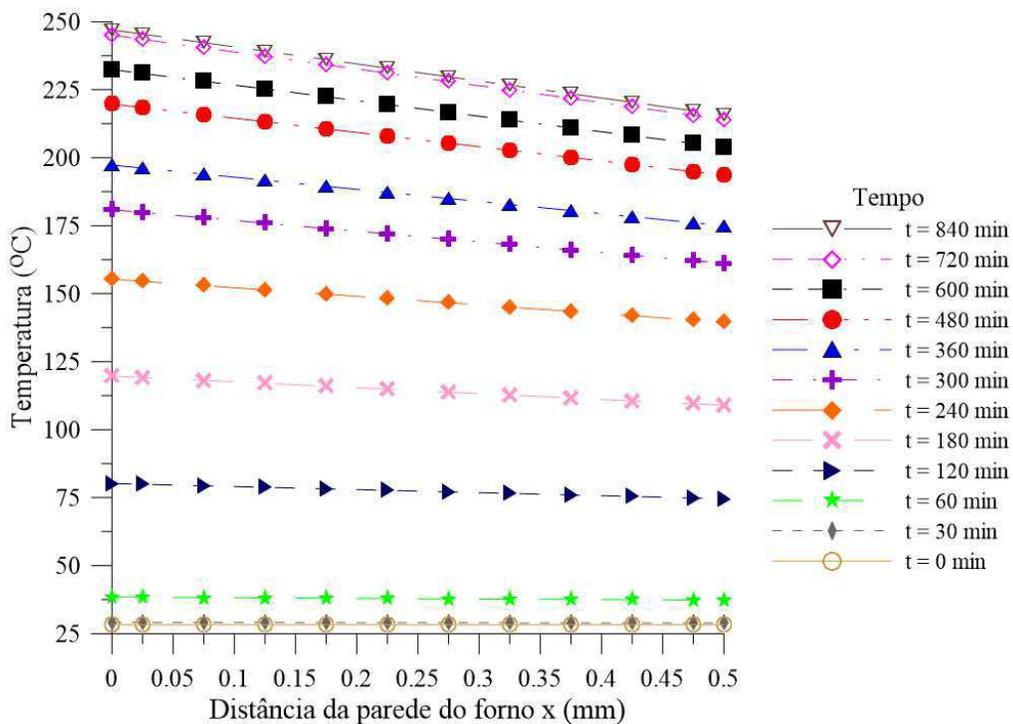


Figura D.5 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra cerâmica.

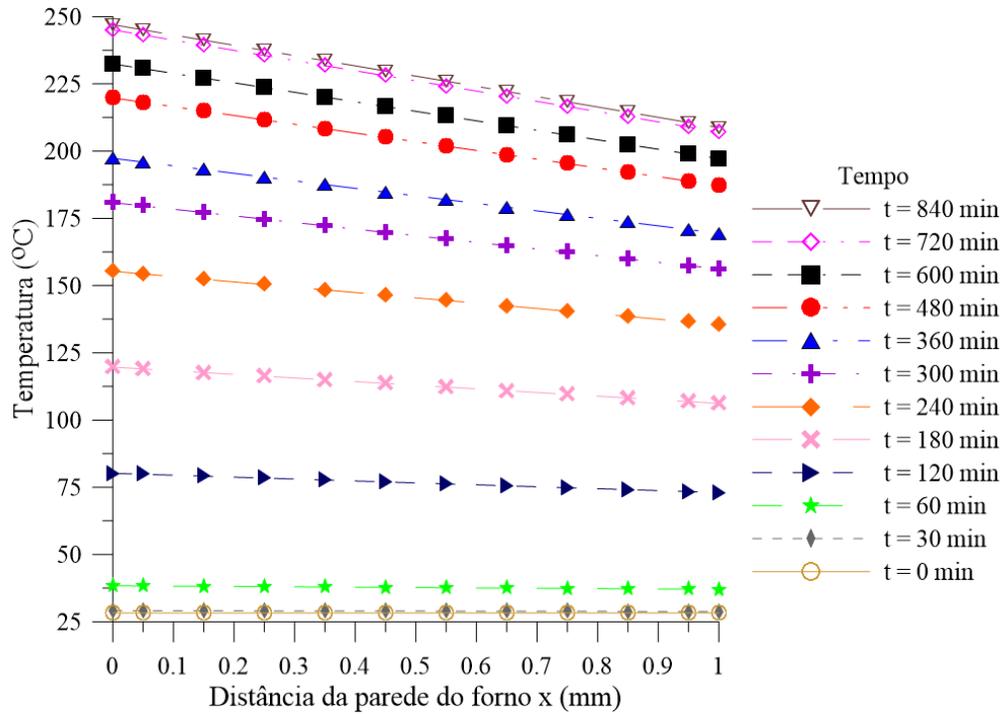


Figura D.6 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de fibra de vidro.

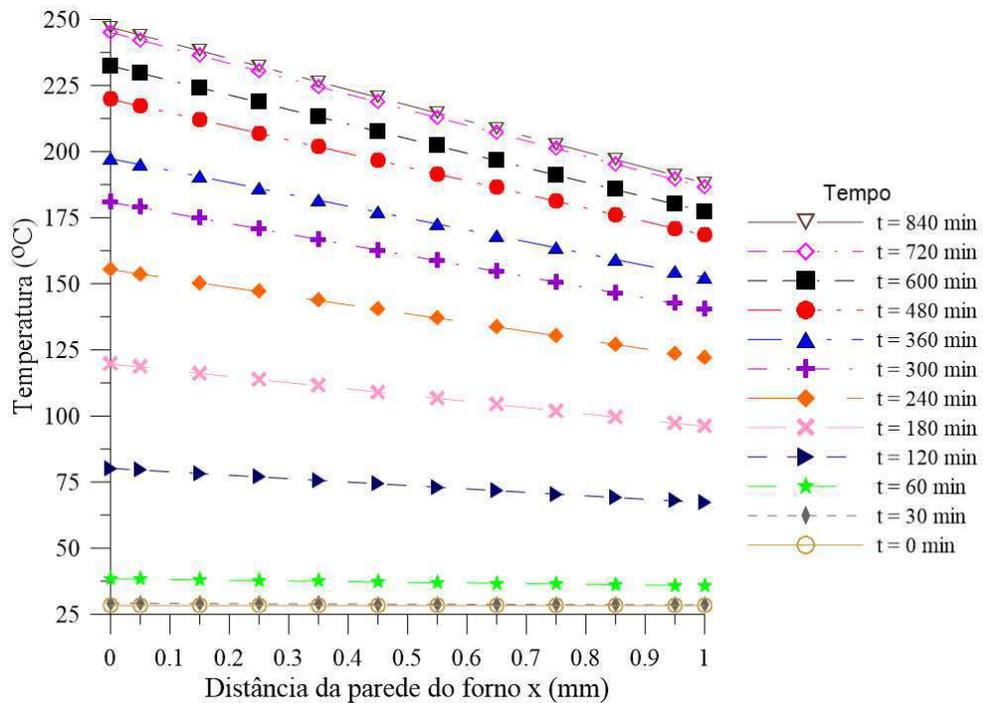


Figura D.7 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de lã de rocha.

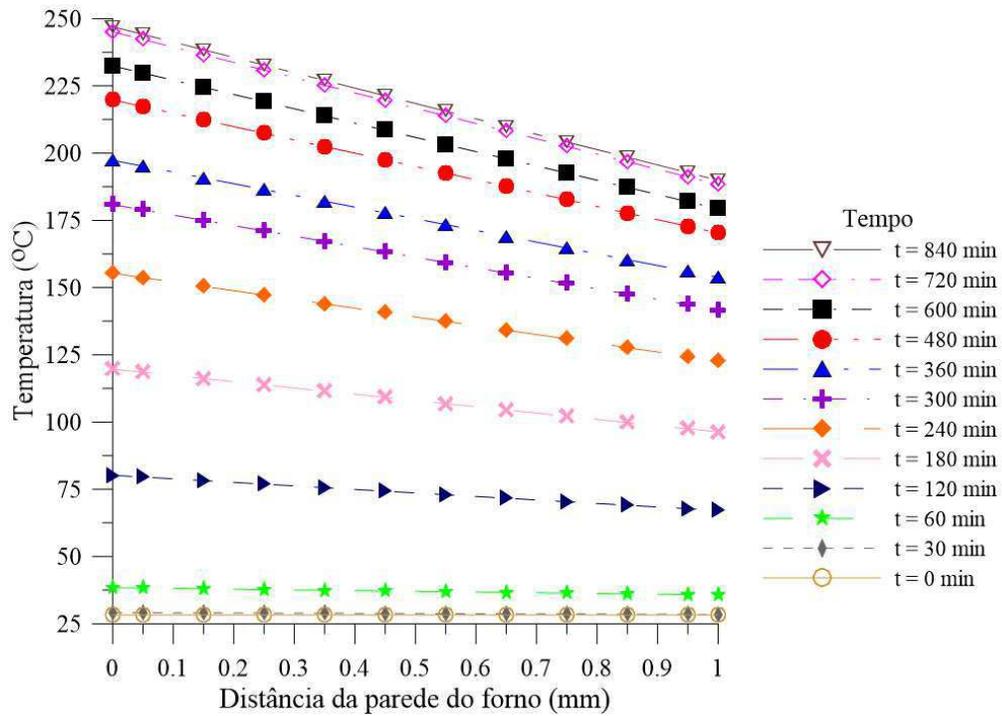


Figura D.8 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 1,0 mm de espessura de silicato de cálcio.

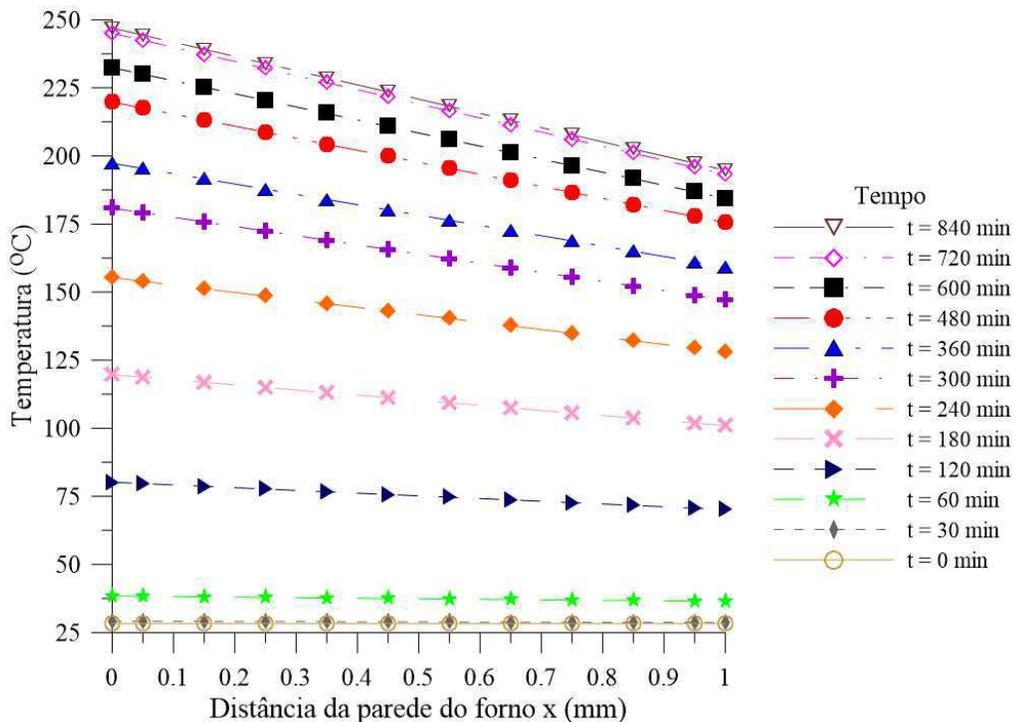


Figura D.9 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra cerâmica.

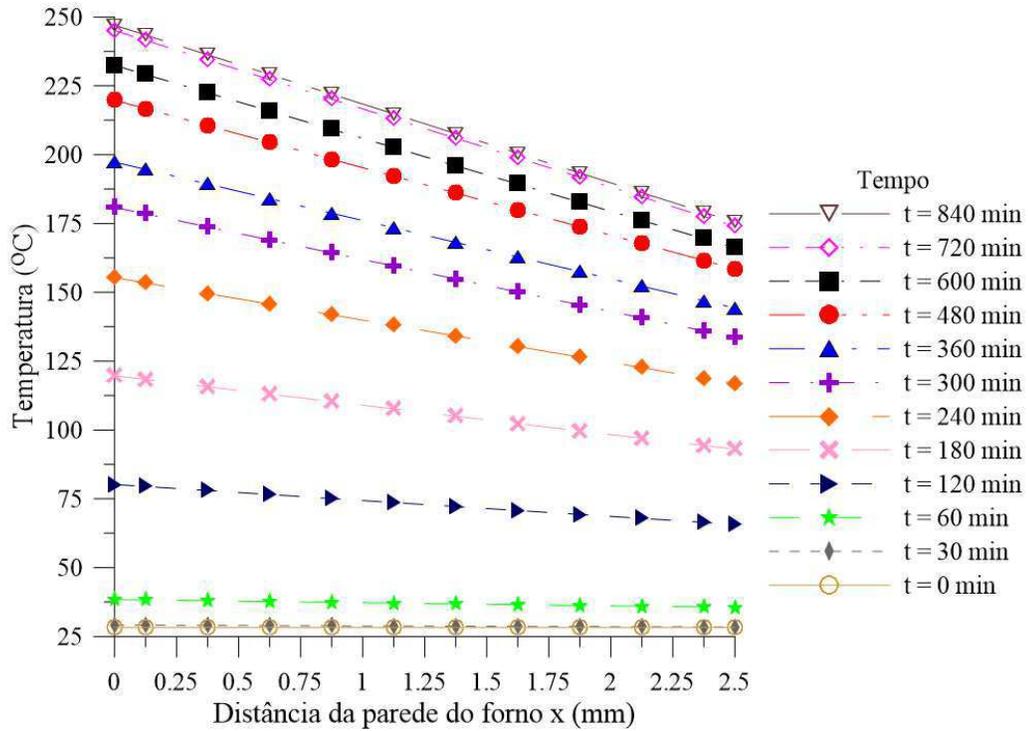


Figura D.10 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de fibra de vidro.

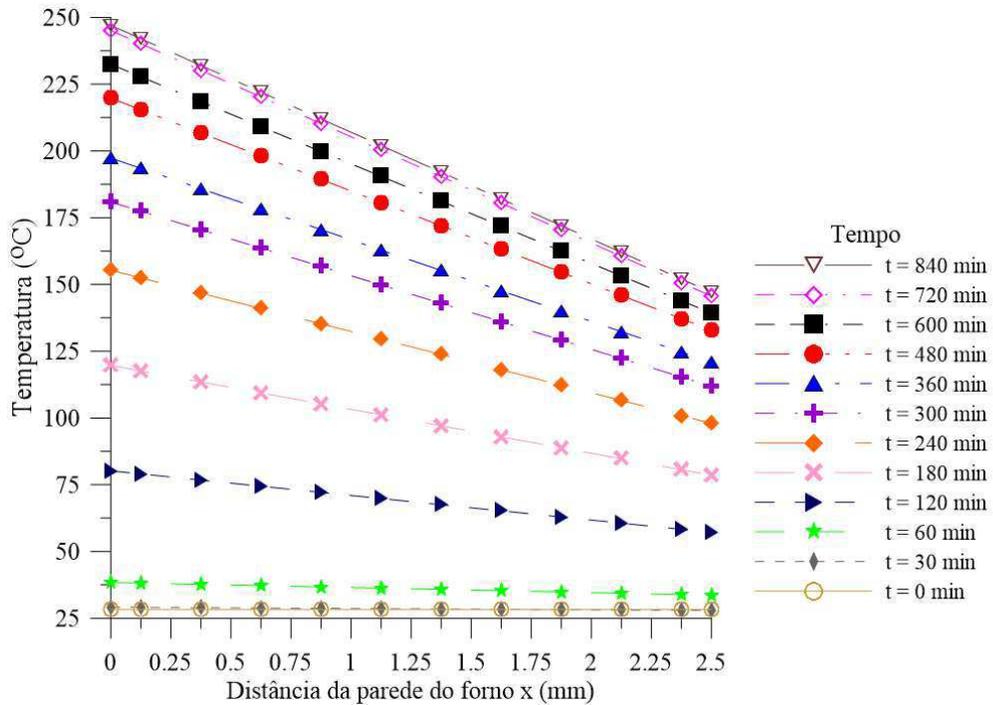


Figura D. 11 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de lã de rocha.

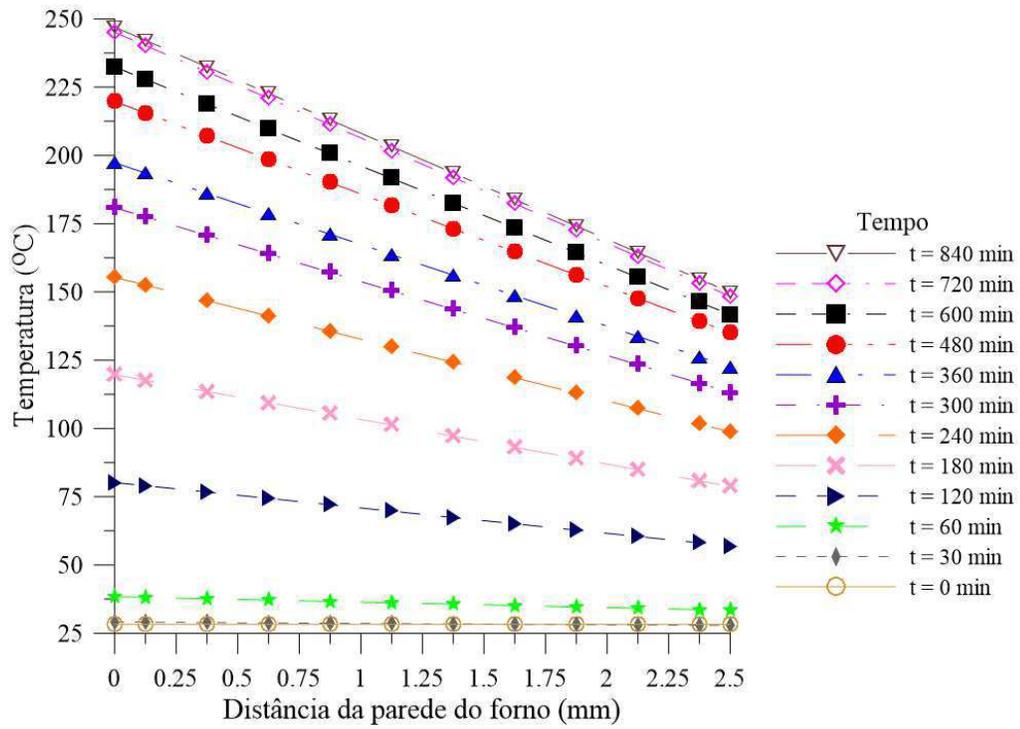


Figura D.12 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 2,5 mm de espessura de silicato de cálcio.

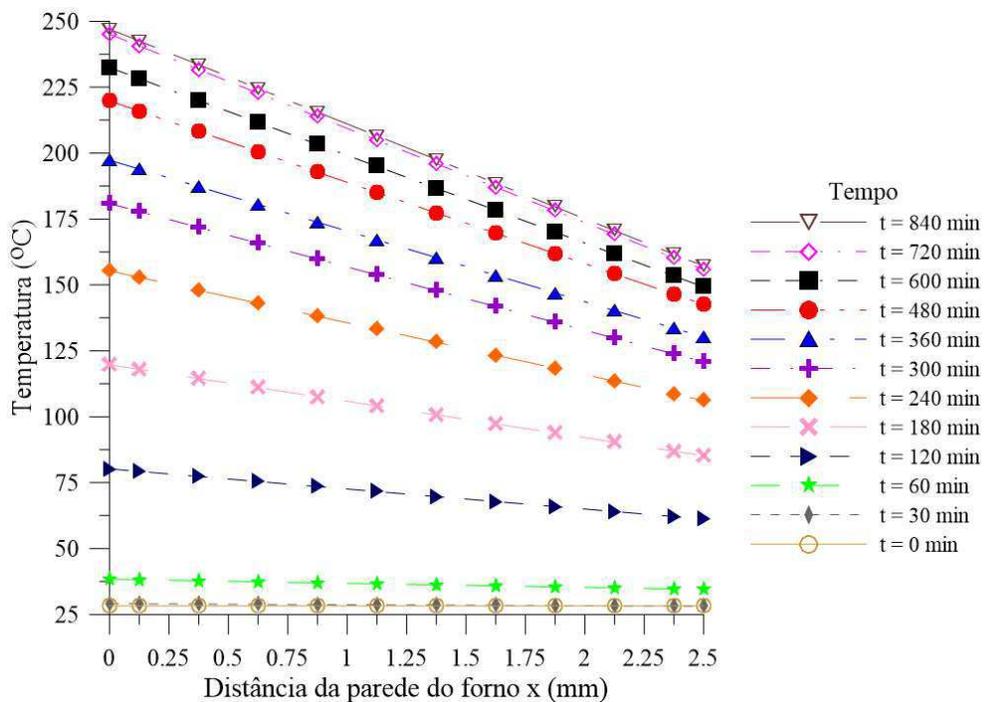


Figura D.13 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra cerâmica.

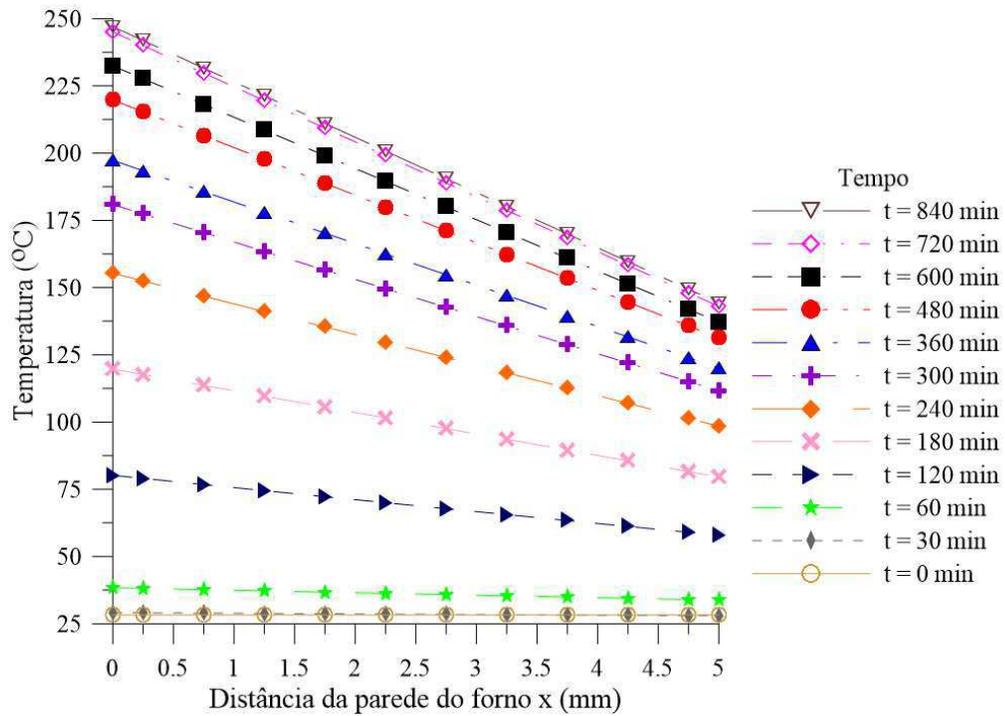


Figura D.14 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de fibra de vidro.

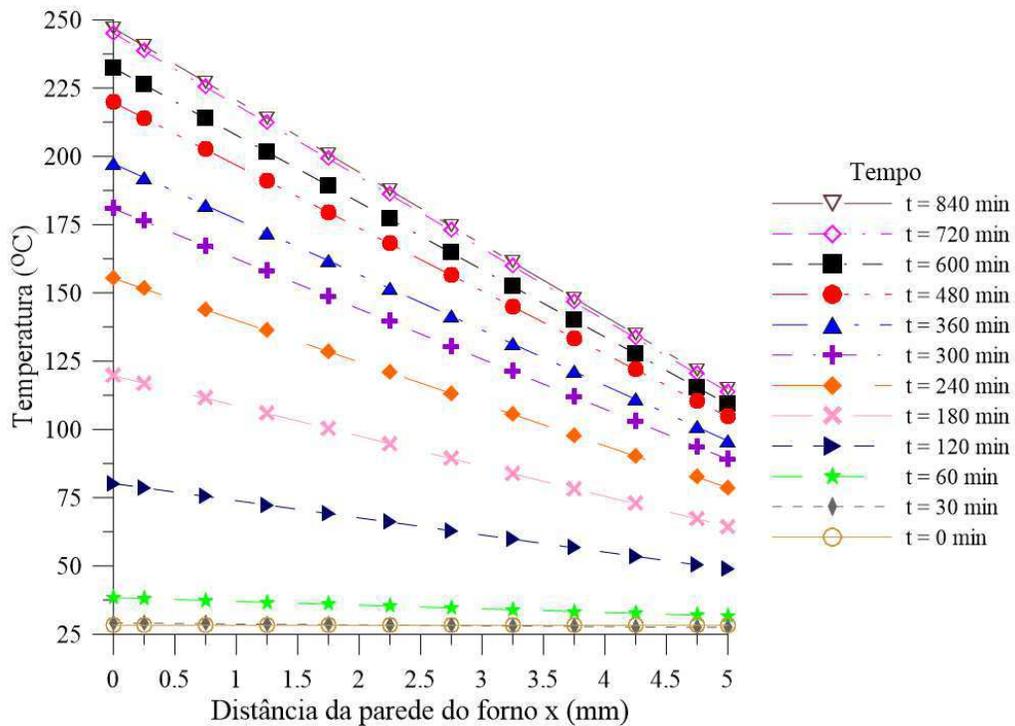


Figura D.15 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de lã de rocha.

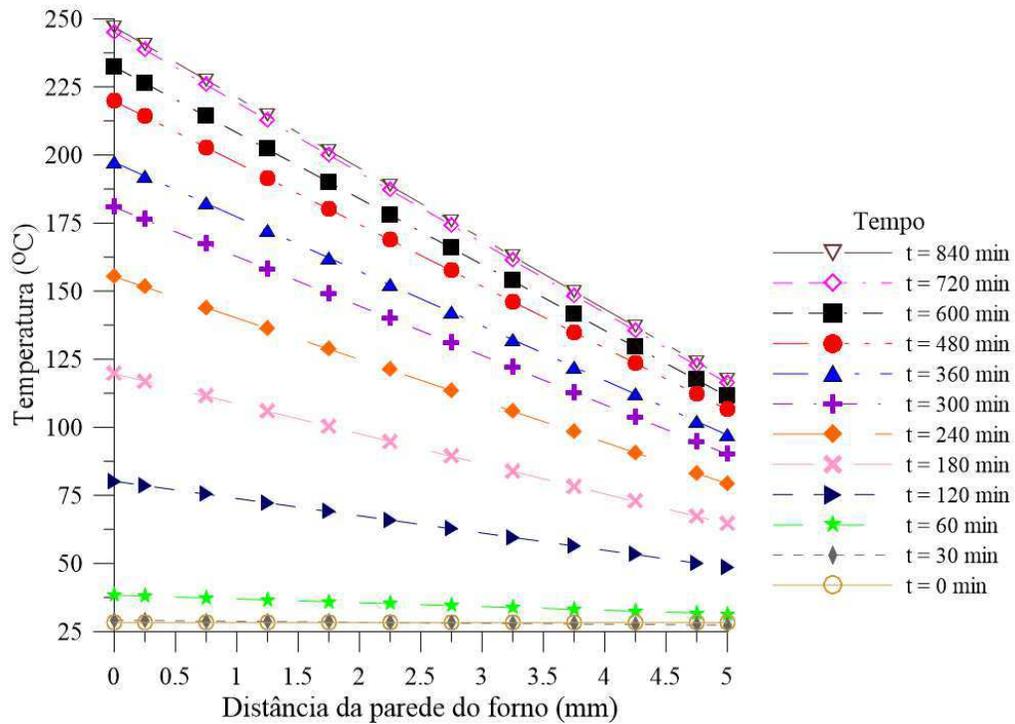


Figura D.16 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 5,0 mm de espessura de silicato de cálcio.

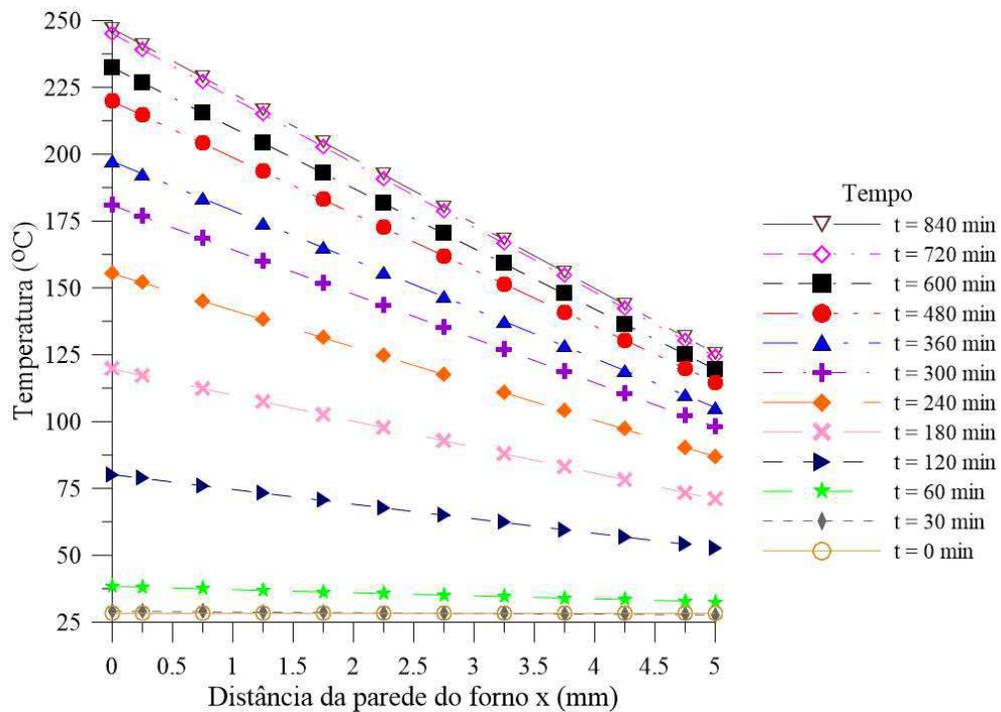


Figura D.17 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra cerâmica.

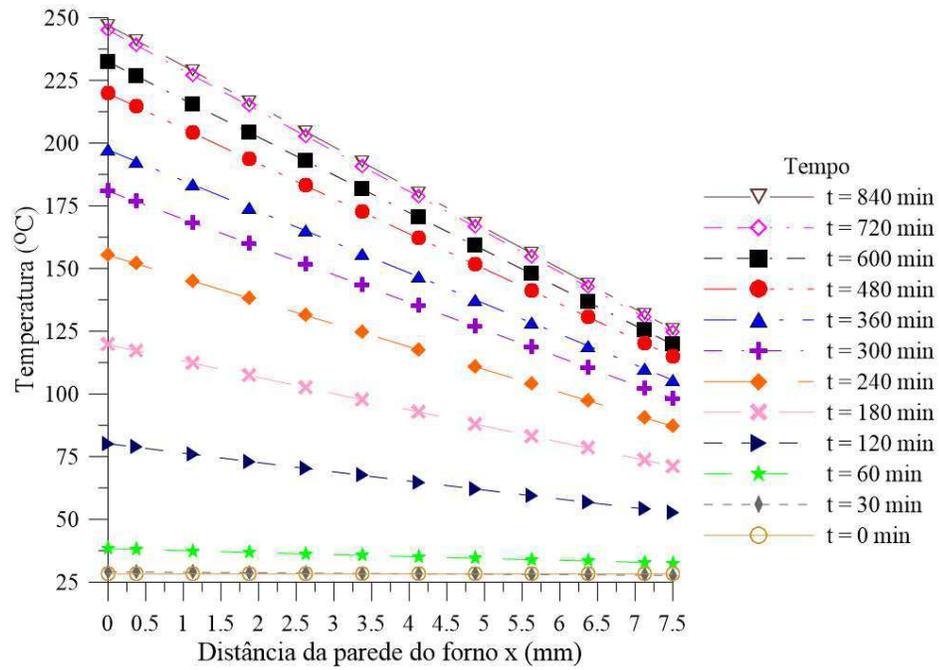


Figura D.18 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de fibra de vidro.

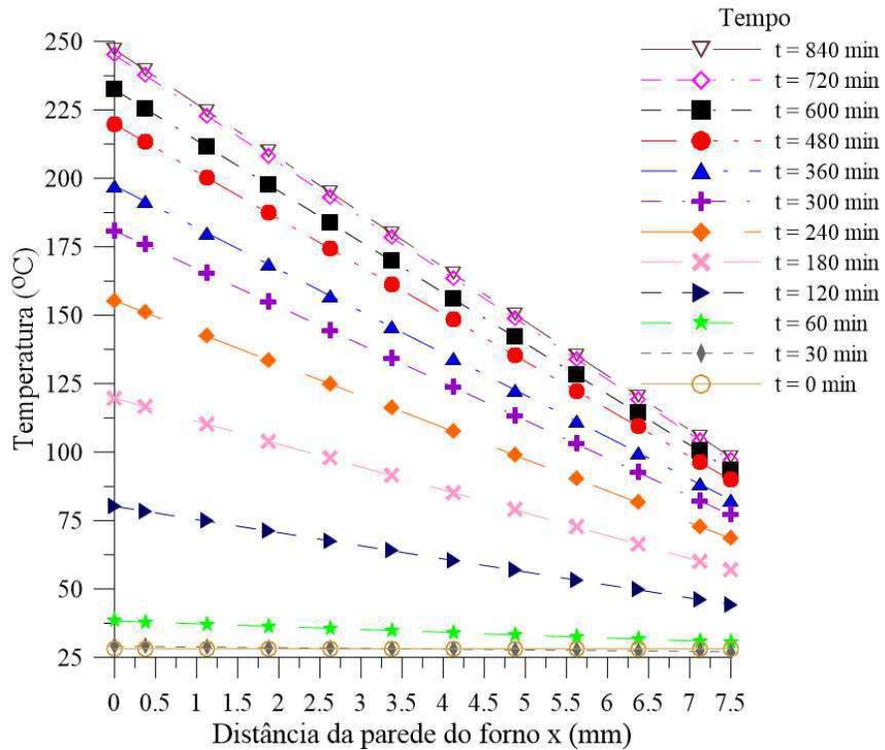


Figura D.19 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de lã de rocha.

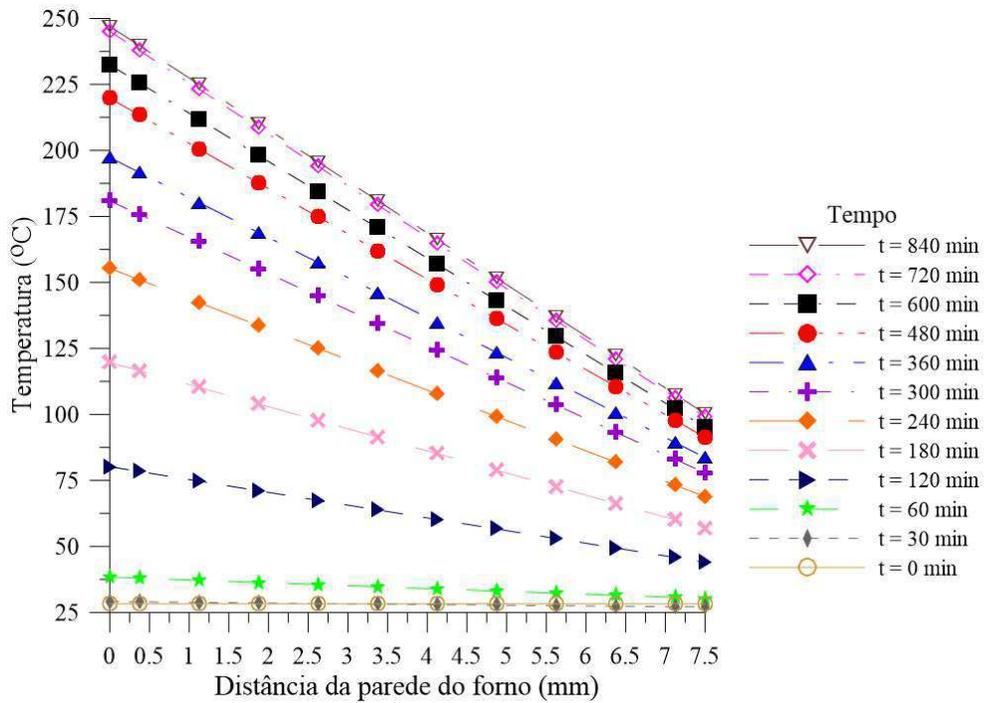


Figura D.20 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 7,5 mm de espessura de silicato de cálcio.

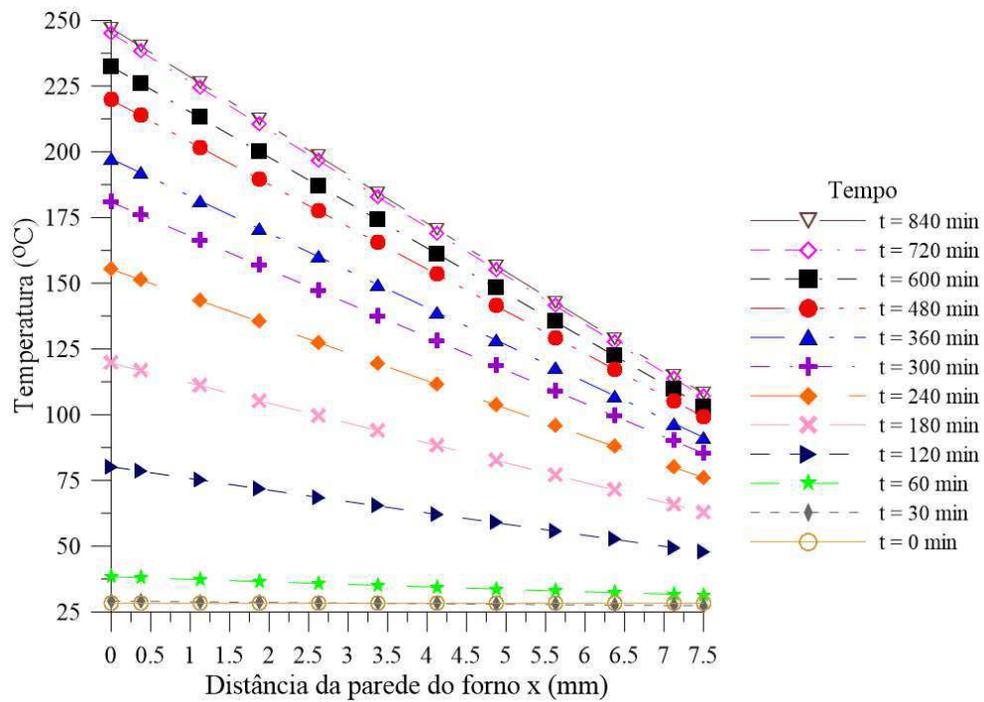


Figura D.21 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra cerâmica.

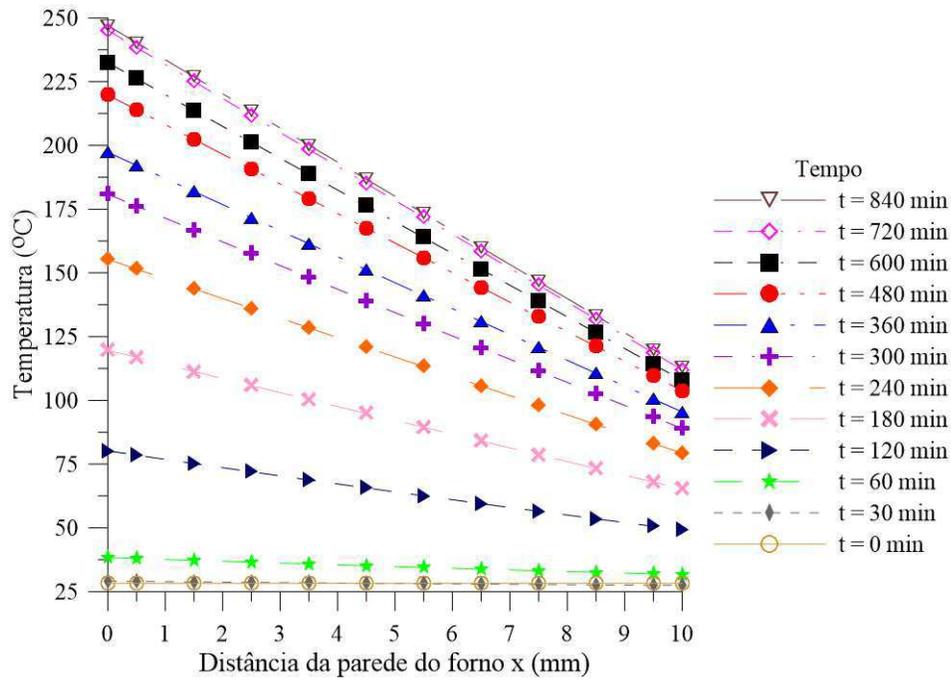


Figura D.22 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de fibra de vidro.

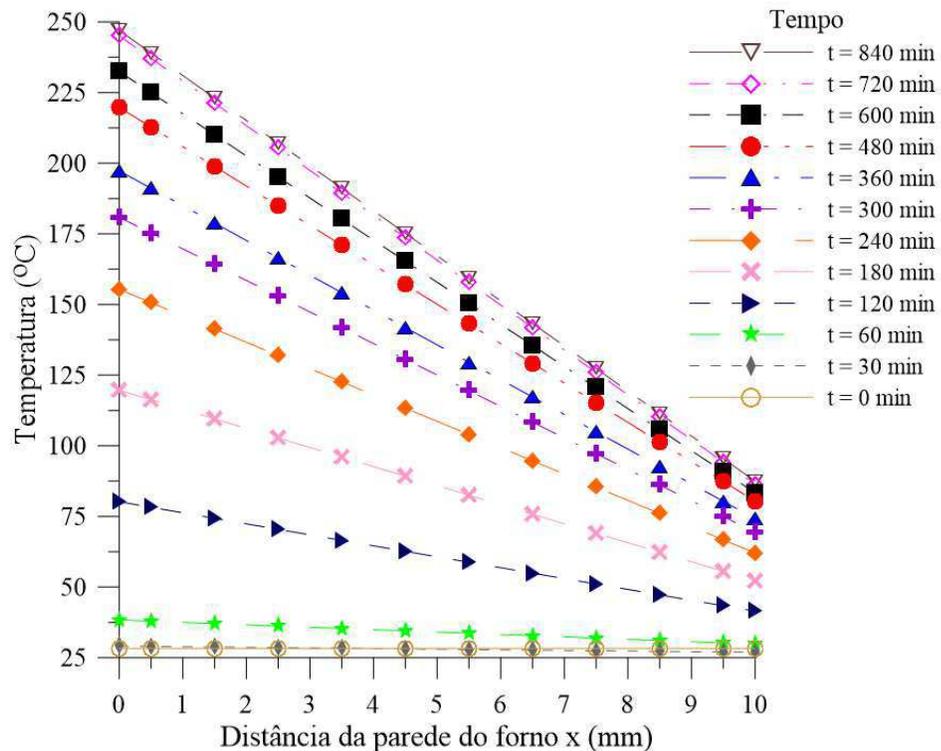


Figura D.23 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de lã de rocha.

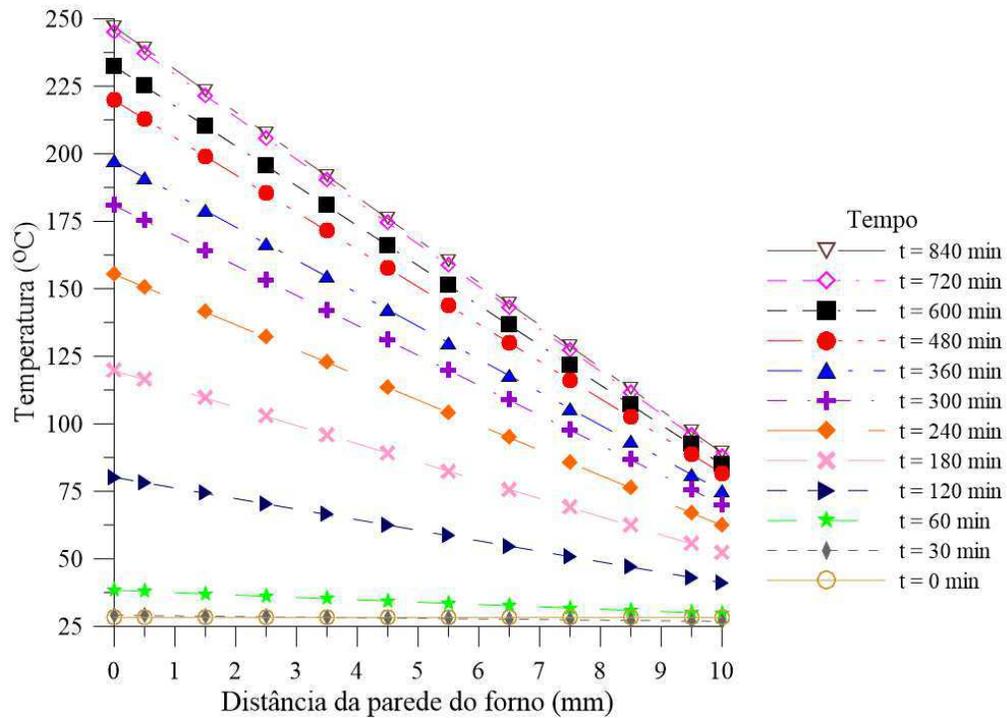


Figura D.24 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 10,0 mm de espessura de silicato de cálcio.

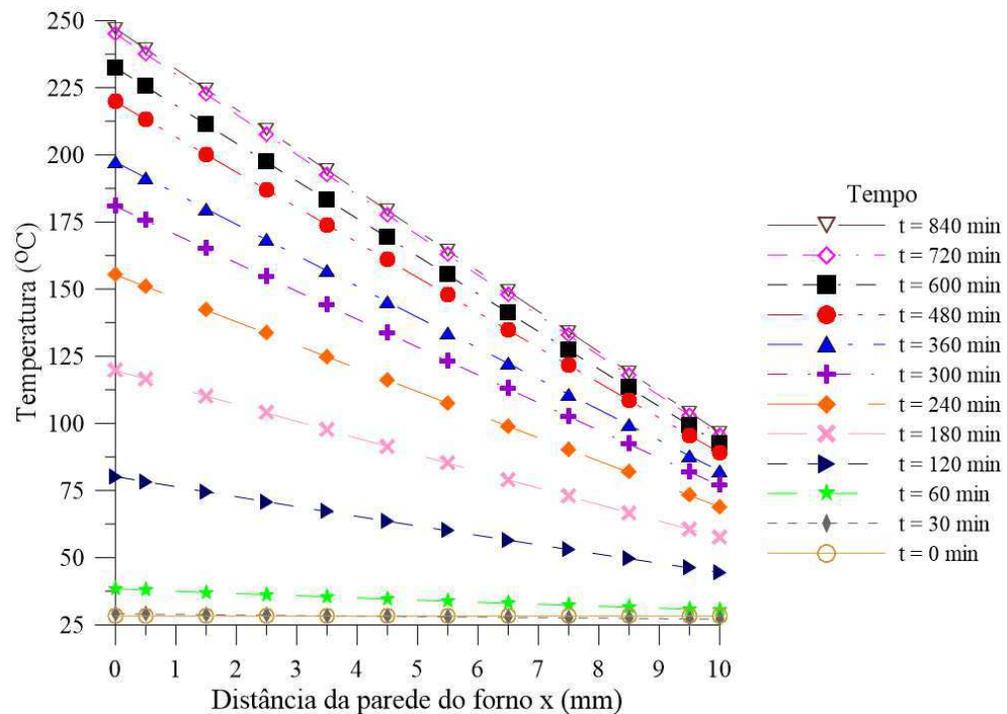


Figura D.25 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra cerâmica.

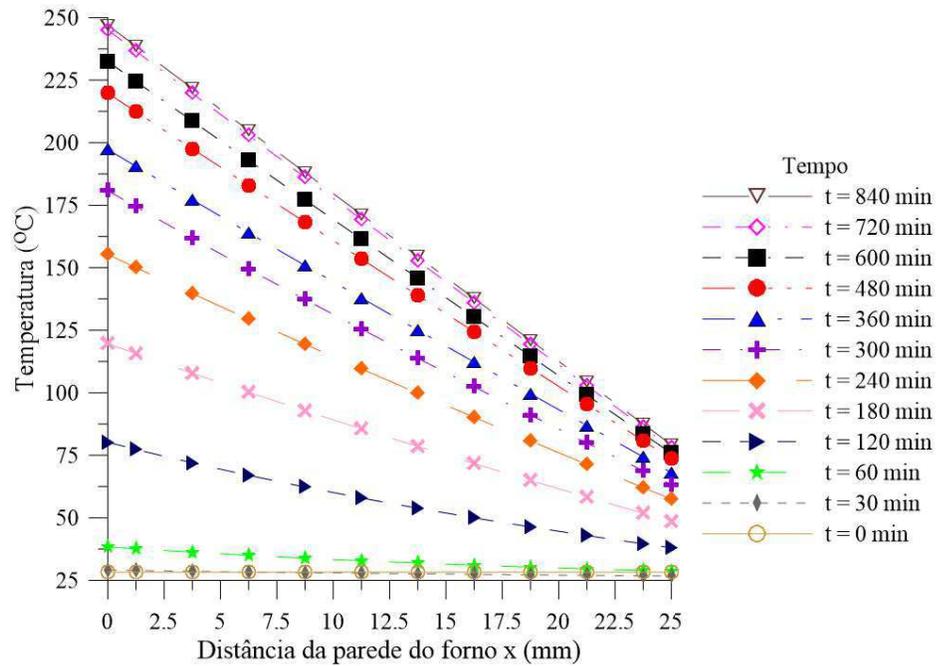


Figura D.26 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de fibra de vidro.

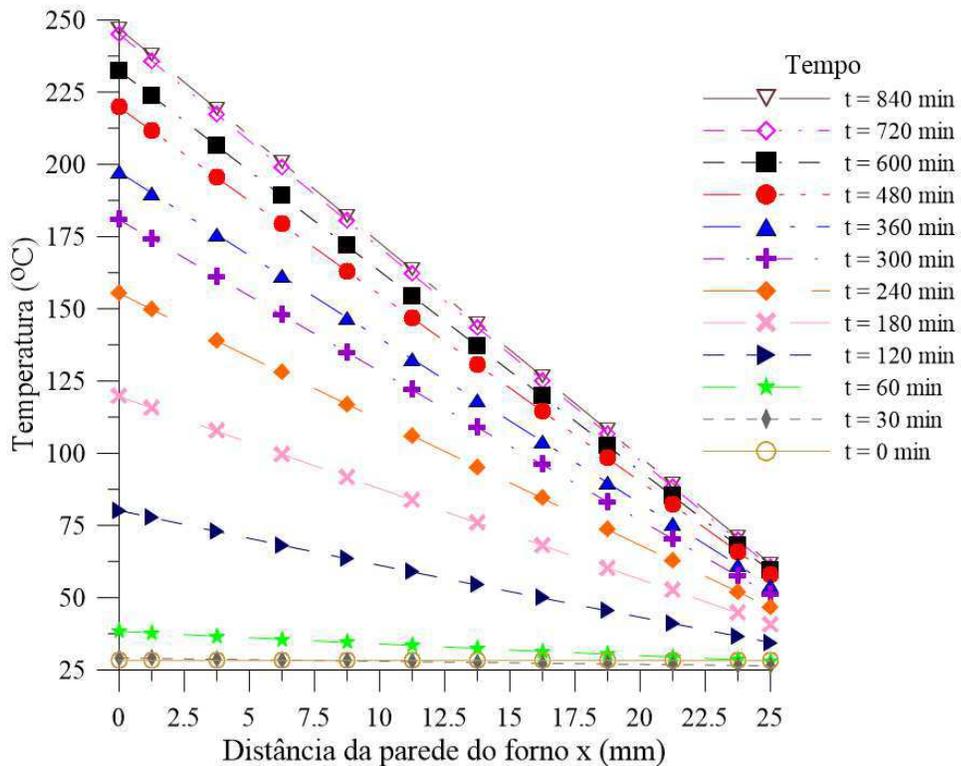


Figura D.27 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de lã de rocha.

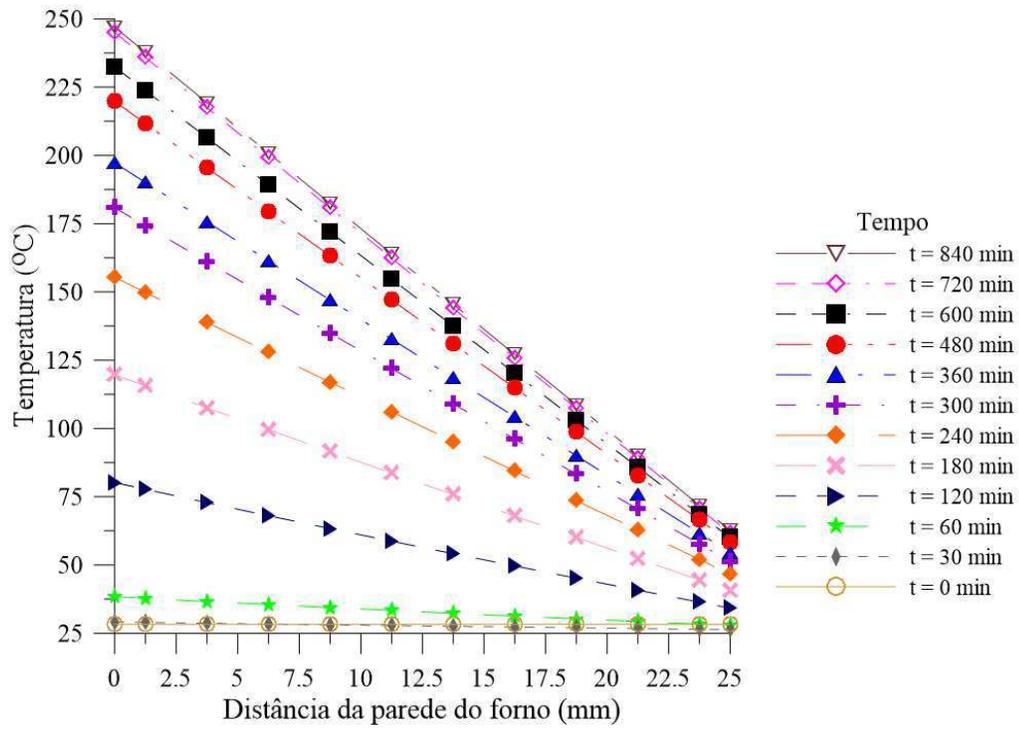


Figura D.28 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 25,0 mm de espessura de silicato de cálcio.

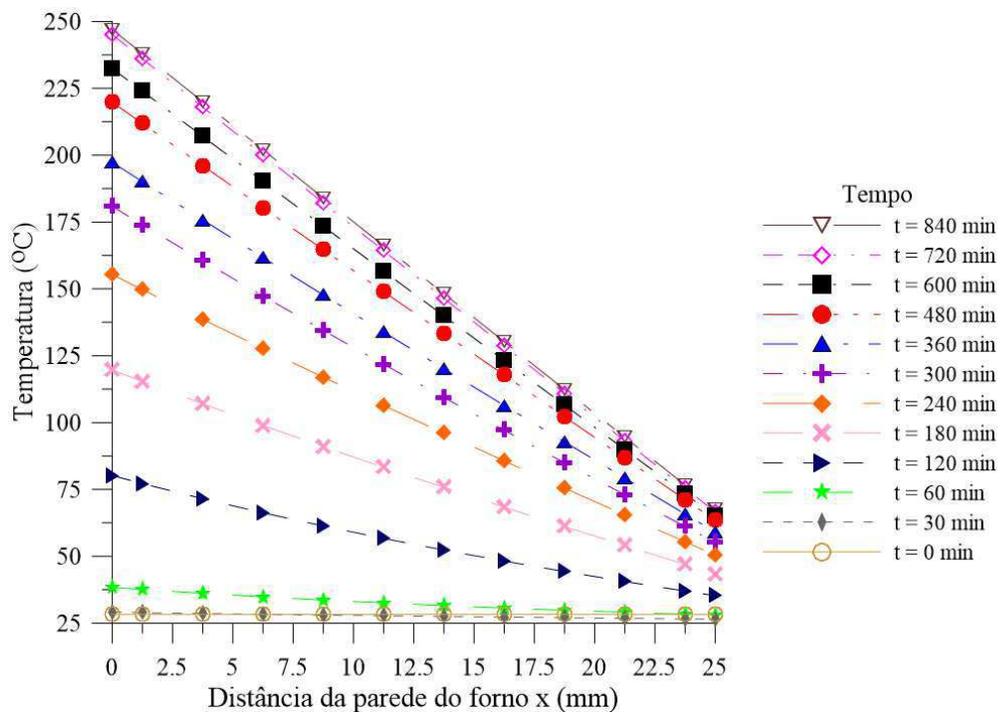


Figura D.29 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra cerâmica.

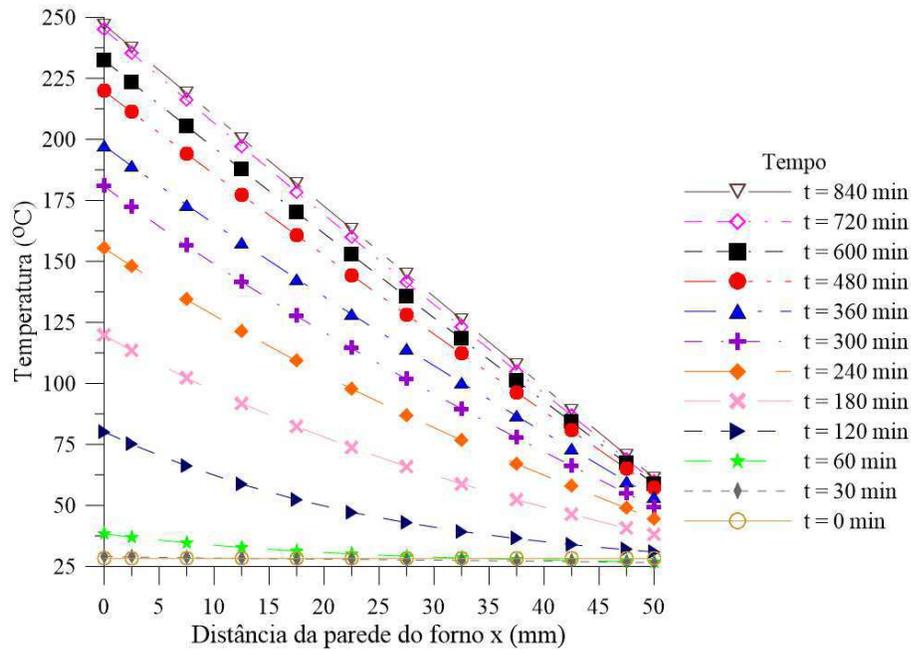


Figura D.30 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de fibra de vidro.

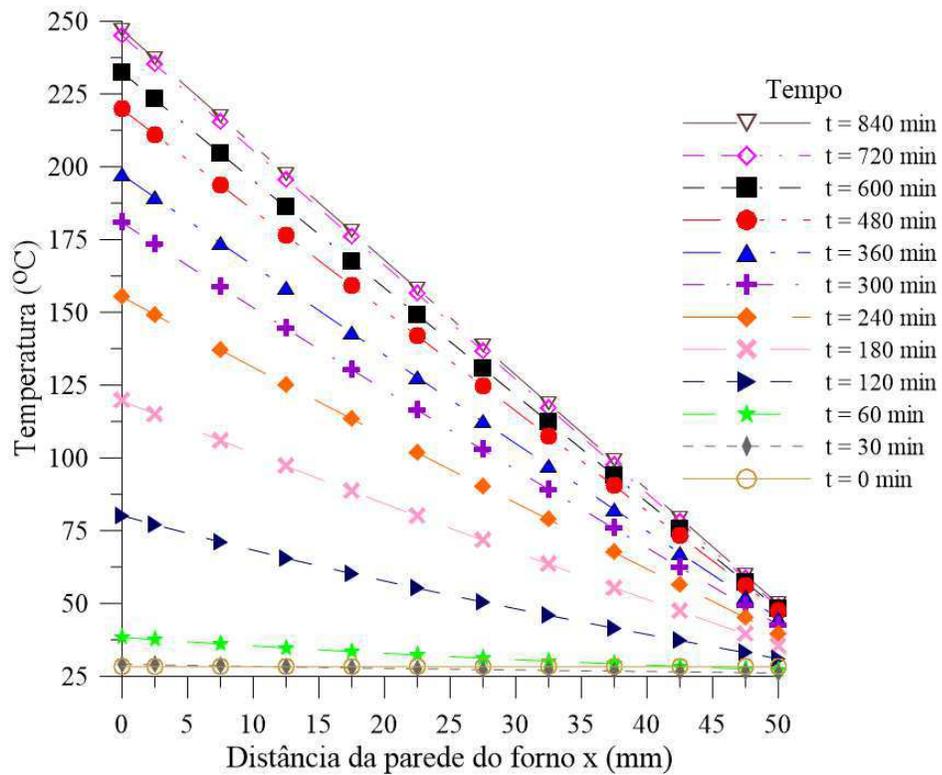


Figura D.31 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de lã de rocha.

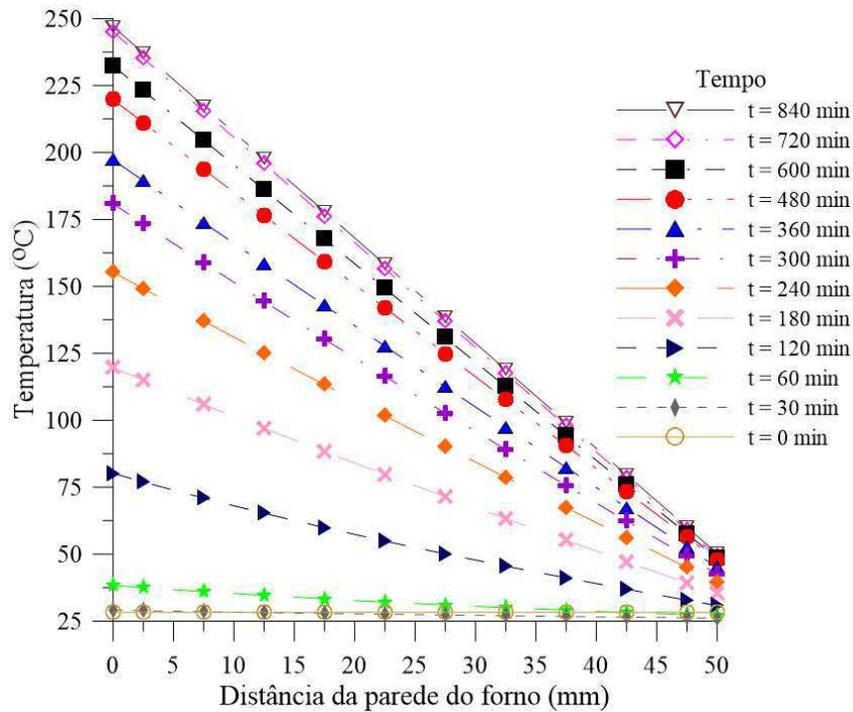


Figura D.32 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 50,0 mm de espessura de silicato de cálcio.

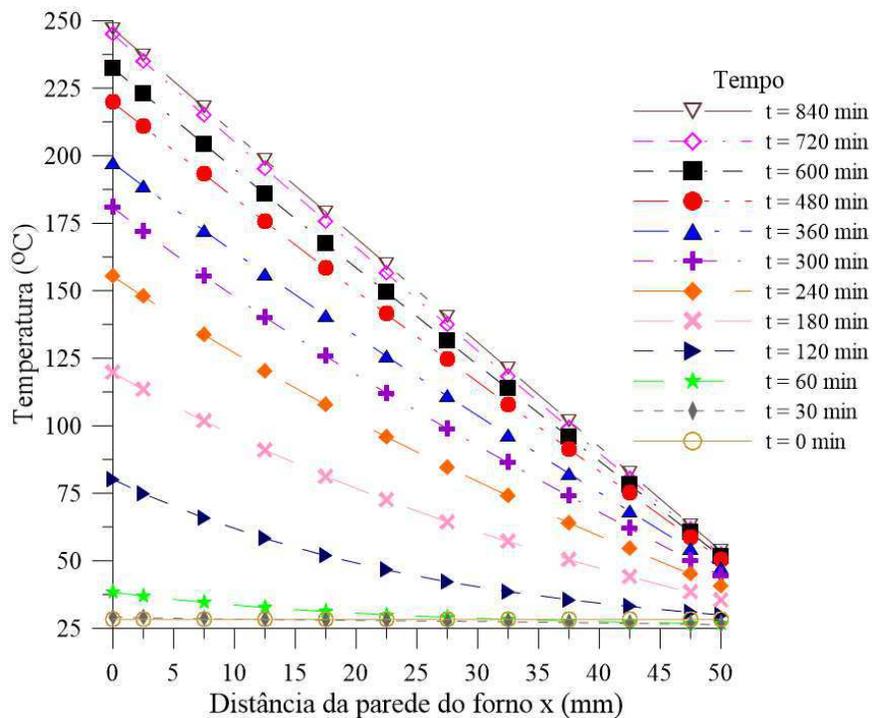


Figura D.33 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra cerâmica.

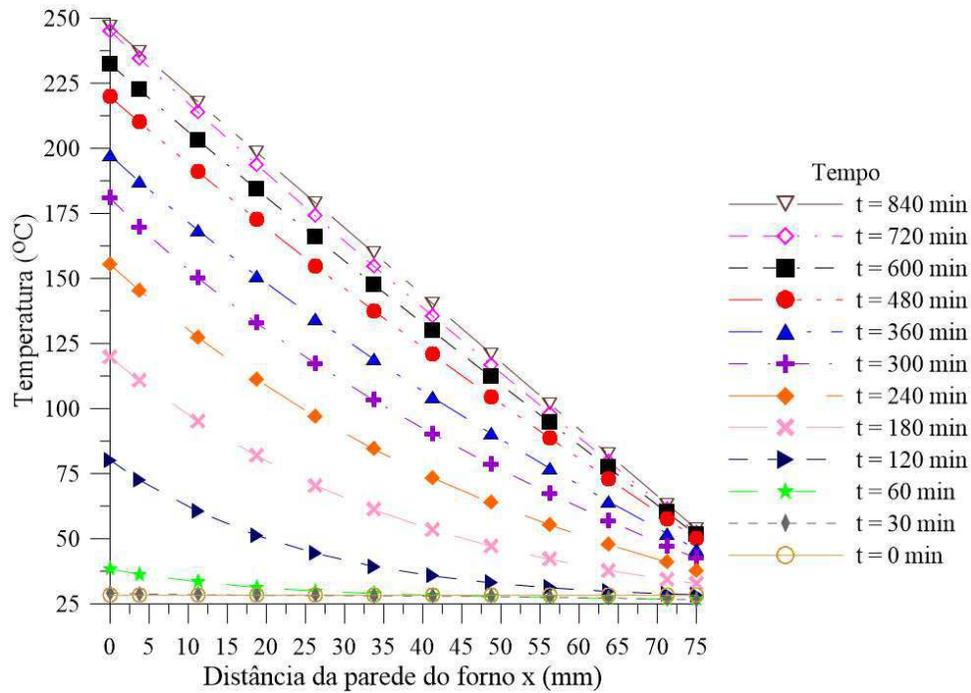


Figura D.34 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de fibra de vidro.

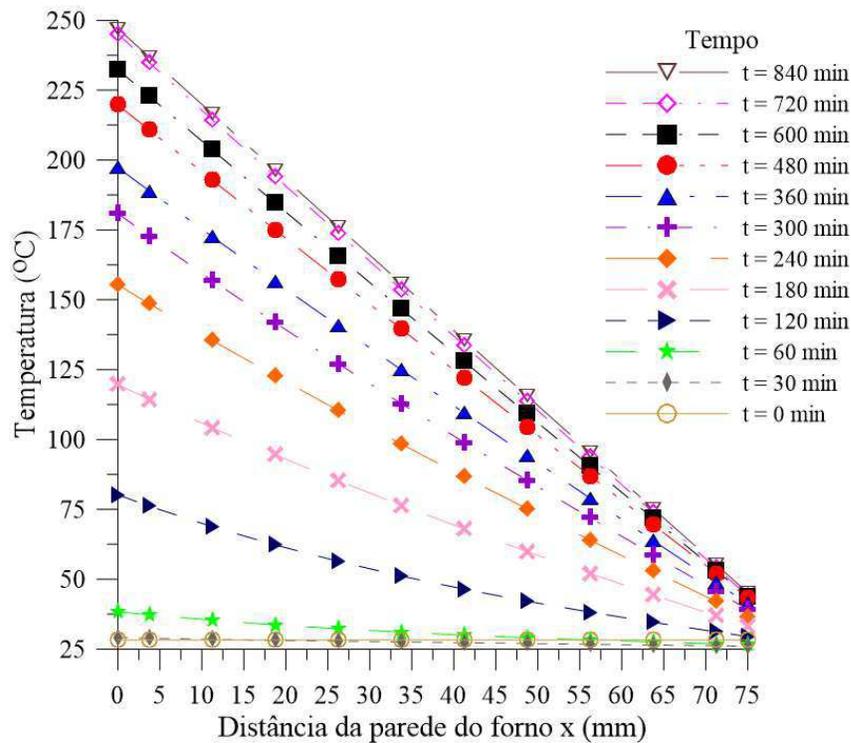


Figura D.35 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de lã de rocha.

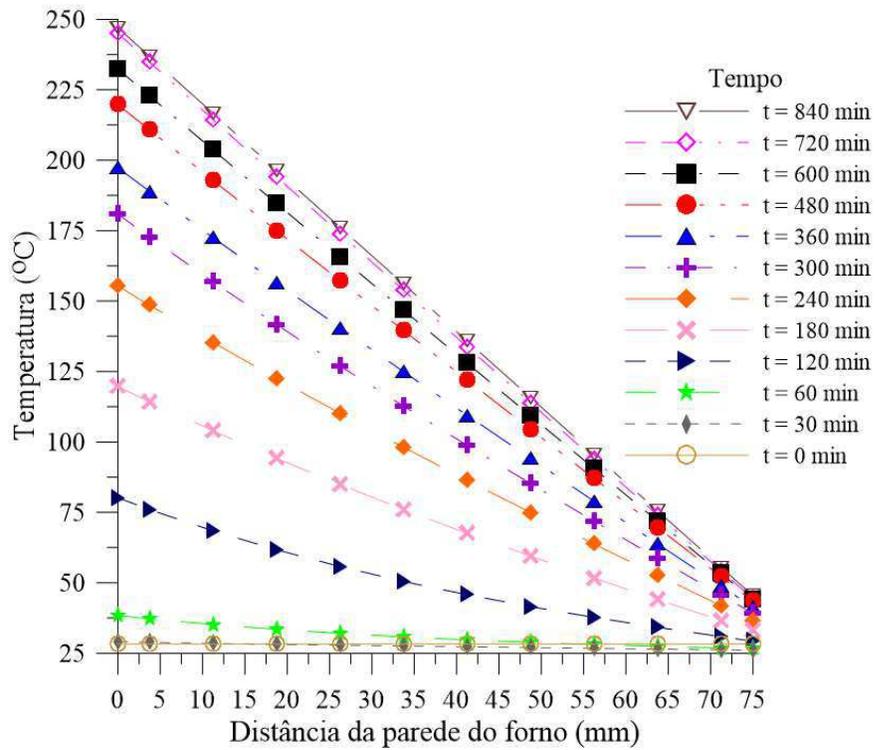


Figura D.36 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 75,0 mm de espessura de silicato de cálcio.

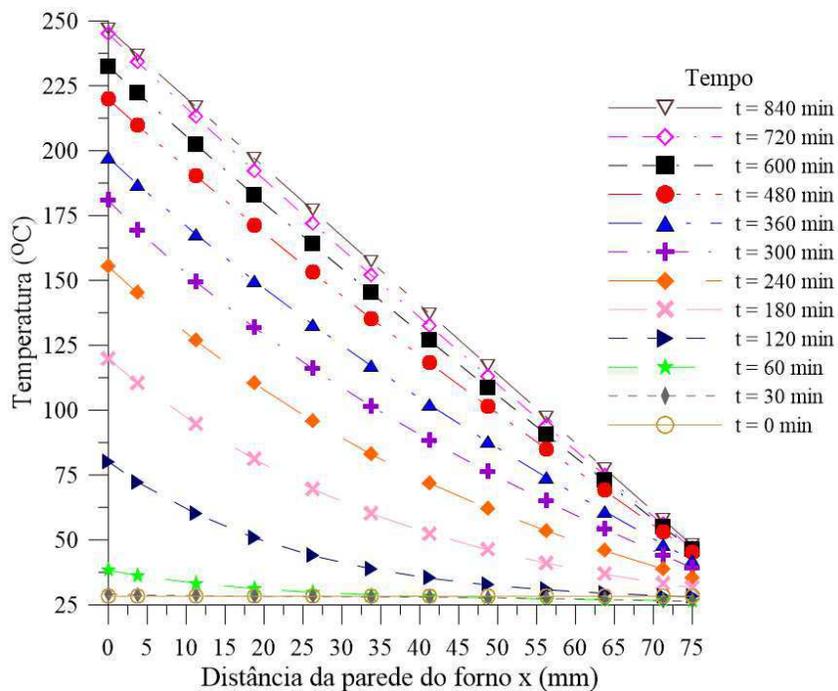


Figura D.37 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra cerâmica.

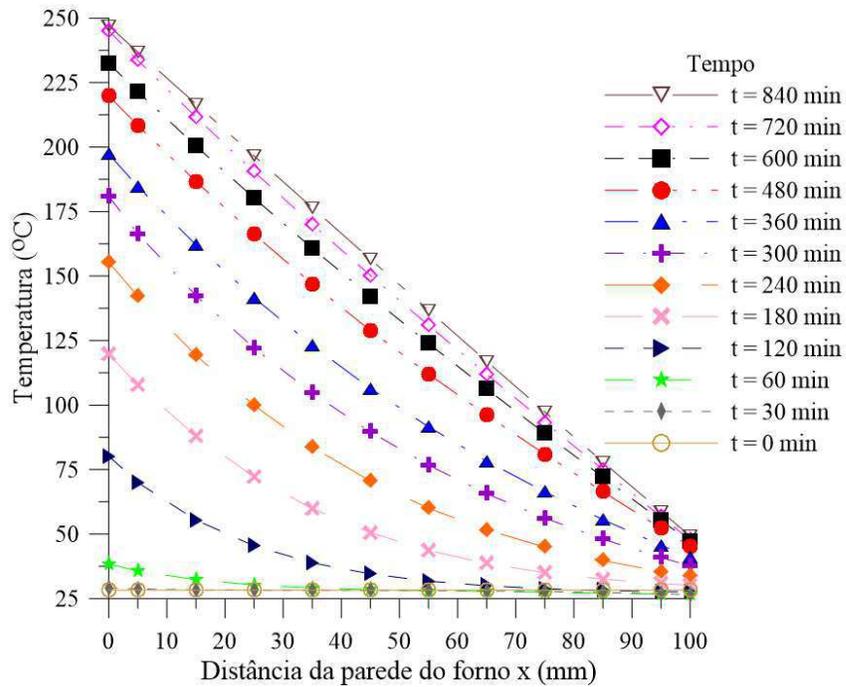


Figura D.38 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de fibra de vidro.

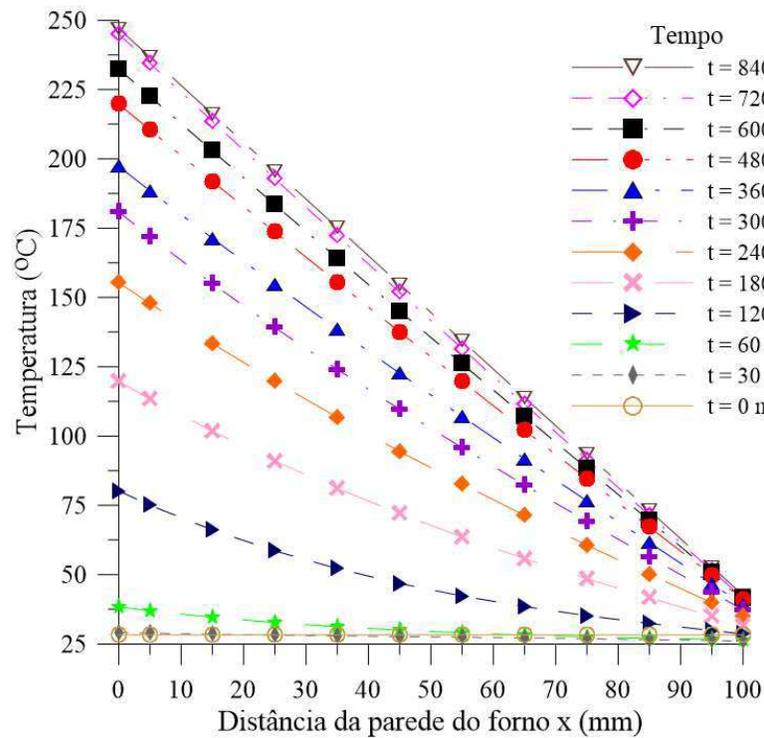


Figura D.39 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de lã de rocha.

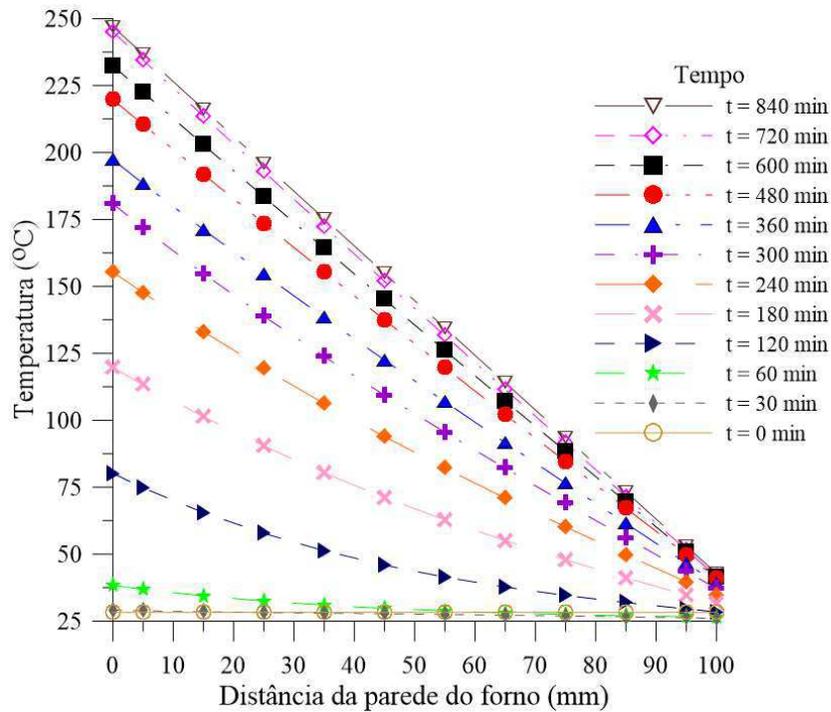
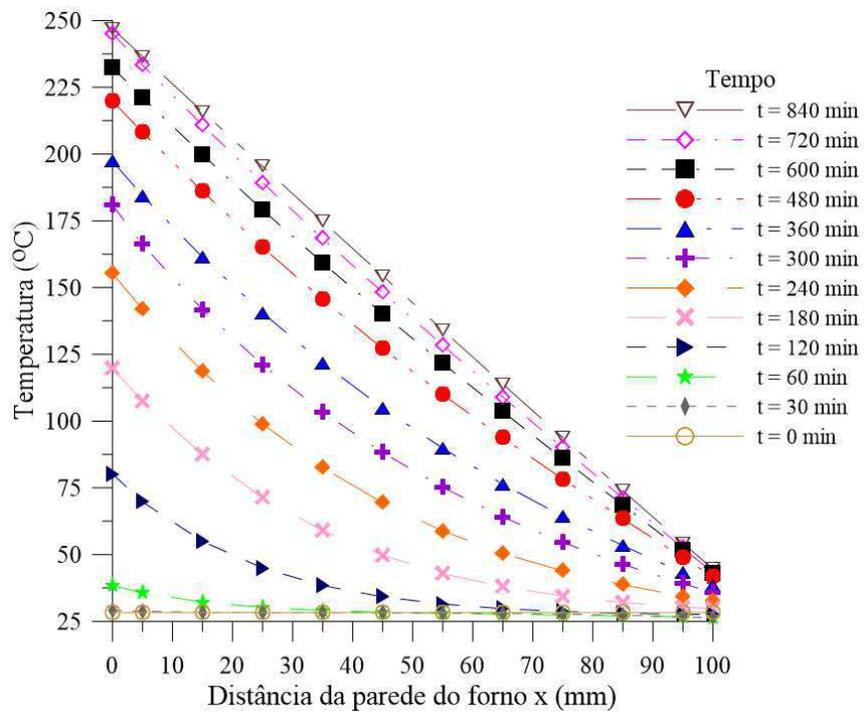


Figura D.40 - Perfil de temperatura no isolamento térmico para diversos instantes de tempo, utilizando 100,0 mm de espessura de silicato de cálcio.



APÊNDICE E – Superfícies de resposta para as variáveis Q_{conv} , Q_{rad} e Q_{acu}

Figura E.1 - Influência da emissividade e espessura do isolamento na perda de energia por convecção.

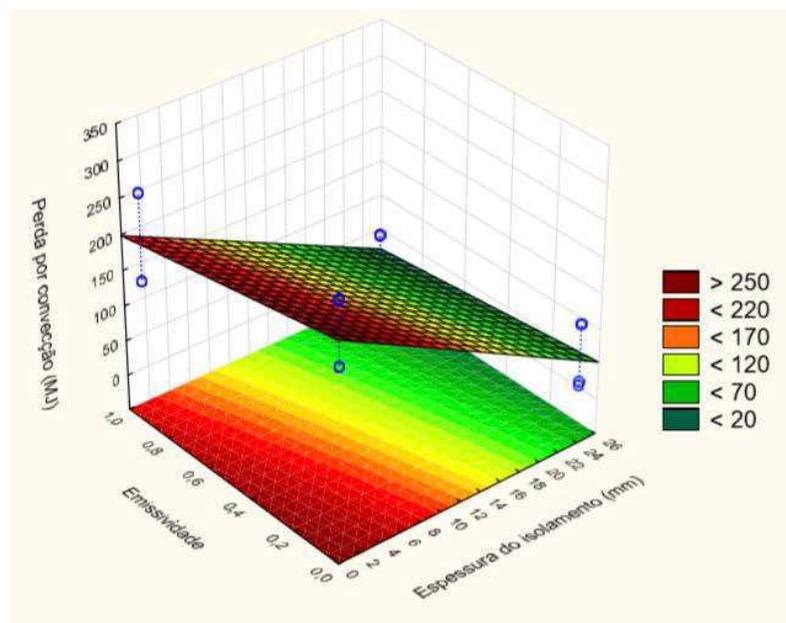


Figura E.2 - Influência da emissividade e condutividade térmica do isolamento na perda de energia por convecção.

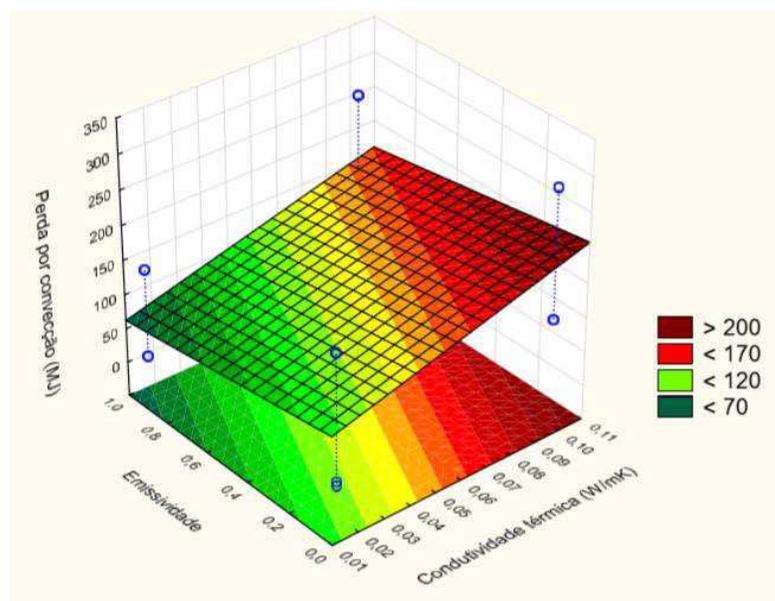


Figura E.3 - Influência da condutividade térmica e espessura do isolamento na perda de energia por convecção.

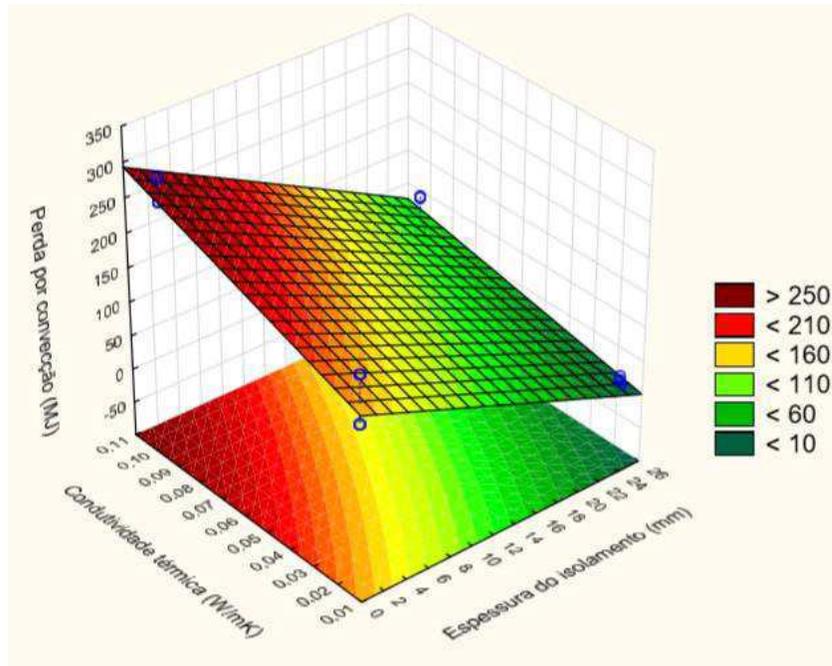


Figura E.4 - Influência do calor específico e da massa específica do isolamento térmico na perda de energia por convecção.

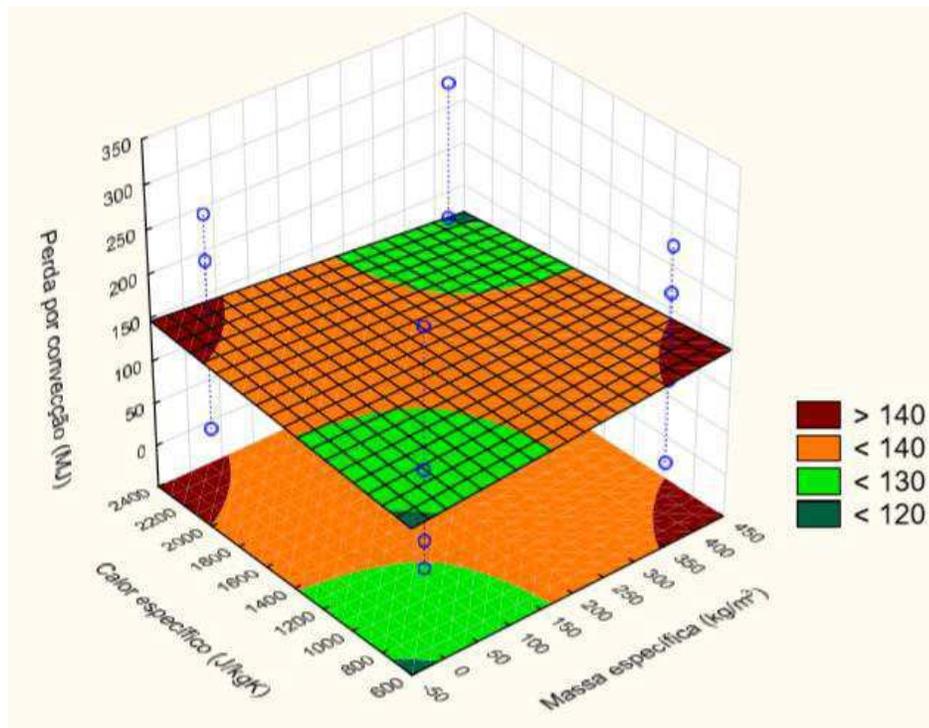


Figura E.5 - Influência da espessura e da emissividade do isolamento na perda de energia por radiação.

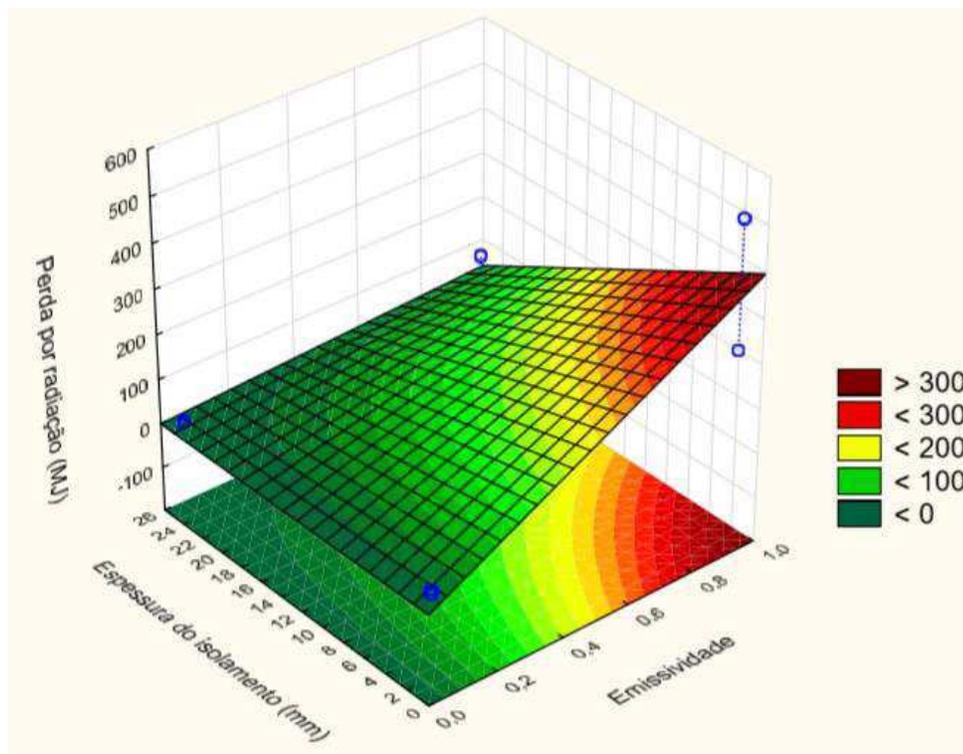


Figura E.6 - Influência da emissividade e condutividade térmica do isolamento na perda de energia por radiação.

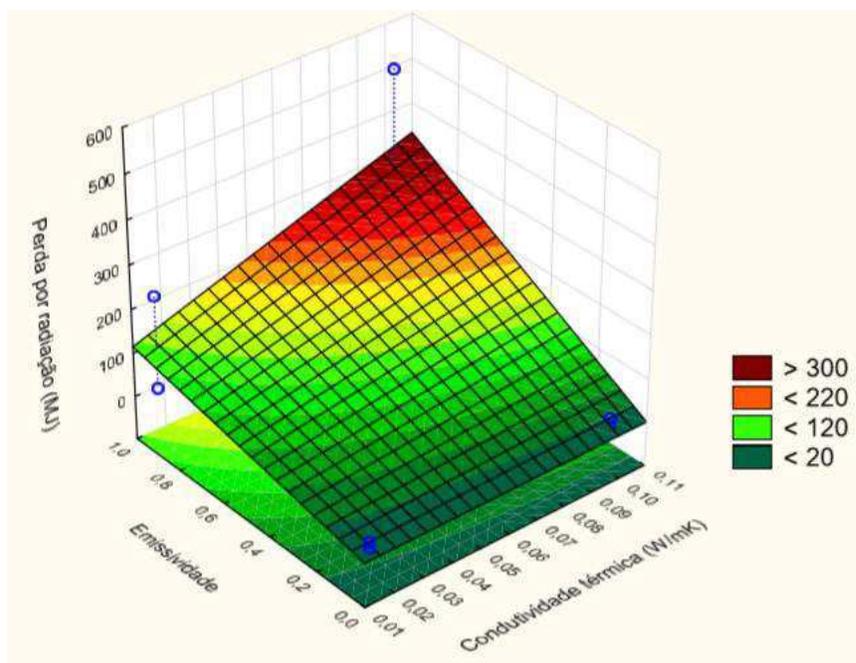


Figura E.7 - Influência da condutividade térmica e da espessura do isolamento na perda de energia por radiação.

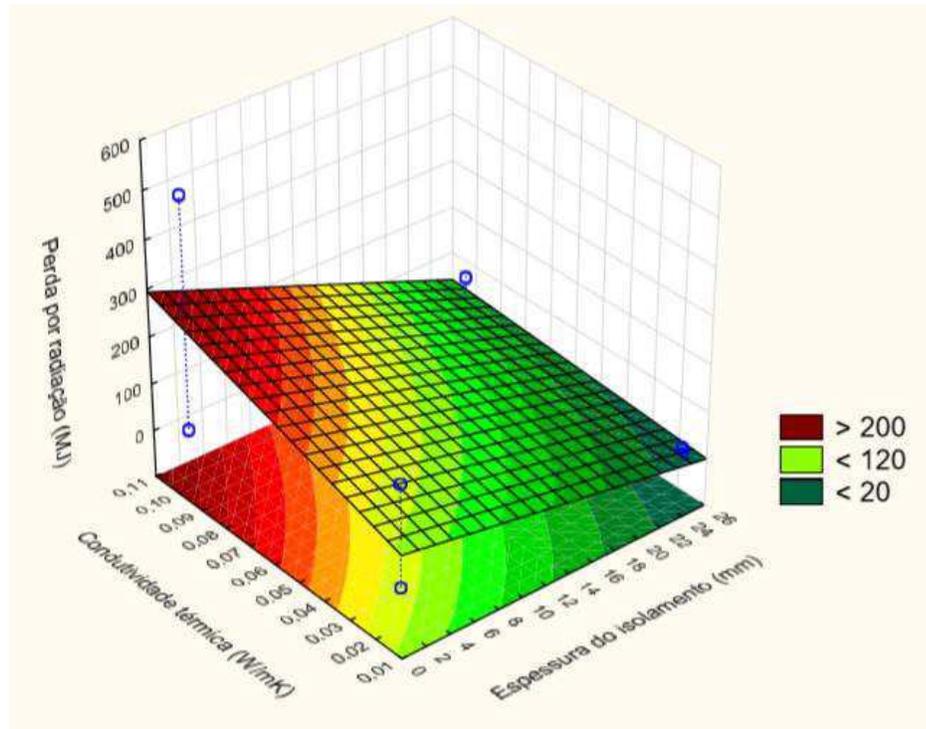


Figura E.8 - Influência do calor específico e da massa específica do isolamento na perda de energia por radiação.

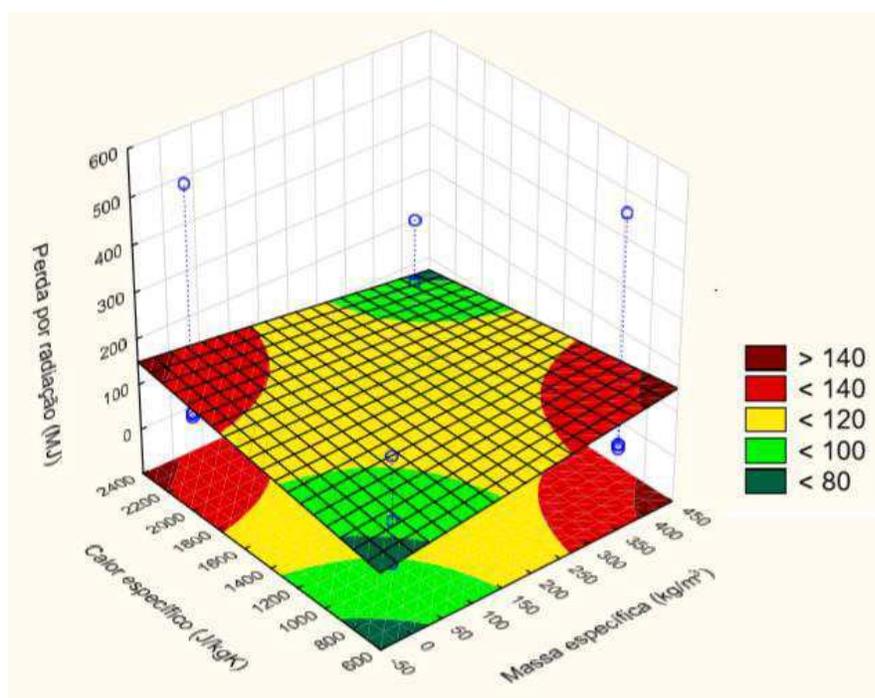


Figura E.9 - Influência da espessura e da emissividade do isolamento na energia acumulada no isolamento.

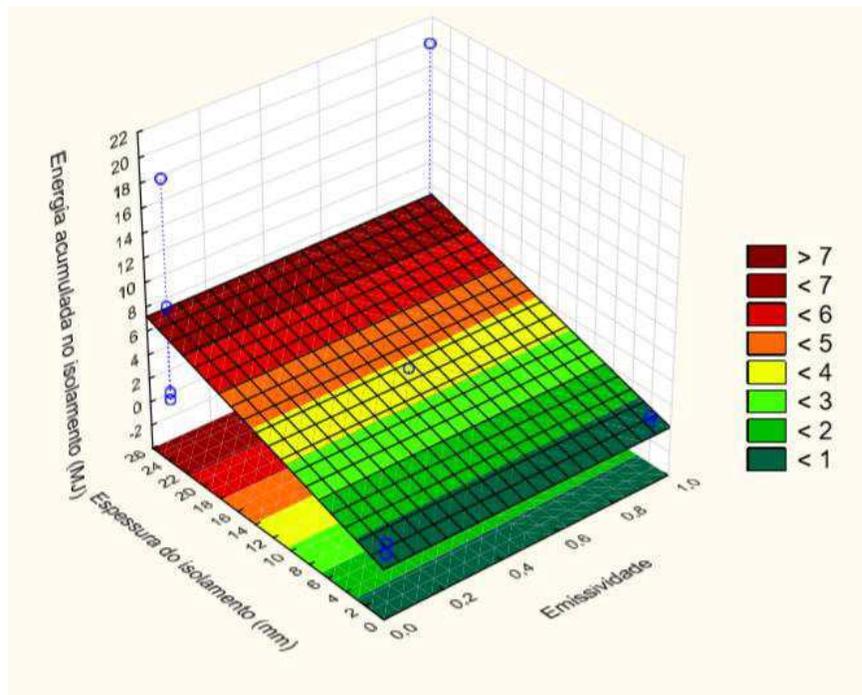


Figura E.10 - Influência da emissividade e da condutividade térmica do isolamento na energia acumulada no isolamento.

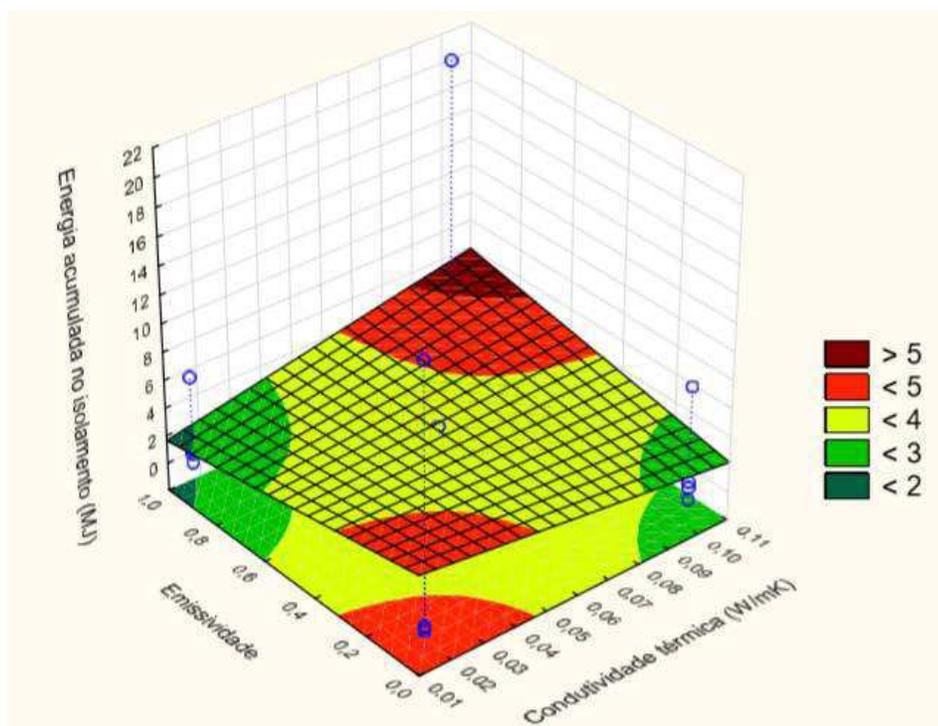


Figura E.11 - Influência da condutividade térmica e da espessura do isolamento na energia acumulada no isolamento.

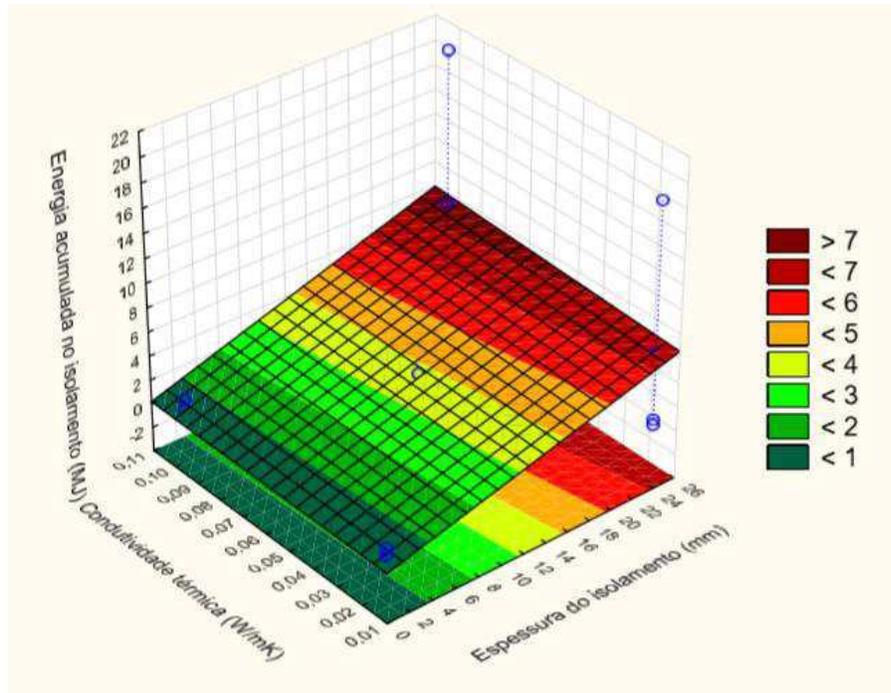


Figura E.12 - Influência do calor específico e da massa específica do isolamento na energia acumulada no isolamento.

