



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada

Análise Térmica de Refratários AZS: Integração de Termografia, Modelagem e MEF para Fornos de Fusão de Vidro

David Junior Pereira

Recife, Março de 2025

David Junior Pereira

Análise Térmica de Refratários AZS: Integração de Termografia, Modelagem e MEF para Fornos de Fusão de Vidro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Física Aplicada.

Linha de pesquisa: Física Aplicada

Orientador (a): Dr. Diego José Rátiva Millán

Recife, Março de 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE

Bibliotecária Suely Manzi – CRB/4 809

P436a

Pereira, David Junior

Análise térmica de refratários AZS: integração de termografia, modelagem e MEF para fornos de fusão de vidro / David Junior Pereira. – 2025

77 f.: il.

Orientador: Diego José Rátiva Millán.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,

Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, Recife, BR-PE, 2019.

Inclui bibliografia e apêndice(s).

1. Física – Estudo e ensino 2. Termografia 3. Infravermelho
4. Diagnóstico por imagem 5. Fontes de radiação 6. Método dos elementos finitos 7. Refratários I. Rátiva Millán, Diego José, orient.

II. Título

CDD 621

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, saúde e perseverança para trilhar e concluir esta jornada acadêmica.

Dedico este trabalho à memória dos meus avós, cujo amor, esforço e dedicação foram essenciais para que eu pudesse estudar e seguir esse caminho. Seu apoio incondicional e sacrifícios permanecerão para sempre como alicerces da minha trajetória.

Agradeço profundamente à minha tia-mãe, que teve um papel fundamental na minha formação. Foi ela quem me ensinou a escrever e, como professora, me levava para suas aulas, despertando em mim o interesse pelo conhecimento desde cedo. Seu apoio incondicional e dedicação foram essenciais para que eu pudesse trilhar esse caminho acadêmico.

Desde a graduação até o mestrado, Andreza Merquiades esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo suporte, incentivo e orientação. Seu compromisso e dedicação foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios e seguir firme nesta jornada.

Agradeço imensamente a Rafael Cruz e Howard Gutemberg, cujas contribuições técnicas e sugestões foram essenciais para o aprimoramento deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Diego José Rátiva Millán, registro meu mais sincero agradecimento pela paciência, orientação e dedicação. Seus ensinamentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Sou igualmente grato ao Professor Dr. Caio Vital, por sua generosidade ao compartilhar conhecimento, pelas orientações valiosas e pelas contribuições que enriqueceram este trabalho. Seu apoio técnico e acadêmico tiveram um papel essencial nesta jornada.

Agradeço também ao Professor Dr. José Ferraz, por ter me indicado um orientador que, a princípio, não me agradou, pois significava estar longe e em outra universidade. No entanto, hoje reconheço que não poderia ter recebido indicação melhor. Tudo ocorreu perfeitamente, graças a Deus, e sou imensamente grato pela oportunidade.

Expresso minha gratidão às instituições que viabilizaram a realização desta pesquisa, especialmente à UFRPE, UPE e CNPq, pelo suporte e incentivo à pesquisa científica.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada aprendizado compartilhado foram indispensáveis para essa conquista.

Resumo

Esta dissertação propõe uma metodologia integrada para estimar a espessura de refratários de alumina-zircônia-sílica (AZS) em fornos industriais, combinando termografia infravermelha, simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e modelagem analítica. O estudo visa otimizar o monitoramento não invasivo do desgaste desses materiais, essenciais na indústria vidreira, reduzindo custos de manutenção e riscos operacionais. Foram realizados experimentos práticos em um miniforno experimental, submetendo refratários com espessuras de 30 mm, 36 mm e 76 mm a velocidades de ventilação entre 0 e 30 m/s. Dados termográficos foram coletados e comparados com simulações no software COMSOL Multiphysics e um modelo analítico desenvolvido para correlacionar temperatura superficial e espessura. Os resultados demonstraram que a ventilação forçada reduz significativamente a temperatura superficial, com erros relativos inferiores a 5% entre métodos para velocidades acima de 15 m/s. O modelo analítico mostrou-se eficaz em prever o comportamento térmico, validado por dados experimentais e numéricos. Limitações, como a faixa de medição da câmera termográfica (até 550 °C), foram identificadas, sugerindo ajustes futuros. Conclui-se que a integração de técnicas termográficas com modelos analíticos oferece uma alternativa viável para monitoramento preditivo, contribuindo para a segurança e eficiência energética em processos industriais de alta temperatura.

Palavras-chave: Refratários AZS, termografia infravermelha, método dos elementos finitos, manutenção preditiva, transferência de calor.

Abstract

This dissertation proposes an integrated methodology to estimate the thickness of alumina-zirconia-silica (AZS) refractories in industrial furnaces by combining infrared thermography, Finite Element Method (FEM) simulations, and analytical modeling. The study aims to optimize non-invasive monitoring of refractory wear in glass manufacturing, reducing maintenance costs and operational risks. Practical experiments were conducted in a mini-furnace, exposing refractories with thicknesses of 30 mm, 36 mm, and 76 mm to air velocities between 0 and 30 m/s. Thermographic data were compared with COMSOL Multiphysics simulations and an analytical model developed to correlate surface temperature and thickness. Results showed that forced ventilation significantly reduces surface temperature, with relative errors below 5% between methods for velocities above 15 m/s. The analytical model effectively predicted thermal behavior, validated by experimental and numerical data. Limitations, such as the thermographic camera's restricted measurement range (up to 550 °C), were identified, suggesting future refinements. The integration of thermography with analytical models offers a viable solution for predictive maintenance, enhancing safety and energy efficiency in high-temperature industrial processes.

Keywords: AZS refractories, infrared thermography, finite element method, predictive maintenance, heat transfer.

Sumário

	Sumário	6
	Lista de ilustrações	8
	Lista de tabelas	1
1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Estrutura do Documento	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIDROS PLANOS	5
2.2	MATERIAIS REFRACTÁRIOS	6
2.2.1	Classificação dos Refratários	7
2.2.2	Refratários AZS e Composição Química	8
2.2.3	Monitoramento do Desgaste dos Refratários	9
2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	9
2.3.1	Transferência de calor por Condução	10
2.3.2	Transferência de Calor por Convecção	11
2.3.3	Transferência de Calor por Radiação	13
2.4	TERMOGRAFIA	16
2.4.1	Princípios de Funcionamento da Termografia	16
2.4.2	Aplicação da Termografia em Refratários	17
3	MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS	19
3.1	Breve Histórico e Importância do Método dos Elementos Finitos	19
3.1.1	Etapas de Aplicação do MEF	19
3.1.2	Aplicação do MEF no Estudo dos Refratários AZS	20
3.1.3	Formulação do Problema	21
3.1.4	Análise de Condução de Calor Unidimensional com Convecção	21
3.1.5	Condições de Contorno	21
3.1.6	Formulação Fraca	22
3.1.7	Discretização do Domínio	23
3.1.8	Aproximação da Temperatura – Funções de Forma Lineares	24
3.1.9	Derivação da Matriz de Rigidez	25
3.2	COMSOL MULTIPHYSICS	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30

4.0.1	Preparação dos Refratários com Desgaste e Bico de Pato	30
4.0.2	Montagem do Miniforno Experimental	32
4.0.3	Equipamentos e Instrumentos	33
4.0.4	Metodologia Experimental	35
4.0.5	Coleta e Análise de Dados	35
4.1	Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos	35
4.1.1	Geometria do Domínio	36
4.1.2	Configuração da Simulação	37
4.2	Desenvolvimento do Modelo Analítico	38
4.2.1	Premissas e Formulação do Sistema Térmico	38
4.2.2	Formulação Matemática do Problema de Contorno	39
4.2.3	Solução Analítica e Determinação de Constantes	39
4.2.4	Propriedades Termofísicas do Ar e Modelagem Computacional	40
4.3	Análise Comparativa	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.0.1	Resultados do Experimento em campo	42
5.0.2	Resultados da Simulação Numérica pelo MEF	46
5.0.3	Previsões do Modelo Analítico	50
5.0.4	Análise gráfica das curvas	50
5.0.5	Comparação entre os três Métodos	53
5.0.6	Cálculo do erro percentual relativo	55
5.0.7	Validação do Modelo Analítico	57
6	CONCLUSÃO	58
A	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS	60
B	SCRIPT DO MODELO ANALÍTICO	61
C	PASSO A PASSO DA SIMULAÇÃO NO COMSOL MULTIPHYSICS	63
	Bibliografia	65

Lista de ilustrações

Figura 1 – Forno de fusão tipo float. Adaptado de [7].	5
Figura 2 – Ilustração dos três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação [19].	10
Figura 3 – Espectro eletromagnético, destacando as regiões associadas à radiação visível. Adaptado de [27].	14
Figura 4 – Distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro.	15
Figura 5 – Diagrama esquemático das etapas de funcionamento de um termovisor. Adaptado de [30].	17
Figura 6 – Amostras de refratários após desgaste simulado: ROI 1 (36 mm), ROI 2 (30 mm) e ROI 3 (76 mm).	31
Figura 7 – Dispositivo de ventilação "bico de pato".	32
Figura 8 – Vista interna do miniforno, com as faces desgastadas voltadas para o interior aquecido.	33
Figura 9 – Vista frontal do miniforno, com as superfícies lisas expostas ao ambiente externo.	33
Figura 10 – Miniforno experimental.	33
Figura 11 – Câmera.	34
Figura 12 – Pirômetro.	34
Figura 13 – Anemômetro.	34
Figura 14 – Geometria do domínio utilizado na simulação numérica.	36
Figura 15 – Malha de elementos finitos aplicada ao domínio.	37
Figura 16 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob condição de ventilação nula (0 m/s).	42
Figura 17 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 5 m/s.	43
Figura 18 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 10 m/s.	43
Figura 19 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 15 m/s.	44
Figura 20 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 20 m/s.	44
Figura 21 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 25 m/s.	45
Figura 22 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 30 m/s.	45
Figura 23 – Resultados da simulação com ventilação de 0 m/s.	47

Figura 24 – Resultados da simulação com ventilação de 5 m/s.	47
Figura 25 – Resultados da simulação com ventilação de 10 m/s.	47
Figura 26 – Resultados da simulação com ventilação de 15 m/s.	48
Figura 27 – Resultados da simulação com ventilação de 20 m/s.	48
Figura 28 – Resultados da simulação com ventilação de 25 m/s.	48
Figura 29 – Resultados da simulação com ventilação de 30 m/s.	49
Figura 30 – Curvas de temperaturas a partir do modelo analítico para três espessuras.	50
Figura 31 – Comparativo das temperaturas médias: experimento, MEF e modelo analítico.	52
Figura 32 – Comparação das Temperaturas Médias entre Modelo Analítico, Simulação no COMSOL e Experimentos Práticos para ROI 1 (36 mm).	54
Figura 33 – Comparação das Temperaturas Médias entre Modelo Analítico, Simulação no COMSOL e Experimentos Práticos para ROI 2 (30 mm).	54
Figura 34 – Comparação das Temperaturas Médias entre Modelo Analítico, Simulação no COMSOL e Experimentos Práticos para ROI 3 (76 mm).	55
Figura 35 – Gráfico da condutividade térmica do refratário AZS ER 1681 RT em função da temperatura (adaptado de Saint-Gobain SEFPRO).	60

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais matérias-primas do vidro tipo float	6
Tabela 2 – Classificação dos materiais refratários com base em critérios técnicos: forma física, processo de fabricação, método de conformação, composição química e mineralógica, densidade e resistência química.	8
Tabela 3 – Espessuras finais das placas refratárias após o processo de desgaste.	31
Tabela 4 – Especificações dos equipamentos.	34
Tabela 5 – Condições experimentais: temperatura interna, velocidade do soprador e tempo até estabilização térmica.	35
Tabela 6 – Propriedades termofísicas do ar ambiente a pressão atmosférica (25 °C).	40
Tabela 7 – Comparação entre as temperaturas médias do Experimento e do Modelo Analítico, com o Erro Relativo para todas as ROIs e velocidades.	56
Tabela 8 – Comparação entre as temperaturas médias da Simulação e do Modelo Analítico, com o Erro Relativo para todas as ROIs e velocidades.	56

1 INTRODUÇÃO

Os refratários são componentes essenciais em indústrias cujos processos envolvem altas temperaturas, desempenhando um papel fundamental como revestimentos de fornos industriais e outros equipamentos que necessitam de isolamento térmico para assegurar a eficiência energética e a segurança operacional. Entre os diversos tipos disponíveis, os refratários de alumina-zircônia-sílica (AZS), objeto deste estudo, desempenham um papel importante na indústria vidreira, especialmente em tanques de fusão, onde enfrentam temperaturas extremas e intensos desgastes mecânicos e químicos [1].

O monitoramento da espessura de materiais refratários é essencial para prevenir falhas estruturais e otimizar a manutenção preditiva, uma vez que esses materiais se degradam ao longo do tempo, apesar de sua resistência. Uma das técnicas empregadas para essa finalidade é o ultrassom, que permite a avaliação não destrutiva da condição do revestimento refratário em altos-fornos, identificando áreas com desgaste acelerado e anomalias. Essa abordagem contribui para a tomada de decisões preventivas e prolonga a vida útil dos equipamentos [2].

Atualmente, diversas tecnologias são utilizadas na medição da espessura de refratários. O ultrassom destaca-se por sua alta precisão, mas sua aplicação é limitada por fatores como custo elevado e a necessidade de contato direto com a superfície analisada. Nesse contexto, a termografia infravermelha surge como uma alternativa de menor custo, permitindo a medição da temperatura sem contato direto e possibilitando a correlação entre variações térmicas e a espessura remanescente do material. No entanto, sua aplicação prática enfrenta desafios, como emissividade variável, ruídos térmicos e interferências ambientais [3, 4].

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo desenvolver e validar uma metodologia para estimar indiretamente a espessura de refratários AZS com base na análise térmica da superfície externa. Para isso, adotamos uma abordagem integrada, combinando experimentos práticos, simulação numérica pelo método dos elementos finitos e modelagem analítica. Essa integração permitiu validar os resultados de forma cruzada, aumentando a confiabilidade das estimativas e fornecendo uma visão mais completa do comportamento térmico do refratário.

Para viabilizar essa análise, um miniforno experimental foi projetado e construído, reproduzindo as condições térmicas e de desgaste encontradas em fornos de fabricação de vidro, permitindo a coleta de imagens termográficas sob diferentes condições de ventilação. Além disso, simulações numéricas utilizando o método dos elementos finitos no software COMSOL Multiphysics foram empregadas para modelar o comportamento térmico do sistema e comparar os resultados com os dados experimentais. Paralelamente, um mo-

delo analítico foi desenvolvido para prever a relação entre a espessura do refratário e a temperatura externa, considerando as propriedades térmicas do material, as condições de convecção e as temperaturas internas.

Partindo dessa abordagem integrada, o estudo visa validar a seguinte hipótese: se a temperatura da superfície externa do refratário for medida com precisão e forem conhecidas as propriedades térmicas do material e as condições de contorno do sistema, então será possível estimar indiretamente sua espessura utilizando-se análise térmica por termografia infravermelha.

Dessa forma, este estudo contribui para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes para inspeção térmica de refratários, proporcionando uma alternativa confiável, econômica e não invasiva para a indústria. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para o aumento da eficiência nas atividades de manutenção, reduzindo custos operacionais, melhorando a segurança e permitindo um gerenciamento mais eficaz das intervenções preditivas nos fornos industriais.

1.1 Estrutura do Documento

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, estruturados para conduzir o leitor desde a contextualização industrial até a síntese dos resultados e conclusões. A seguir, apresenta-se a organização do documento:

Capítulo 1 – Introdução Este capítulo introduz o tema da pesquisa, contextualizando a aplicação dos refratários de alumina-zircônia-sílica (AZS) em fornos de fusão de vidro. São discutidos os desafios operacionais desses materiais, como desgaste térmico e corrosão, bem como suas implicações ambientais e econômicas, com destaque para o alto consumo energético. Também são apresentados os objetivos do estudo, as hipóteses e a motivação para a integração de termografia, modelagem analítica e simulação numérica na avaliação do desempenho térmico dos refratários.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica Este capítulo apresenta os fundamentos técnicos necessários para a compreensão do estudo. São descritos o processo de fabricação do vidro, com ênfase no método float, e os aspectos essenciais dos materiais refratários, incluindo composição química e classificação. Além disso, são abordados os mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) e os princípios da termografia infravermelha, destacando sua aplicação no monitoramento térmico de superfícies refratárias.

Capítulo 3 – Método dos Elementos Finitos (MEF) Explora os fundamentos teóricos do MEF e sua aplicação na simulação térmica dos refratários AZS. São detalhadas a formulação matemática do método, a discretização do domínio e a implementação computacional utilizada para analisar a distribuição de temperatura e os efeitos do desgaste nos materiais estudados.

Capítulo 4 – Materiais e Métodos Este capítulo descreve a metodologia adotada no estudo, que envolve abordagens experimental, numérica e analítica. São apresentadas as amostras de refratários com espessuras de 30 mm, 36 mm e 76 mm, e a configuração do miniforno utilizado nos ensaios térmicos. As espessuras de 30 mm e 36 mm foram selecionadas por representarem os limites típicos de desgaste em refratários laterais de fornos de vidro. Em seguida, descrevem-se os procedimentos experimentais, com uso de termovisor para aquisição de imagens térmicas e anemômetro para medição da velocidade do ar. Por fim, são abordadas a modelagem numérica via método dos elementos finitos e a formulação do modelo analítico para estimativa da temperatura externa.

Capítulo 5 – Resultados e Discussões Apresenta e analisa os resultados obtidos a partir das três abordagens do estudo. São comparados os dados experimentais, as previsões do modelo analítico e os resultados das simulações numéricas, avaliando-se a influência da espessura do refratário e da ventilação na dissipação térmica. A seção também discute as limitações e a aplicabilidade dos métodos utilizados.

Capítulo 6 – Conclusão Este capítulo sintetiza as principais contribuições do estudo para o monitoramento térmico e estrutural de refratários em fornos de vidro. São discutidos os avanços obtidos na utilização da termografia como ferramenta não invasiva, bem como as possibilidades de aplicação do modelo desenvolvido em ambientes industriais. Além disso, são sugeridas direções para trabalhos futuros, incluindo aprimoramentos nos modelos computacionais e a aplicação da metodologia em outros setores que operam com materiais refratários em altas temperaturas.

A estrutura proposta combina teoria, experimentação e modelagem numérica, fornecendo um modelo replicável para otimização de processos industriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIDROS PLANOS

A produção de vidros planos é um processo industrial fundamental, atendendo a diversas aplicações em setores como construção civil, automotivo e eletrodomésticos. Um dos métodos mais amplamente utilizados para fabricação desse tipo de vidro é o processo *float*. Esse processo, pioneiramente descrito por Pilkington (1969), revolucionou a fabricação de vidro plano ao combinar eficiência produtiva com qualidade óptica superior[5, 6].

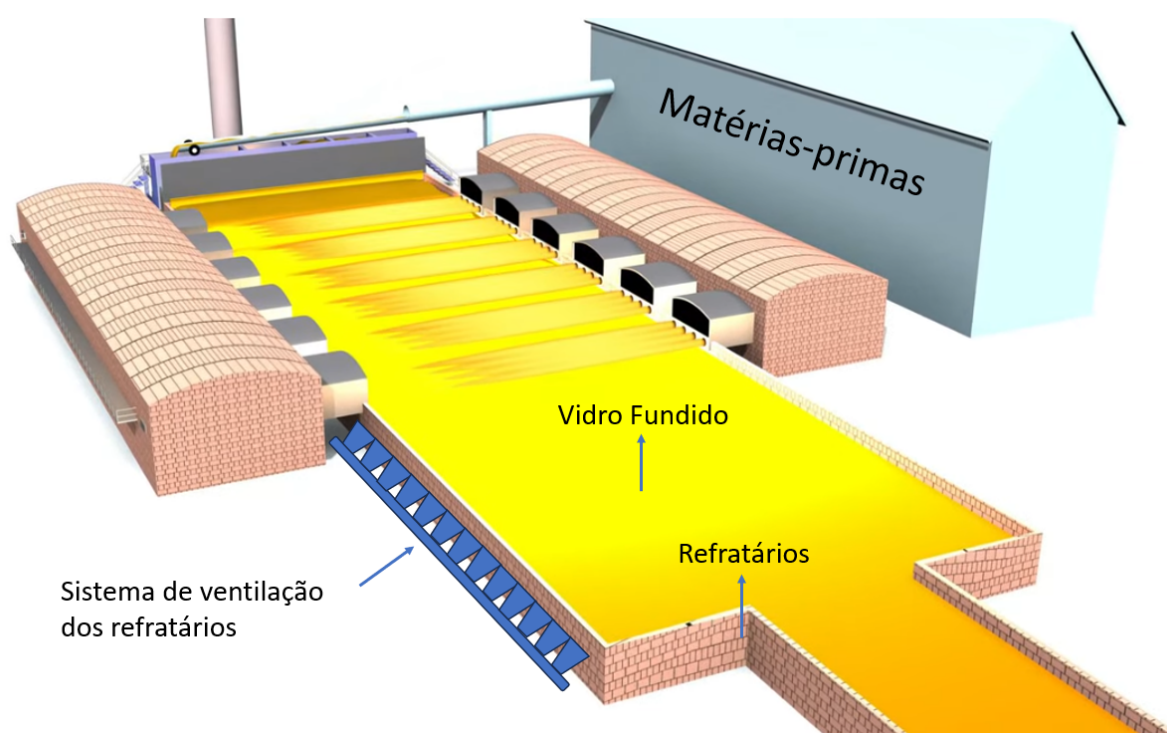


Figura 1 – Forno de fusão tipo float. Adaptado de [7].

Nesse processo *float*, as matérias-primas são cuidadosamente pesadas e misturadas antes de serem introduzidas no forno de fusão, onde ocorrem reações químicas a temperaturas elevadas, frequentemente superiores a 1.500 °C [8]. Essa etapa é crucial, pois proporciona a transformação da mistura sólida em um vidro fundido homogêneo, garantindo as propriedades desejadas para o produto final [9].

As principais matérias-primas utilizadas no processo float são detalhadas na Tabela 1, juntamente com suas funções específicas no processo.

Matéria-prima	Função no processo
Areia sílica (SiO_2)	Principal formador da estrutura vítrea, responsável pela resistência mecânica e transparência do vidro.
Barrilha (Na_2CO_3)	Reduz a temperatura de fusão da sílica, facilitando o processo de fabricação.
Calcário (CaCO_3)	Introduz cálcio na composição, aumentando a durabilidade química e mecânica do vidro.
Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	Fonte de cálcio e magnésio, melhora a resistência química e reduz tensões internas.
Feldspato (KAlSi_3O_8)	Fornece potássio e alumínio, melhorando a resistência térmica e química.
Sulfato de sódio (Na_2SO_4)	Agente de refino, auxilia na remoção de bolhas durante a fusão.
Óxidos metálicos	Podem ser adicionados para coloração e propriedades específicas do vidro (ex.: óxido de ferro para vidros verdes).
Caco de vidro reciclado	Reduz o consumo de energia e melhora a fusão, contribuindo para a sustentabilidade.

Tabela 1 – Principais matérias-primas do vidro tipo float

Após a fusão, o vidro líquido é vertido em um tanque contendo estanho líquido, onde flutua e se espalha formando uma folha contínua. A escolha do estanho como substrato deve-se à sua baixa reatividade química e alta densidade, que permite ao vidro flutuar e se alisar naturalmente, eliminando irregularidades superficiais [10]. A escolha do estanho é devido a três propriedades físicas desse metal: o baixo ponto de fusão, $231,9\text{ }^\circ\text{C}$; o alto ponto de ebulição, $2.602,0\text{ }^\circ\text{C}$; e a densidade, $7,26\text{ g/cm}^3$, maior do que a do vidro, $2,70\text{ g/cm}^3$, essas propriedades permitem que a folha de vidro flutue, porém, é necessário que o estanho fique enclausurado para não sofrer oxidação em contato com oxigênio, tornando necessário injeção dos gases, nitrogênio e hidrogênio, para impedir a oxidação do estanho [9].

Ao avançar lentamente pelo banho de estanho, o vidro sofre resfriamento gradual e solidifica-se parcialmente antes de ser conduzido por rolos até uma zona conhecida como recozimento, onde ocorre o resfriamento controlado. Esse tratamento térmico é essencial para aliviar as tensões internas induzidas durante o processo de fabricação, garantindo estabilidade dimensional e resistência mecânica ao produto final. Após o recozimento, o vidro é cortado em chapas padronizadas e submetido a inspeções rigorosas para detecção e controle de eventuais imperfeições [9].

2.2 MATERIAIS REFRACTÁRIOS

As primeiras formas de materiais refratários remontam à antiguidade. Observou-se que a argila, quando misturada e queimada em altas temperaturas, endurecia sem quebrar

ou rachar, demonstrando resistência ao calor. Esse método era utilizado por povos antigos para produzir utensílios de cozinha e recipientes para armazenar água. Essa técnica de endurecimento da argila foi o ponto de partida para o desenvolvimento de materiais refratários mais avançados, essenciais em diversas indústrias atualmente.

Hoje, os materiais refratários continuam a evoluir, impulsionados por novas tecnologias e materiais. Esses materiais, resistentes ao calor, são amplamente empregados em ambientes industriais e científicos. Refratários modernos, como o carbetto de silício e tijolos de alumina-zircônia-sílica fundida, são essenciais para aplicações que exigem resistência, especialmente nas indústrias de vidro e aço [11].

Em geral, os materiais refratários são definidos como aqueles capazes de suportar temperaturas extremamente elevadas sem sofrer degradação significativa em suas propriedades físicas e químicas. Embora os refratários cerâmicos sejam os mais comuns, existem outras categorias, como os refratários orgânicos à base de carbono e os metálicos, incluindo tungstênio e molibdênio [12]. As principais matérias-primas usadas na fabricação desses materiais, como magnesita, dolomita e alumina, possuem pontos de fusão superiores a 1.800 °C, conferindo-lhes alta resistência térmica e tornando-os indispensáveis para aplicações industriais de alta temperatura [13].

2.2.1 Classificação dos Refratários

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a classificação dos materiais refratários está descrita na norma NBR 10237. Essa norma categoriza os refratários segundo diversos critérios técnicos relevantes para fabricação, comercialização e aplicação prática, incluindo a forma, processo de fabricação, conformação, natureza química e mineralógica, densidade e resistência ao ataque químico. A Tabela 2 detalha as categorias dessa classificação.

Critério	Categorias
Forma	Conformados: formatos padronizados e especiais. Não conformados: argamassas, concretos densos e isolantes, massas de socar, plásticas, de projeção e granuladas secas.
Processo de fabricação	Conformados: queimados, impregnados, quimicamente ligados, eletrofundidos, e ligados (curados ou não) a piche, alcatrão ou resinas. Não conformados.
Processo de conformação	Classe: prensados, extrudados, moldados manualmente (por socagem), por colagem, por vibração, por vertimento ou eletrofundidos.
Natureza química e mineralógica	Ácidos: silicosos (sílica) e silicoaluminosos (sílica-alumina). Básicos: magnesianos (magnésia), magnesiano-cromíticos (magnésia-cromita), cromomagnesianos (cromita-magnésia), dolomíticos (dolomita), de magnésia-carbono. Neutros: aluminosos (alumina), alumina-carbono, alumina-carbeto-carbono, silício-carbono, alumina-cromita, cromíticos, de carbono ou grafita. Especiais: carbeto de silício, cordierita e mulita.
Densidade	Grau de densidade (massa específica aparente).
Resistência ao ataque químico	Resistência à ação de ácidos, como H_2SO_4 ou HCl .

Tabela 2 – Classificação dos materiais refratários com base em critérios técnicos: forma física, processo de fabricação, método de conformação, composição química e mineralógica, densidade e resistência química.

2.2.2 Refratários AZS e Composição Química

Os refratários AZS (Alumina-Zircônia-Sílica) são classificados, segundo a norma NBR 10237, como refratários conformados eletrofundidos de natureza predominantemente ácida. Sua fabricação ocorre por meio do processo de eletrofusão em fornos de arco elétrico, onde as matérias-primas são fundidas e subsequentemente solidificadas, resultando em tijolos refratários com elevada resistência mecânica, térmica e química. Devido a essas propriedades excepcionais, os refratários AZS são amplamente empregados na indústria vidreira, desempenhando um papel fundamental na resistência à corrosão provocada pelo vidro fundido e às elevadas temperaturas operacionais [8].

A composição química desses refratários é essencial para a definição de suas propriedades termomecânicas. Os principais constituintes são a alumina (Al_2O_3), a zircônia (ZrO_2) e a sílica (SiO_2), podendo conter pequenas quantidades de outros óxidos metálicos, como a hematita (Fe_2O_3), que são incorporados conforme a aplicação desejada para otimizar características específicas do material [14].

A microestrutura do AZS é heterogênea e anisotrópica, composta por fases cristalinas de alumina e zircônia dispersas em uma matriz vítrea rica em sílica. Essa distribuição não uniforme das fases impacta diretamente as propriedades térmicas e mecânicas do material, uma vez que variações microestruturais dentro do bloco podem influenciar a resistência à corrosão e ao choque térmico [15].

Cada componente desempenha um papel específico na performance do material:

- **Alumina (Al_2O_3):** responsável por conferir alta resistência mecânica e estabilidade térmica, devido ao seu elevado ponto de fusão (2050°C) e resistência química a ambientes agressivos [16].
- **Zircônia (ZrO_2):** melhora a tenacidade do refratário e sua resistência ao choque térmico, sendo essencial para suportar variações bruscas de temperatura. Seu ponto de fusão elevado (2715°C) garante estabilidade estrutural em condições extremas[17].
- **Sílica (SiO_2):** atua como fase ligante, promovendo coesão e estabilidade estrutural, com ponto de fusão em torno de 1700°C [14].

Graças a essa combinação única de propriedades, os refratários AZS são amplamente utilizados no revestimento de fornos industriais de fusão, canais de transporte do vidro fundido e câmaras de resfriamento. Seu emprego é essencial para proteger os equipamentos contra danos estruturais, minimizar perdas energéticas e garantir a integridade química e mecânica dos produtos processados [18].

2.2.3 Monitoramento do Desgaste dos Refratários

Apesar da alta resistência dos refratários AZS, seu desgaste progressivo pode comprometer a eficiência térmica e a integridade estrutural dos fornos industriais. A degradação ocorre, principalmente, devido à dissolução química provocada pelo vidro fundido, à erosão mecânica por fluxo de material e aos estresses térmicos gerados por ciclos operacionais.

Fornos modernos com revestimentos de AZS são projetados para operar por longos períodos (8 a 9 anos) sem necessidade de manutenção estrutural significativa. No entanto, a durabilidade desses materiais depende de um monitoramento rigoroso, capaz de identificar precocemente desgastes excessivos e prever falhas estruturais. Métodos como termografia infravermelha, análise de variação de espessura e simulações computacionais são amplamente utilizados para acompanhar o estado dos refratários, permitindo otimizar a vida útil do revestimento e evitar paradas inesperadas no processo industrial [18].

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é um fenômeno físico fundamental amplamente abordado na termodinâmica e na física, consistindo no processo pelo qual a energia térmica é transmitida de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura. Este conceito é crucial para compreender não apenas a transferência energética entre o vidro fundido e o refratário, mas também os mecanismos envolvidos no resfriamento dos materiais refratários. A transferência de calor pode ocorrer por três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação. Cada um desses modos possui características particulares regidas por princípios físicos específicos [19]. A Figura 2 ilustra esquematicamente esses três modos.

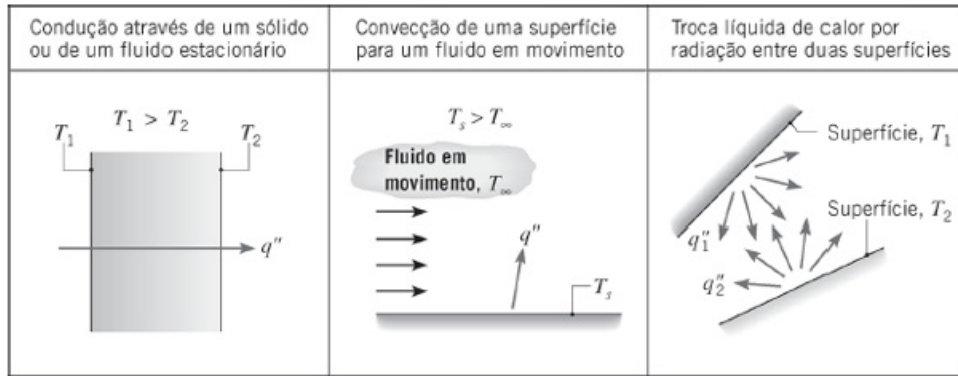


Figura 2 – Ilustração dos três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação [19].

2.3.1 Transferência de calor por Condução

A condução térmica ocorre dentro de um mesmo material ou entre materiais sólidos em contato direto, sendo caracterizada pela transferência de energia térmica através das vibrações moleculares. De acordo com Incropera et al. [19], a condução térmica pode ser compreendida como o processo no qual partículas com maior energia cinética transmitem energia às partículas adjacentes menos energéticas, resultando em um fluxo de calor.

Matematicamente, a condução é descrita pela Lei de Fourier, que relaciona o fluxo de calor ao gradiente de temperatura existente no material:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}. \quad (2.1)$$

Nessa expressão, q_x'' representa o fluxo de calor por unidade de área na direção x [W/m²], k é a condutividade térmica do material [W/(m · K)], e $\frac{dT}{dx}$ corresponde ao gradiente de temperatura na direção x [K/m]. O sinal negativo indica que o calor flui naturalmente na direção das temperaturas mais baixas.

A condutividade térmica (k) dos materiais varia significativamente conforme sua estrutura e composição. Metais, como cobre e alumínio, possuem alta condutividade térmica devido à presença de elétrons livres que facilitam a transferência de calor. Por outro lado, materiais cerâmicos e polímeros apresentam condutividades térmicas mais baixas, uma vez que a transferência de calor nesses materiais ocorre principalmente por meio de vibrações da rede cristalina, conhecidas como fônons, e não pela movimentação de elétrons livres [20]. O conhecimento dessa propriedade é essencial na seleção e aplicação de materiais refratários.

Equação Geral da Condução Térmica

A partir da Lei de Fourier e do princípio da conservação de energia, é possível derivar a equação geral da condução térmica, uma equação diferencial que descreve a distribuição

espacial e temporal da temperatura em sólidos, podendo incluir ou não fontes internas de calor. A forma geral da equação em coordenadas cartesianas é dada por:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q. \quad (2.2)$$

Em que ρ representa a densidade [kg/m³], c_p o calor específico [J/(kg · K)], T a temperatura [K], t o tempo [s] e q é a taxa volumétrica de geração interna de calor [W/m³].

Essa equação pode ser simplificada dependendo das condições específicas do problema em análise. Por exemplo, em casos estacionários ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$) e sem geração interna de calor ($q = 0$), ela se reduz à Equação de Laplace:

$$\nabla^2 T = 0. \quad (2.3)$$

Se houver geração interna de calor em condições estacionárias, obtém-se a Equação de Poisson:

$$\nabla^2 T = -\frac{q}{k}. \quad (2.4)$$

Essas equações são amplamente empregadas na modelagem e análise de fenômenos térmicos complexos, incluindo o comportamento térmico em refratários industriais.

Dependendo da geometria específica do problema analisado, é necessário considerar diferentes sistemas de coordenadas. A seguir, são apresentadas as formulações simplificadas para condução térmica unidimensional em sistemas coordenados:

Coordenadas cartesianas (placas planas):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q. \quad (2.5)$$

Coordenadas cilíndricas (tubos ou cilindros sólidos):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q. \quad (2.6)$$

Coordenadas esféricas (esferas sólidas):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q. \quad (2.7)$$

Essas equações permitem tratar adequadamente problemas com diferentes simetrias geométricas.

2.3.2 Transferência de Calor por Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre devido à interação térmica entre uma superfície sólida e um fluido em movimento. Esse mecanismo pode ser classificado em dois tipos principais: convecção natural e convecção forçada. A convecção natural é induzida

pela diferença de densidade gerada por variações de temperatura no fluido, resultando em movimento espontâneo do fluido sem a necessidade de forças externas. Já a convecção forçada ocorre quando dispositivos externos, como ventiladores ou bombas, são utilizados para impulsionar o fluxo do fluido, aumentando significativamente a taxa de transferência de calor [21].

Matematicamente, a taxa de transferência de calor convectiva é descrita pela **Lei do Resfriamento de Newton**, representada por:

$$q = h(T_s - T_\infty). \quad (2.8)$$

Onde q representa o fluxo de calor convectivo [W/m^2], h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], T_s é a temperatura da superfície do sólido e T_∞ é a temperatura do fluido afastado da superfície.

Determinação do Coeficiente Convectivo h

O coeficiente convectivo (h) depende diretamente das propriedades físicas do fluido, do regime de escoamento e da geometria do sistema. Para calcular h , utiliza-se o número adimensional de Nusselt (Nu), definido pela relação:

$$Nu = \frac{hL}{k_{\text{fluido}}}. \quad (2.9)$$

Rearranjando essa expressão para determinar h , temos:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{\text{fluido}}}{L}. \quad (2.10)$$

Em que k_{fluido} representa a condutividade térmica do fluido [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] e L é a dimensão característica do sistema [m], como comprimento ou diâmetro, dependendo da geometria envolvida.

A análise detalhada da transferência de calor por convecção frequentemente utiliza números adimensionais, pois permitem generalizar e comparar diferentes situações. Os principais são os números de Reynolds e Prandtl.

Número de Reynolds (Re_L): caracteriza o regime do fluxo (laminar ou turbulento), sendo definido como:

$$Re_L = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu}. \quad (2.11)$$

Onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], v é a velocidade do fluido [m/s], μ é a viscosidade dinâmica [$\text{Pa} \cdot \text{s}$], e ν é a viscosidade cinemática [m^2/s]. Altos valores de Re_L indicam fluxo turbulento, enquanto baixos valores sugerem fluxo laminar.

Número de Prandtl (Pr): expressa a relação entre a difusividade do momento e a difusividade térmica do fluido, dado por:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_{\text{fluido}}}. \quad (2.12)$$

Sendo c_p a capacidade calorífica específica do fluido [J/(kg · K)]. O número de Prandtl é importante na determinação do regime térmico e na análise da eficácia do processo de convecção.

Combinando as equações anteriores, a Lei do Resfriamento de Newton pode ser expressa na forma expandida:

$$q = \frac{Nu \cdot k_{\text{fluido}}}{L} (T_s - T_{\infty}). \quad (2.13)$$

Essa forma destaca explicitamente a influência direta das propriedades do fluido, do regime de fluxo e da geometria do sistema sobre o fluxo convectivo.

Na literatura especializada, a importância da caracterização adequada das propriedades do fluido e dos números adimensionais é amplamente ressaltada, especialmente o número de Reynolds, cuja variação determina diretamente o regime do escoamento (laminar ou turbulento) e, conseqüentemente, a eficiência na transferência de calor por convecção [22, 23].

Neste trabalho, o ar é o fluido utilizado para promover a transferência de calor por convecção tanto no experimento prático quanto nas simulações computacionais e no modelo analítico. Assim, suas propriedades termofísicas, como densidade, viscosidade dinâmica, capacidade calorífica e condutividade térmica, são fundamentais para a correta previsão e análise do comportamento térmico dos refratários AZS em condições controladas. O entendimento preciso dessas propriedades permite otimizar processos térmicos industriais, garantindo eficiência operacional e precisão nas estimativas de espessura dos refratários [24].

2.3.3 Transferência de Calor por Radiação

A transferência de calor por radiação ocorre devido à emissão de energia eletromagnética por corpos com temperaturas superiores ao zero absoluto (0 K), não dependendo de um meio material para sua propagação, podendo ocorrer inclusive no vácuo [25]. Diferentemente dos mecanismos de condução e convecção, que exigem um meio físico para transferência de energia, a radiação térmica ocorre por meio de ondas eletromagnéticas, que abrangem uma ampla faixa do espectro eletromagnético, desde o infravermelho até o ultravioleta, dependendo da temperatura do corpo emissor [26].

A Figura 3 apresenta as diferentes faixas do espectro eletromagnético, destacando especialmente as regiões associadas à radiação visível.

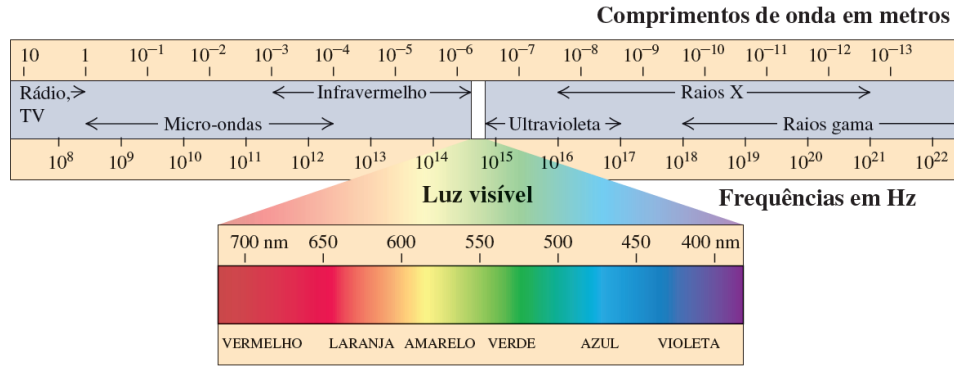


Figura 3 – Espectro eletromagnético, destacando as regiões associadas à radiação visível. Adaptado de [27].

Um conceito central para compreender a radiação térmica é o corpo negro, definido teoricamente como um emissor e absorvedor perfeito, capaz de absorver toda a radiação incidente e emitir radiação térmica máxima em todas as frequências possíveis [28]. O fluxo de calor emitido por um corpo negro é dado pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$q_{\text{corpo negro}} = \sigma T^4. \quad (2.14)$$

onde $q_{\text{corpo negro}}$ é o fluxo de calor emitido [W/m^2], σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), e T é a temperatura absoluta do corpo [K].

Além disso, a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro segue a Lei de Planck, conforme ilustrado na Figura 4. Essa distribuição é descrita pela equação:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}, \quad (2.15)$$

onde $I(\lambda, T)$ representa a intensidade espectral da radiação emitida [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$], λ é o comprimento de onda [m], T é a temperatura [K], h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz e k_B é a constante de Boltzmann. O pico de emissão de energia se desloca para comprimentos de onda menores à medida que a temperatura do corpo aumenta, fenômeno descrito pela Lei do Deslocamento de Wien.

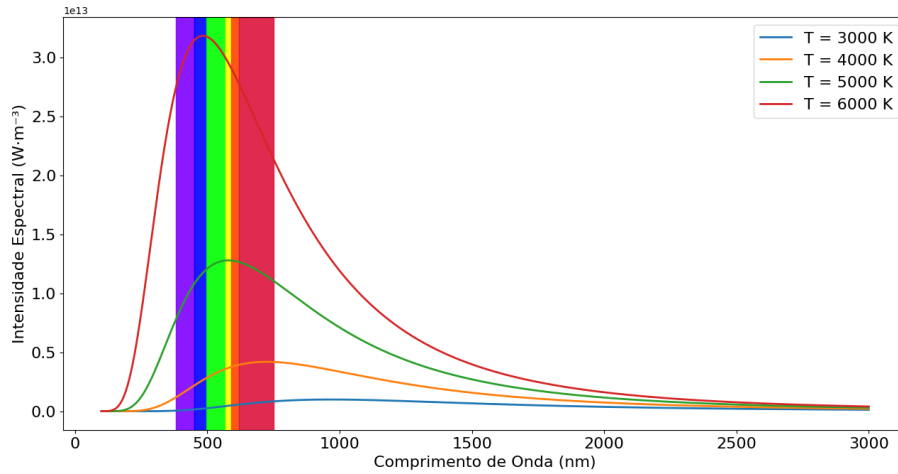


Figura 4 – Distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro.

Corpos reais não se comportam como corpos negros perfeitos, emitindo radiação com menor eficiência. Para caracterizar essa diferença, utiliza-se a propriedade denominada *emissividade* (ε), um parâmetro adimensional que assume valores entre 0 (superfície totalmente reflexiva) e 1 (corpo negro ideal). A emissividade depende de fatores como o material, a temperatura e o comprimento de onda da radiação [29]. Por exemplo, superfícies metálicas polidas apresentam baixa emissividade, enquanto superfícies oxidadas ou não metálicas tendem a ter emissividades mais altas. Assim, o fluxo de calor emitido por uma superfície real é expresso como:

$$q_{\text{real}} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.16)$$

A transferência líquida de calor por radiação entre uma superfície e seu ambiente é determinada pela diferença entre a radiação emitida e a radiação absorvida. Considerando uma superfície à temperatura T_s cercada por um ambiente à temperatura T_∞ , o fluxo líquido de calor por radiação é descrito por:

$$q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.17)$$

Essa equação destaca a forte dependência do fluxo radiativo com as temperaturas envolvidas, indicando que esse mecanismo ganha relevância significativa em sistemas de alta temperatura, como fornos industriais, processos metalúrgicos e operações envolvendo refratários.

Contudo, em contextos específicos, como no estudo de refratários sujeitos a intensa ventilação ou quando os mecanismos de condução e convecção dominam, a contribuição relativa da radiação pode tornar-se menos significativa no balanço térmico global. Dessa forma, a simplificação dos modelos térmicos, focando principalmente na condução e na convecção, é uma estratégia frequentemente adotada para reduzir a complexidade computacional, sem prejuízos significativos à precisão dos resultados obtidos [19].

2.4 TERMOGRAFIA

A termografia é uma técnica de análise térmica não invasiva que utiliza câmeras sensíveis à radiação infravermelha para medir e visualizar a distribuição de temperaturas superficiais de objetos e materiais. Essa tecnologia é amplamente empregada em diversas áreas como engenharia, medicina e indústria, permitindo a identificação de anomalias térmicas que podem indicar problemas estruturais, falhas operacionais ou até condições médicas específicas [30].

No contexto industrial, a termografia destaca-se pela sua versatilidade e eficiência, sendo aplicada em diferentes setores produtivos como construção civil, indústria automobilística, siderurgia e indústria vidreira. Na siderurgia, por exemplo, a técnica é empregada para analisar o perfil térmico de metais fundidos durante a solidificação, enquanto na indústria vidreira pode monitorar o estado térmico e estrutural dos revestimentos refratários utilizados em fornos industriais. A principal vantagem dessa técnica é permitir o acompanhamento contínuo das condições térmicas sem necessidade de interrupções no processo produtivo [31].

2.4.1 Princípios de Funcionamento da Termografia

A termografia fundamenta-se no princípio físico de que todos os corpos cuja temperatura esteja acima do zero absoluto (0 K) emitem radiação eletromagnética proporcional à sua temperatura. Essa radiação encontra-se majoritariamente na faixa do infravermelho, seguindo a Lei de Stefan-Boltzmann já apresentada na Equação (2.14). Entretanto, corpos reais não são emissores perfeitos, sendo necessário considerar um fator conhecido como emissividade, uma propriedade específica dos materiais que influencia diretamente a precisão das medições térmicas [32].

As câmeras termográficas são projetadas para captar e processar a radiação infravermelha emitida pelos corpos analisados, transformando-a em imagens visuais representativas da temperatura da superfície observada [33]. O processo operacional básico de um termovisor pode ser descrito em quatro etapas principais:

1. **Captação da Radiação:** A radiação infravermelha emitida pelo objeto é captada pela lente do termovisor e direcionada ao sensor interno.
2. **Conversão em Sinal Elétrico:** O sensor converte a radiação captada em sinais elétricos proporcionais à intensidade da radiação recebida.
3. **Processamento dos Dados:** O processador do equipamento converte os sinais elétricos em valores de temperatura, considerando parâmetros como emissividade do objeto e condições ambientais.

4. **Visualização da Imagem Térmica:** As temperaturas calculadas são representadas em uma imagem térmica visível, utilizando uma escala de cores que facilita a análise térmica da superfície.

A Figura 5 apresenta um esquema simplificado do funcionamento básico de um termovisor, destacando as etapas mencionadas anteriormente.

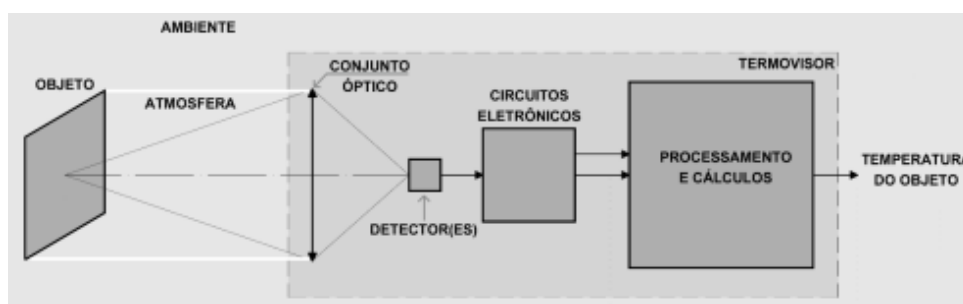


Figura 5 – Diagrama esquemático das etapas de funcionamento de um termovisor. Adaptado de [30].

A emissividade foi ajustada em 0.95 para garantir maior precisão nas medições termográficas. Apesar de ser uma técnica eficaz e amplamente utilizada, a termografia possui algumas limitações que podem comprometer a exatidão das medições. A principal limitação é a dependência da emissividade, já que materiais com emissividades diferentes refletem e emitem radiação térmica em graus variados. De acordo com diversas fontes da literatura, refratários do tipo AZS apresentam emissividade próxima de 0.85 a 0.95, dependendo da composição e do estado da superfície. Superfícies metálicas altamente polidas, por exemplo, apresentam baixa emissividade e elevada refletividade, exigindo ajustes cuidadosos nos equipamentos termográficos para evitar erros significativos nas medições [34].

Apesar de a termografia ter sido realizada em ambiente controlado, livre de interferências externas, a aplicação em fornos industriais envolve desafios adicionais, como reflexões térmicas, fuligem, variações de emissividade e instabilidades no fluxo de ar. Tais fatores podem comprometer a precisão das medições.

Nesse contexto, os dados experimentais servem como base para calibração e validação de modelos. Para uso em campo, recomenda-se atenção à emissividade, ao ângulo de visão, à distância da medição e, quando possível, o uso complementar de imagens no espectro visível, conforme orienta [35].

2.4.2 Aplicação da Termografia em Refratários

No estudo específico dos refratários, a termografia desempenha um papel fundamental ao permitir o monitoramento contínuo e não invasivo da distribuição térmica superficial desses materiais. Esse monitoramento é especialmente importante para avaliar a eficiência

térmica e identificar precocemente regiões de desgaste ou perda de espessura, uma vez que alterações térmicas na superfície estão frequentemente associadas à degradação estrutural do refratário. Tais mudanças podem afetar tanto a segurança quanto a eficiência energética dos fornos industriais [35].

Para garantir medições precisas e confiáveis em refratários, é fundamental considerar que estes materiais não se comportam como corpos negros ideais, apresentando emissividades específicas que precisam ser cuidadosamente determinadas [36]. Assim, a calibração adequada da câmera termográfica, incluindo a seleção correta da emissividade, é essencial para assegurar resultados exatos e consistentes [37].

Ao integrar a termografia com técnicas adicionais, como simulações computacionais e modelos analíticos, é possível obter uma compreensão mais detalhada e abrangente do comportamento térmico dos refratários. Essa abordagem integrada proporciona uma base robusta para a tomada de decisões operacionais e facilita intervenções de manutenção preditiva mais eficazes na indústria vidreira e em outros setores industriais críticos [38].

3 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

3.1 Breve Histórico e Importância do Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada para solucionar problemas complexos descritos por equações diferenciais parciais (EDPs). Sua origem remonta à década de 1940, com os trabalhos pioneiros de Richard Courant, que apresentou o conceito inicial de discretização para resolver problemas estruturais na engenharia aeronáutica. Posteriormente, nas décadas de 1950 e 1960, pesquisadores como J. H. Argyris e O. C. Zienkiewicz consolidaram e aprimoraram formalmente essa abordagem, expandindo-a para diversas aplicações práticas [39].

A principal contribuição do método reside na sua capacidade de transformar problemas contínuos, representados por equações diferenciais parciais complexas, em sistemas discretizados de equações algébricas, que podem ser resolvidos numericamente com grande eficiência e precisão. Ao longo dos anos, consolidou-se como uma ferramenta essencial para o estudo de geometrias complexas, sendo amplamente empregado em áreas como engenharia estrutural e análise térmica de materiais refratários [39].

Dentre as abordagens numéricas disponíveis atualmente, essa técnica destaca-se pela robustez e versatilidade, sendo aplicada em diversos ramos da engenharia, incluindo mecânica estrutural, transferência de calor, mecânica dos fluidos e eletromagnetismo [39]. No contexto da análise térmica de materiais refratários, objeto central deste estudo, permite prever com precisão a distribuição de temperaturas e otimizar estratégias operacionais e de manutenção.

Além das aplicações clássicas na engenharia estrutural e térmica, o MEF tem sido amplamente utilizado em outras áreas da engenharia, como mecânica, civil, elétrica e química, demonstrando sua versatilidade. Na ciência dos materiais, destaca-se por possibilitar análises detalhadas do comportamento térmico e estrutural de materiais avançados, como refratários, compósitos e biomateriais.

Outro campo de aplicação relevante é a biomecânica, onde esse método numérico é empregado para simular o comportamento estrutural de ossos, tecidos e dispositivos médicos, expandindo significativamente seu alcance tecnológico e científico.

3.1.1 Etapas de Aplicação do MEF

A resolução de problemas pelo MEF segue uma metodologia estruturada, com etapas sequenciais que asseguram a obtenção de resultados robustos e precisos [40]. As etapas principais são:

1. **Formulação do Problema:** definição das equações governantes, condições iniciais e condições de contorno;
2. **Discretização Espacial (Geração da Malha):** divisão do domínio contínuo em elementos menores e discretos, criando uma malha apropriada;
3. **Escolha das Funções de Forma:** definição de funções interpoladoras que descrevem a variação das variáveis (por exemplo, temperatura ou deslocamento) dentro de cada elemento;
4. **Montagem das Equações Elementares:** estabelecimento das equações discretas elementares, que são reunidas para formar um sistema global de equações;
5. **Aplicação das Condições de Contorno:** introdução das condições específicas do problema, garantindo representatividade física;
6. **Resolução Numérica do Sistema Algébrico:** obtenção das soluções discretas para o problema;
7. **Pós-processamento:** análise e interpretação dos resultados obtidos através de gráficos, mapas de calor e relatórios numéricos detalhados.

Essas etapas formam um ciclo iterativo, permitindo ajustes para melhorar a precisão e convergência das soluções obtidas.

3.1.2 Aplicação do MEF no Estudo dos Refratários AZS

Neste estudo, o (MEF) foi aplicado para avaliar o comportamento térmico dos refratários AZS sob diferentes condições operacionais, especificamente variando a velocidade de ventilação na superfície externa. Para realizar essa análise numérica, foi empregado o software COMSOL Multiphysics, ferramenta amplamente reconhecida pela sua capacidade de resolver equações diferenciais complexas por meio do método dos elementos finitos, permitindo simulações detalhadas e precisas dos fenômenos térmicos em estudo.

Na modelagem numérica do comportamento térmico e mecânico dos objetos, é comum adotar a hipótese de isotropia e homogeneidade, assumindo que suas propriedades são uniformes em todas as direções [41]. Essa simplificação facilita a resolução das equações de transferência de calor no Método dos Elementos Finitos (MEF). Neste trabalho, essa abordagem será utilizada para viabilizar a análise numérica, considerando suas vantagens computacionais e a complexidade adicional envolvida em um modelo anisotrópico e heterogêneo.

3.1.3 Formulação do Problema

O problema abordado consiste na transferência de calor em regime estacionário através de um bloco refratário AZS isotrópico, com dimensões específicas de $500 \times 200 \times 76$ mm. Essas dimensões foram escolhidas por corresponderem à mesma placa refratária utilizada na realização de placagem na cuba de fornos industriais para fusão de vidro, garantindo representatividade prática ao modelo. Nesse contexto, uma das faces do bloco é submetida a uma temperatura constante elevada, simulando as condições térmicas reais no interior do forno, enquanto a face externa oposta é exposta a um fluxo de ar por meio de ventilação forçada.

Devido às características geométricas e condições de operação específicas do sistema analisado, é viável realizar uma simplificação do modelo para uma abordagem unidimensional (1D). Essa simplificação é válida desde que as faces laterais sejam consideradas isoladas termicamente, o que implica na ausência de gradientes significativos de temperatura nas direções transversais (y e z). Dessa forma, todo o fluxo de calor é assumido ocorrer exclusivamente na direção da espessura (x), facilitando a implementação computacional e a análise dos resultados, sem perda significativa de precisão para os objetivos deste estudo.

3.1.4 Análise de Condução de Calor Unidimensional com Convecção

Após a definição clara do problema, passamos à formulação matemática detalhada da transferência de calor por condução unidimensional, considerando a presença de convecção em uma das faces do bloco refratário AZS.

Para descrever a condução térmica em materiais isotrópicos em regime estacionário (sem variação de temperatura no tempo), utiliza-se a seguinte equação diferencial em três dimensões (3D):

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (3.1)$$

Como o problema proposto admite simplificação unidimensional, com variações significativas da temperatura apenas na direção x (direção da espessura do refratário), essa equação reduz-se a:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.2)$$

onde $L = 76$ mm corresponde à espessura total do refratário AZS estudado.

3.1.5 Condições de Contorno

Para resolver essa equação diferencial ordinária, devem-se estabelecer condições de contorno que refletem o comportamento físico do sistema:

Face quente (condição de Dirichlet): A face interna ($x = 0$) está em contato com uma temperatura constante e conhecida (T_0), representando a temperatura da face em contato com o vidro fundido:

$$T(0) = T_0 \quad (3.3)$$

Face ventilada (condição de Robin): A face externa está exposta à ventilação forçada, o que resulta em uma condição de contorno convectiva, dada por:

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = h [T(L) - T_{\text{amb}}] \quad (3.4)$$

onde:

- h é o coeficiente de transferência de calor convectivo [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$];
- $T(L)$ é a temperatura da face externa do refratário [K ou $^{\circ}\text{C}$];
- T_{amb} é a temperatura ambiente (do ar em circulação) [K ou $^{\circ}\text{C}$].

Faces laterais isoladas (condição adiabática): Como pressuposto, as faces laterais são consideradas adiabáticas, eliminando o fluxo de calor nas direções y e z :

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

3.1.6 Formulação Fraca

A formulação fraca desempenha um papel essencial na aplicação do (MEF), sendo particularmente vantajosa em problemas envolvendo equações diferenciais, como é o caso da condução de calor em refratários AZS. Entre suas principais vantagens destacam-se:

Suavização da solução: A formulação fraca reduz os requisitos de regularidade da solução $T(x)$, permitindo soluções menos suaves do que as exigidas pela formulação forte (clássica).

Incorporação natural das condições de contorno: Condições do tipo Neumann e Robin (como a convecção) são incorporadas naturalmente no processo de integração, sem a necessidade de imposição explícita.

Facilidade de discretização: A formulação fraca resulta em um sistema de equações algébricas, facilitando sua solução numérica por métodos computacionais como o MEF.

Dessa forma, a escolha pela formulação fraca simplifica a resolução numérica do problema e melhora a estabilidade e convergência dos resultados obtidos.

A derivação da formulação fraca começa pela multiplicação da equação diferencial governante por uma função teste arbitrária $v(x)$, seguida da integração ao longo de todo o domínio de interesse:

$$\int_0^L v(x) \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx = 0 \quad (3.6)$$

A técnica de integração por partes é aplicada para transformar a expressão inicial, simplificando-a e incorporando naturalmente as condições de contorno no problema. Retomando a equação inicial:

$$\int_0^L v(x) \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx \quad (3.7)$$

Aplicando o método de integração por partes, definem-se as seguintes substituições: $u = v(x)$ e $dv = \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx$. Com isso, a integral torna-se:

$$\int_0^L v(x) \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx = - \int_0^L k \frac{dT}{dx} \frac{dv}{dx} dx + \left[v(x) k \frac{dT}{dx} \right]_0^L \quad (3.8)$$

Neste ponto, analisamos as contribuições das condições de contorno. Na face esquerda do domínio ($x = 0$), a temperatura é fixada pela condição de Dirichlet, o que faz com que a função teste seja nula ($v(0) = 0$), anulando o termo de contorno nessa posição. Já na face direita ($x = L$), há uma condição de contorno convectiva de Robin dada por:

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = h [T(L) - T_{\text{amb}}] \quad (3.9)$$

Com isso, o termo de contorno à direita pode ser reescrito como:

$$v(L) k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = -v(L) h [T(L) - T_{\text{amb}}] \quad (3.10)$$

Substituindo na equação integral, obtém-se a formulação fraca final:

$$\int_0^L k \frac{dT}{dx} \frac{dv}{dx} dx + h T(L) v(L) = h T_{\text{amb}} v(L) \quad (3.11)$$

Essa forma final incorpora naturalmente a condição de contorno convectiva, permitindo que a solução numérica pelo Método dos Elementos Finitos seja implementada com maior eficiência e clareza.

3.1.7 Discretização do Domínio

A discretização do domínio em elementos finitos é a base do MEF, permitindo a aproximação de soluções para problemas complexos de engenharia [42]. A discretização consiste em dividir o domínio contínuo em elementos finitos menores, onde a solução é aproximada por funções interpoladoras conhecidas como *funções de forma*. Esse processo permite transformar o problema de condução de calor em um sistema de equações algébricas solucionável numericamente.

O primeiro passo no MEF é subdividir o domínio $[0, L]$ em N elementos finitos. Cada elemento possui um tamanho Δx dado por:

$$\Delta x = \frac{L}{N} \quad (3.12)$$

No presente estudo, considerando uma abordagem inicial simplificada, utilizamos um único elemento ($N = 1$), cobrindo todo o intervalo de $x = 0$ a $x = L$:

$$\Delta x = L \quad (3.13)$$

Para $L = 76$ mm, o elemento único representa toda a espessura do refratário, e a solução será definida nos nós $x = 0$ e $x = L$.

3.1.8 Aproximação da Temperatura – Funções de Forma Lineares

Dentro de cada elemento, a temperatura $T(x)$ é aproximada por uma combinação linear das temperaturas nos nós do elemento:

$$T(x) \approx N_1(x)T_1 + N_2(x)T_2 \quad (3.14)$$

onde:

- T_1 e T_2 são as temperaturas nos nós do elemento, correspondentes às posições $x = 0$ e $x = L$;
- $N_1(x)$ e $N_2(x)$ são as **funções de forma**, que descrevem como a temperatura varia dentro do elemento.

As funções de forma lineares são construídas para garantir que $N_1(x)$ assumam valor 1 no nó $x = 0$ e 0 em $x = L$, e vice-versa para $N_2(x)$. A expressão dessas funções pode ser definida como:

$$N_1(x) = 1 - \frac{x}{L}, \quad N_2(x) = \frac{x}{L} \quad (3.15)$$

Essas funções garantem que, nos nós do elemento:

$$N_1(0) = 1, \quad N_1(L) = 0, \quad N_2(0) = 0, \quad N_2(L) = 1 \quad (3.16)$$

Com isso, a solução $T(x)$ é uma interpolação linear entre T_1 e T_2 , garantindo uma transição suave dentro do elemento.

A utilização de funções de forma lineares implica que a temperatura dentro do elemento varia de maneira linear entre os nós, o que é uma aproximação válida para elementos pequenos ou para problemas em que o gradiente térmico não apresenta variações bruscas. Essa estratégia simplifica os cálculos e fornece bons resultados para a modelagem inicial do problema térmico em refratários AZS.

3.1.9 Derivação da Matriz de Rigidez

A formulação fraca, obtida anteriormente, permite a construção da matriz de rigidez que será utilizada para resolver numericamente o problema térmico dos refratários AZS pelo Método dos Elementos Finitos.

A equação integral correspondente à formulação fraca para o problema de condução térmica unidimensional em regime estacionário, com condição de contorno convectiva na extremidade $x = L$, é expressa por:

$$\int_0^L k \frac{dT}{dx} \frac{dv}{dx} dx + hT(L)v(L) = hT_{\text{amb}}v(L) \quad (3.17)$$

Para resolver numericamente essa equação pelo Método dos Elementos Finitos, substituímos a temperatura $T(x)$ por sua aproximação utilizando as funções de forma, conforme a Equação (3.14), em que $N_1(x)$ e $N_2(x)$ são as funções de forma lineares definidas na Equação (3.15).

A fim de calcular o termo de condução da Equação (3.17), é necessário determinar as derivadas das funções de forma em relação à coordenada espacial x . Como $N_1(x)$ e $N_2(x)$ são funções lineares, suas derivadas são constantes:

$$\frac{dN_1}{dx} = -\frac{1}{L}, \quad \frac{dN_2}{dx} = \frac{1}{L} \quad (3.18)$$

Essas derivadas serão utilizadas para compor os termos da matriz de rigidez associada ao problema térmico, possibilitando a montagem do sistema algébrico que aproxima a distribuição de temperatura no domínio do refratário.

Substituímos essas derivadas na integral da formulação fraca para obter os coeficientes da matriz de rigidez. Os termos individuais são calculados como:

$$K_{11} = \int_0^L k \left(-\frac{1}{L}\right) \left(-\frac{1}{L}\right) dx = \frac{k}{L} \quad (3.19)$$

$$K_{12} = \int_0^L k \left(-\frac{1}{L}\right) \left(\frac{1}{L}\right) dx = -\frac{k}{L} \quad (3.20)$$

$$K_{21} = \int_0^L k \left(\frac{1}{L}\right) \left(-\frac{1}{L}\right) dx = -\frac{k}{L} \quad (3.21)$$

$$K_{22} = \int_0^L k \left(\frac{1}{L}\right) \left(\frac{1}{L}\right) dx = \frac{k}{L} \quad (3.22)$$

Assim, a Matriz de Rigidez do Elemento devido à Condutividade é:

$$K_{\text{cond}}^e = \frac{k}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Essa matriz descreve a influência da condutividade térmica do material na distribuição de temperatura dentro do elemento finito. A próxima etapa consiste em incluir a contribuição da condição de contorno convectiva na formulação para obter o sistema completo de equações.

A troca de calor entre a superfície do refratário e o ambiente ocorre por convecção, fenômeno descrito pela seguinte condição de contorno:

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = h (T(L) - T_{\text{amb}}) \quad (3.24)$$

No contexto do Método dos Elementos Finitos, essa condição impõe uma modificação na matriz de rigidez do sistema, adicionando um termo relacionado à convecção. Além disso, a convecção também contribui para o vetor de carga.

Como essa condição de contorno ocorre na face $x = L$, que corresponde ao nó 2 da discretização, a matriz de rigidez sofre um acréscimo representado por:

$$K_{\text{conv}} = h \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Enquanto isso, o vetor de carga recebe a seguinte contribuição da convecção:

$$F_{\text{conv}} = hT_{\text{amb}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

O sistema completo de equações que governa a distribuição de temperatura no elemento finito é obtido somando a matriz de rigidez devido à condução com a matriz adicional de convecção:

$$(K_{\text{cond}} + K_{\text{conv}}) \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = F_{\text{conv}} \quad (3.27)$$

Expandindo as expressões das matrizes:

$$\left(\frac{k}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + h \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = hT_{\text{amb}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Efetuando a soma das matrizes:

$$\begin{bmatrix} \frac{k}{L} & -\frac{k}{L} \\ -\frac{k}{L} & \frac{k}{L} + h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ hT_{\text{amb}} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Considerando que a temperatura na face $x = 0$ é fixada em T_0 , temos uma condição de Dirichlet que pode ser diretamente aplicada ao sistema. Isso significa que a equação referente ao nó 1 é eliminada, e o valor $T_1 = T_0$ é substituído na segunda equação:

$$-\frac{k}{L}T_0 + \left(\frac{k}{L} + h \right) T_2 = hT_{\text{amb}} \quad (3.30)$$

Rearranjando os termos para obter a expressão final de T_2 :

$$\left(\frac{k}{L} + h\right) T_2 = \frac{k}{L} T_0 + h T_{\text{amb}} \quad (3.31)$$

Essa equação fornece a temperatura na face ventilada (T_2), considerando tanto a condução térmica no interior do refratário quanto a convecção na superfície exposta ao ambiente. Com essa formulação, é possível analisar variáveis como condutividade térmica (k), coeficiente de convecção (h) e espessura do material (L) influenciam a distribuição térmica do sistema.

- A matriz de rigidez condutiva vem da integração da formulação fraca, resultando em:

$$K_{\text{cond}}^e = \frac{k}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

- A matriz de rigidez da convecção adiciona um termo à equação no nó $x = L$:

$$K_{\text{conv}} = h \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

- O vetor de carga da convecção adiciona uma contribuição ao nó $x = L$:

$$F_{\text{conv}} = h T_{\text{amb}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

- Aplicando a condição de Dirichlet $T_1 = T_0$, o sistema reduz-se a:

$$\left(\frac{k}{L} + h\right) T_2 = \frac{k}{L} T_0 + h T_{\text{amb}} \quad (3.35)$$

Essa abordagem permite resolver o problema da condução de calor considerando a convecção na extremidade da barra usando o Método dos Elementos Finitos com um único elemento.

Matriz de Rigidez do Elemento (Condutividade):

$$K_{\text{cond}}^e = \frac{k}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Contribuição da Convecção (Face $x = L$):

$$K_{\text{conv}} = h \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F_{\text{conv}} = h T_{\text{amb}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Sistema Global (Para $N = 1$):

$$(K_{\text{cond}} + K_{\text{conv}}) \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = F_{\text{conv}} \quad (3.38)$$

Aplicando $T_1 = T_0$ (Dirichlet), o sistema reduz-se a:

$$\left(\frac{k}{L} + h\right) T_2 = \frac{k}{L} T_0 + h T_{\text{amb}} \quad (3.39)$$

Que pode ser resolvida para T_2 (temperatura na face ventilada):

$$T_2 = \frac{kT_0 + hLT_{\text{amb}}}{k + hL} \quad (3.40)$$

A aplicação do (MEF) enfrenta desafios como a definição precisa das equações de condução de calor e a necessidade de equilibrar o refinamento da malha para garantir precisão sem comprometer a eficiência computacional. Além disso, geometrias irregulares e domínios complexos frequentemente exigem malhas altamente refinadas, elevando significativamente o custo computacional.

A formulação numérica apresentada permitiu descrever matematicamente o problema térmico dos refratários AZS, considerando tanto a condução interna quanto a convecção na superfície exposta ao ambiente. A solução analítica encontrada para T_2 oferece um ponto de partida para a implementação do modelo numérico em softwares como COMSOL Multiphysics, permitindo a extensão para malhas mais refinadas e geometrias mais complexas.

3.2 COMSOL MULTIPHYSICS

O *COMSOL Multiphysics* é um software de simulação computacional baseado no (MEF), desenvolvido para modelar e resolver problemas físicos complexos descritos por Equações Diferenciais Parciais (EDPs). Sua principal vantagem está na flexibilidade para criar geometrias detalhadas, definir condições de contorno variadas e incorporar múltiplos fenômenos físicos em um mesmo ambiente, garantindo uma representação precisa dos sistemas analisados [43, 44].

Uma das características mais marcantes dessa plataforma é sua interface gráfica intuitiva, que simplifica a formulação matemática do problema, desde a geração da malha até a configuração dos parâmetros físicos [45]. O programa conta com uma malha adaptativa automática, permitindo maior refinamento em regiões com gradientes térmicos elevados sem comprometer a eficiência computacional. Esse recurso é essencial para estudos térmicos detalhados, como a análise da distribuição de temperatura em refratários AZS submetidos a ventilação forçada.

Além da modelagem de condução térmica, o software possibilita a simulação de fenômenos multifísicos acoplados, como convecção e radiação térmica, facilitando a análise integrada de sistemas complexos [46]. A flexibilidade na configuração de coeficientes de transferência de calor variáveis, aliada à possibilidade de definir condições de contorno Dirichlet, Neumann e Robin, torna-o altamente eficiente para problemas de transferência de calor.

Outro ponto de destaque é sua otimização computacional, que utiliza métodos numéricos avançados e suporte à paralelização, permitindo a resolução eficiente de sistemas de grande porte [45]. O software também facilita a validação experimental, possibilitando a comparação direta entre os resultados da simulação e dados experimentais. Esse recurso permite ajustes no modelo para melhor calibração, aumentando a confiabilidade dos resultados [43].

Embora a aplicação do MEF envolva desafios, como a necessidade de refinamento da malha e a correta definição das condições de contorno, a ferramenta oferece recursos que tornam esse processo mais eficiente e preciso. Sua capacidade de integrar múltiplas interações físicas e fornecer visualizações gráficas avançadas, como mapas de calor e isócurvas de temperatura, a torna uma das opções mais robustas para simulações térmicas de refratários e outros sistemas industriais complexos [46].

Dentre as diversas opções disponíveis no mercado, este software foi escolhido para o presente estudo devido à sua robustez na simulação de fenômenos físicos, especialmente no contexto da transferência de calor combinada com efeitos convectivos e radiativos.

4 Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta detalhadamente o experimento prático, a simulação numérica pelo (MEF) utilizando o software COMSOL Multiphysics e o desenvolvimento do modelo analítico. Além disso, são descritos os materiais, equipamentos e métodos empregados no estudo, bem como a metodologia de análise comparativa entre os três métodos, destacando os critérios utilizados para avaliar a confiabilidade dos resultados. A abordagem adotada integra diferentes técnicas de análise para validar o modelo analítico proposto, possibilitando sua aplicação, em conjunto com a termografia, no monitoramento não invasivo do desgaste de refratários AZS. Essa estratégia visa otimizar processos industriais, reduzindo custos de monitoramento e manutenção, além de garantir maior eficiência operacional.

Para investigar essa relação, foi desenvolvido um miniforno experimental projetado para simular diferentes cenários térmicos e níveis de desgaste dos refratários. Os experimentos práticos forneceram dados termográficos da superfície dos refratários sob diferentes condições de ventilação. Paralelamente, foi realizada uma simulação numérica baseada no (MEF) utilizando o software COMSOL Multiphysics. Além disso, um modelo analítico foi formulado para estabelecer uma relação matemática entre a espessura do material e sua temperatura superficial.

A abordagem integrada possibilitou a validação do modelo analítico por meio da comparação com os resultados experimentais e computacionais, aumentando a confiabilidade na estimativa da espessura dos refratários.

O experimento prático avaliou a relação entre temperatura superficial e espessura dos refratários AZS em um miniforno experimental, submetendo amostras com diferentes níveis de desgaste a variações controladas de ventilação. Foram utilizados equipamentos de medição para garantir a precisão dos dados térmicos e do fluxo de ar. A seguir, são detalhados os procedimentos de preparação das amostras, a configuração do sistema de ventilação e a montagem do miniforno.

4.0.1 Preparação dos Refratários com Desgaste e Bico de Pato

Para replicar os desgastes observados em refratários, foram utilizadas três placas de refratários AZS ER1681, cada uma com dimensões iniciais de 500 mm de altura, 200 mm de comprimento e 76 mm de espessura. Essas placas foram submetidas a um processo de desgaste mecânico, que incluiu corte e desbaste por meio de uma serra elétrica. Esse procedimento teve como objetivo simular os efeitos de corrosão e erosão progressiva observados em fornos de fusão de vidro.

Após o processo de desgaste, as placas refratárias AZS com diferentes espessuras em Regiões de Interesse (*Regions of Interest* - ROIs), foram ajustadas para apresentar

espessuras finais distintas, representando diferentes estágios de desgaste:

ROI	Espessura Final (mm)	Estágio de Desgaste
ROI 1	36	Desgaste intermediário
ROI 2	30	Desgaste avançado
ROI 3	76	Sem desgaste

Tabela 3 – Espessuras finais das placas refratárias após o processo de desgaste.

A Figura 6 ilustra as amostras preparadas com diferentes espessuras após o processo de desgaste simulado.



Figura 6 – Amostras de refratários após desgaste simulado: ROI 1 (36 mm), ROI 2 (30 mm) e ROI 3 (76 mm).

Para assegurar condições controladas de ventilação nos experimentos, foi utilizado um dispositivo denominado "bico de pato". Esse sistema foi projetado não apenas para direcionar o fluxo de ar de forma uniforme sobre as regiões de interesse dos refratários, mas também para reproduzir as características do sistema de ventilação presente no forno de fabricação de vidro, garantindo uma representação similar das condições reais de operação.

O "bico de pato" foi confeccionado em chapas metálicas, cortadas e dobradas conforme as dimensões da saída de ar, permitindo um controle adequado da velocidade e da distribuição do fluxo. A Figura 7 apresenta o dispositivo utilizado nos ensaios.



Figura 7 – Dispositivo de ventilação "bico de pato".

A adequação do fluxo de ar proporcionada pelo "bico de pato" foi fundamental para garantir a repetibilidade dos experimentos, assegurando condições controladas de resfriamento e permitindo a correta avaliação do comportamento térmico das amostras sob diferentes estágios de desgaste.

4.0.2 Montagem do Miniforno Experimental

A montagem do mini-forno experimental seguiu uma sequência planejada. Primeiramente, as placas de refratário AZS, com três diferentes espessuras, foram fixadas na parte frontal do equipamento. O posicionamento foi ajustado para garantir que as faces internas desgastadas estivessem voltadas para o interior aquecido do forno, enquanto as faces externas lisas permanecessem expostas ao fluxo de ar de resfriamento.

Para assegurar uma ventilação uniforme sobre as regiões de interesse, o dispositivo "bico de pato" foi posicionado estrategicamente em frente ao refratário. Essa configuração direcionou o fluxo de ar de maneira controlada, reproduzindo as condições de ventilação encontradas no forno industrial.

A Figura 8 mostra a perspectiva interna do miniforno, evidenciando as faces desgastadas voltadas para o interior aquecido, enquanto a Figura 9 ilustra a vista frontal, destacando as superfícies lisas em contato com o fluxo de ar de resfriamento e a Figura 10 mostra o miniforno finalizado.

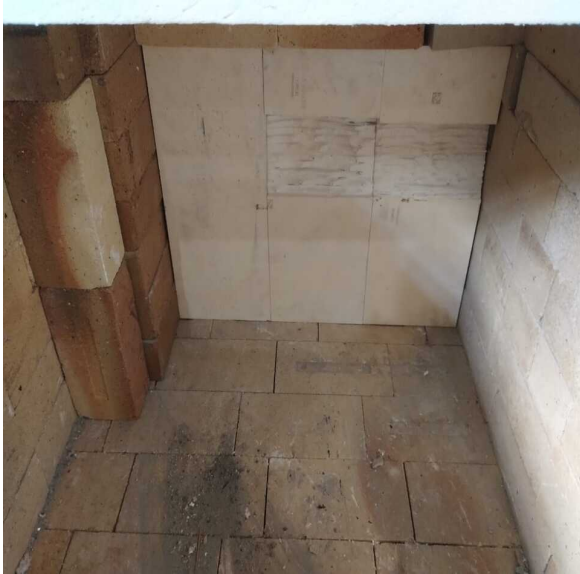


Figura 8 – Vista interna do miniforno, com as faces desgastadas voltadas para o interior aquecido.



Figura 9 – Vista frontal do miniforno, com as superfícies lisas expostas ao ambiente externo.

A Figura 10 apresenta uma visão geral do miniforno experimental, destacando sua estrutura compacta e a disposição frontal das placas refratárias.



Figura 10 – Miniforno experimental.

4.0.3 Equipamentos e Instrumentos

Para garantir a precisão das medições, foram utilizados os seguintes equipamentos:

Equipamento	Especificações	Precisão
Câmera termográfica UNIT 260B	-20 °C a 550 °C	± 2 °C
Pirômetro infravermelho Cyclops 100L	550 °C a 3000 °C	$\pm 0,5\%$
Anemômetro digital INSTRUTEMP ITMAN10PSI	0 a 40 m/s	$\pm 2,5\%$

Tabela 4 – Especificações dos equipamentos.



Figura 11 – Câmera.



Figura 12 – Pirômetro.



Figura 13 – Anemômetro.

O experimento fez uso de instrumentos de medição confiáveis para assegurar a acurácia dos dados coletados. A seguir, são descritos o princípio de funcionamento do pirômetro e do anemômetro utilizados.

O pirômetro é um dispositivo óptico de medição de temperatura que opera com base na radiação térmica emitida por corpos aquecidos. O modelo Cyclops 100L, utilizado neste estudo, é um pirômetro infravermelho portátil que permite medições em temperaturas elevadas, variando de 550 °C a 3000 °C.

Seu funcionamento baseia-se na detecção da radiação eletromagnética emitida pelo objeto em análise, tipicamente na faixa do infravermelho. Essa radiação é focalizada por um sistema óptico sobre um detector, que converte a energia radiante em um sinal elétrico proporcional. O dispositivo aplica então leis de radiação térmica, como a Lei de Planck e a Lei de Stefan-Boltzmann, para estimar a temperatura superficial do corpo alvo. O ajuste da emissividade do material é essencial para obter leituras precisas.

O anemômetro é um instrumento utilizado para medir a velocidade do fluxo de ar. O modelo digital INSTRUTEMP ITMAN10PSI opera com base em sensores de efeito térmico (como fio quente ou película quente) ou sensores rotacionais, dependendo da versão.

No caso do anemômetro digital por fio quente, o princípio de funcionamento envolve o aquecimento de um fio condutor fino por uma corrente elétrica. Quando o ar em movimento passa pelo fio, ocorre uma transferência de calor por convecção, resfriando o fio. A variação na resistência elétrica do fio, que depende da sua temperatura, é então utilizada para inferir a velocidade do fluxo de ar. O dispositivo realiza automaticamente a conversão da variação elétrica em unidades de velocidade (m/s), apresentando o valor digitalmente com precisão de até $\pm 2,5\%$.

Esse instrumento foi fundamental para caracterizar o regime de ventilação no experimento, especialmente na análise da influência da convecção forçada sobre a temperatura da superfície externa dos refratários.

4.0.4 Metodologia Experimental

O experimento foi conduzido em três etapas principais:

1. **Aquecimento do miniforno:** O sistema foi aquecido utilizando gás natural até atingir 750 °C, com um tempo de estabilização de aproximadamente 48 horas.
2. **Aplicação da ventilação:** O fluxo de ar foi ajustado em sete níveis (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 m/s), mantendo cada nível até a estabilização térmica dos refratários.
3. **Coleta de dados:** A temperatura superficial foi monitorada por termografia, com capturas realizadas após a estabilização térmica em cada nível de ventilação.

A Tabela 5 resume as condições experimentais adotadas.

Tabela 5 – Condições experimentais: temperatura interna, velocidade do soprador e tempo até estabilização térmica.

Temperatura Interna (°C)	Velocidade do Soprador (m/s)	Condição de Ventilação	Tempo de Estabilização (min)
750	0	Sem ventilação	—
750	5	Ventilação a 5 m/s	36
750	10	Ventilação a 10 m/s	31
750	15	Ventilação a 15 m/s	29
750	20	Ventilação a 20 m/s	32
750	25	Ventilação a 25 m/s	35
750	30	Ventilação a 30 m/s	24

4.0.5 Coleta e Análise de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de termografia, uma técnica não destrutiva e não invasiva que permitiu monitorar a temperatura de forma contínua e precisa. As capturas termográficas foram feitas após a estabilização térmica em cada nível de ventilação conforme a Tabela 5, com a câmera posicionada a uma distância fixa de 1.5 m das ROIs.

Para a análise dos dados, foram utilizados boxplots para representar a distribuição térmica e as variações na temperatura externa dos refratários em diferentes velocidades do ar, permitindo uma avaliação visual da dispersão e tendências dos resultados.

4.1 Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos

A simulação numérica pelo (MEF) foi realizada no software COMSOL Multiphysics para analisar o comportamento térmico das Regiões de Interesse (ROIs), conforme detalhado na Tabela 3. O objetivo foi complementar os dados experimentais e investigar o impacto da ventilação na distribuição térmica do refratário sob diferentes velocidades de ar.

Essa abordagem permitiu a exploração de cenários que seriam inviáveis de reproduzir experimentalmente, ampliando a compreensão dos efeitos térmicos no material. Além disso, a simulação serviu para validar os resultados obtidos no experimento prático e no modelo analítico, possibilitando uma comparação sistemática entre previsões teóricas e medições experimentais.

4.1.1 Geometria do Domínio

A modelagem da geometria do domínio foi realizada com base nas dimensões reais dos refratários utilizados no miniforno, incluindo altura, largura, profundidade e os diferentes níveis de desgaste. Essa representação precisa assegurou que as condições simuladas reproduzissem fielmente o comportamento térmico observado nos experimentos.

Para garantir a fidelidade da simulação, a geometria foi construída de forma a preservar aspectos essenciais da análise térmica, como as proporções das ROIs e a interação com o fluxo de ventilação. Essa abordagem permitiu uma avaliação detalhada do impacto da ventilação na temperatura superficial do refratário e assegurou que as condições de contorno e as propriedades do material fossem aplicadas de maneira consistente com o experimento prático.

A Figura 14 apresenta a geometria do modelo, destacando as regiões de interesse e os desgastes simulados, permitindo uma correlação precisa entre os dados experimentais e os resultados da simulação.

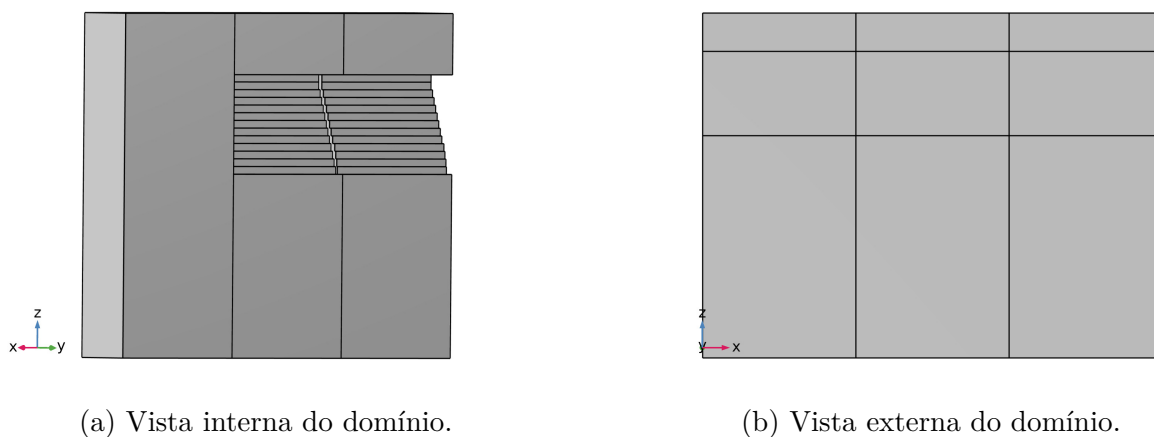


Figura 14 – Geometria do domínio utilizado na simulação numérica.

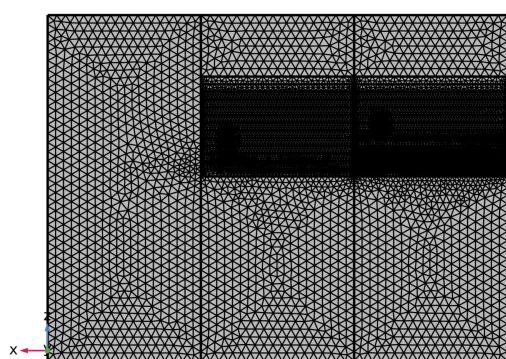
A malha de elementos finitos foi gerada com atenção especial às Regiões de Interesse (ROIs), onde se esperam os maiores gradientes térmicos devido à ventilação e às variações na espessura do material. O objetivo foi equilibrar a precisão numérica e a eficiência computacional, assegurando que os resultados da simulação refletissem adequadamente as condições experimentais.

Para isso, foram utilizados elementos tetraédricos, escolhidos por sua capacidade de adaptação a geometrias complexas, especialmente nas áreas desgastadas dos refratários.

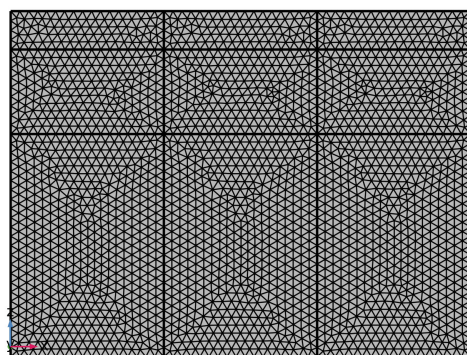
Essa abordagem permitiu uma representação mais fiel das superfícies irregulares e das transições térmicas.

A fim de capturar com maior precisão as variações de temperatura, a malha foi refinada nas ROIs, proporcionando uma descrição detalhada dos gradientes térmicos e reduzindo erros numéricos. Esse refinamento foi essencial para garantir a precisão das soluções térmicas, principalmente nas superfícies expostas à ventilação.

A Figura 15 ilustra a malha aplicada ao domínio da simulação. A imagem à esquerda (15a) evidencia a maior densidade de elementos nas regiões de interesse, enquanto a imagem à direita (15b) destaca a malha externa, projetada para capturar os efeitos da convecção e das variações térmicas na superfície exposta.



(a) Malha de elementos finitos - Vista interna.



(b) Malha de elementos finitos - Vista externa.

Figura 15 – Malha de elementos finitos aplicada ao domínio.

O refinamento da malha nas regiões de interesse permitiu capturar os efeitos da convecção e das flutuações de temperatura com maior fidelidade, reduzindo erros numéricos e melhorando a estabilidade dos cálculos nas superfícies expostas à ventilação.

4.1.2 Configuração da Simulação

A simulação foi configurada para reproduzir as condições experimentais e analisar o comportamento térmico dos refratários sob diferentes velocidades de ventilação. As condições de contorno e as propriedades dos materiais foram definidas com base nos dados experimentais, garantindo coerência entre as abordagens numérica, experimental e analítica.

A face interna dos refratários foi mantida a uma temperatura constante de 750°C , representando o ambiente interno do mini-forno. Já a ventilação foi simulada aplicando um fluxo de ar na superfície externa, com velocidades variando entre 0 e 30 m/s, conforme adotado no experimento prático. Essa condição foi modelada como um fluxo imposto de velocidade fixa no domínio externo, assegurando que os efeitos da convecção fossem devidamente representados.

As propriedades térmicas do refratário AZS, como condutividade térmica, densidade e calor específico, foram definidas com base nos valores apresentados no Apêndice A. A condutividade térmica do AZS foi considerada como $4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, valor adequado para as condições analisadas, dado que a temperatura interna do refratário foi fixada em 750°C .

A simulação foi conduzida em regime estacionário, modelando o estado de equilíbrio térmico para cada combinação de velocidade de ventilação e espessura do refratário. Essa abordagem permitiu uma comparação direta com os resultados experimentais, assegurando a confiabilidade da validação do modelo.

Os resultados da simulação foram exportados em formato **CSV**, contendo os valores de temperatura para cada ROI e condição de ventilação. Esses dados foram processados para a geração de gráficos e análises comparativas.

A simulação numérica proporcionou uma análise detalhada do comportamento térmico dos refratários em diferentes condições de ventilação, fornecendo dados complementares à investigação experimental e ao modelo analítico. Os resultados obtidos serão discutidos em profundidade na seção de Validação do Modelo Analítico, permitindo avaliar a precisão e a aplicabilidade da metodologia proposta.

4.2 Desenvolvimento do Modelo Analítico

A estimativa da espessura do refratário AZS foi realizada mediante a elaboração de um modelo analítico fundamentado nos mecanismos combinados de transferência de calor por condução unidimensional e convecção forçada. Embora a radiação térmica exerça influência significativa em regimes de convecção natural, sua contribuição torna-se marginal em sistemas dominados por convecção forçada e condução, conforme estabelecido por [47]. Esta simplificação viabilizou a construção de um sistema termodinâmico matematicamente tratável, apto a correlacionar a espessura do material com a temperatura superficial externa obtida por termografia.

4.2.1 Premissas e Formulação do Sistema Térmico

O sistema foi modelado como uma parede plana em regime permanente, considerando exclusivamente o componente refratário AZS. Adotou-se a hipótese de unidimensionalidade térmica, justificada pela razão aspecto geométrico (área superficial significativamente superior à espessura), conforme postulado por [48]. As demais premissas incluem:

1. Homogeneidade e isotropia do material, com condutividade térmica constante;
2. Estacionariedade do processo, compatível com condições operacionais estáveis do forno;
3. Desprezo de resistências térmicas de contato e efeitos radiativos na interface externa.

O fluxo calorífico unidirecional ocorre da face interna ($T_i = 750^\circ\text{C}$) para a externa (T_e), onde é dissipado por convecção forçada para o ambiente (T_a) mediante coeficiente h , função da velocidade do fluxo de ar.

4.2.2 Formulação Matemática do Problema de Contorno

A equação governante para condução unidimensional em regime permanente sem geração interna é expressa por:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (4.1)$$

Para material homogêneo (k constante), a Equação 4.1 reduz-se a:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (4.2)$$

Sujeita às condições de contorno:

$$T(0) = T_i \quad (4.3)$$

$$-k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = h [T_e - T_a] \quad (4.4)$$

4.2.3 Solução Analítica e Determinação de Constantes

A integração dupla da equação diferencial fornece o perfil térmico linear:

$$T(x) = C_1x + C_2 \quad (4.5)$$

Aplicando a condição de contorno 4.3:

$$C_2 = T_i \quad (4.6)$$

Derivando a Equação 4.5 e substituindo em 4.4:

$$-kC_1 = h [(C_1L + T_i) - T_a] \quad (4.7)$$

Resolvendo para C_1 :

$$C_1 = -\frac{h(T_i - T_a)}{k + hL} \quad (4.8)$$

Substituindo C_1 e C_2 na Equação 4.5, obtém-se a temperatura superficial externa:

$$T_e = \frac{kT_i + hLT_a}{k + hL} \quad (4.9)$$

4.2.4 Propriedades Termofísicas do Ar e Modelagem Computacional

A determinação precisa das propriedades termofísicas do ar ambiente e sua influência na transferência de calor por convecção são fundamentais para a modelagem computacional deste estudo. A Tabela 6 apresenta os valores das principais propriedades termofísicas do ar a temperatura ambiente (25 °C) e pressão atmosférica, utilizados no algoritmo desenvolvido. Esses valores foram obtidos a partir de fontes consolidadas da literatura, como Incropera et al. [19] e Engineering Toolbox [49].

Tabela 6 – Propriedades termofísicas do ar ambiente a pressão atmosférica (25 °C).

Propriedade	Valor
Densidade (ρ)	1.184 kg m ⁻³
Viscosidade dinâmica (μ)	1.85 × 10 ⁻⁵ Pa s
Viscosidade cinemática (ν)	1.57 × 10 ⁻⁵ m ² s ⁻¹
Capacidade térmica (c_p)	1007 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Condutividade térmica (k)	0.0257 W m ⁻¹ K ⁻¹
Número de Prandtl (Pr)	0.707

A solução analítica foi implementada computacionalmente por meio do algoritmo descrito no Apêndice B, o qual estima a temperatura externa considerando as propriedades termofísicas do ar e as condições de contorno do sistema. O modelo adota um cálculo iterativo do coeficiente convectivo h , baseado na seguinte correlação para o número de Nusselt:

$$Nu = \begin{cases} 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}, & Re < 10^5 \\ 0.037 Re^{0.8} Pr^{1/3}, & Re \geq 10^5 \end{cases} \quad (4.10)$$

A partir desse coeficiente, o modelo computacional permite a solução numérica para diferentes espessuras de refratário, incluindo 30, 36 e 76 mm, bem como a geração automática de curvas termoanalíticas, conforme ilustrado na Figura 30.

A implementação computacional desse modelo permite a estimativa indireta da espessura do refratário por meio da análise termográfica, tornando-se uma ferramenta eficiente para o monitoramento térmico de revestimentos refratários em aplicações industriais.

4.3 Análise Comparativa

A metodologia de análise comparativa entre os resultados obtidos nas três abordagens baseia-se em métricas estatísticas e critérios físicos que garantem a avaliação da coerência e precisão das previsões térmicas. O objetivo é validar os resultados, identificando eventuais discrepâncias entre as abordagens e compreendendo as limitações inerentes a cada método

O processo de validação seguiu três etapas principais:

1. **Comparação direta dos valores médios:** As temperaturas externas foram organizadas em tabelas para cada espessura de refratário e velocidade de ventilação, possibilitando uma análise objetiva da proximidade entre os resultados obtidos experimentalmente, os cálculos do modelo analítico e as previsões da simulação numérica.
2. **Análise gráfica das curvas:** A visualização das curvas de temperatura em função da velocidade do ar permite comparar diretamente os dados experimentais com o modelo teórico, identificando padrões de comportamento e possíveis desvios sistemáticos [50]. Essa abordagem possibilita verificar se as tendências apresentadas pelos métodos são consistentes entre si.
3. **Cálculo do erro percentual relativo:** Para quantificar a discrepância entre os métodos, foi utilizada a seguinte equação:

$$\text{Erro (\%)} = \left| \frac{T_{\text{método1}} - T_{\text{método2}}}{T_{\text{método1}}} \right| \times 100, \quad (4.11)$$

conforme a definição apresentada por [51]. Esse indicador permite avaliar a proximidade entre os resultados experimentais e predições teóricas, auxiliando na identificação de possíveis tendências sistemáticas nos desvios.

Na equação, $T_{\text{método1}}$ e $T_{\text{método2}}$ representam as temperaturas obtidas por dois métodos distintos, como os valores registrados experimentalmente, os calculados pelo modelo analítico e os simulados via Método dos Elementos Finitos (MEF). Valores elevados do erro percentual indicam maior discrepância entre os métodos, sugerindo a necessidade de ajustes na modelagem ou na calibração experimental.

Essa abordagem permitirá validar os resultados obtidos e compreender as incertezas associadas a cada método, contribuindo para a confiabilidade da análise térmica dos refratários e sua aplicação em fornos industriais.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos, permitindo a avaliação da precisão e aplicabilidade da técnica desenvolvida no monitoramento térmico de refratários industriais.

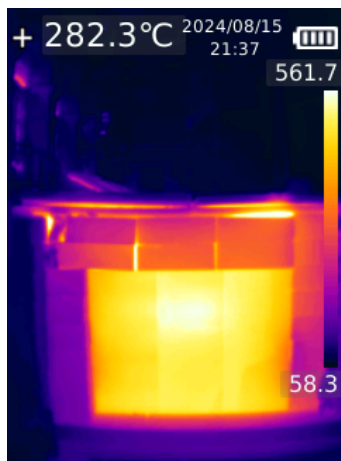
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das três abordagens descritas no capítulo de Materiais e Métodos: experimento prático, simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) no software COMSOL Multiphysics e modelo analítico. A comparação entre essas abordagens permite uma compreensão mais abrangente da relação entre o comportamento térmico dos refratários, sua espessura e as condições de ventilação.

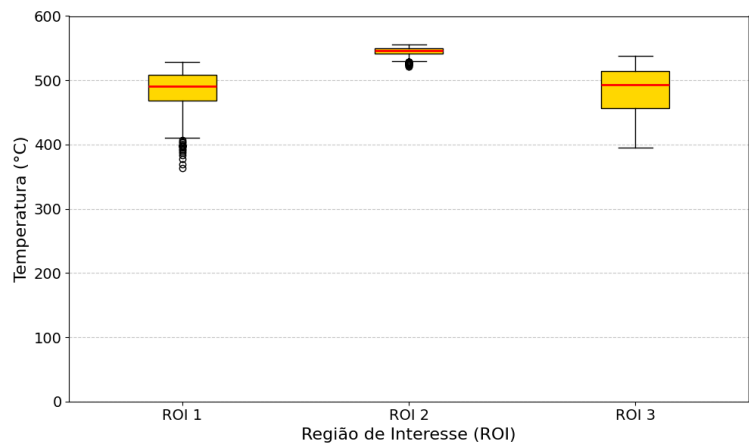
5.0.1 Resultados do Experimento em campo

Nesta seção, são apresentados os resultados do experimento prático realizado com os três blocos refratários de diferentes espessuras. O objetivo principal foi analisar a distribuição das temperaturas externas nas regiões de interesse (ROIs 1, 2 e 3) sob diferentes velocidades de ventilação, variando de 0 a 30 m/s, em incrementos de 5 m/s.

Os resultados a seguir ilustram a distribuição das temperaturas externas registradas em cada ROI para as diferentes velocidades do ar, permitindo avaliar a influência da ventilação na dissipação de calor e na variação térmica dos blocos refratários.



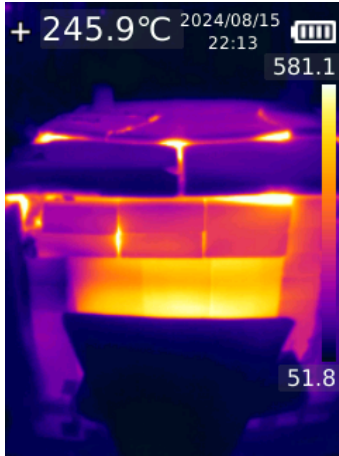
(a) Imagem termográfica (0 m/s)



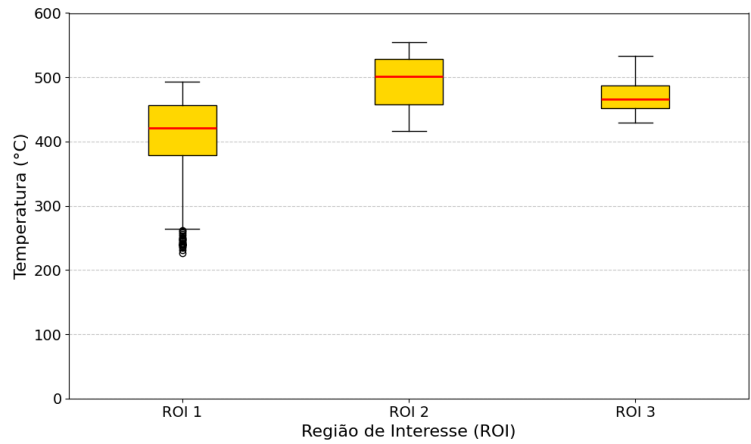
(b) Boxplot de temperatura (0 m/s)

Figura 16 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob condição de ventilação nula (0 m/s).

Fonte: Autor, 2024.



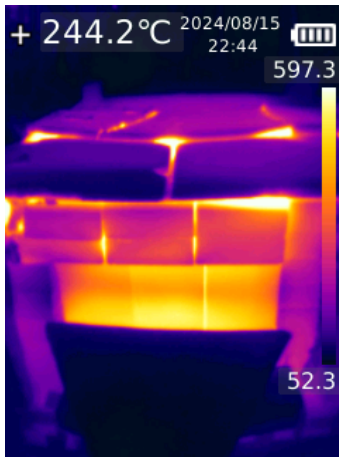
(a) Imagem termográfica (5 m/s)



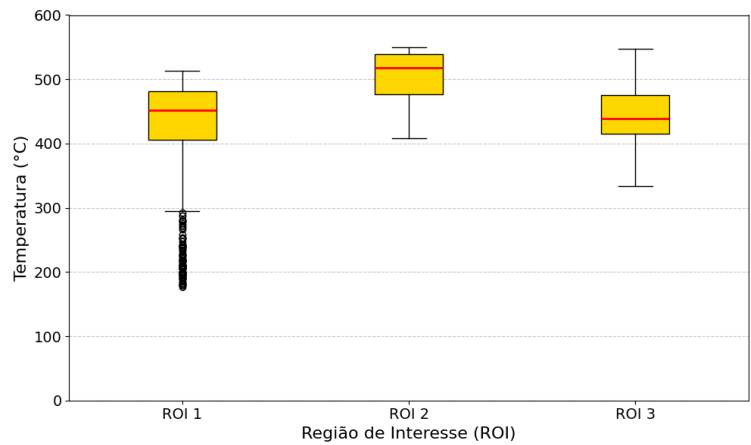
(b) Boxplot de temperatura (5 m/s)

Figura 17 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 5 m/s.

Fonte: Autor, 2024.



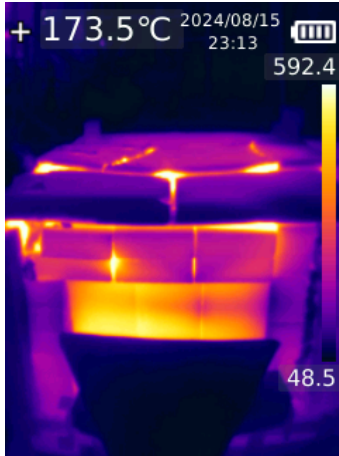
(a) Imagem termográfica (10 m/s)



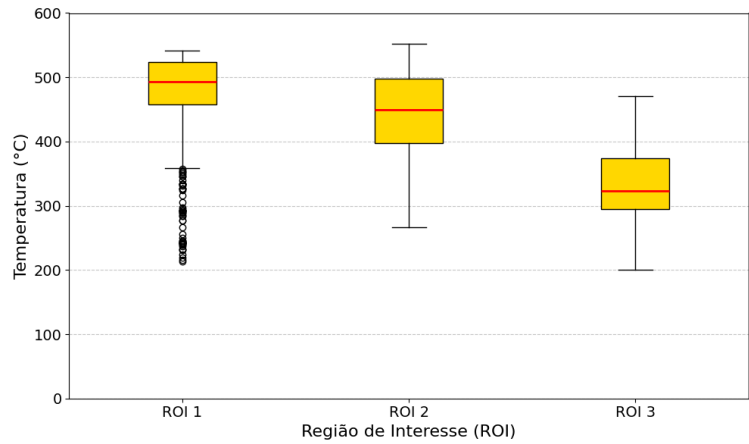
(b) Boxplot de temperatura (10 m/s)

Figura 18 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 10 m/s.

Fonte: Autor, 2024.



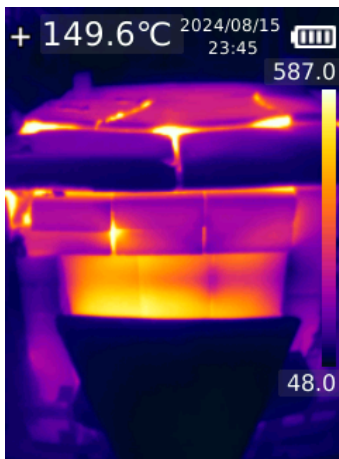
(a) Imagem termográfica (15 m/s)



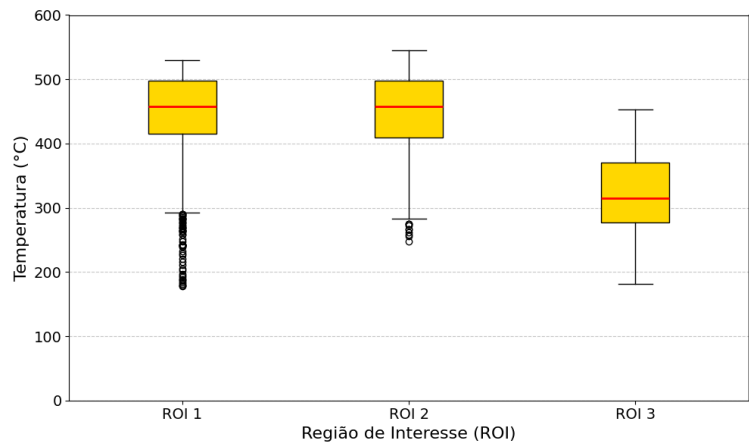
(b) Boxplot de temperatura (15 m/s)

Figura 19 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 15 m/s.

Fonte: Autor, 2024.



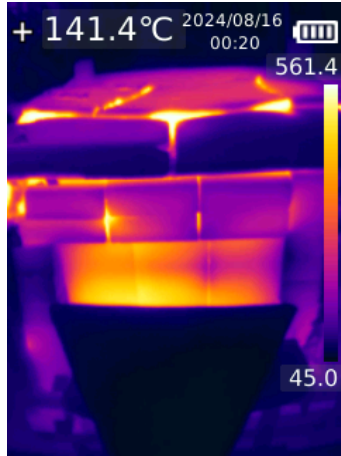
(a) Imagem termográfica (20 m/s)



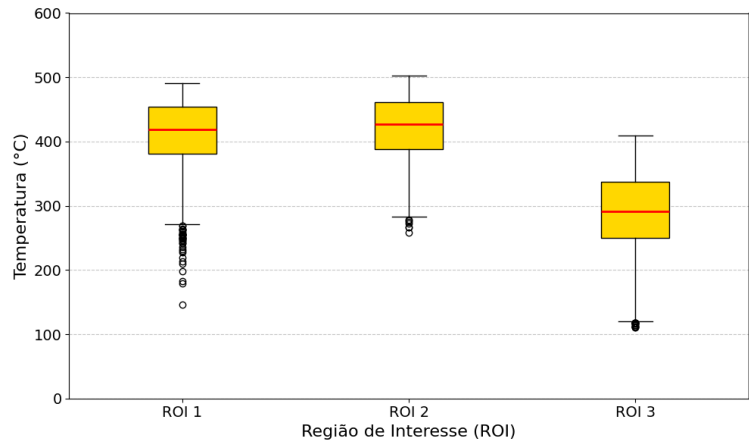
(b) Boxplot de temperatura (20 m/s)

Figura 20 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 20 m/s.

Fonte: Autor, 2024.



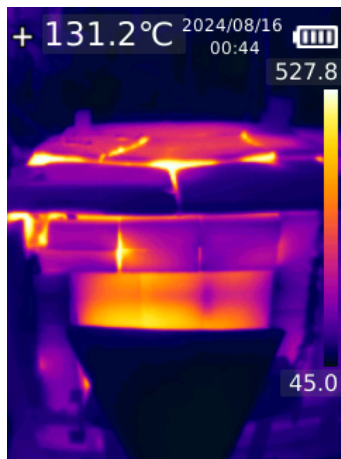
(a) Imagem termográfica (25 m/s)



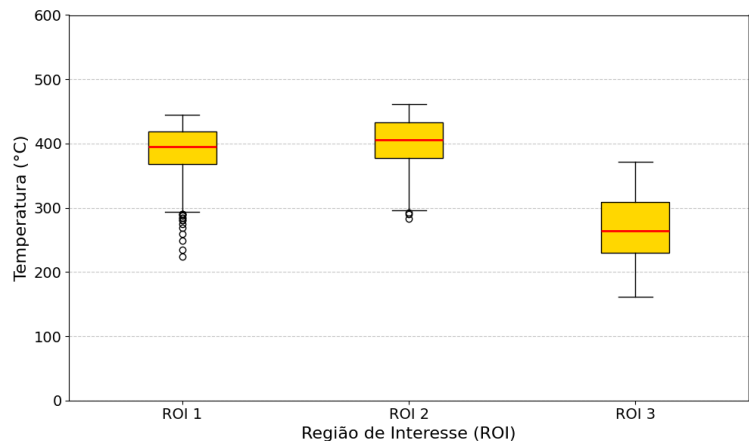
(b) Boxplot de temperatura (25 m/s)

Figura 21 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 25 m/s.

Fonte: Autor, 2024.



(a) Imagem termográfica (30 m/s)



(b) Boxplot de temperatura (30 m/s)

Figura 22 – Distribuição térmica e estatística da superfície externa do bloco refratário sob ventilação de 30 m/s.

Fonte: Autor, 2024.

Após a apresentação dos resultados, a seguir, são analisadas as variações das temperaturas de cada ROI em função das diferentes velocidades de ventilação, proporcionando uma análise mais detalhada do comportamento térmico de cada região, permitindo identificar como a ventilação influencia temperatura externa de cada (ROI).

ROI 1 (36 mm): Apresentou uma tendência de diminuição das temperaturas e, conforme o aumento da velocidade do ar, as temperaturas médias variaram de 483,39 °C (0 m/s) para 388,21 °C (30 m/s). O desvio padrão aumentou inicialmente com a velocidade do ar, atingindo um máximo de 82,43 °C a (10 m/s). Depois disso, diminuiu, chegando a 40,55 °C a (30 m/s). As temperaturas extremas seguiram essa variação, a temperatura

mínima apresentou uma variação considerável, com o valor mais baixo sendo registrado a 25 m/s (146,65 °C). A temperatura máxima oscilou entre 444,17 °C e 541,01 °C, sem uma tendência clara ao longo do experimento. O desgaste de 40 mm foi compensado pela ventilação, que permitiu uma redução significativa da temperatura ao longo do experimento.

ROI 2 (30 mm): Esta região de interesse possui a menor espessura entre as analisadas. A ROI 2 registrou as temperaturas mais elevadas, tanto nos valores máximos quanto nos mínimos, com uma temperatura inicial média de 544,72 °C sem ventilação. O desvio padrão da temperatura aumentou a medida que a velocidade do ar aumenta de 7,55 °C a 0 m/s para 66,19 °C a 15 m/s sendo o maior desvio padrão registrado. Finalmente, a 30 m/s, o desvio padrão diminuiu ainda mais para 37,39 °C. Entretanto, a ventilação mostrou-se bastante eficaz, reduzindo a temperatura média para 401,99 °C com fluxo de 30 m/s.

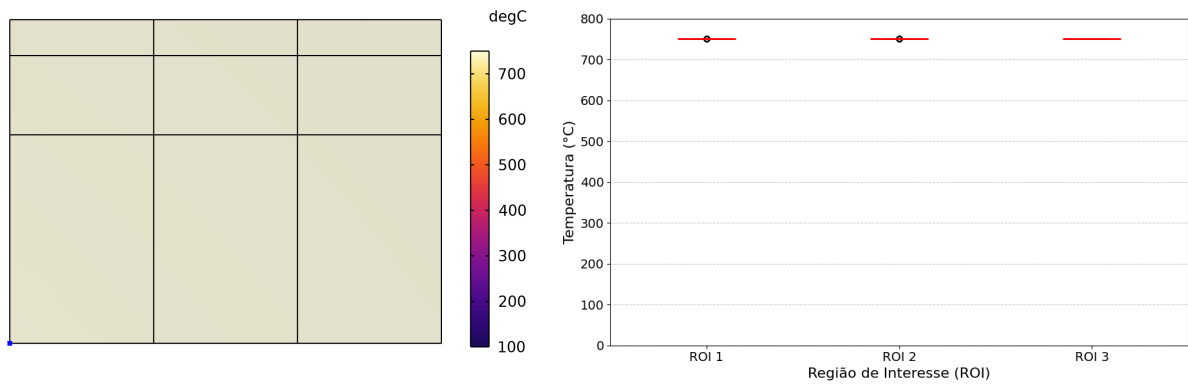
ROI 3 (76 mm): A ROI mais espessa mostrou uma maior retenção de calor inicialmente, com temperatura média de 486,00 °C sem ventilação, valor muito próximo à temperatura média da ROI 1 a 0 m/s. Contudo, a ventilação foi altamente eficaz, reduzindo a temperatura para 267,43 °C a 30 m/s. O desvio padrão das temperaturas também apresentou variações interessantes a 0 m/s, o desvio padrão foi de 35,24 °C, sendo o maior entre as ROIS analisadas a essa velocidade, diminuiu para 22,58 °C a 5 m/s, indicando uma distribuição térmica mais uniforme. No entanto à medida que a velocidade do ar aumentou, o desvio padrão também aumentou.

Esses resultados quantitativos oferecem uma visão do comportamento térmico de cada Região de Interesse sob diferentes velocidades de ventilação.

5.0.2 Resultados da Simulação Numérica pelo MEF

Nesta seção, são apresentados os resultados da simulação numérica pelo (MEF) no software COMSOL Multiphysics para as três regiões de interesse (ROIs 1, 2 e 3). A simulação foi conduzida sob as mesmas condições do experimento prático, permitindo uma comparação direta entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles previstos pelo modelo numérico.

Assim como o objetivo do experimento, o objetivo da simulação é avaliar a distribuição térmica nas Regiões de Interesse, considerando a variação de ventilação variando de 0 a 30 m/s sobre a temperatura superficial externa dos blocos refratários. A análise dos dados provenientes da simulação fornece uma perspectiva detalhada de como a ventilação influencia a dissipação de calor em cada ROI. Os resultados a seguir ilustram a distribuição das temperaturas externas registradas em cada ROI para as diferentes velocidades de ar.

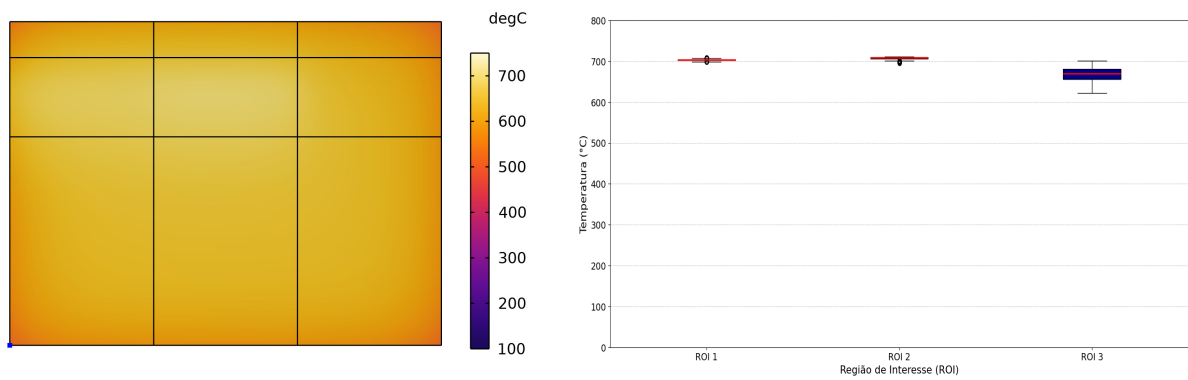


(a) Simulação termográfica (0 m/s)

(b) Boxplot de temperatura (0 m/s)

Figura 23 – Resultados da simulação com ventilação de 0 m/s.

Fonte: Autor, 2024.

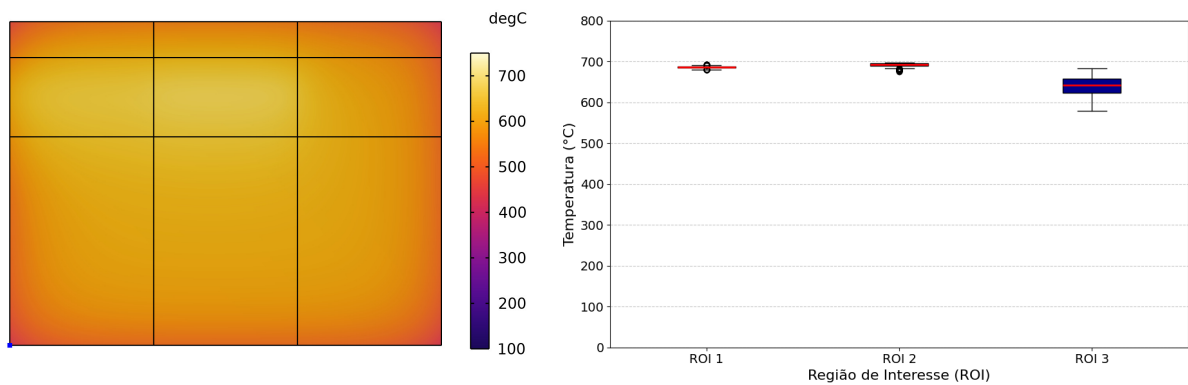


(a) Simulação termográfica (5 m/s)

(b) Boxplot de temperatura (5 m/s)

Figura 24 – Resultados da simulação com ventilação de 5 m/s.

Fonte: Autor, 2024.

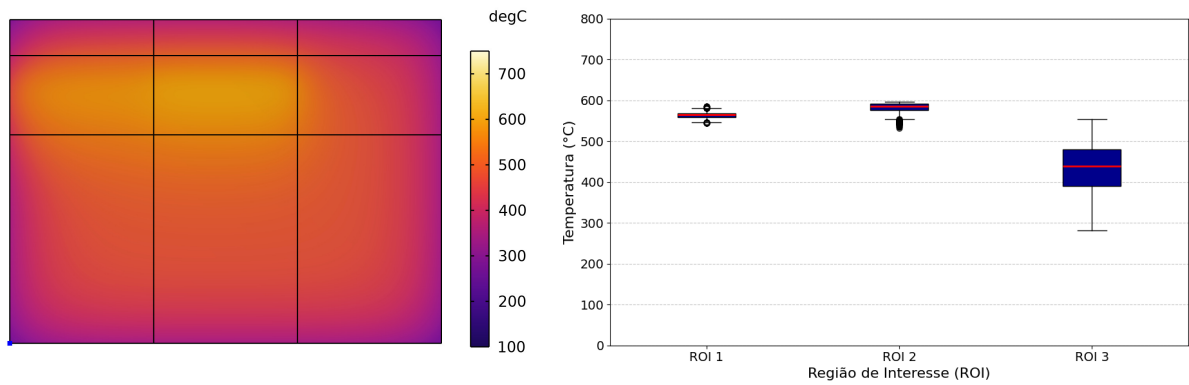


(a) Simulação termográfica (10 m/s)

(b) Boxplot de temperatura (10 m/s)

Figura 25 – Resultados da simulação com ventilação de 10 m/s.

Fonte: Autor, 2024.

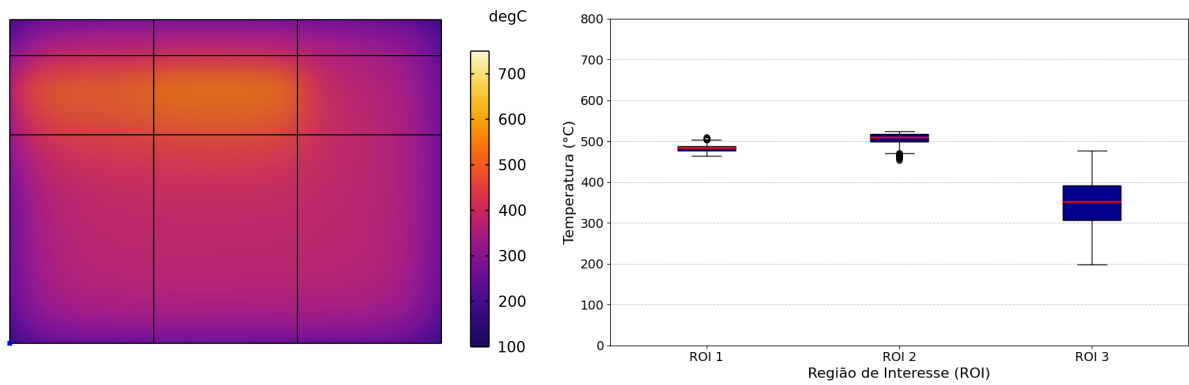


(a) Simulação termográfica (15 m/s)

(b) Boxplot de temperatura (15 m/s)

Figura 26 – Resultados da simulação com ventilação de 15 m/s.

Fonte: Autor, 2024.

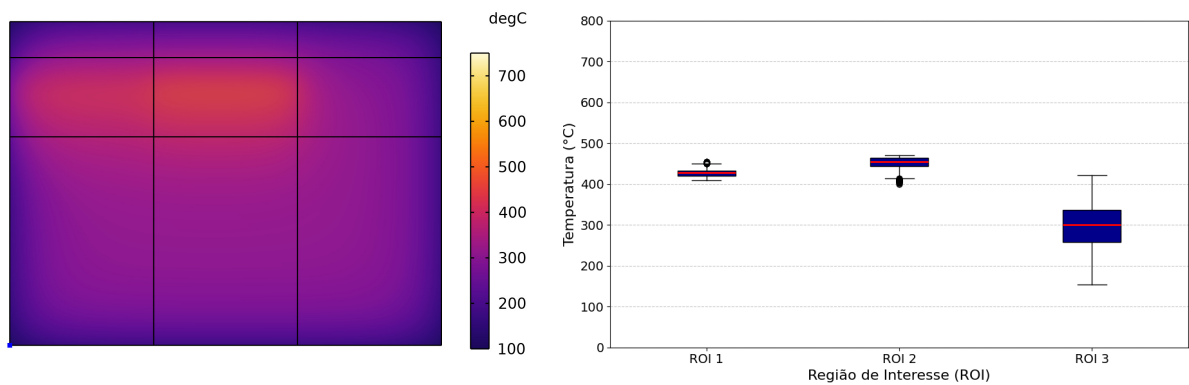


(a) Simulação termográfica (20 m/s)

(b) Boxplot de temperatura (20 m/s)

Figura 27 – Resultados da simulação com ventilação de 20 m/s.

Fonte: Autor, 2024.

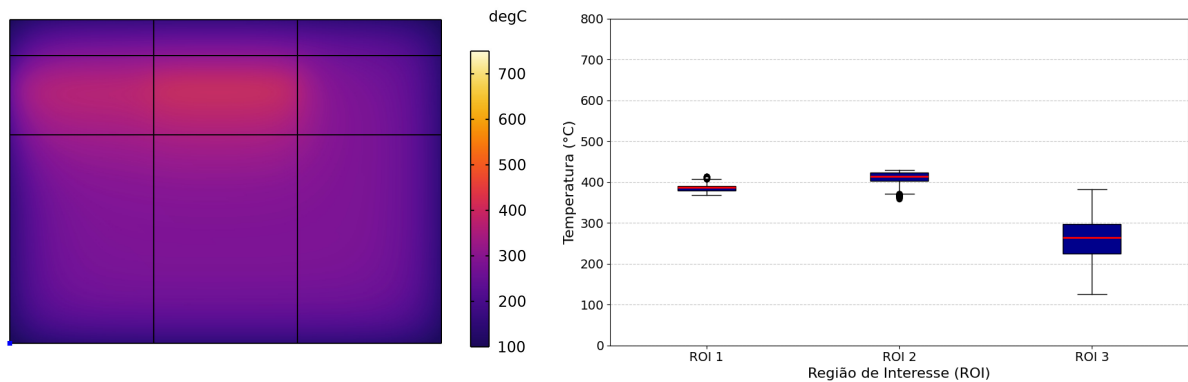


(a) Simulação termográfica (25 m/s)

(b) Boxplot de temperatura (25 m/s)

Figura 28 – Resultados da simulação com ventilação de 25 m/s.

Fonte: Autor, 2024.



(a) Simulação termográfica (30 m/s)

(b) Boxplot de temperatura (30 m/s)

Figura 29 – Resultados da simulação com ventilação de 30 m/s.

Fonte: Autor, 2024.

Em seguida, após a apresentação dos gráficos da simulação, são realizadas análises dos resultados obtidos, seguindo o mesmo princípio aplicado no experimento. Esses dados oferecem uma visão abrangente do comportamento térmico nas regiões simuladas, destacando a influência exercida pela ventilação e pela espessura dos blocos.

ROI 1 (36 mm) Na simulação do COMSOL, a ROI 1 demonstrou uma clara tendência de diminuição das temperaturas médias à medida que a velocidade do ar aumentava, variando de 750 °C (0 m/s) para 385,06 °C (30 m/s). O desvio padrão das temperaturas aumentou com a velocidade do ar, alcançando 8,93 °C a 30 m/s, o que indica uma maior variabilidade nas medições térmicas. As temperaturas extremas também apresentaram variações significativas; a temperatura mínima caiu para 367,75 °C a 30 m/s, enquanto a temperatura máxima oscilou entre 544,8 °C e 750 °C, sem uma tendência clara. A ventilação reduziu a temperatura ao longo do experimento, mostrando que os resultados são consistentes com os dados do experimento em campo, onde a ventilação também contribuiu para a diminuição das temperaturas.

ROI 2 (30 mm) A ROI 2 na simulação apresentou as temperaturas médias mais elevadas entre as ROIs analisadas, começando em 750 °C sem ventilação e caindo para 411,34 °C a 30 m/s. O desvio padrão das temperaturas aumentou significativamente com o aumento da velocidade do ar, iniciando em 2,91 °C a 5 m/s e atingindo um máximo de 14,04 °C a 30 m/s. Essa crescente variabilidade nas medições térmicas reflete o comportamento observado no experimento em campo, onde a menor espessura resultou em temperaturas mais elevadas e um aumento no desvio padrão à medida que a velocidade do ar aumentava.

ROI 3 (76 mm) A ROI 3 na simulação revelou uma maior retenção de calor inicialmente, com uma temperatura média de 750 °C sem ventilação. Com o aumento da velocidade do ar, houve uma queda drástica na temperatura média para 260,29 °C a 30 m/s. O desvio padrão das temperaturas variou de 0 °C a 0 m/s para um máximo de 65,09 °C a 20 m/s, indicando uma crescente variabilidade nas medições térmicas à medida que o

fluxo de ar aumentava. Esses resultados corroboram as observações do experimento em campo, onde a ventilação foi igualmente eficaz em reduzir as temperaturas.

Os resultados obtidos na simulação corroboram e reforçam as tendências observadas nos experimentos, destacando o impacto significativo da ventilação. As análises mostram que tanto na simulação quanto no experimento, a ventilação contribui de maneira significativa para a dissipação de calor.

5.0.3 Previsões do Modelo Analítico

O modelo analítico foi desenvolvido para prever a espessura dos refratários AZS, considerando as velocidades do ar e as temperaturas internas e externas. As espessuras de 30 mm, 36 mm e 76 mm foram selecionadas para corresponder às condições do experimento e da simulação.

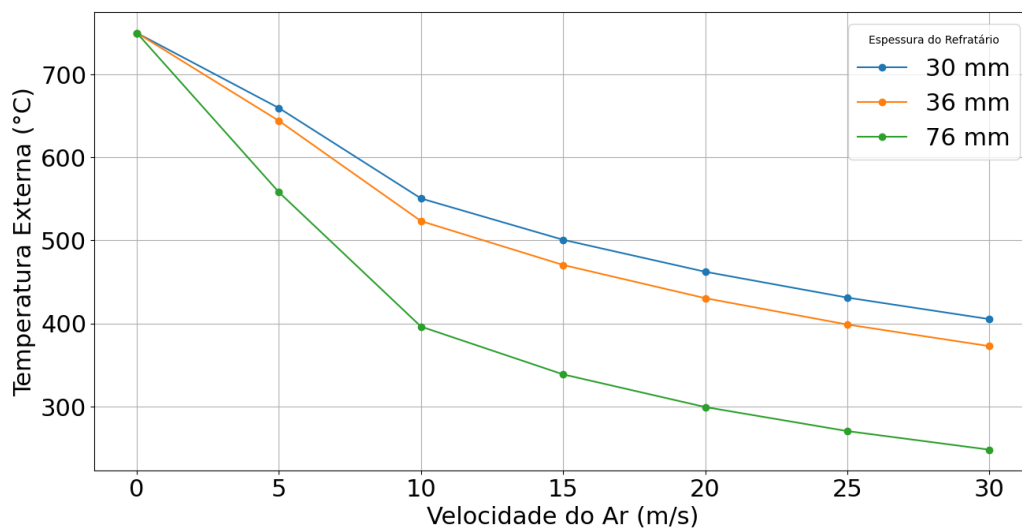


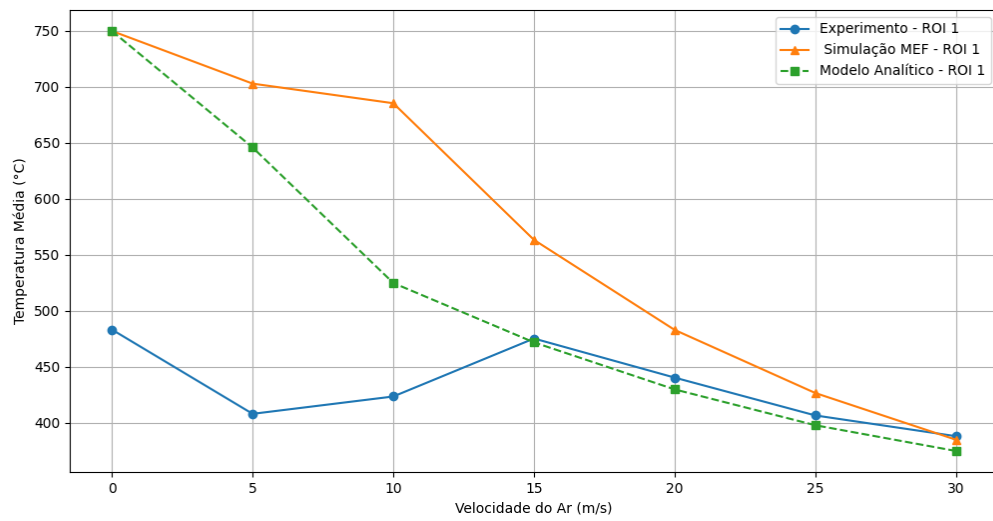
Figura 30 – Curvas de temperaturas a partir do modelo analítico para três espessuras.

A Figura 30 apresenta as curvas de temperatura previstas pelo modelo analítico para diferentes espessuras dos refratários AZS em função das velocidades de ventilação. Essas curvas evidenciam o impacto da ventilação na dissipação de calor, destacando as diferenças no comportamento térmico entre as espessuras analisadas. Os resultados obtidos estão alinhados com as previsões teóricas e observações experimentais, fornecendo uma base sólida para comparação com os dados provenientes do experimento prático e da simulação numérica.

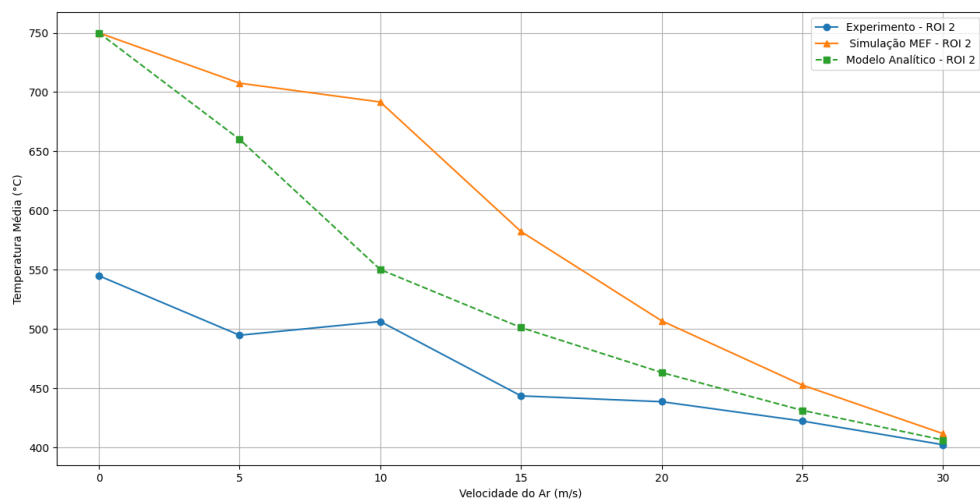
5.0.4 Análise gráfica das curvas

Nesta seção, são apresentadas as comparações gráficas entre os três métodos avaliados: experimento, simulação via (MEF) e modelo analítico. A Figura 31 ilustra a evolução da

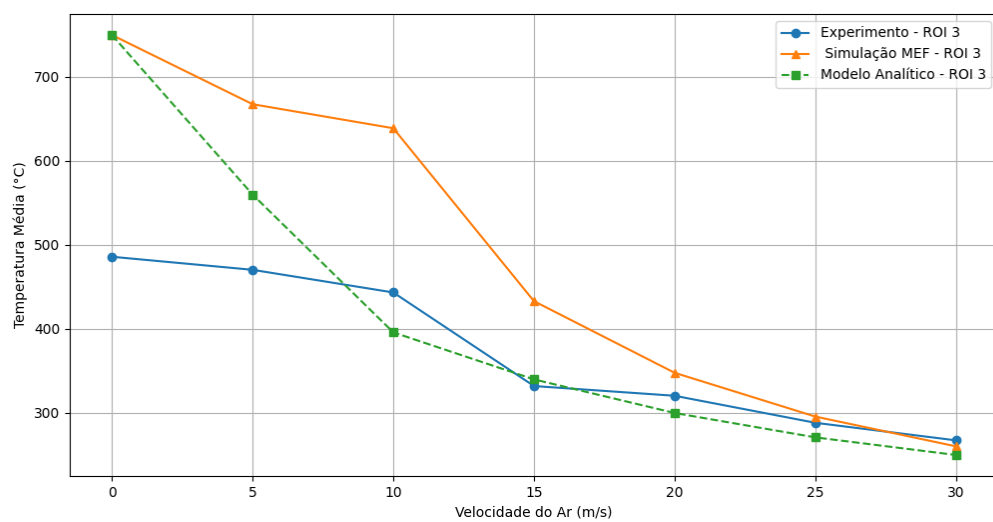
temperatura externa em função da velocidade do ar para cada ROI.



(a) ROI 1 - Espessura: 36 mm



(b) ROI 2 - Espessura: 30 mm



(c) ROI 3 - Espessura: 76 mm

Figura 31 – Comparativo das temperaturas médias: experimento, MEF e modelo analítico.

A análise dos gráficos permite identificar algumas tendências importantes:

Em todas as ROIs, observa-se que a temperatura externa diminui à medida que a velocidade do ar aumenta. Esse comportamento está de acordo com a expectativa teórica, uma vez que o aumento da ventilação intensifica a convecção térmica, reduzindo a temperatura na superfície do refratário.

Para velocidades abaixo de 10 m/s, nota-se que o modelo analítico tende a superestimar a temperatura externa em comparação aos valores experimentais e da simulação. Esse efeito é mais pronunciado nas ROIs 1 e 2. Além disso, os resultados experimentais indicam temperaturas mais baixas do que o esperado.

Para velocidades acima de 15 m/s, os três métodos apresentam uma convergência mais evidente, principalmente para as ROIs 2 e 3. Esse comportamento sugere que, sob condições de convecção forçada intensa, as aproximações feitas no modelo analítico e na simulação MEF capturam bem os efeitos térmicos predominantes.

A ROI 3 apresenta a maior discrepância entre os métodos, especialmente para velocidades intermediárias (10–20 m/s). Nota-se que os resultados da simulação diferem significativamente dos valores obtidos experimentalmente e das previsões do modelo analítico. No entanto, o modelo analítico demonstra uma maior proximidade com os dados experimentais, sugerindo uma melhor representação do comportamento térmico observado na prática.

A análise gráfica evidencia que, apesar das diferenças observadas, os três métodos seguem uma tendência geral coerente. Dessa forma, esses resultados contribuem para uma melhor compreensão dos fenômenos térmicos envolvidos e fornecem subsídios para aprimoramentos futuros nos modelos utilizados.

5.0.5 Comparação entre os três Métodos

Assim como análise anterior a comparação entre os três métodos empregados permite avaliar a coerência entre as abordagens e identificar eventuais discrepâncias nos resultados. A comparação entre os valores obtidos para cada uma das ROIs fornece uma visão abrangente do comportamento térmico dos refratários AZS sob diferentes condições de ventilação.

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam a comparação das temperaturas médias obtidas nos três métodos para cada uma das ROIs analisadas.

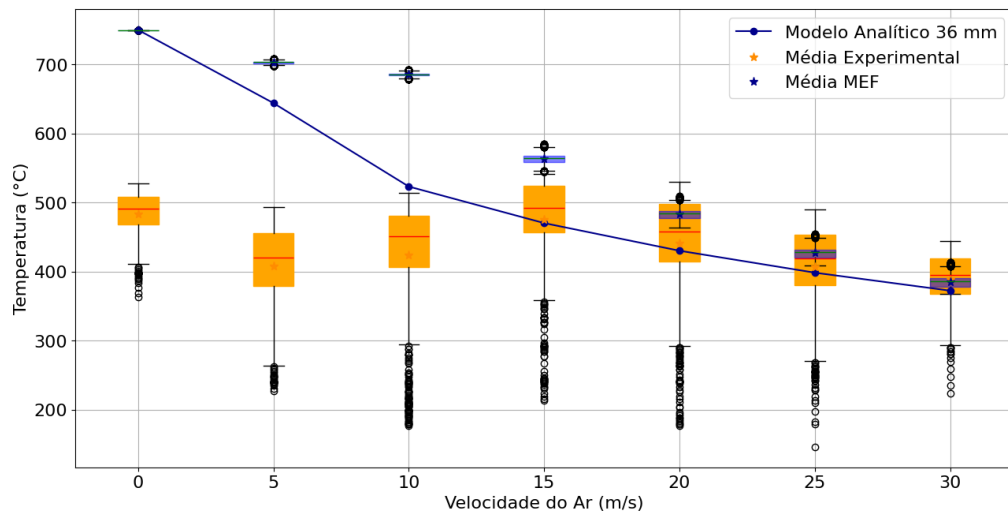


Figura 32 – Comparação das Temperaturas Médias entre Modelo Analítico, Simulação no COMSOL e Experimentos Práticos para ROI 1 (36 mm).

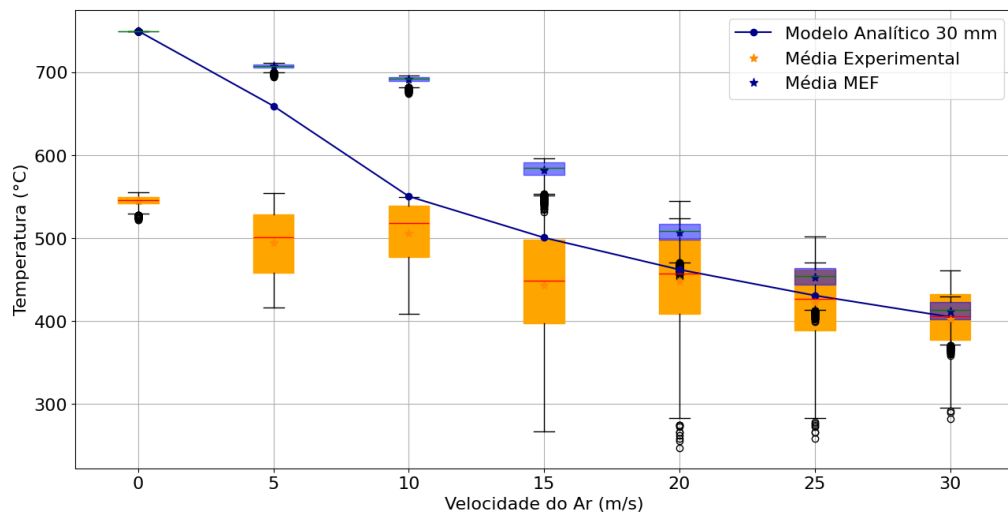


Figura 33 – Comparação das Temperaturas Médias entre Modelo Analítico, Simulação no COMSOL e Experimentos Práticos para ROI 2 (30 mm).

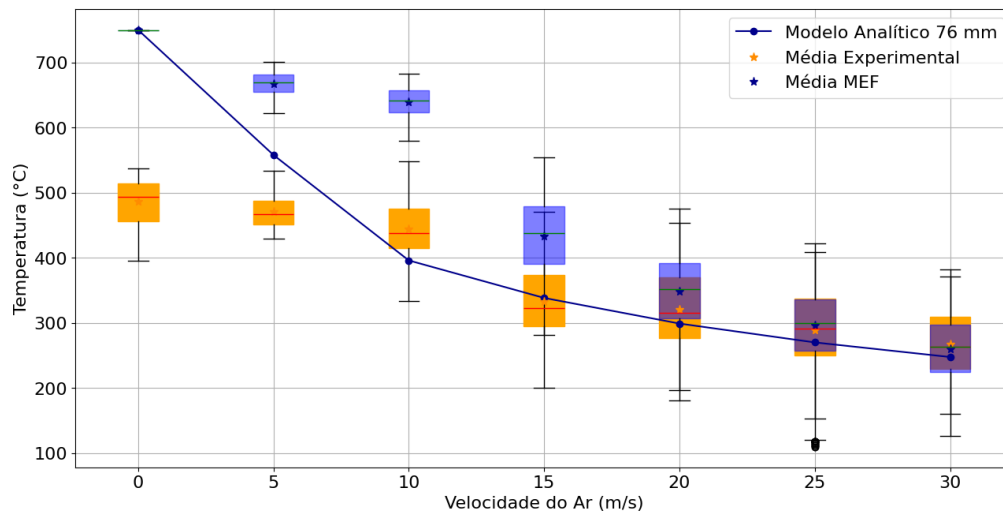


Figura 34 – Comparação das Temperaturas Médias entre Modelo Analítico, Simulação no COMSOL e Experimentos Práticos para ROI 3 (76 mm).

As comparações indicam que, apesar de algumas diferenças em velocidades inferiores a 10 m/s, a tendência geral das curvas de temperatura é consistente entre os três métodos. Além disso, a simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e o experimento apresentaram maior aderência ao modelo analítico para velocidades superiores a 15 m/s.

5.0.6 Cálculo do erro percentual relativo

A avaliação da precisão dos métodos utilizados no estudo requer a quantificação das diferenças entre os resultados experimentais, o modelo analítico e a simulação numérica. Para isso, o erro percentual relativo foi calculado para cada condição de ventilação e região de interesse (ROI), permitindo uma análise comparativa entre os métodos. As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores obtidos, destacando as discrepâncias observadas e a aderência entre os diferentes modelos. Essa abordagem possibilita a identificação de padrões de variação nos resultados, auxiliando na validação da modelagem térmica empregada neste trabalho.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os erros relativos entre os métodos analisados para cada ROI e condição de ventilação

ROI	Espessura (mm)	Velocidade do Ar (m/s)	Temp. Média Experimento (°C)	Temp. Modelo Analítico (°C)	Erro Relativo (%)
1	36	0	483.39	750	35.55
1	36	5	408.18	646	36.81
1	36	10	423.67	525	19.30
1	36	15	475.43	472	0.73
1	36	20	440.53	430	2.45
1	36	25	406.75	398	2.20
1	36	30	388.21	375	3.52
2	30	0	544.72	750	27.37
2	30	5	494.50	660	25.08
2	30	10	506.12	550	7.98
2	30	15	443.25	501	11.53
2	30	20	438.32	463	5.33
2	30	25	421.99	431	2.09
2	30	30	401.99	406	0.99
3	76	0	486	750	35.20
3	76	5	470.46	560	15.99
3	76	10	443.49	396	11.99
3	76	15	332.10	340	2.32
3	76	20	320.51	300	6.84
3	76	25	288.35	271	6.40
3	76	30	267.43	250	6.97

Tabela 7 – Comparação entre as temperaturas médias do Experimento e do Modelo Analítico, com o Erro Relativo para todas as ROIs e velocidades.

ROI	Espessura (mm)	Velocidade do Ar (m/s)	Temp. Média Simulação (°C)	Temp. Modelo Analítico (°C)	Erro Relativo (%)
1	36	0	750	750	0.00
1	36	5	703.02	646	8.83
1	36	10	685.5	525	30.57
1	36	15	563.52	472	19.39
1	36	20	483.11	430	12.35
1	36	25	426.77	398	7.23
1	36	30	385.06	375	2.68
2	30	0	750	750	0.00
2	30	5	707.51	660	7.20
2	30	10	691.58	550	25.74
2	30	15	582.15	501	16.20
2	30	20	506.66	463	9.43
2	30	25	452.38	431	4.96
2	30	30	411.34	406	1.32
3	76	0	750	750	0.00
3	76	5	667.61	560	19.22
3	76	10	639	396	61.36
3	76	15	433.14	340	27.39
3	76	20	347.85	300	15.95
3	76	25	295.75	271	9.13
3	76	30	260.29	250	4.12

Tabela 8 – Comparação entre as temperaturas médias da Simulação e do Modelo Analítico, com o Erro Relativo para todas as ROIs e velocidades.

De modo geral, os resultados indicam que o modelo analítico é mais confiável para velocidades de ventilação elevadas, especialmente acima de 15 m/s. A simulação pelo MEF no COMSOL apresentou boa correlação com o modelo analítico, sugerindo que este pode ser uma alternativa válida para prever a temperatura superficial do refratário sem a necessidade de simulações numéricas complexas.

Por outro lado, as discrepâncias mais significativas em velocidades baixas e intermediárias (5 e 10 m/s) sugerem que ajustes adicionais podem ser necessários, seja na formulação do modelo analítico, seja no refinamento dos parâmetros experimentais. Esses resultados reforçam a importância da abordagem integrada entre experimento, simulação numérica

e modelagem analítica para aprimorar a confiabilidade das técnicas de monitoramento térmico em fornos industriais.

A integração desses métodos contribui para a melhoria das estratégias de manutenção preditiva, reduzindo custos operacionais e aumentando a segurança no monitoramento de refratários em processos industriais de alta temperatura.

5.0.7 Validação do Modelo Analítico

A validação do modelo analítico fundamenta-se na premissa de que, ao conhecer a temperatura da superfície externa do refratário, suas propriedades térmicas e as condições de contorno, é possível estimar indiretamente sua espessura por meio da análise térmica. Dessa forma, a precisão do modelo pode ser aferida pela comparação com os resultados obtidos experimentalmente e via simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

Os resultados indicam que, para velocidades de ventilação superiores a 15 m/s, os erros relativos entre os três métodos diminuem significativamente, evidenciando uma maior previsibilidade térmica do sistema sob essas condições. Esse comportamento sugere que, em regimes de convecção forçada intensa, as aproximações adotadas no modelo analítico capturam com maior precisão os efeitos térmicos predominantes.

No entanto, para velocidades inferiores a 10 m/s, foram observadas discrepâncias mais expressivas entre os métodos, especialmente na ROI 3 (76 mm), onde a maior espessura do refratário impacta na distribuição térmica e na eficiência da dissipação de calor. Essas diferenças indicam a necessidade de ajustes adicionais no modelo analítico para melhorar sua aderência aos dados experimentais em regimes de menor ventilação.

De modo geral, a comparação entre os métodos demonstra que o modelo analítico fornece estimativas confiáveis para a temperatura externa do refratário, particularmente em condições de ventilação intensa. Assim, ele se apresenta como uma ferramenta útil para a previsão do comportamento térmico dos refratários AZS, reduzindo a dependência de simulações computacionais complexas e permitindo uma avaliação rápida das condições operacionais desses materiais em ambientes industriais.

6 CONCLUSÃO

O capítulo de conclusões desta dissertação apresentou uma abordagem integrada para a estimativa da espessura de refratários AZS a partir da temperatura superficial medida por termografia. A metodologia combinou experimentação em campo, modelagem computacional via Método dos Elementos Finitos (MEF) e um modelo analítico, com o objetivo de validar uma técnica não invasiva para monitoramento do desgaste dos refratários, otimizando a operação de fornos industriais e reduzindo custos de manutenção.

Os resultados indicaram que a temperatura superficial do refratário é fortemente influenciada pela espessura do material e pela velocidade do ar incidente. As três abordagens utilizadas – experimento, simulação no COMSOL Multiphysics e modelo analítico – forneceram informações complementares, permitindo uma análise detalhada do comportamento térmico dos refratários sob diferentes condições operacionais. O modelo analítico apresentou boa concordância com os dados experimentais e simulados para velocidades de ventilação superiores a 15 m/s. No entanto, para velocidades entre 0 e 10 m/s, foram observadas discrepâncias mais significativas, possivelmente devido às limitações da câmera termográfica, simplificações do modelo ou variações experimentais.

A comparação entre os três métodos utilizados validou a hipótese central da pesquisa: é possível estimar a espessura do refratário a partir da temperatura superficial, desde que as condições de contorno e as propriedades térmicas do sistema sejam conhecidas. Entre as principais contribuições do estudo, destacam-se a confirmação da aplicabilidade do modelo analítico para prever temperaturas superficiais em diferentes espessuras e velocidades de ventilação, a correlação entre temperatura e espessura como ferramenta para estimar o desgaste do refratário e a importância da ventilação na dissipação térmica.

Entretanto, algumas limitações foram identificadas. A câmera termográfica utilizada possuía uma faixa de medição restrita a 550 °C, o que limitou a análise em temperaturas mais elevadas. O modelo analítico não considerou efeitos de radiação térmica nem variações das propriedades térmicas do refratário com a temperatura, o que poderia melhorar a precisão dos resultados.

Com base nessas limitações, sugerem-se algumas direções para pesquisas futuras. A incorporação de efeitos radiativos no modelo analítico pode aprimorar a precisão das estimativas, principalmente para temperaturas elevadas. O uso de câmeras termográficas com maior faixa de medição permitiria obter dados mais confiáveis para validação do modelo. Além disso, a análise do efeito da rugosidade da superfície do refratário poderia revelar como essa característica influencia a dissipação térmica e a precisão das medições termográficas. A aplicação da metodologia desenvolvida em fornos industriais reais seria um passo importante para validar a abordagem em escala prática, enquanto a investigação de

técnicas avançadas de processamento de imagens térmicas, como aprendizado de máquina, poderia tornar a estimativa da espessura do refratário ainda mais precisa.

Assim, esta dissertação demonstrou que a temperatura superficial pode ser utilizada para inferir a espessura do refratário, desde que as condições de contorno sejam bem definidas. A metodologia proposta pode ser aplicada ao monitoramento contínuo de refratários em fornos industriais, contribuindo para a otimização dos processos produtivos e a redução de custos de manutenção. Com os avanços sugeridos para estudos futuros, espera-se aprimorar ainda mais a precisão do modelo, tornando-o uma ótima ferramenta para a indústria vidreira e outras aplicações envolvendo materiais refratários sob altas temperaturas.

A Propriedades dos Materiais Utilizados

Neste apêndice, são descritas as propriedades físicas e térmicas dos materiais utilizados no experimento. Essas propriedades foram fundamentais para a análise térmica dos refratários e para o desenvolvimento do modelo analítico.

O refratário AZS ER 1681 RT apresenta propriedades térmicas que o tornam adequado para aplicações em fornos de vidro tipo float. A seguir, destacam-se suas principais características:

- Densidade (ρ): 3720 kg/m^3 .
- Calor específico (c_p): $1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

A condutividade térmica do material em função da temperatura é ilustrada na Figura 35. Este gráfico foi adaptado do documento técnico fornecido pelo fabricante Saint-Gobain SEFPRO.

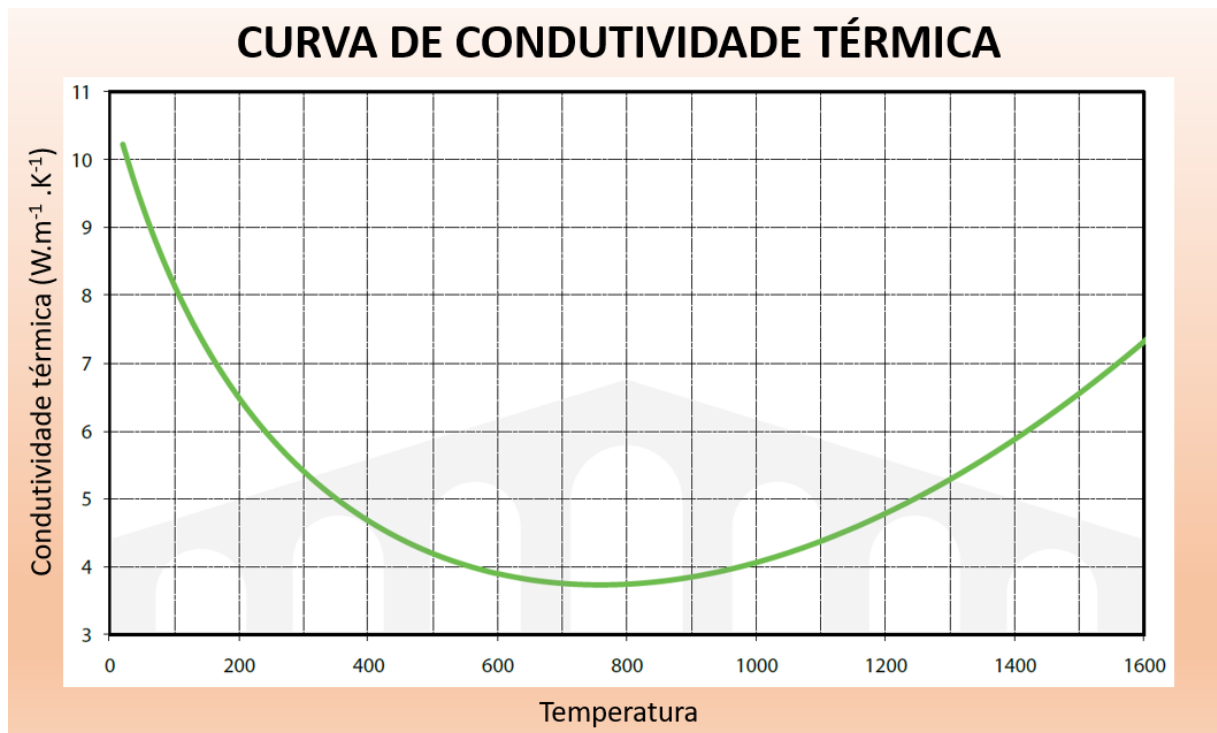


Figura 35 – Gráfico da condutividade térmica do refratário AZS ER 1681 RT em função da temperatura (adaptado de Saint-Gobain SEFPRO).

Essas propriedades foram consideradas constantes para simplificar os cálculos no modelo analítico.

B Script do Modelo Analítico

O código implementado no modelo analítico está descrito a seguir. Este script foi utilizado para calcular a temperatura externa dos refratários sob diferentes velocidades de ventilação e espessuras:

Listing B.1 – Código Python para cálculo das temperaturas externas e geração do gráfico

```

1  # Importação de bibliotecas
2  import numpy as np
3  import matplotlib.pyplot as plt
4
5  # Propriedades do ar
6  L = 200          # Comprimento característico (mm)
7  nu = 15.89e-6    # Viscosidade cinemática do ar (m2/s)
8  mu = 1.81e-5     # Viscosidade dinâmica do ar (Pa·s)
9  cp = 1005        # Capacidade calorífica específica do ar (J/(kg·K)
10 )
11 k_air = 0.0262   # Condutividade térmica do ar (W/(m·K))
12
13 # Definindo as velocidades do ar (0 a 30 m/s, de 5 em 5)
14 velocidades_ar = np.arange(0, 31, 5) # Velocidades do ar (m/s)
15
16 # Parâmetros do problema
17 Ti = 750 + 273.15 # Temperatura interna do forno (K)
18 Ta = 35 + 273.15  # Temperatura ambiente (K)
19 k = 4              # Condutividade térmica do refratário (W/m·K)
20
21 # Espessuras consideradas
22 espessuras = [30, 36, 76] # Espessuras em mm
23
24 # Função para cálculo das temperaturas
25 def calcular_temperaturas(L_fixa_mm):
26     temperaturas_externas = []
27     for v in velocidades_ar:
28         Re = (v * (L / 1000)) / nu # Conversão de L para metros
29         Pr = (mu * cp) / k_air
30         if Re < 1e5:
31             Nu = 0.664 * Re**0.5 * Pr**(1/3)
32         else:
33             Nu = 0.037 * Re**0.8 * Pr**(1/3)

```

```
33     h = (Nu * k_air) / (L / 1000)
34     L_fixa_m = L_fixa_mm / 1000 # Conversão para metros
35     To_valueK = (k * Ti + h * L_fixa_m * Ta) / (h * L_fixa_m
36         + k)
37     To_value = To_valueK - 273.15 # Conversão para Celsius
38     temperaturas_externas.append(To_value)
39
40 # Configuração do gráfico
41 plt.figure(figsize=(22, 8))
42
43 for espessura in espessuras:
44     temperaturas_externas = calcular_temperaturas(espessura)
45     plt.plot(velocidades_ar, temperaturas_externas, marker='o',
46         linestyle='--',
47         label=f'{espessura} mm')
48
49 # Formatação do gráfico
50 plt.xlabel('Velocidade do Ar (m/s)', fontsize=22)
51 plt.ylabel('Temperatura Externa (°C)', fontsize=22)
52 plt.xticks(np.arange(0, 31, 5), fontsize=22)
53 plt.yticks(fontsize=22)
54 plt.legend(title='Espessura do Refratário', fontsize=22)
55 plt.grid(True)
56 plt.show()
```

C Passo a Passo da Simulação no COMSOL Multiphysics

Este apêndice apresenta o passo a passo detalhado para replicar a simulação realizada no software COMSOL Multiphysics.

1. Configuração Inicial

Abra o COMSOL Multiphysics e selecione a **Interface de Física** relevante:

1. No caso da análise térmica do refratário, escolha **Heat Transfer in Solids** (Transferência de Calor em Sólidos).

2. Criação da Geometria

Desenhe a geometria do refratário:

1. **Espessura:** Defina 36 mm para ROI 1, 30 mm para ROI 2, ou 76 mm para ROI 3.
 2. **Altura e largura:** Defina dimensões coerentes, como 200 mm de largura e 300 mm de altura.
1. Clique em **Geometry** e configure a unidade como **milímetros (mm)**.
 2. Finalize clicando em **Build All Objects**.

3. Definição das Propriedades do Material

Na aba **Materials**, adicione o material correspondente ao refratário:

Para o refratário AZS ER1681, insira:

1. **Condutividade térmica:** $4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.
2. **Capacidade térmica:** conforme valores experimentais ou tabelados.

Caso necessário, crie um material personalizado inserindo os valores experimentais.

4. Configuração das Condições de Contorno

Superfície interna do refratário:

1. Atribua uma temperatura fixa de **750 °C**.

Superfície externa do refratário, configure a troca de calor com o ar.

1. **Velocidade do ar:** 30 m/s (ou outro valor relevante).
2. **Coeficiente de transferência de calor:** Insira o valor calculado para convecção forçada.

5. Definição da Malha

1. Clique em **Mesh** e selecione uma malha **fin**a para maior precisão.
2. Ajuste o refinamento especialmente nas interfaces de interesse.
3. Clique em **Build All** para gerar a malha.

6. Configuração do Estudo

1. Na aba **Study**, escolha **Stationary Study** (Estudo Estacionário).
2. Clique em **Compute** para iniciar a simulação.

7. Análise dos Resultados

Após o processamento, vá até a aba **Results**:

1. Escolha **Surface Plot** para visualizar o campo de temperatura.
2. Adicione **Line Graphs** para avaliar o gradiente térmico em regiões específicas.
3. Exporte os dados relevantes, como as temperaturas médias, para comparação com dados experimentais e analíticos.

Bibliografia

- [1] Kevin Selkregg. “Fusion cast refractories : Roles of containment”. Em: 2018. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:209527525>.
- [2] Afshin Sadri et al. “Monitoramento e Controle de Desgaste do Refratário para Operações Contínuas de Alto-Forno”. Em: *ABM Proceedings*. 2023. URL: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/monitoramento-e-controle-de-desgaste-do-refratario-para-operacoes-continuas-de-alto-forno>.
- [3] Vladimir Vavilov e Douglas Burleigh. *Infrared Thermography and Thermal Nondes- tructive Testing*. Jan. de 2020. ISBN: 978-3-030-48001-1. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8.
- [4] Franciele Forcelini, Eugenio Merino e Thiago Varnier. “Termografia Infravermelha e Captura de Movimentos: vantagens e desvantagens no desenvolvimento de projetos”. Em: nov. de 2019. DOI: 10.5151/ped2018-3.3_ACO_72.
- [5] Marcio Luis Ferreira Nascimento. “Breve história da produção de vidros planos: 60 anos da patente de Pilkington”. Em: (2014).
- [6] L. A. B. Pilkington. “The float glass process”. Em: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 314.1516 (1969), pp. 1–25. DOI: 10.1098/rspa.1969.0212.
- [7] Saint-Gobain. *How Glass is Made - Float Process*. Acessado em: 11 mar. 2025. 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=sYASDru75qY>.
- [8] S.M. George, P.W. Haycock e R.M. Ormerod. “The mechanism of corrosion of Aluminium Zirconium Silicate (AZS) material in the float glass furnace regenerator”. Em: *Journal of the European Ceramic Society* 38.4 (2018), pp. 2202–2209. ISSN: 0955-2219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221917308142>.
- [9] André R Toquetto e O Tema. “Vidro Plano (Tecnologia Float)” para a Educação Científica e Tecnológica”. Em: *Química Nova na Escola* 39.2 (2017), pp. 153–161.
- [10] Yasuo Hayashi, K. Matsumoto e Masahiro Kudo. “Mechanisms and chemical effects of surface tin enrichment on float glass”. Em: *Glass Technology* 42 (2001), pp. 130–133. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:99886048>.
- [11] Kiyoshi Sugita. “Historical Overview of Refractory Technology in the Steel Industry”. Em: 2008.
- [12] AO Surendranathan. *An introduction to ceramics and refractories*. CRC Press, 2014.

- [13] Elisa Monteiro do Amaral. *Estudo de Materiais Refratários*. Acessado em: 10 mar. 2025. 2018. URL: https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCC_1%C2%BA_2016-Elisa-Monteiro-do-Amaral-vers%C3%A3o-final.pdf.
- [14] Lina DENG et al. “Effects of Chemical Composition and Microstructure on Exudation of Fused Cast AZS Refractory Materials”. Em: *China’s Refractories* 28.2 (2019), pp. 23–26. URL: http://www.cnref.cn/EN/abstract/article_2941.shtml.
- [15] Wolfgang Wisniewski, Christian Thieme e Christian Rüssel. “The detailed microstructure of an alumina-zirconia-silica (AZS) fused cast refractory material from the cast skin into the bulk analyzed using EBSD”. Em: *Journal of the European Ceramic Society* 39.6 (2019), pp. 2186–2198. ISSN: 0955-2219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.051>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221919300779>.
- [16] Heloisa Gonçalves Campos. “Propriedades mecânicas de compósitos à base de alumina e zircônia com adição de céria”. Em: (2016).
- [17] Ingrid Ferreira Coutinho et al. “DESENVOLVIMENTO DE BRÁQUETE DE ZIRCONIA POR MEIO DO SISTEMA CAD/CAM”. Em: *Revista Univap* 30.68 (2024).
- [18] V Ya Dzyuzer. “Electrofused AZS refractories for high-capacity glass-founding furnaces”. Em: *Refractories and industrial ceramics* 54 (2013), pp. 304–306.
- [19] Frank P. Incropera et al. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [20] Universidade Federal da Bahia (UFBA). *Propriedades térmicas dos materiais: condutividade térmica e mecanismos de transferência de calor*. Acessado em: 10 mar. 2025. 2025. URL: https://www.ledmaufba.com.br/images/material_ditatico/pos_graduacao/ENGM33/ENG_M33-Unidade03.pdf.
- [21] Frank Kreith e Mark S. Bohn. *Princípios de Transferência de Calor*. 6ª ed. Tradução da obra original em inglês: Principles of Heat Transfer. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. ISBN: 9788521613527.
- [22] Sofia Lerche Vieira. “Uma Análise Numérica da Transferência de Calor por Convecção Natural”. Em: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Térmica*. Brasil, 2008.
- [23] Primeiro Nome Nardi. “Investigação sobre Materiais Refratários”. Em: *Anais do Congresso de Materiais Refratários*. Local não especificado, 2015.
- [24] Primeiro Nome Machado. “Análise Numérica da Resistência ao Calor em Materiais Refratários”. Em: *Revista Brasileira de Materiais Refratários* X.Y (2015), ZZ–ZZ.
- [25] Primeiro Nome Diório e Yunus A. Çengel. *Transferência de Calor e Massa*. Local não especificado: Editora Técnica, 2009.

- [26] Primeiro Nome Quites e Primeiro Nome Lia. “Introdução à Transferência de Calor”. Em: *Revista de Engenharia Térmica* X.Y (2005), ZZ–ZZ.
- [27] Hugh D. Young e Roger A. Freedman. *Física III: Termodinâmica, Oscilações e Ondas, Eletromagnetismo*. 14^a. Sears e Zemansky’s Physics for Scientists and Engineers. São Paulo: Pearson Education, 2015.
- [28] João Carlos Martins Coelho. *Energia e fluidos: transferência de calor*. Vol. 3. Editora Blucher, 2016.
- [29] Armando C Oliveira. “Transferência de Calor: Um Guia para a Resolução de Problemas Práticos”. Em: (2022).
- [30] Gabriela de Souza Carvalho, Marcos Vinicius da Silva Freitas e Aneliza Gorne Bueno Ferro Vieira. “Emprego da termografia na inspeção preditiva”. Em: *Revista de Engenharia e Termografia* X.Y (2010), ZZ–ZZ.
- [31] H. Mohammad e J. Wan. “A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations”. Em: *Energies* 15.16 (2022), p. 6000. URL: <https://doi.org/10.3390/en15166000>.
- [32] J.B. Davis et al. *Infrared Thermography: Principles and Applications*. Springer, 2012.
- [33] J. P. Holman. *Transferência de Calor*. 10^a ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.
- [34] J.M. Sweeney e M.T. Kearney. “Thermal Imaging and Infrared Thermography”. Em: *Journal of Industrial Technology* 29.2 (2013), pp. 1–10.
- [35] M. M. Hossain et al. “Infrared thermography for monitoring refractory lining in rotary kilns”. Em: *Applied Thermal Engineering* 127 (2017), pp. 1654–1663. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.103.
- [36] Michael Vollmer e Klaus-Peter Möllmann. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. 2^a ed. Weinheim, Germany: Wiley, 2017.
- [37] International Organization for Standardization. *ISO 18434-1:2008: Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures*. <https://www.iso.org/standard/41264.html>. Acesso em: 10 out. 2023. 2008.
- [38] Y Zhang, X Wang e J Liu. “Thermal imaging technology for condition monitoring in industrial applications”. Em: *Applied Thermal Engineering* 170 (2020), pp. 114–123.
- [39] Olgierd Cecil Zienkiewicz, Robert Leroy Taylor e Jian Z Zhu. *The finite element method: its basis and fundamentals*. Elsevier, 2005.
- [40] Klaus-Jürgen Bathe. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [41] Junuthula Narasimha Reddy. *An introduction to the finite element method*. Vol. 3. McGraw-Hill New York, 2005.
- [42] T. J. R. Hughes. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications, 2000.

- [43] COMSOL. *COMSOL Multiphysics User's Guide*. COMSOL Inc., 2023. URL: <https://www.comsol.com/documentation/>.
- [44] John D. Smith. *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2020.
- [45] Emily R. Johnson. *Introduction to Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Berlin, Germany: Springer, 2019.
- [46] Jane Doe. "Multiphysics Simulation in Engineering: A Review". Em: *Journal of Engineering Science and Technology Review* 14.3 (2021), pp. 45–56.
- [47] Yunus A. Engeli e Afshin J Ghajar. *Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática*. AMGH Editora Ltda, 2012.
- [48] J.P. Holman. *Heat Transfer*. 10th. New York: McGraw-Hill, 2009. ISBN: 978-0-07-352904-3.
- [49] The Engineering Toolbox. *Air - Thermophysical Properties*. Online; acesso em 2025. https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html. 2023.
- [50] Diego B. Figueiredo. *Técnicas de Análise de Dados em Ciências Experimentais*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2019, p. 112. ISBN: 978-85-7393-123-4.
- [51] John Taylor. *Introduction to error analysis, the study of uncertainties in physical measurements*. 1997.