

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

**ANÁLISES TÉRMICA E ENERGÉTICA NO PRÉ-AQUECIMENTO DO  
REVESTIMENTO REFRACTÁRIO DE PANEIS DE ACIARIA VIA  
MÉTODOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS**

Tamires Miranda Milagres Portilho

São Carlos  
2022



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

**ANÁLISES TÉRMICA E ENERGÉTICA NO PRÉ-AQUECIMENTO DO  
REVESTIMENTO REFRACTÁRIO DE PANEIS DE ACIARIA VIA  
MÉTODOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS**

Tamires Miranda Milagres Portilho

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

Orientador: Dr. Victor Carlos Pandolfelli

Coorientador: Dr. Ricardo Afonso Angélico

Agência Financiadora: CNPq - Processo: 134355/2019-9

São Carlos  
2022



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos que compartilharam tempo e conhecimento, e fizeram com que esse projeto se concretizasse.

## **VITAE DO CANDIDATO**

Bacharel em Engenharia Metalúrgica pelo IFMG (2017).





# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Tamires Miranda Milagres Portilho, realizada em 28/04/2022.

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli (UFSCar)

Profa. Dra. Ana Candida Martins Rodrigues (UFSCar)

Prof. Dr. Carlos Pagliosa Neto (RHI Magnesita)



## AGRADECIMENTOS

Mais uma importante etapa se encerra e o sentimento de gratidão é o que fica. Agora aumenta os desafios e expectativas para novas realizações.

Agradeço a Deus por me conceder toda calma necessária e perseverança. À minha família por confiar nas minhas escolhas. Ao meu namorado Marco Antônio pelo companheirismo e por entender minha ausência diversas vezes. À minha tia Rejane por me dar um lar em Araraquara e fazer da sua casa minha casa. Aos amigos e colegas, agradeço à amizade, parceria, momentos de alegria e apoio nas horas difíceis.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Victor Pandolfelli pela oportunidade, pela vontade de ajudar e disponibilidade para desenvolver essa pesquisa e Prof. Dr. Ricardo Angélico, pelo tempo dedicado, pelas contribuições, que foram muito importantes para o avanço desse projeto. Agradeço também ao Matheus Santos por todo suporte, colaboração e paciência para aguentar meus dramas. Sua participação e incentivo foram fundamentais para vencer todos os obstáculos. Trabalhar com você é gratificante, e que a REDLAB prospere, porque você é merecedor de tudo de melhor nessa vida.

Ao Breno Parente e Leonardo Consoni por me ajudarem na preparação das amostras, Otávio Borges por toda disponibilidade e assistência nos ensaios de DSC, Vânia Salvini por disponibilizar o sistema de aquisição de dados durante os experimentos, Túlio Múmic e Murilo Moreira pela ajuda no desenvolvimento em Python. Tiago dos Santos Jr, Thais Mota, Prof. Dra. Ana Paula, da Luz e demais colegas do GEEM, obrigada pelo convívio, conversas e discussões.

Ao PGCEM/UFSCar, especialmente à equipe da secretaria, pelos serviços prestados. Aos professores do PPCGEM, obrigada por todo conhecimento compartilhado. Agradeço ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro para realização desse trabalho com bolsa de estudos, processo 134355/2019-9. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.



## RESUMO

O pré-aquecimento de equipamentos industriais revestidos com materiais refratários usualmente consome grandes quantidades de energia. Essa etapa geralmente é longa e impacta nos custos e na produtividade de diversos setores econômicos. Práticas de aquecimento com menor custo e maior sustentabilidade devem ser estudadas e implementadas. Adicionalmente, tal etapa é crítica ao refratário e à indústria que o utiliza, pois o material sofre transformações quando é aquecido até as temperaturas usuais do processo, como a evaporação da água, a eliminação de materiais voláteis ou reações no estado sólido. Logo, é necessário assegurar a qualidade desses materiais, aplicando-se uma curva de aquecimento adequada. Este trabalho tem como objetivo quantificar o consumo energético durante o pré-aquecimento do revestimento refratário de painéis de aço. Para tal, foram realizados ensaios DSC, análises térmicas e simulações computacionais de um concreto refratário, com o intuito de avaliar a influência das transformações na etapa de aquecimento. As simulações para um concreto aluminoso, considerando a análise térmica de um corpo cilíndrico, mostraram uma diferença máxima de temperaturas no primeiro aquecimento de 2 °C entre o valor experimental e o obtido na simulação, se mostrando adequada para quantificação do consumo de energia durante o aquecimento de materiais cerâmicos refratários. Já a simulação considerando a curva obtida no ensaio de DSC, não foi satisfatória para representar a taxa de energia por unidade de volume do concreto 5CAC. O consumo de combustível foi de 1,8% superior para o caso em que as energias das reações são consideradas. O método desenvolvido pode trazer uma maior previsibilidade na programação do pré-aquecimento de painéis de aciaria, tanto em questão de consumo de combustível, como também de programação da curva de aquecimento.

**Palavras-chave:** Consumo de energia; Simulação computacional; Pré-aquecimento de painéis de aciaria; Concreto aluminoso; Método dos elementos finitos.



## ABSTRACT

### THERMAL AND ENERGY ANALYSIS IN THE PREHEATING OF REFRACTORY LINING OF STEEL LADLE VIA NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Preheating the refractory lining of industrial equipment usually consumes substantial amounts of energy. This step is usually time consuming and impacts the costs and productivity of several economic sectors. Therefore, cost-effective, and sustainable heating practices should be studied and implemented. Additionally, this step is critical to the refractory and the industry that deploys it because the material faces transformations when heated up to the usual process temperatures, such as the evaporation of water, the elimination of volatile materials, or reactions in the solid state. Based on that, it is necessary to ensure the quality of these materials by applying an appropriate heating curve. This work aims to quantify the energy consumption during the preheating of the refractory lining of a steel ladle. To this end, DSC tests, thermal analysis, and computer simulations were carried out on refractory concrete to evaluate the influence of transformations on the heating step. The simulations for an alumina-based castable, considering the thermal analysis of a cylindrical sample, showed a maximum temperature difference in the first heating of 2 °C between the experimental value and that obtained by the simulation, proving to be suitable for the quantification of energy consumption during preheating. The simulation, considering the profile obtained in the DSC test, was not satisfactory to represent the energy rate per unit volume of the 5CAC castable. The fuel consumption was 1.8% higher for the case where the energies of the reactions were considered. The developed methodology can bring greater predictability to the preheating schedule of steel ladles, both in terms of fuel consumption and programming the heating curve.

**Keywords:** Energy consumption; Computer simulation; Preheating of steel ladle; Alumina-based castable; Finite element method.



## **PUBLICAÇÕES**

- Trabalhos completos aceitos para apresentação em Congresso:

Portilho, T. M. M., Santos, M. F., Angélico, R. A., Pandolfelli, V. C., Analytical and Numerical Determination of the Volumetric Rate of Thermal Energy Generation in a Refractory Castable. UNITECR, Chicago 2022.

Portilho, T. M. M., Santos, M. F., Angélico, R. A., Pandolfelli, V. C., Experimental and numerical method for determining the rate of energy generation per unit volume in refractory materials. 6° edição ABM Week, São Paulo 2022.



## ÍNDICE DE ASSUNTOS

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO .....	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xvii
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivo.....	3
1.2 Justificativa.....	4
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	5
2.1 Contexto histórico.....	5
2.2 Processo siderúrgico.....	14
2.3 Panela de aciaria.....	16
2.4 Pré-aquecimento de painéis de aciaria .....	17
2.4.1 Estação de pré-aquecimento.....	18
2.4.2 Curvas de pré-aquecimento .....	22
2.5 Refratários utilizados na panela de aciaria.....	23
2.5.1 Tijolos refratários .....	25
2.5.2 Refratários sem carbono .....	26
2.5.3 Refratários monolíticos.....	27
2.6 Propriedade dos materiais refratários .....	30

2.6.1	Condutividade térmica.....	30
2.6.2	Calor específico.....	31
2.6.3	Densidade .....	31
2.6.4	Taxa de geração de energia por unidade de volume .....	32
2.6.4.1	Análise térmica dos materiais refratários.....	33
2.7	Mecanismos de transferência de calor.....	35
2.7.1	Balanço energético em um volume infinitesimal.....	36
2.7.2	Condução .....	37
2.7.3	Convecção .....	38
2.7.4	Radiação .....	39
2.8	Simulação térmica via método dos elementos finitos.....	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1	Materiais refratários analisados.....	43
3.1.1	Concreto aluminoso de pega hidráulica (5CAC) .....	43
3.1.2	Materiais utilizados em painéis de aciaria .....	43
3.2	Determinação experimental das propriedades térmicas do concreto 5CAC	
	45	
3.2.1	Preparação das amostras .....	45
3.2.2	Termogravimetria e densidade .....	46
3.2.3	Calor específico e condutividade térmica .....	47
3.2.4	Análises térmicas do refratário durante o pré-aquecimentos .....	48
3.2.5	Calorimetria de varredura diferencial (DSC).....	50
3.3	Métodos de análises .....	52
3.3.1	Determinação da taxa de energia volumétrica .....	52
3.3.2	Modelo térmico em elementos finitos .....	54
3.3.3	Determinação do consumo de energia / combustível.....	58

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
4.1	Resultados experimentais .....	61
4.1.1	Termogravimetria e densidade .....	61
4.1.2	DSC .....	62
4.1.3	Análise térmica experimental .....	67
4.2	Modelo de determinação da taxa de energia volumétrica .....	70
4.3	Simulação do aquecimento do corpo de prova no forno mufla .....	76
4.4	Simulação da panela de aço .....	78
4.5	Consumo de energia .....	81
5	CONCLUSÕES .....	83
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
7	REFERÊNCIAS .....	87



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos combustíveis [33]. .....	21
Tabela 3.1 - Formulação do concreto refratário. ....	43
Tabela 3.2 – Densidades aparentes dos materiais utilizados na simulação da panela. ....	47
Tabela 3.3 - Condutividade térmica e calor específico dos materiais utilizados na simulação térmica da panela de aciaria. ....	48
Tabela 3.4 - Composição das amostras analisadas no DSC. ....	51
Tabela 3.5 – Composição e poder calorífico dos combustíveis utilizados [52], [53]. ....	59
Tabela 4.1 - A energia total para pré-aquecer a panela.....	81



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais características das etapas da Revolução Industrial [14].	6
Figura 2.2 - Desenvolvimento refratário na segunda metade do século 20 [13].	8
Figura 2.3 – Os nove pilares da Indústria 4.0 [17].	9
Figura 2.4 - Diagrama Sankey com os principais setores responsáveis pela emissão dos gases de efeito estufa no Brasil em 2020 [20].	10
Figura 2.5 - Parcela de emissão dos gases de efeito estufa do setor industrial e produção de aço no Brasil em 2020 [21].	10
Figura 2.6 - Matriz energética da siderurgia brasileira [22].	11
Figura 2.7 - Principais países produtores de aço e suas respectivas produção (Mt) em 2020 [23].	12
Figura 2.8 - Empresas produtoras de aço no Brasil em 2020 [24].	13
Figura 2.9 - Principais mercados consumidores de refratários [25].	13
Figura 2.10 - Fluxograma típico da siderurgia [31].	15
Figura 2.11 – Diferentes regiões com refratários de uma panela de aciaria [31].	16
Figura 2.12 - Ciclo da panela de aciaria durante o refino secundário [31].	17
Figura 2.13 - Queimadores para pré-aquecimento de painéis de aciaria.	19
Figura 2.14 – a) Vazão de combustível, vazão de ar de combustão e temperatura do ar secundário utilizados na simulação. b) Perfis de temperatura ao longo no comprimento da parede obtidos pelo modelo [9].	20
Figura 2.15 - Curva do controlador de temperatura para secagem e pré-aquecimento de painéis novos [32].	23
Figura 2.16 - Classificação dos refratários segundo a classificação ISO [34].	24
Figura 2.17 - Materiais refratários conformados [34].	26
Figura 2.18 - Refratários monolíticos [34].	27
Figura 2.19 - Taxa de pré-aquecimento de um concreto refratário aquecido e um forno com uma rampa de 10°C por minuto [37].	29
Figura 2.20 - Transformações que podem ocorrer durante o pré-aquecimento de concretos refratários de alumina contendo CAC [42].	33
Figura 2.21 - TG e DSC das fases encontradas no concreto 5CAC [46].	35
Figura 2.22 - TG e DTA do polímero polietilenoglicol [47].	35

Figura 2.23 - Mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação, respectivamente) [48]. .....	36
Figura 2.24 - Esquema para um volume infinitesimal das componentes envolvidas no balanço térmico para um material sólido [48]. .....	36
Figura 2.25 - Diagrama de resolução de problemas de transferência de calor pelo método dos elementos finitos [31]. .....	41
Figura 3.1 - Representação da panela de aciaria destacando os materiais utilizados e posição dos termopares para análise térmica. ....	44
Figura 3.2 – (a) Reômetro planetário utilizado na preparação do concreto aluminoso (5CAC). (b) Molde e corpo de prova antes da cura. ....	45
Figura 3.3 – Montagem experimental utilizado no ensaio de termogravimetria. ....	46
Figura 3.4 - Representação da amostra utilizada no ensaio de TG. TA representa um termopar posicionado no centro da amostra. ....	47
Figura 3.5 - (a) Amostras cilíndricas 5CAC utilizadas durante os testes e simulações. Em A, observa-se o orifício do termopar utilizado para medir a temperatura do centro da amostra. Em B, o entalhe utilizado para posicionar o termopar, que mediu a temperatura da superfície. Em C, tem-se uma representação da amostra, com os termopares e dimensões. (b) Rampa de pré-aquecimento utilizada no ensaio experimental, com taxa de 2 °C/min. ....	49
Figura 3.6 - Esquema e imagens do sistema de pré-aquecimento e registro de temperatura utilizado para realização dos experimentos. ....	50
Figura 3.7 - Curva de pré-aquecimento utilizada nos ensaios de DSC. ....	51
Figura 3.8 - Fluxograma representativo da metodologia de cálculo do $s$ .....	53
Figura 3.9 - Geometria utilizada no modelo via MEF. ....	55
Figura 3.10 – (a) Gradiente térmico utilizado como condição de contorno na simulação da panela. (b) Rampa de pré-aquecimento utilizada na simulação. ....	57
Figura 4.1 – Resultados experimentais (a) DTG do 5CAC. (b) Densidade do 5CAC. ....	62
Figura 4.2 – Resultados do DSC do concreto refratário 5CAC. (a) Curvas extraídas do equipamento de DSC para o primeiro e segundo aquecimento do	

5CAC. (b) Perda de massa e diferença entre os DSCs do primeiro e segundo aquecimento do 5CAC. ....	63
Figura 4.3 - DSC do primeiro e segundo pré-aquecimento do cimento Secar 71. ....	64
Figura 4.4 – DSC e perda de massa do dispersante. ....	65
Figura 4.5 - DSC e DTG das amostras ensaiadas. ....	66
Figura 4.6 – Diferença do consumo de energia entre o primeiro e segundo pré-aquecimento.....	68
Figura 4.7 - Temperatura das amostras e forno durante os pré-aquecimentos. ....	69
Figura 4.8 - Diferença de temperatura entre o primeiro e segundo aquecimento. ....	70
Figura 4.9 - Gráfico ilustrativo da somatória de quatro funções gaussianas centradas em diferentes valores de temperatura. A primeira e a última representam processos exotérmicos, enquanto a segunda e a terceira, processos endotérmicos. ....	73
Figura 4.10 - Taxa de pré-aquecimento da amostra durante o primeiro e segundo pré-aquecimento. ....	73
Figura 4.11 – Ajuste do modelo aos dados experimentais do procedimento analítico do 5CAC. ....	75
Figura 4.12 – Ajuste do modelo obtido por meio do resultado do DSC do 5CAC. ....	76
Figura 4.13 - Diferença de temperatura entre o experimento e a simulação para o caso do $s$ calculado.....	77
Figura 4.14 - Diferença de temperatura entre o experimento e a simulação para o caso do $sDSC$ a partir do DSC.....	78
Figura 4.15 - Temperatura da camada de trabalho (fundo) da panela. As posições dos termopares estão indicadas na Figura 3.1. ....	79
Figura 4.16 - Diferença entre o perfil térmico da simulação não considerando o valor de $s$ pela simulação considerando esse valor. ....	80
Figura 4.17 - Taxa de pré-aquecimento das faces quente e fria da camada de trabalho (fundo) da panela. ....	80



## 1 INTRODUÇÃO

A siderurgia possui tecnologias consolidadas, mas o cenário atual força a sofisticação e otimização de seus processos a fim de se buscar as melhores condições para aumentar a produtividade, reduzir custos, impactos ambientais e melhorar as condições de trabalho [1]. A utilização dos pilares da indústria 4.0 para resolver problemas complexos está cada vez mais presente e próximo do âmbito fabril. Essas ferramentas podem ser utilizadas para rastrear o processo, tratar dados em tempo real, corrigir variáveis, tornar as decisões mais efetivas e assertivas, melhorar a previsão de demanda de produção, bem como o controle de estoque e logística, e melhor gestão das paradas para manutenção dos equipamentos [2].

Neste contexto destaca-se a frente de simulação, que tem o Método dos Elementos Finitos (MEF) como uma das abordagens mais amplamente empregadas. O MEF consiste em uma rota numérica, que resolve, de forma aproximada, as equações diferenciais associadas aos fenômenos físicos pela discretização do problema, facilitando a solução quando aplicado para geometrias e condições complexas. Tal método pode ser usado para prever comportamentos em sistemas estruturais, mecânicos, térmicos, elétricos e químicos, tanto para o desenvolvimento de novos projetos, quanto para análise de desempenho de materiais [3].

Nos processos de produção do aço em usinas siderúrgicas são necessários grandes aportes energéticos devido às elevadas temperaturas. As temperaturas do aço ultrapassam os 1550 °C, visto que em grande parte do tempo o material encontra-se fundido. Para isso utilizam de energia elétrica, química, térmica para geração de calor e promover a redução do minério, fundir a sucata, refinar o aço, laminar tarugos e placas. Grande parte dessa energia é proveniente de combustíveis fósseis, onerosos, não renováveis e que degradam o meio ambiente, sendo imprescindível a conservação de calor para aumento da eficiência energética desses processos. Por isso, grande parte dos equipamentos são revestidos por materiais refratários, pois estes garantem a integridade estrutural do processo nas elevadas temperaturas exigidas e

reduzem a transferência de calor do interior dos equipamentos para o ambiente. Isso torna o processo mais seguro, eficiente e com elevada produtividade [4].

Quanto mais próximo da cadeia final de produção, maior deve ser o controle das variáveis de processo. No caso da siderurgia, a última etapa antes da solidificação e obtenção do produto, tem-se o refino secundário ou a metalurgia da panela. Nesta etapa, o aço fundido produzido no refino primário (convertedor LD ou forno elétrico a arco - FEA) é vazado na panela de aciaria e passa por outros tratamentos para ajuste da composição química, efetua-se a desoxidação e desfosforação, adição de ligas, ajuste da temperatura do banho e remoção de inclusões remanescentes. Todos esses ajustes são realizados na panela de aço.

Para atender as exigências de mercado para produção de aços de alto valor agregado, com composição química bem estabelecida, e alta qualidade e desempenho, menor devem ser as interferências na qualidade do aço, como exemplos a serem evitados ou minimizados, pode-se destacar o *pick-up* de nitrogênio proveniente das adições (sucata, ferro-ligas, borbulhamento) feitas durante o refino secundário, e o *pick-up* de carbono proveniente do revestimento refratário [5]. Diversos estudos abordam a necessidade de se investigar configurações de revestimento para garantir as especificações de qualidade e produção, com menor custo possível [6]. Para isso, reduzir tempos de paradas para manutenção e aumentar a vida útil dos revestimentos é fundamental.

Nesse contexto, refratários com teor de carbono baixo ou nulo têm sido desenvolvido. O carbono nos refratários de panela em grande parte é originado dos ligantes resinados utilizados. Desenvolvimentos recentes consideram refratários monolíticos que utilizam água como ligante e não apresentam carbono em sua composição. Em grande parte as desvantagens desses últimos materiais estão associadas ao tempo e o consumo de energia gasto para aquecer tais materiais [7].

A etapa de pré-aquecimento das panelas de aço é importante tanto ao processo de refino para a garantia da qualidade do revestimento refratário. Essa etapa é necessária para assegurar as propriedades desejadas ao refratário,

evitando o choque térmico ou outros danos no revestimento, e também para evitar perdas severas de energia do aço [8].

Práticas de pré-aquecimento mais efetivas, com menor custo e mais sustentáveis devem ser estudadas e implementadas [9] [10]. Esta etapa é crítica ao refratário e à indústria que o utiliza, pois, o material sofre transformações quando é aquecido até as temperaturas usuais do processo, como, por exemplo, a evaporação da água, a eliminação de materiais voláteis ou reações no estado sólido. Uma consequência dessas reações é o aumento da pressão interna no material, que dependendo das condições de pré-aquecimento pode explodir [11]. Logo, é necessário assegurar a qualidade desses materiais e a segurança do processo, aplicando-se uma curva de pré-aquecimento adequada [7]. Adicionalmente, a energia necessária para que esses fenômenos ocorram deve ser considerada / contabilizada / avaliada.

Esse trabalho tem como proposta, por meio de análises experimentais e modelamento computacional utilizando o MEF, desenvolver um procedimento que quantifique a taxa de geração de energia por unidade de volume de um concreto refratário, bem como analisar e quantificar o consumo energético durante a etapa de pré-aquecimento de painéis de aciaria, contribuindo assim, com mais informação para o aprimoramento dos modelos de simulação térmica existentes.

## **1.1 Objetivo**

A etapa de pré-aquecimento consome grandes quantidades de energia e impactam na qualidade e custos dos processos siderúrgicos. Garantir melhores práticas de pré-aquecimento evita problemas no processo, danos aos refratários, além de reduzir o tempo necessário para o pré-aquecimento, aumentar a produtividade e minimizar impactos ambientais.

Este trabalho tem como objetivo quantificar o consumo energético durante o pré-aquecimento do revestimento refratário de painéis de aço, por meio de análises experimentais e modelos computacionais. Logo, busca-se:

- coletar e determinar as propriedades térmicas dos materiais estudados;

- desenvolver um procedimento experimental para identificar a taxa de geração de energia por unidade de volume dos materiais refratários, assim como uma abordagem para considerar essa taxa no modelo numérico em elementos finitos;
- desenvolver uma ferramenta para análise térmica e energética de painéis de aço durante o pré-aquecimento, que possibilite o estudo de diferentes cenários de operação e configuração do revestimento;

## **1.2 Justificativa**

A demanda energética no refino secundário é muito alta, pois é necessário garantir que o aço se mantenha completamente fundido e que esteja na temperatura ideal para o lingotamento. Esta etapa representa um dos principais consumos específicos de materiais refratários (tonelada de refratário por tonelada de aço) na siderurgia. Portanto, aumentar a eficiência energética, seja por conservação térmica dos equipamentos, por meio de revestimentos refratários mais eficientes, ou pela redução da utilização de fontes externas de combustíveis, principalmente na etapa de pré-aquecimento, significa reduzir o consumo e a dependência dos combustíveis fósseis. Além disso, a etapa de pré-aquecimento interfere na disponibilidade de painéis para operação, e conseqüentemente na produtividade da aciaria.

Nesse contexto, justifica-se desenvolver um procedimento para identificação e aprimoramento da curva de pré-aquecimento de revestimentos refratários de painéis de aço buscando soluções para estes desafios.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Contexto histórico

O primeiro contato do homem com o metal ferro foi por meio de fragmentos contidos em meteoritos, e com o passar do tempo foi-se aprendendo que este material poderia ser moldado para atender às diversas necessidades do homem primitivo. Os primeiros ferreiros, no século XIII antes de Cristo, descobriram que o ferro se tornava mais resistente se deixado em fornos a carvão [12].

Desde os tempos antigos, os refratários têm sido intimamente envolvidos na produção do ferro e nos avanços da siderurgia. Temperaturas mais altas eram necessárias dentro desses fornos e o revestimento interno tinha que suportar não apenas a calor, mas também a corrosão mecânica e química.

Os refratários utilizados nessa época eram desprovidos de forma, ou em menor quantidade, blocos de rochas de  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , com alto grau de impurezas [13].

Durante a conquista e expansão do Império Romano surgiu a necessidade de armas e armaduras, que exigiram o desenvolvimento de processos para melhorar a qualidade do ferro, como por exemplo a têmpera para produção de um material mais duro e resistente. Artesões na China, no século III A.C. conseguiram aprimorar o processo de produção de aço, produzindo em escala e com excelente qualidade para época [12].

Durante a Idade Média, a metalurgia foi se desenvolvendo para atender diversas necessidades correntes, mas somente com a Revolução Industrial, com o desenvolvimento e aperfeiçoamento das fontes energéticas, e o aprimoramento das tecnologias de produção dos materiais refratários, que houve um avanço significativo na maneira de extrair minérios e produzir os metais [13].

As Revoluções Industriais dos últimos séculos podem ser divididas em 4 etapas / períodos, distintas e caracterizadas pelos avanços tecnológicos, conforme Figura 2.1.



Figura 2.1 - Principais características das etapas da Revolução Industrial [14].

A Primeira Revolução Industrial (1784 – 1870) foi caracterizada pela consolidação da produção. Nesse período, houve a expansão do comércio, e a mecanização possibilitou maior produtividade. Destacam-se como os principais avanços dessa época o desenvolvimento da máquina a vapor, utilizando carvão como fonte energia, que permitiu a mecanização do trabalho, a criação da locomotiva, facilitando o transporte, o aparecimento da indústria têxtil e a ampliação da indústria siderúrgica e refratária [2].

Já a Segunda Revolução Industrial (1870 – 1970) corresponde ao processo evolutivo das tecnologias, aumento da produção, com linhas de montagens, surgimento da eletricidade e utilização da energia por meio da combustão. Esse período também representou expansões das fronteiras deixando de ser limitado apenas à Inglaterra e espalhando-se para outros países, como Estados Unidos, Japão, Alemanha e França. Surgiu nessa época o capitalismo financeiro, esse avanço e aperfeiçoamento econômico possibilitou aumentar a produtividade nas indústrias, bem como os lucros obtidos. Os avanços siderúrgicos também foram significativos nesse período, caracterizados pelo aperfeiçoamento dos aços e processos, que aumentaram também a demanda por desenvolvimento de materiais refratários com maior qualidade química e física [2], [13].

A Terceira Revolução Industrial (1970 – hoje) também é conhecida como a revolução técnico-científica, é marcada pelos avanços e aperfeiçoamento das

áreas de robótica, genética, telecomunicações, transporte e infraestrutura. Surgiu nessa época o conceito de globalização, ou seja, o processo de intensificação da integração econômica e política internacional, marcado pelo avanço nos sistemas de transporte, de comunicação e de produção. Esse período também é caracterizado pela consolidação do capitalismo financeiro, onde foi aumentada a produção em massa e automatizada, reduzindo o tempo de produção e aumentando a produtividade. Consequência disso foi o aumento nos níveis de consumo, intensificados pelo fácil acesso e disponibilidade do mercado.

O setor siderúrgico foi um dos que mais se beneficiou dos avanços tecnológicos dessa época. Com disponibilidade de recursos naturais e energéticos, e com o aumento do mercado consumidor, além de maior automatização dos processos, a produtividade aumentou significativamente. A demanda do mercado consumidor também trouxe outras vantagens competitivas para o setor, como desenvolvimentos de novas ligas para aumentar a qualidade e/ou reduzir os custos, novas aplicações, etc. [2], [13]. Esse aumento na produção e aprimoramento dos tipos de aço só foram possíveis com avanços nas tecnologias refratárias demonstrados na Figura 2.2 [13].

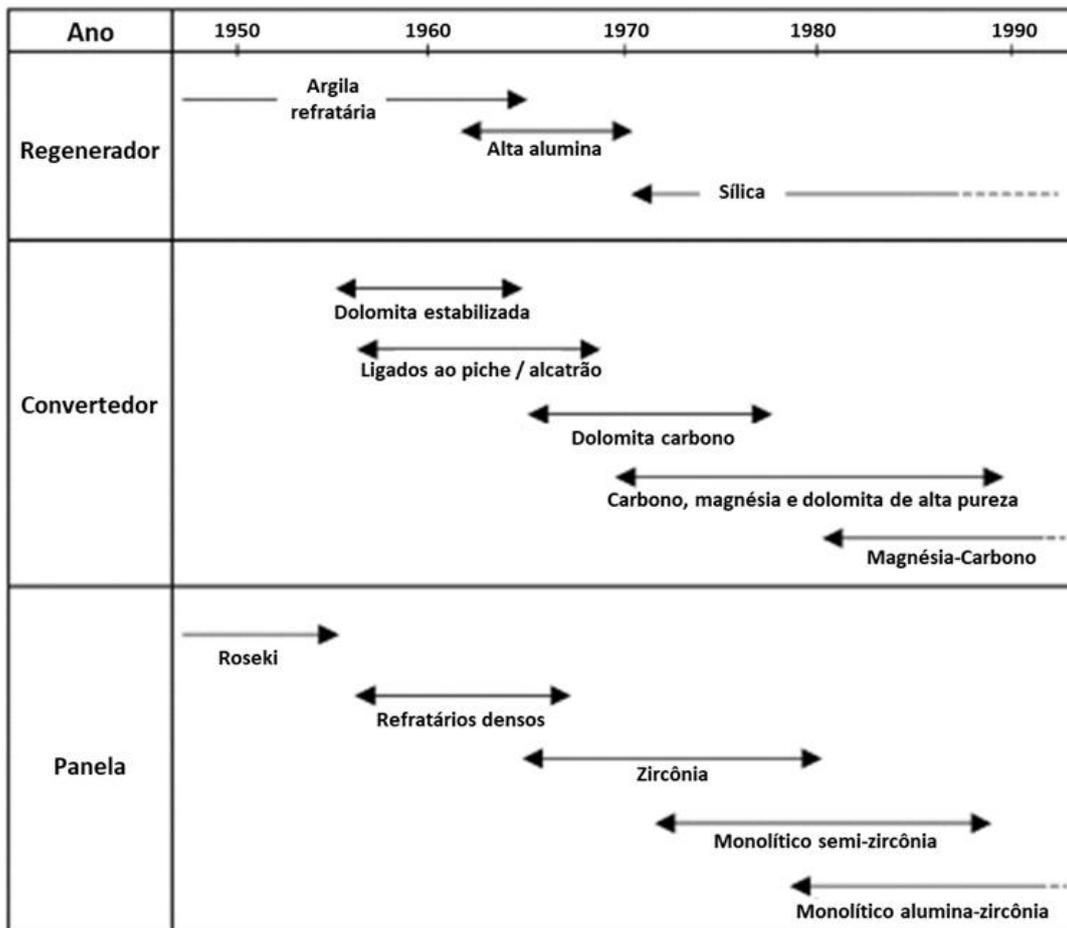


Figura 2.2 - Desenvolvimento refratário na segunda metade do século 20 [13].

A nova Revolução Industrial, também conhecida como indústria 4.0, pode ser definida como um conceito de indústria que engloba as principais inovações tecnológicas das áreas de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura.

Esse conceito surgiu na Alemanha em 2011 [2] e é constituído por 9 pilares (Figura 2.3): segurança da informação, internet das coisas, computação em nuvens, big data, sistemas integrados, robotização, realidade aumentada, simulação e manufatura aditiva. Com estes conceitos os processos de produção tendem a se tornar cada vez mais eficientes, controláveis, previsíveis, autônomos e customizáveis. No setor siderúrgico, existem diversas possibilidades de adaptação da produção, processo e manutenção, fundamentando-se nos pilares da indústria 4.0 [15]. O chão de fábrica, antes

fechado e desintegrado com toda a cadeia produtiva, foi tornando-se mais integrado, digital e rastreável [16].

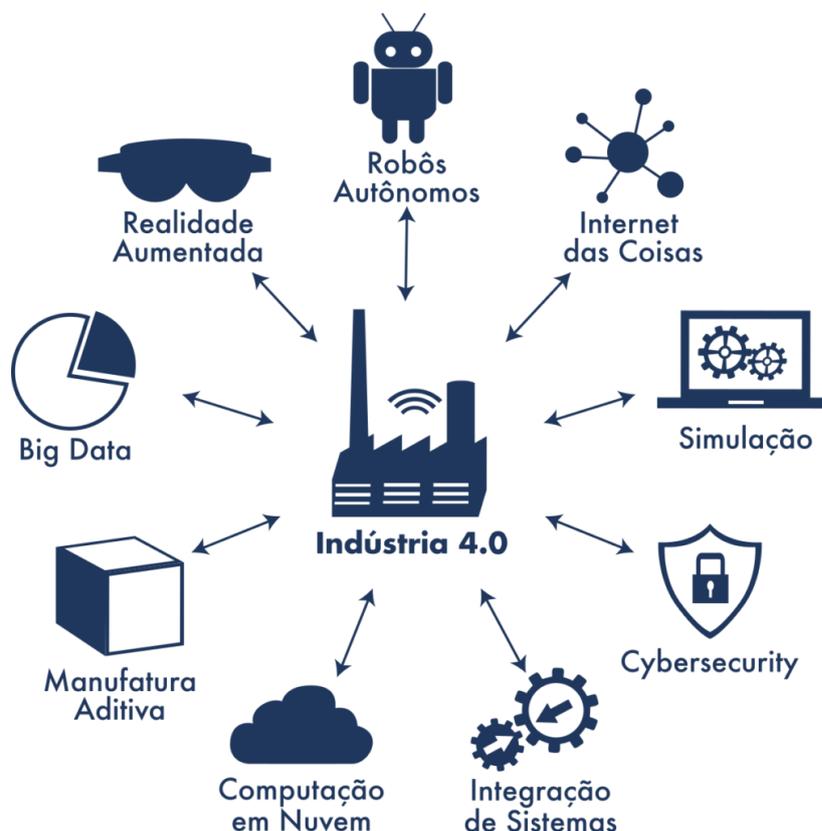


Figura 2.3 – Os nove pilares da Indústria 4.0 [17].

As maiores consequências trazidas com a Revolução Industrial são o consumo exacerbado, o uso irresponsável dos recursos naturais e esgotáveis, além de poucas medidas de controle dos impactos socioambientais.

Dentro desse cenário, a indústria siderúrgica também tem se destacado como uma grande causadora dos impactos ambientais. É inerente ao processo a geração de subprodutos ou resíduos, que muitas vezes não são reaproveitados dentro das usinas, além dos particulados e gases lançados na atmosfera. A indústria metalúrgica brasileira, tem uma grande contribuição na emissão de gases do efeito estufa [18] [19]. Dentro do setor industrial, a maior parcela de emissão de CO<sub>2</sub> é proveniente de processos metalúrgicos, como podemos ver na Figura 2.4 e Figura 2.5. Isso tanto devido às emissões intrínsecas à química do processo, quanto para à produção de energia utilizada para eles ocorrerem.

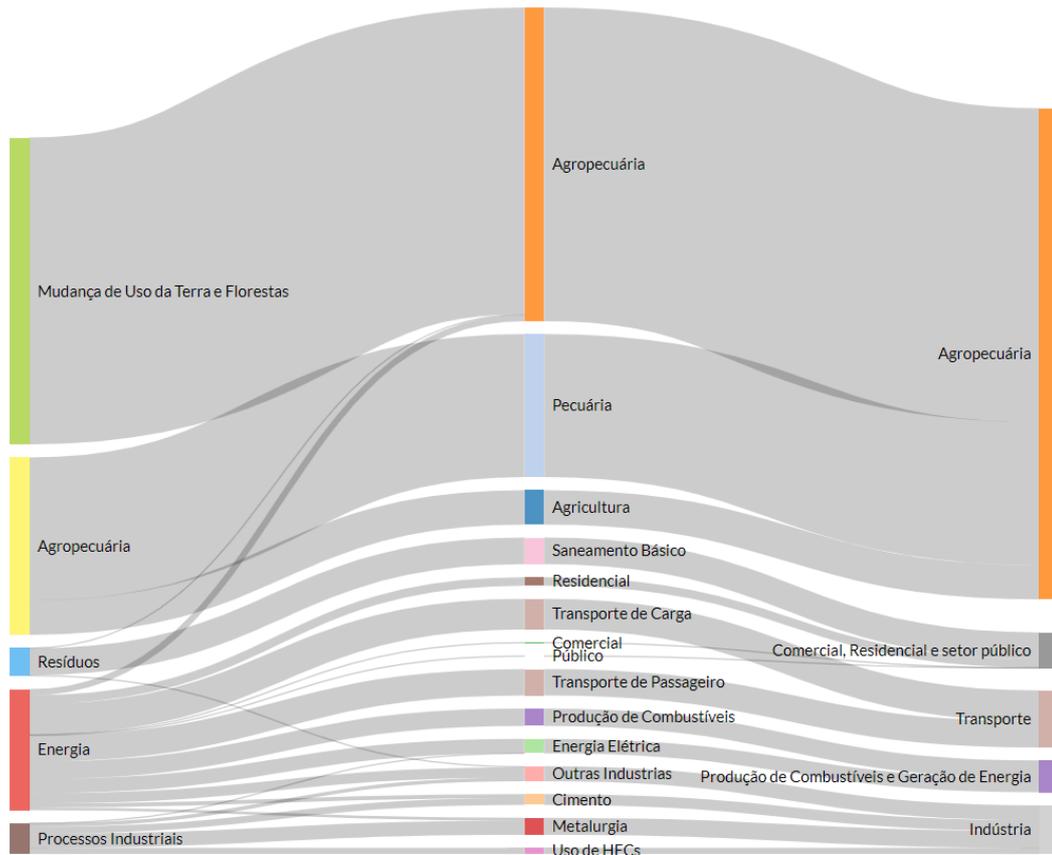


Figura 2.4 - Diagrama Sankey com os principais setores responsáveis pela emissão dos gases de efeito estufa no Brasil em 2020 [20].

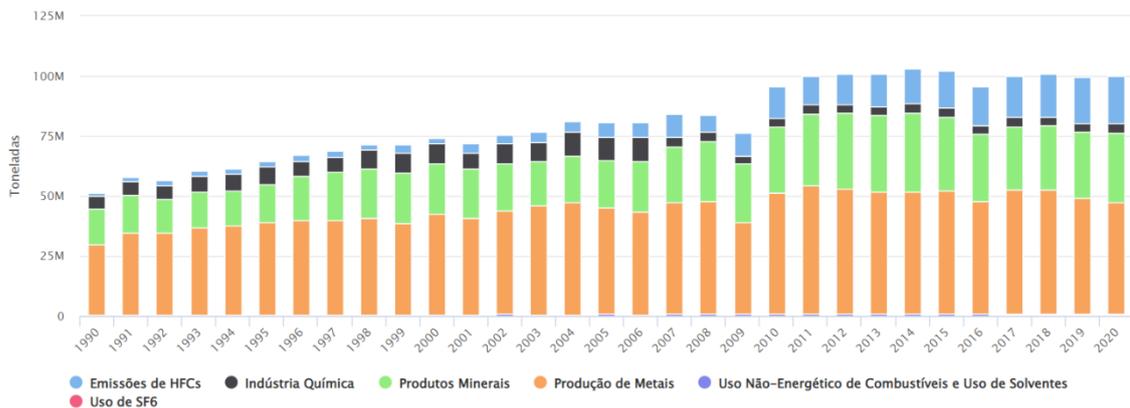


Figura 2.5 - Parcela de emissão dos gases de efeito estufa do setor industrial e produção de aço no Brasil em 2020 [21].

São quatro as principais alternativas que têm sido usadas pelas empresas brasileiras para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na siderurgia: a cogeração de energia elétrica por meio do reaproveitamento de

calor e de gases do processo; a substituição de insumos/ combustíveis; a otimização do controle de processos com automação; e os programas de sensibilização/treinamento de fornecedores [18].

O Brasil é o principal produtor de aço a carvão vegetal do mundo. É evidente também o aumento da utilização de fontes renováveis na indústria do ferro-gusa e aço. A Figura 2.6 a seguir traz a evolução da matriz energética da siderurgia brasileira. Além disso, pode-se observar ser bem comum a reutilização de combustíveis gerados na siderurgia, como fonte de energia em outros processos na própria planta, reduzindo a dependência externa de combustíveis, muitas vezes caras e poluentes [22].

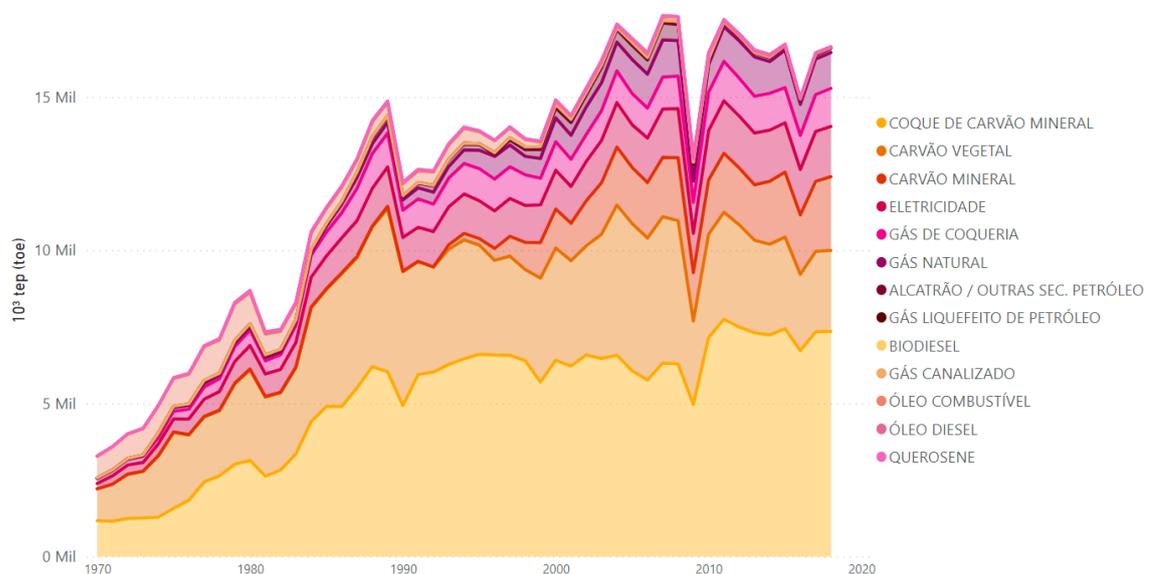


Figura 2.6 - Matriz energética da siderurgia brasileira [22].

A demanda mundial pelo aço é crescente. Em 2018, a produção de aço mundial, ultrapassou 1,8 Bt/ano. Na Figura 2.7, nota-se que os maiores produtores são a China, Índia e Japão [23].

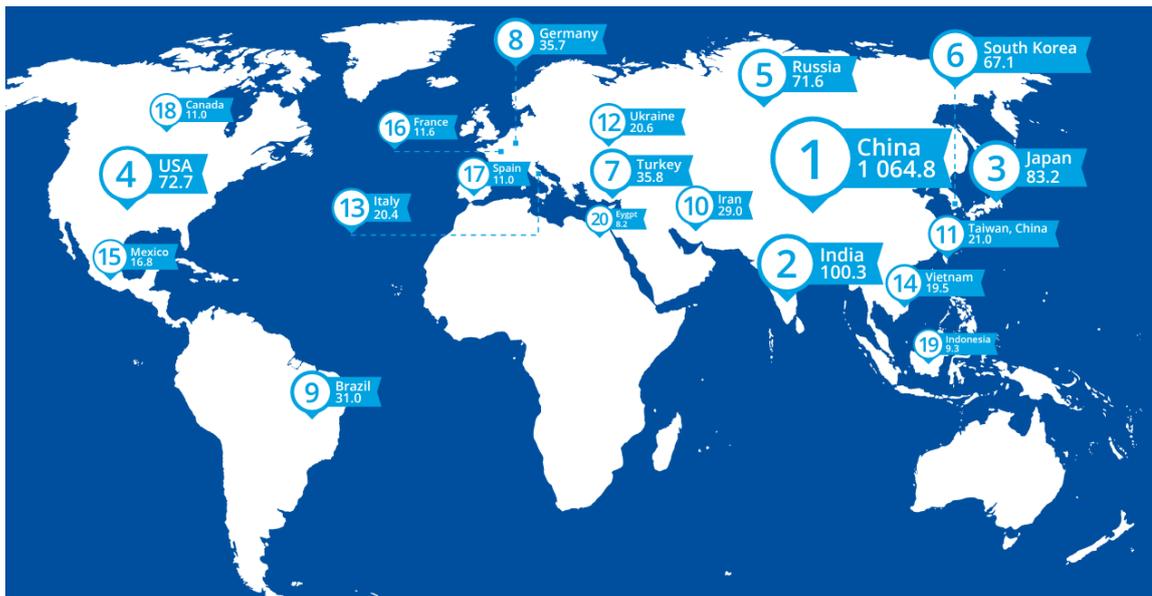


Figura 2.7 - Principais países produtores de aço e suas respectivas produção (Mt) em 2020 [23].

A siderurgia tem importante papel no ramo industrial brasileiro. Segundo a *World Steel*, a produção de aço no Brasil em 2020, foi de 31 Mt/ano, sendo o 9º maior produtor de aço do mundo [23]. O parque siderúrgico brasileiro é composto 12 grupos industriais, operando com 32 usinas em 11 estados, em 4 regiões do país, como ilustrado na Figura 2.8 [24]. A indústria siderúrgica brasileira consegue atender à quase totalidade da demanda do mercado doméstico, produzindo uma ampla gama de produtos de aços planos e longos.

31 usinas (15 integradas e 16 mini-mills), administradas por 12 grupos

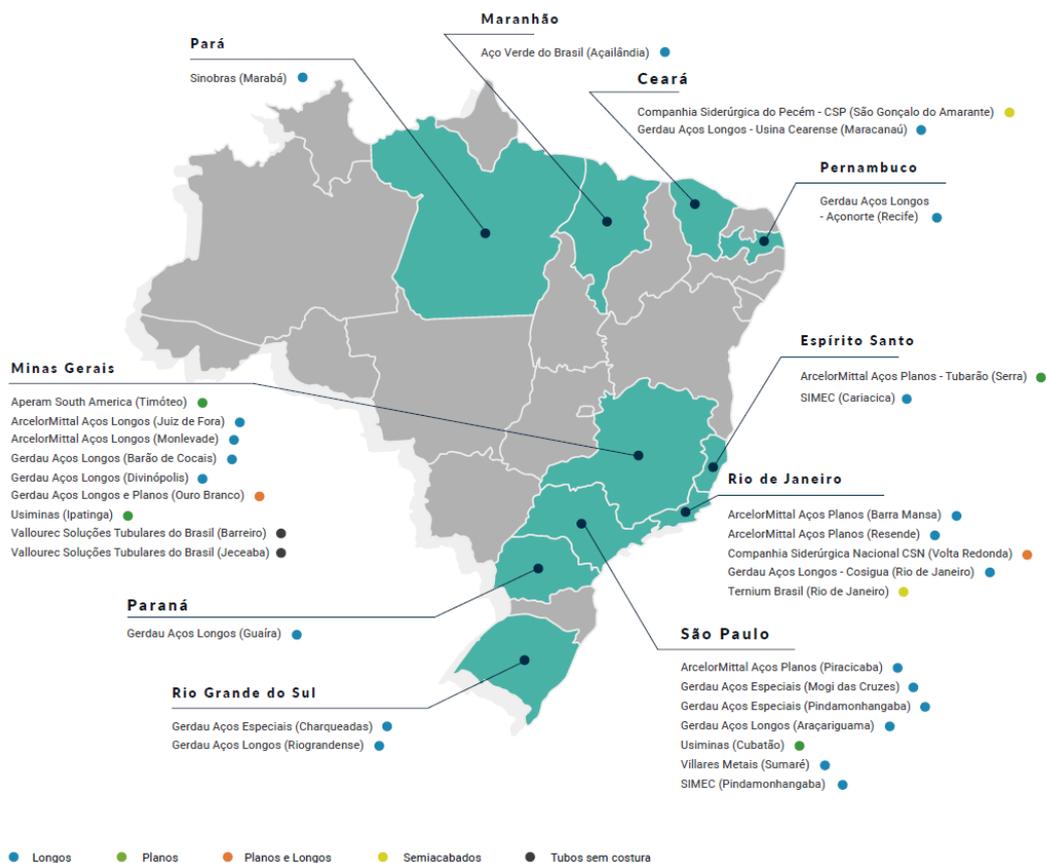


Figura 2.8 - Empresas produtoras de aço no Brasil em 2020 [24].

A indústria siderúrgica é a principal consumidora de materiais refratários. Em 2020, a siderurgia foi responsável por mais de 60% do mercado de materiais refratários, como pode ser visto na Figura 2.9.

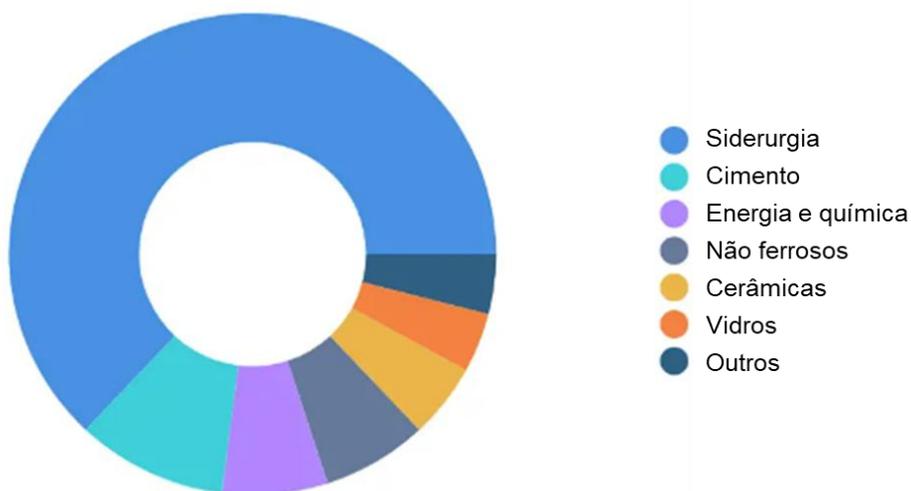


Figura 2.9 - Principais mercados consumidores de refratários [25].

## 2.2 Processo siderúrgico

Para que os processos siderúrgicos ocorram, é necessário um grande aporte energético, muitas vezes com combustíveis caros, poluentes e não renováveis [4]. Duas frentes de pesquisa e trabalho tem ganhado força nesse contexto energético: soluções energéticas mais limpas e baratas, e conservação de energia dentro dos equipamentos. Essa última contribui no sentido de reduzir a necessidade de novas entradas energéticas. A solução indispensável para essa conservação energética são os revestimentos refratários, visto que suportam as elevadas temperaturas e reduzem a transferência de calor do processo para o ambiente, e conseqüentemente, o consumo de energia. Isto é apresentado em estudos que descrevem o comportamento térmico de painéis de aço ou de outros equipamentos siderúrgicos. Por exemplo, pode-se destacar trabalhos que visam melhorar o desempenho dos revestimentos refratários em painéis de aço, a partir da utilização de materiais refratários sem carbono, que contribuem para redução de GEE e do consumo de energia durante o refino do aço [18], [26 – 28].

Os aços são ligas ferro-carbono, onde o ferro é obtido a partir de minérios encontrados na natureza, normalmente na forma de óxidos de ferro, e o carbono é obtido do carvão mineral ou vegetal e podem conter outros elementos de liga. São produzidos majoritariamente por duas rotas, integrada e semi-integrada. Uma pequena parcela também é produzida por redução direta [4] [29].

Na rota integrada, a preparação da carga, é composta geralmente pela coqueria e sinterização. A redução do minério ocorre no alto-forno produzindo o ferro-gusa. No convertedor LD o refino primário do ferro-gusa é realizado para a obtenção do aço. No refino secundário do aço são feitos os ajustes finais de composição química e temperatura para logo em seguida, o aço ser lingotado. Por fim, o aço já sólido é conformado [4] [30].

Já na rota semi-integrada, não existe o processo de redução. O aço é obtido da fusão de sucata. A Figura 2.10 abaixo mostra um esquema das duas principais rotas de processamento do aço [4] [30].

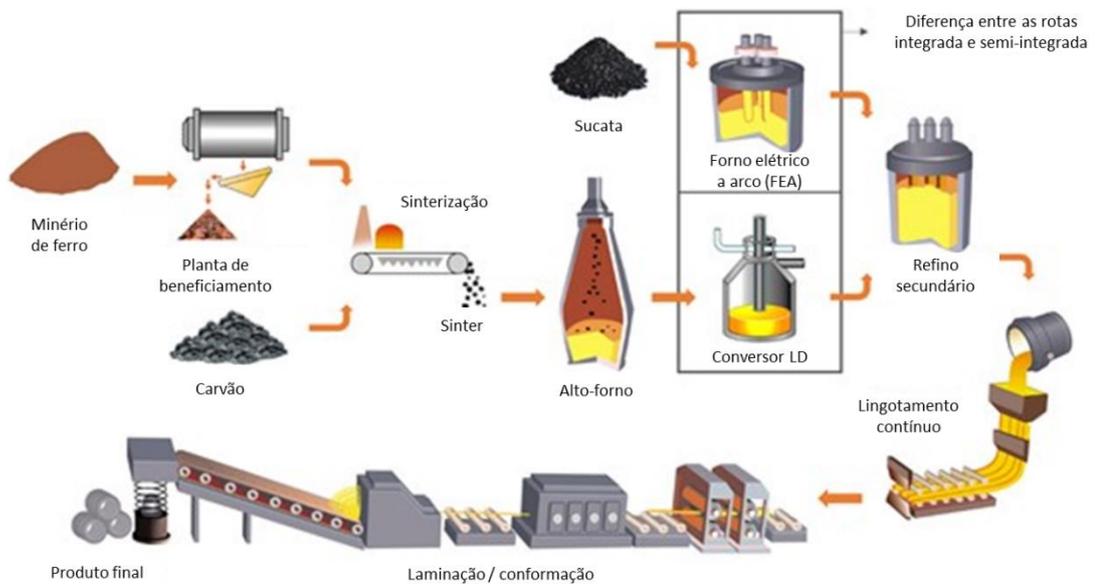


Figura 2.10 - Fluxograma típico da siderurgia [31].

O aço líquido proveniente da aciaria (BOF, FEA ou redução direta) é vazado na panela e direcionado para a estação de refino secundário para remoção de impurezas (oxigênio, nitrogênio, enxofre, hidrogênio, fósforo), ajuste de composição química e de temperatura. Essas impurezas formam compostos (inclusões) e geralmente são prejudiciais às propriedades mecânicas e características do aço [4]:

- Diminuição da plasticidade;
- Diminuição da tenacidade;
- Formação de trincas,
- Geração de defeitos superficiais.

O ajuste da composição proporciona ao aço melhorias nas suas propriedades:

- Melhor usinabilidade;
- Aumento da tenacidade em direções específicas, pelo alinhamento das inclusões;
- Maior dureza.

Estes processos são todos realizados na panela de aciaria. Por isso, garantir que o projeto de revestimento seja planejado e instalado da melhor maneira, evita perdas térmicas, custos adicionais com pré-aquecimento do

banho, maior vida útil do revestimento, proporcionando uma maior produtividade. A configuração dos processos do refino secundário está ligada a exigência do ajuste fino da produção do aço para o lingotamento e posterior conformação.

### 2.3 Painela de aciaria

De todos os equipamentos dentro das usinas é notável a importância das painelas de aço, como mencionado anteriormente. A painela de aciaria é composta por uma carcaça metálica e é revestida na parte interior por materiais refratários específicos para atender as solicitações de cada região (Figura 2.11) [31].

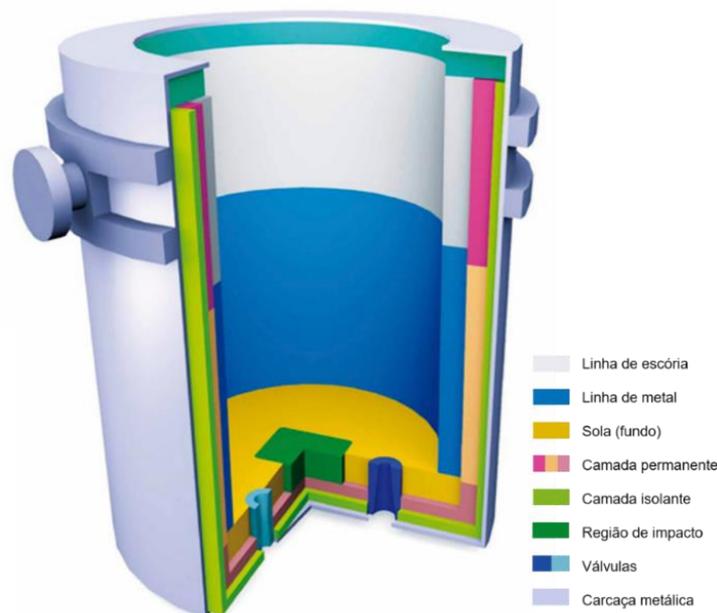


Figura 2.11 – Diferentes regiões com refratários de uma painela de aciaria [31].

O ciclo de uma painela de aciaria é composto por uma sequência de operações. Pode ser dividido em dois momentos, painela vazia, que corresponde aos períodos em que está sem aço, e painela cheia, correspondendo ao tempo de transporte e processamento do aço. O processo é apresentado de forma simplificada na Figura 2.12.

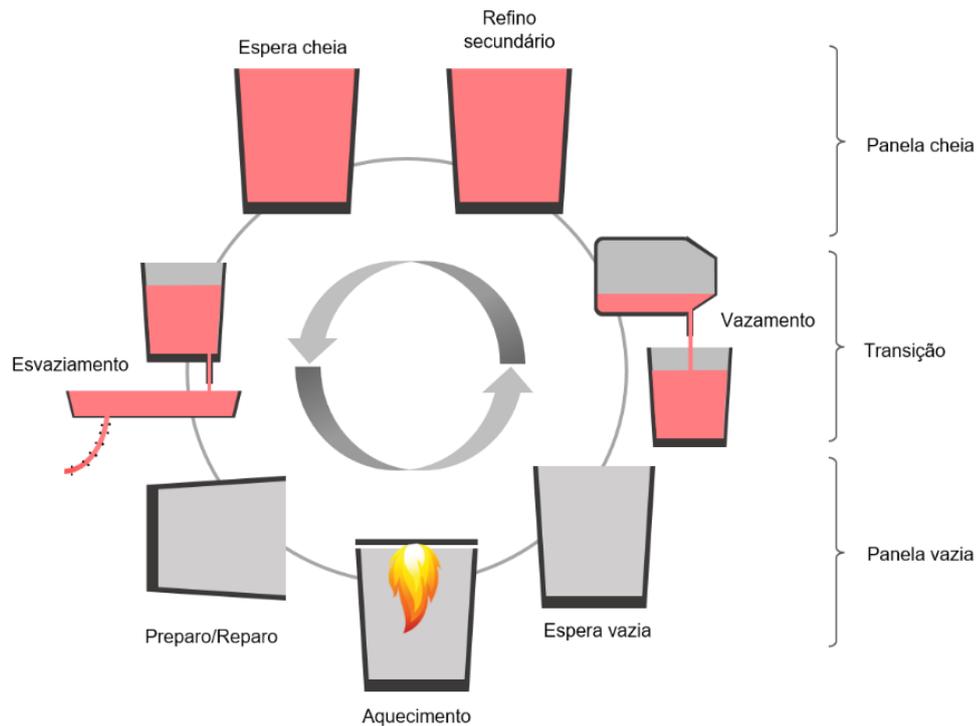


Figura 2.12 - Ciclo da panela de aciaria durante o refino secundário [31].

## 2.4 Pré-aquecimento de panelas de aciaria

O objetivo do pré-aquecimento de panelas de aciaria é elevar a temperatura do sistema controladamente até as temperaturas usuais de processo. Essa etapa é realizada após a instalação do revestimento. A panela é posicionada nas estações de pré-aquecimento, e geralmente por uma chama, a energia térmica é transferida por radiação e convecção para o revestimento, durante um determinado intervalo de tempo [8] [32].

Controlar o perfil térmico de forma efetiva na etapa de pré-aquecimento de panelas de aciaria resulta em um grande impacto no consumo de combustível e na produtividade da planta [32]. Diversos fatores impedem que a programação da curva de pré-aquecimento seja cumprida. Por exemplo, a restrição de tempo e orçamento, escassez de mão de obra para planejar e executar, limitações dos equipamentos. Jenkins et al. destacam, que além das condições de processos, a configuração do revestimento também deve ser considerada para promover um bom planejamento de pré-aquecimento [7].

Arantes et al. utilizaram de modelagem matemática para quantificar o calor armazenado em painéis de aciaria e por meio de balanço energético, calcularam a quantidade de calor necessário para secagem e pré-aquecimento utilizando gás natural (GN) [32]. A curva de pré-aquecimento proposta pelos autores apresentou uma economia de 799 m<sup>3</sup> de GN por ciclo de pré-aquecimento de panela nova. No entanto, para o ajuste fino do controle da chama são necessárias adaptações no processo como, por exemplo, inclusão de medidor de vazão de ar de combustão e gás natural.

Pode-se destacar como parâmetros que afetam diretamente o estado térmico da panela no fim do pré-aquecimento: a eficiência da combustão e a curva de pré-aquecimento programada [8].

#### **2.4.1 Estação de pré-aquecimento**

No caso da panela, o queimador é posicionado no centro de uma tampa revestida por mantas refratárias. Este dispositivo (Figura 2.13) é responsável por fazer com que o combustível e o agente oxidante fiquem em contato o tempo suficiente e à temperatura suficiente para ocorrer e completar a reação de combustão [8]. Tais reações dão origem a uma chama responsável pelo pré-aquecimento.



Figura 2.13 - Queimadores para pré-aquecimento de placas de aciaria.

Drozd-Ry, simulou, utilizando CFD (*Computer Fluid Dynamics*), o pré-aquecimento de placas de aciaria, variando a temperatura do ar secundário de combustão (agente oxidante), em cinco condições (z5, v1, v2, v3, v4) conforme pode ser visto na Figura 2.14 (a), visando otimizar o consumo de combustível durante o pré-aquecimento. Foi analisado o perfil térmico do revestimento no final do pré-aquecimento. A simulação utilizando o ar secundário aquecido a 673 K, resultou em uma temperatura da face quente 20 superior, como visto na Figura 2.14 (b) quando comparado aos outros cenários, promovendo uma economia de 324 MJ/h durante o pré-aquecimento [9].

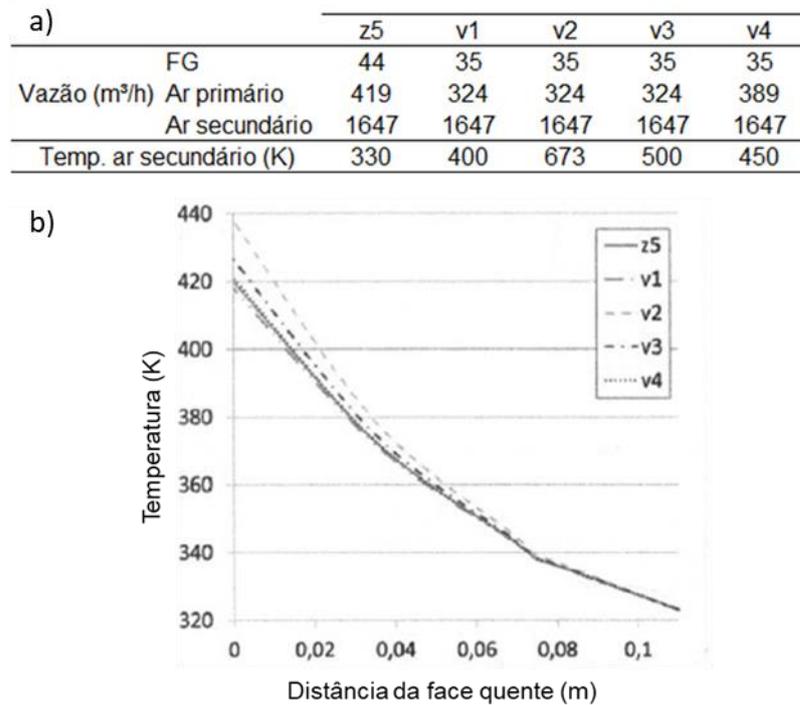


Figura 2.14 – a) Vazão de combustível, vazão de ar de combustão e temperatura do ar secundário utilizados na simulação. b) Perfis de temperatura ao longo no comprimento da parede obtidos pelo modelo [9].

#### - Combustíveis

Combustíveis são substâncias, naturais ou artificiais, que ao se combinar com outras, geram uma reação exotérmica rápida, desprendendo luz e calor. Em geral, os combustíveis são compostos formados por carbono e hidrogênio, denominados hidrocarbonetos, e podem ser acompanhados de outros elementos, como o enxofre, nitrogênio e oxigênio, além de pequenas quantidades de outros elementos como o vanádio e o sódio [32]. Para que uma substância seja considerada um combustível industrial três requisitos devem ser cumpridos:

- O combustível deve existir em abundância;
- O combustível deve possuir baixo custo;
- O combustível deve ser aplicável no processo industrial em consideração.

Todos os combustíveis podem ser subdivididos pelo estado de agregação (em sólidos, líquidos ou gasosos) e pela origem (naturais e artificiais). A Tabela 2.1 apresenta a classificação dos combustíveis [33].

Tabela 2.1 - Classificação dos combustíveis [33].

<i>Classificação</i>	<i>Tipo</i>	<i>Exemplos</i>
Sólidos	Naturais	Lenha
		Madeira
	Artificiais	Serragem
		Cavacos
Líquidos	Naturais	Turfa
		Linhito
	Artificiais	Antracito
		Hulha
Gasosos	Naturais	Carvão Vegetal
		Coque de Carvão
	Artificiais	Coque de Petróleo
		Briquetes
Líquidos	Naturais	Petróleo
		Óleos de Xisto
	Artificiais	Derivados de Petróleo
		Alcatrão
Gasosos	Naturais	Etanol
		Gás Natural
	Artificiais	Metano
		Hidrogênio
Coloidais	Artificiais	Butano e Propano
		GLP
		Gás de Iluminação
		Gás de Coqueria
		Gás de Nafta
		Gás de Gasogênio
Resíduos	Artificiais	Gás de Alto Forno
		Mistura de combustíveis sólidos e líquidos
		Resíduos de fabricação e de extração

Para se atingir a sustentabilidade é indispensável que se criem e apliquem mecanismos pelos quais a expansão dos sistemas e a escolha das fontes de energia independa das atuais estruturas de custos e passem a ser regidas por critérios ligados aos impactos provocados sobre o meio ambiente, pela produção e consumo de energia.

### 2.4.2 Curvas de pré-aquecimento

A determinação da curva de pré-aquecimento depende da infraestrutura disponível na estação de pré-aquecimento, principalmente quanto ao controle das taxas de temperaturas impostas e a máxima ou mínima temperatura possível. Do ponto de vista metalúrgico, espera-se que as painéis sejam aquecidas rapidamente até as máximas temperaturas possíveis para se reduzir as perdas térmicas do aço quando vazado dos convertedores ou fornos a arco elétrico. Contudo, dependendo da vida das painéis, o pré-aquecimento deve ser realizado controladamente devido ao revestimento refratário.

As curvas de pré-aquecimento dos equipamentos revestidos por materiais refratários devem ser planejadas para diminuir o gradiente térmico no sistema e evitar danos originados de solicitações térmicas. Patamares ao longo da curva, podem ajudar a homogeneizar a temperatura do revestimento. As taxas de pré-aquecimento também podem ser distintas ao longo do pré-aquecimento a fim de atender condições específicas de cada projeto refratário. Em cada faixa de temperatura ocorre alguma transformação do material, e a velocidade com que estas se verificam devem ser consideradas ao se planejar a curva de pré-aquecimento.

Segundo Jenkins, para os refratários monolíticos, quanto mais lenta a taxa de pré-aquecimento, mais tempo para remoção da água, diminuindo a pressão interna do revestimento. Porém, tempos muito longos de pré-aquecimento interferem na disponibilidade do equipamento e na produtividade da planta [7].

Arantes utilizou uma curva teórica para simular o processo de pré-aquecimento de painéis (camada de trabalho, segurança, permanente e carcaça) por simulação via MEF, conforme a Figura 2.15. Pode-se observar que a taxa praticada no início do pré-aquecimento é mais lenta, sendo a seguir uma taxa mais alta e por fim, um patamar para homogeneidade da temperatura no material [32].

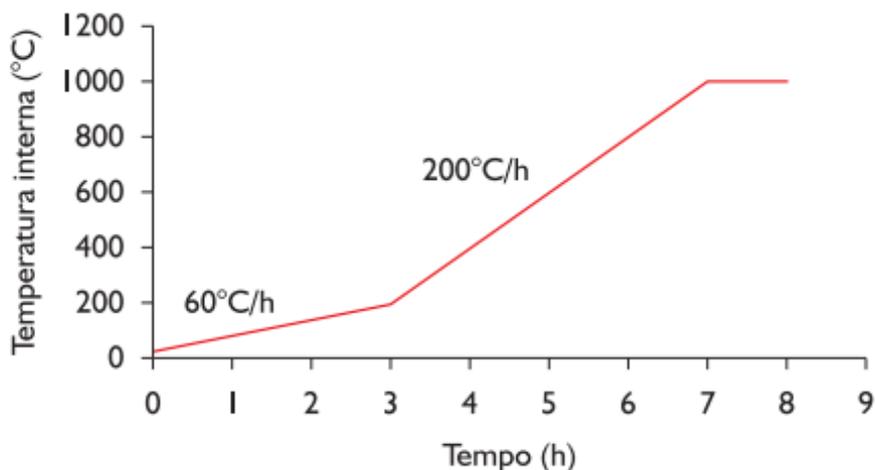


Figura 2.15 - Curva do controlador de temperatura para secagem e pré-aquecimento de painéis novos [32].

## 2.5 Refratários utilizados na placa de aciaria

Os refratários pertencem à classe dos materiais cerâmicos que possuem a capacidade de suportar elevadas temperaturas, sem se fundir ou se decompor. Também podem permanecer não-reativo e inertes quando expostos a ambientes severos, além da capacidade de proporcionar isolamento térmico [29].

São classificados com base na composição, sendo possível ser feita uma distinção segundo a classificação ISO (*International Standards Organization Committee*), entre refratários básicos, não básicos, com carbono, sílica, argilas refratárias e materiais especiais, conforme Figura 2.16 [34].

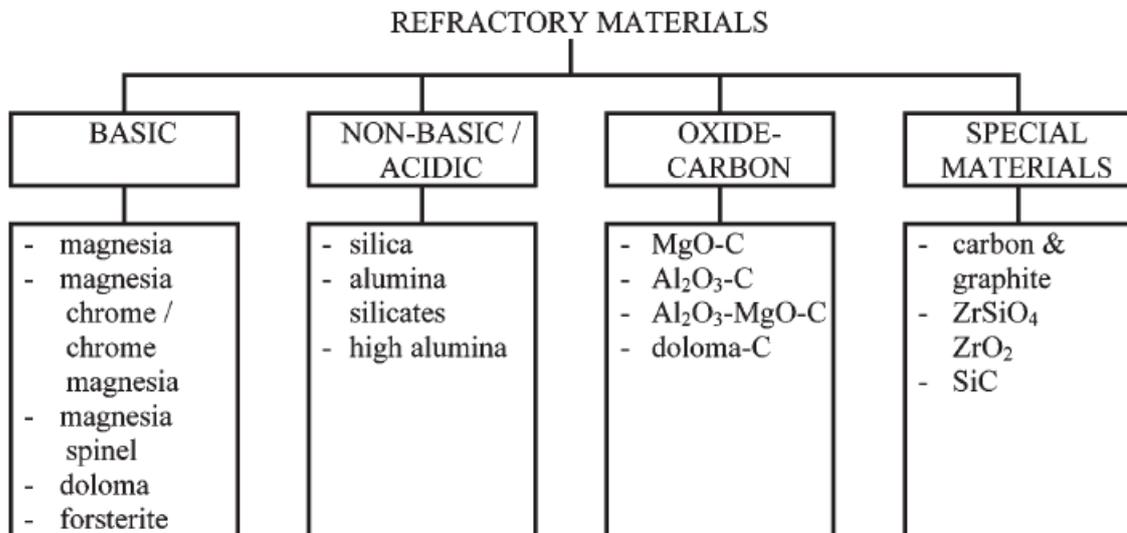


Figura 2.16 - Classificação dos refratários segundo a classificação ISO [34].

Quanto ao processo de fabricação, os materiais refratários são classificados de duas formas: refratários conformados e monolíticos [15].

Existem dois principais grupos de revestimentos utilizados atualmente em panelas de aciaria: os dolomíticos e os magnesianos. Os dolomíticos são usados majoritariamente em aciarias elétricas, já os magnesianos são aplicados em aciarias de usinas integradas. Estes materiais possuem teor de carbono em sua composição, o qual é responsável por elevar a condutividade térmica da matriz e por reduzir a molhabilidade do refratário pela escória, reduzindo o grau de infiltração e de corrosão do revestimento [35].

Para a panela de aciaria, o projeto refratário deve considerar os fatores térmicos, químicos e mecânicos na escolha dos materiais a serem utilizados e cada região do equipamento.

Na camada de trabalho o refratário está em contato direto com o metal líquido, portanto está mais propenso ao desgaste e corrosão. Isso pode reduzir o tempo de operação do equipamento, sendo necessária interrupções para a realização de reparos ou a troca da região degradada. Além disso, pode alterar a composição final do aço, trazendo consequências negativas ao processo e ao produto final [6].

A camada de segurança (ou camada permanente) fica localizada entre a camada de trabalho e a carcaça. Sua principal função é isolar as partes metálicas das altas temperaturas no interior da panela, além de proteger a carcaça de possíveis infiltrações de metal líquido ou escória, nos casos de falha da camada de trabalho.

Entre a carcaça e a camada de segurança são geralmente colocados materiais isolantes, produtos de baixa condutividade térmica e densidade (alta porosidade). Esta última funciona como uma barreira térmica evitando a propagação da onda de calor para as regiões externas a ela (carcaça metálica). Isso reduz as perdas térmicas (das panelas cheias e vazias) e melhora o controle da temperatura do aço, além de aumentar a segurança das aciarias.

### **2.5.1 Tijolos refratários**

Os materiais conformados, Figura 2.17, usualmente os tijolos convencionais, são utilizados nas panelas de aço das aciarias [28]. Isso deve-se principalmente as características obtidas pelo processo de compactação de pós (prensagem) onde o material refratário adquire densidades elevadas e baixa porosidade. Conseqüentemente, esses materiais apresentam maior vida útil comparado aos refratários monolíticos, além de um processo de secagem facilitado.



Figura 2.17 - Materiais refratários conformados [34].

A maior durabilidade desse material leva a um menor consumo específico de refratários durante o refino secundário, sendo uma tendência das últimas décadas. Porém, esses materiais apresentam dificuldade de aplicação, demandando um elevado tempo e uma mão-de-obra qualificada e específica para sua instalação, reduzindo a produtividade da planta.

### 2.5.2 Refratários sem carbono

Os refratários sem carbono foram inicialmente desenvolvidos para reduzir o *pick-up* de carbono durante a produção de aços com ultrabaixo teor deste elemento. Eles também contribuem para uma maior sustentabilidade do setor, tanto por uma questão ambiental, quanto econômica.

É grande o interesse da indústria moderna tornar-se mais eficiente energeticamente, ou seja, reduzir o desperdício de energia decorrente de qualquer processo de produção.

Devido às altas temperaturas e altas massas de material aquecido durante o processo siderúrgico, também são altas as quantidades de calor

cedidas para o ambiente. Estas geralmente são repostas pela queima de combustíveis de origem fóssil poluente e não renováveis. Os refratários *Carbonfree* apresentam menor condutividade térmica em altas temperaturas, ou seja, permitem reduzir as perdas para o ambiente externo.

Santos et al., desenvolveram um modelo numérico em elementos finitos para simular o ciclo de uma panela de aço [27]. Esse modelo foi aplicado para estimar o potencial de conservação de energia dos revestimentos *Carbonfree* em um caso real (linha de metal e sola) e os resultados mostram um potencial de redução de 21%.

### 2.5.3 Refratários monolíticos

Uma das principais motivações para utilização de revestimento monolítico, Figura 2.18, é a redução de mão de obra necessária para a aplicação dos materiais não moldados. A possibilidade de reparar o revestimento desgastado leva a menores consumos de material. Além disso, os materiais monolíticos permitem um menor tempo de instalação e apresentam menores índices de sobra após a aplicação, o que leva a reduções de estoque e maior facilidade de operação da cadeia de suprimentos, tanto para o cliente quanto para o fornecedor [28].



Figura 2.18 - Refratários monolíticos [34].

Por outro lado, esses materiais são menos densos e mais porosos que os refratários conformados, além de necessitarem de uma curva de pré-aquecimento bastante controlada. Para contornar o problema da vida útil, tecnologias refratárias voltadas para o desenvolvimento de concretos refratários avançados têm resultado em propriedades a níveis similares aos tijolos conformados. Contudo, a necessidade de pré-aquecimentos controlados permanece.

Devido a maior densidade obtida para esses materiais, e conseqüentemente menor permeabilidade, o pré-aquecimento exige ainda mais atenção. A aplicação de taxas de pré-aquecimento inadequadas pode levar a pressurização do vapor de água no interior da estrutura e ocasionar explosão do refratário, ou ainda elevar consideravelmente os gastos com energia e tempo de parada para manutenção de equipamentos.

A adição de água às formulações de concretos refratários, é necessária por duas razões principais: 1) melhor homogeneização das diferentes matérias-primas, permitindo que possam ser transportadas e moldadas mais facilmente e 2) por meio de reações químicas com os ligantes, como os cimentos de aluminato de cálcio e aluminas hidratáveis, a água atua como componente hidráulico, que garante as propriedades mecânicas mínimas ao material.

#### **5.4.2.1 Remoção da água livre de concretos refratários**

A remoção da água presente em concretos refratários, ou seja, a mudança do estado da água de um estado líquido para um gás na forma de vapor d'água, deve ser realizada a uma taxa controlada, com um tempo e custo aceitáveis, e de forma a não danificar o material [36].

Em concretos refratários, a retirada da água ocorre principalmente através da porosidade aberta presente na microestrutura e das interfaces permeáveis entre matriz e agregados, geradas por falhas de empacotamento devido às diferenças de tamanho de partícula [37].

No início da secagem, observa-se um filme contínuo de água que recobre a superfície do meio poroso. Sua presença revela que a fração volumétrica de

água presente no material foi suficiente para recobrir toda a área superficial das partículas presentes.

A evaporação, primeiro estágio da secagem (25 – 110 °C), envolve a retirada da água presente nas camadas mais próximas à superfície do material. Como não há grandes obstáculos à remoção de água, sua velocidade é limitada pelas forças motrizes do processo (pressão parcial de vapor na atmosfera, temperatura e pressão ambiente).

Ao fim do primeiro estágio de secagem, com a superfície já seca, a difusão térmica continua no material e encontra camadas mais internas ainda úmidas.

Durante a vaporização da água (110 – 300 °C), a temperatura e a taxa de pré-aquecimento na superfície de secagem são significativamente menores que a do ambiente. Isso ocorre devido à maior capacidade calorífica da água que absorve maiores quantidades de calor, tornando menos eficiente o pré-aquecimento do meio sólido [37].

Devido ao maior gradiente térmico existente entre a água e a temperatura do concreto, a taxa de pré-aquecimento da superfície e a velocidade de secagem aumenta. Como há menor quantidade de água presente entre as partículas sólidas da superfície, mais calor pode ser absorvido por elas. De acordo com Salomão, tem-se então uma taxa de pré-aquecimento na amostra maior que a utilizada no ambiente de secagem, conforme pode ser visto na Figura 2.19 [37].

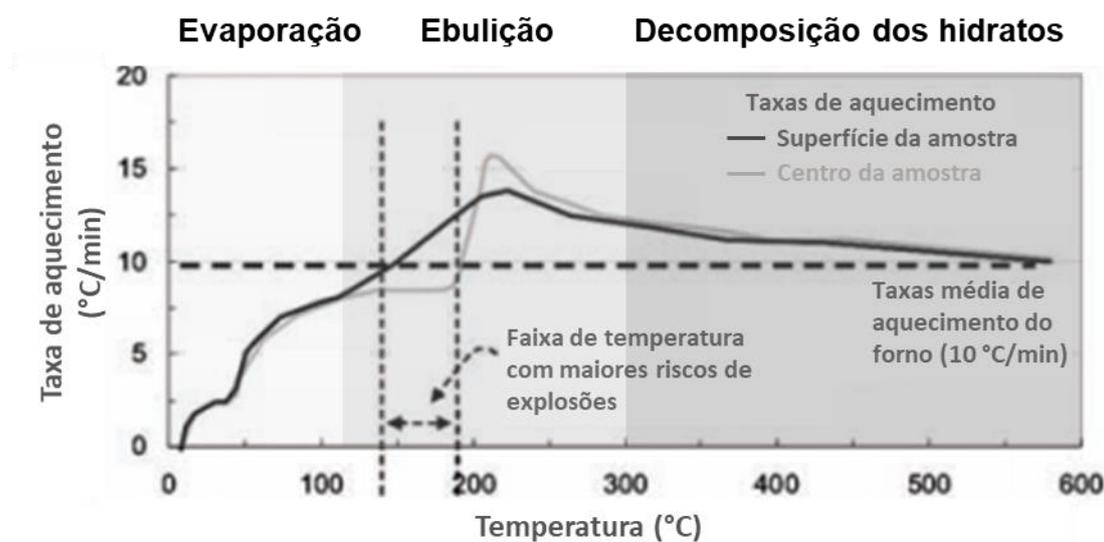


Figura 2.19 - Taxa de pré-aquecimento de um concreto refratário aquecido e um forno com uma rampa de 10°C por minuto [37].

Sendo assim, a força motriz para o fluxo de massa para a superfície passa a ser a pressurização do vapor e inicia-se o segundo estágio de secagem: a ebulição.

Comparando-se as velocidades de secagem envolvidas nos dois primeiros estágios, a da ebulição é significativamente maior pois não depende apenas das condições do ambiente, mas também da pressão de vapor da água a uma certa temperatura e da taxa de pré-aquecimento utilizada. Esses 2 últimos fatores são os principais responsáveis pelos elevados riscos de explosão durante a secagem dos concretos.

Uma vez superado os estágios de evaporação e ebulição, a secagem entra em sua fase final correspondente à decomposição de fases hidratadas dos ligantes hidráulicos utilizados (temperatura acima de 300 °C). Essa fase pode ser crítica, dependendo da quantidade de CAC, causando explosão do refratário. Adicionalmente, a decomposição do HA diminui a permeabilidade do material e gera  $AH_3$ .

Para todos esses mecanismos ocorrerem, é fornecido uma determinada quantidade de energia. Esta energia térmica é chamada calor latente de vaporização, ou seja, a quantidade de energia térmica necessária para promover a mudança de fase, sem qualquer mudança na temperatura. A combinação da energia envolvida em todos os mecanismos que ocorrem simultaneamente no concreto está relacionada a taxa de geração de energia por volume de material.

## **2.6 Propriedade dos materiais refratários**

### **2.6.1 Condutividade térmica**

A condutividade térmica dos refratários, é resultado da capacidade destes materiais de conduzir energia térmica por meio dos mecanismos de transferência de calor, os quais, agem à nível microestrutural. A condutividade térmica efetiva ( $K_{ef}$ ), pode ser idealizada como a soma das contribuições dos três mecanismos de transferência de calor:

$$k_{ef} = k_{cond} + k_{conv} + k_{rad} \quad (2.1)$$

( $k_{cond}$ ) devido ao processo de condução na fração sólida, ( $k_{conv}$ ) ao de convecção e ( $k_{rad}$ ) de radiação nos defeitos e interfaces [38].

### 2.6.2 Calor específico

O calor específico é definido como a energia necessária para aumentar a temperatura em um grau de uma unidade de massa de dada substância [39]. Em um sólido, a temperatura é uma medida do grau de agitação dos átomos na rede cristalina em relação as suas posições de equilíbrio. Maiores temperaturas necessitam de mais energia para aumentar a vibração da rede. Quanto maior o calor específico, maior é a quantidade de energia necessária para que o aumento das vibrações represente a adição de um grau na temperatura.

### 2.6.3 Densidade

A densidade é geralmente considerada em conjunto com a porosidade, e representa uma medida da massa de um determinado volume do refratário. Um aumento na densidade aumenta a estabilidade volumétrica, a capacidade térmica, bem como a resistência à abrasão e à penetração de escória. Porém, a secagem de um material mais denso é mais difícil, pois a pressão de vapor interna no material tende a ser maior e pode levar a explosão [40].

Materiais que apresentam porosidade elevada (70 – 99%), apresentam menores condutividade térmica e resistência mecânica que os refratários mais densos.

#### 2.6.4 Taxa de geração de energia por unidade de volume

A taxa de geração de energia por unidade de volume ( $\dot{s}$ ) está associada a conversão de energia mecânica, elétrica, nuclear ou química em calor (ou energia térmica). Essa conversão é um fenômeno volumétrico, ou seja, ocorre por todo o corpo ou meio [41].

A determinação da taxa de geração de energia por unidade de volume ( $\dot{s}$ ) está relacionado às quantidades de energia envolvidas nas reações que ocorrem durante seu processamento e principalmente durante o pré-aquecimento. A identificação dessas possíveis reações é dificultada devido à complexidade do sistema e ao fato que em uma determinada temperatura diversas reações podem estar ocorrendo simultaneamente. A Figura 2.20 apresenta essas reações para o 5CAC [42]. Da hidratação do cimento até a sinterização do concreto, são observadas aproximadamente 16 reações. Tais reações envolvem conversões de energia e influenciam na transferência de calor nesses materiais durante o pré-aquecimento. As quantidades de energia envolvidas em cada reação individualmente não são facilmente identificadas devido à complexidade desses sistemas (hidratação e transformação de compostos de aluminato de cálcio), e geralmente essas energias são desconsideradas dos modelos térmicos e estudos envolvendo esses materiais [42].

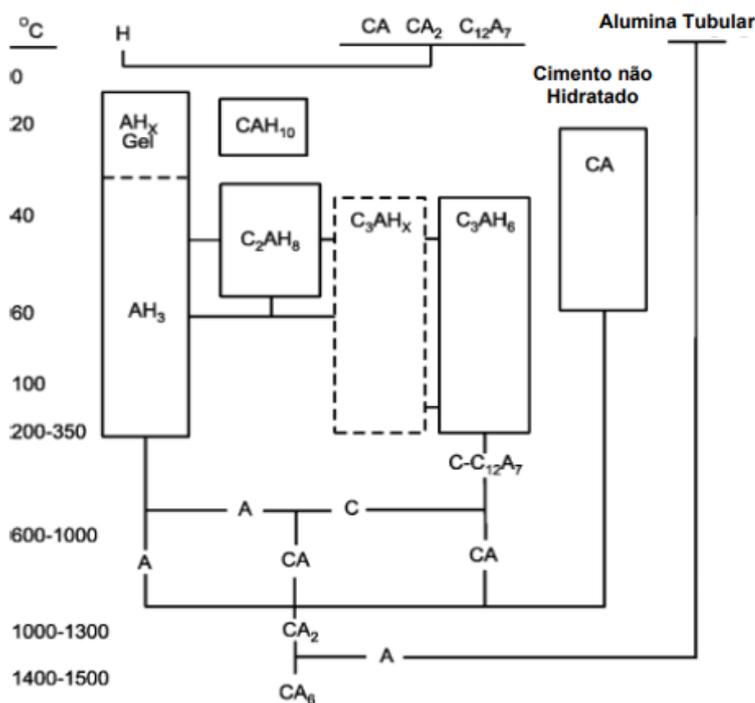


Figura 2.20 - Transformações que podem ocorrer durante o pré-aquecimento de concretos refratários de alumina contendo CAC [42].

#### 2.6.4.1 Análise térmica dos materiais refratários

Os métodos de análises térmicas (DTA - Análise Térmica Diferencial e DSC - Calorímetro Diferencial de Varredura) são utilizados para mensurar propriedades físicas e química de uma amostra, em função da temperatura e/ou tempo, enquanto são aquecidas, resfriadas ou mantidas à temperatura constante [43].

Em ambos, o primeiro sinal detectado durante uma medição é a diferença de temperatura entre uma amostra e a referência. Para o DSC, esta diferença de temperatura pode ser convertida em um fluxo de calor, em mW, a partir de uma calibração apropriada.

O DSC foi desenvolvido com o intuito de evitar as dificuldades encontradas no DTA ou compensá-las, gerando uma técnica capaz de quantificar a energia envolvida nas reações [44].

Para a análise as amostras possuem massas pequenas, visto que é necessário:

- Garantir homogeneidade da composição;
- Garantir que a diferença de temperatura entre a amostra de referência e a amostra do ensaio seja computada;
- Garantir que as reações que consomem ou liberam pouca energia sejam identificadas;
- Desprezar o empuxo da balança.

Segundo Barakat, para os refratários, as informações sobre energia envolvidas da transformação desses materiais não são tão representativas com as técnicas de medição convencionais e, portanto, representam um sério desafio para otimizar as curvas de pré-aquecimento para as programações de pré-aquecimento [45].

Os trabalhos que investigam o pré-aquecimento dos materiais refratários atentam-se às reações que acompanham liberação de massa na forma de vapor, visto que esta é uma das principais causas de falhas geradas durante o pré-aquecimento [7], [45].

A complexidade de reações envolvidas dificulta identificar de forma individual a energia associada a cada um dos eventos utilizando técnicas como a análise calorimétrica diferencial (DSC). Além disso, tais análises exigem amostras muito pequenas que dificulta muitas vezes a obtenção de boa representatividade para o caso dos refratários [45]. Na literatura há trabalhos que avaliaram as energias envolvidas na transformação de algumas das fases encontrada em concretos refratários. Litwinek apresenta o TG e DSC (Figura 2.21) de um cimento refratário comercial e das fases CA e C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>, encontradas nos concretos refratários [46].

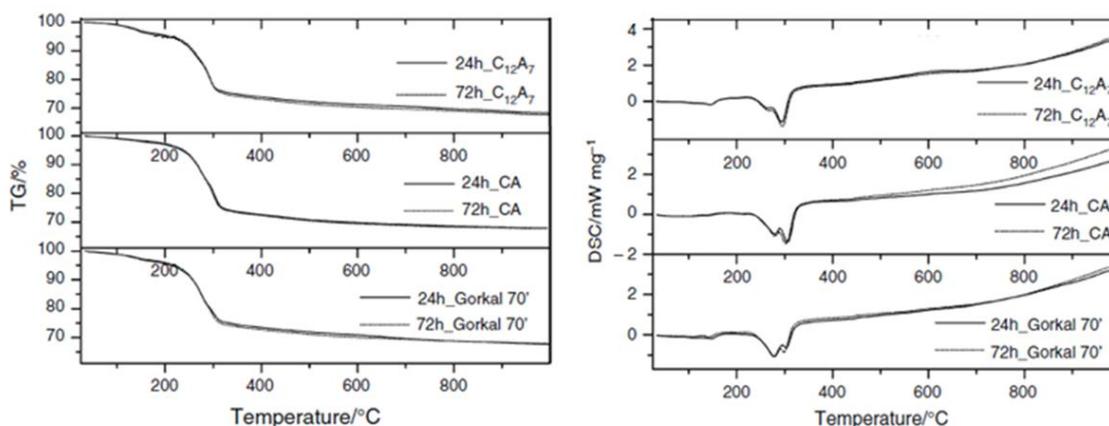


Figura 2.21 - TG e DSC das fases encontradas no concreto 5CAC [46].

O dispersante usualmente utilizado em concretos refratários é baseado no polímero polietilenoglicol. Baugh fez análise térmica desse polímero, conforme podemos ver na Figura 2.22 [47]. Podemos observar na curva de DTA existem basicamente 3 picos, 1 endotérmico, provavelmente relacionados a eliminação de umidade desse material e outros 2 picos exotérmicos, relacionados a pirólise e combustão do carbono.

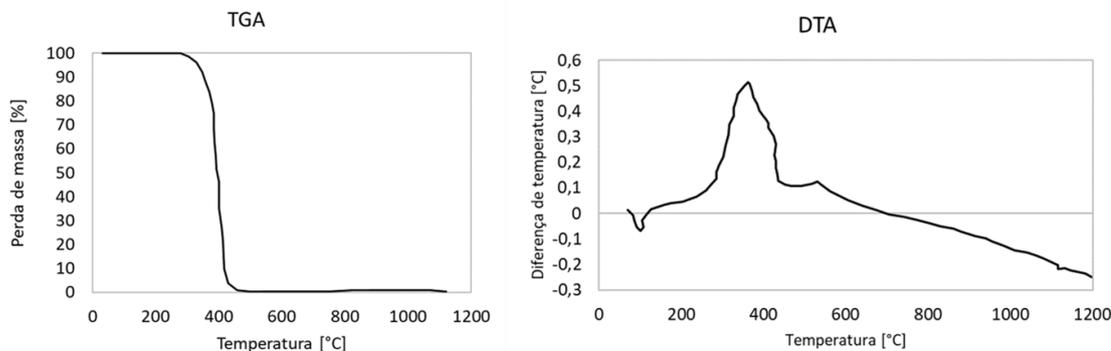


Figura 2.22 - TG e DTA do polímero polietilenoglicol [47].

## 2.7 Mecanismos de transferência de calor

A transferência de calor pode ser definida como o trânsito da energia térmica devido a um gradiente de temperatura [48]. Os mecanismos de transferência de calor são condução, convecção e radiação. A Figura 2.23 apresenta cada um desses mecanismos de forma simplificada.

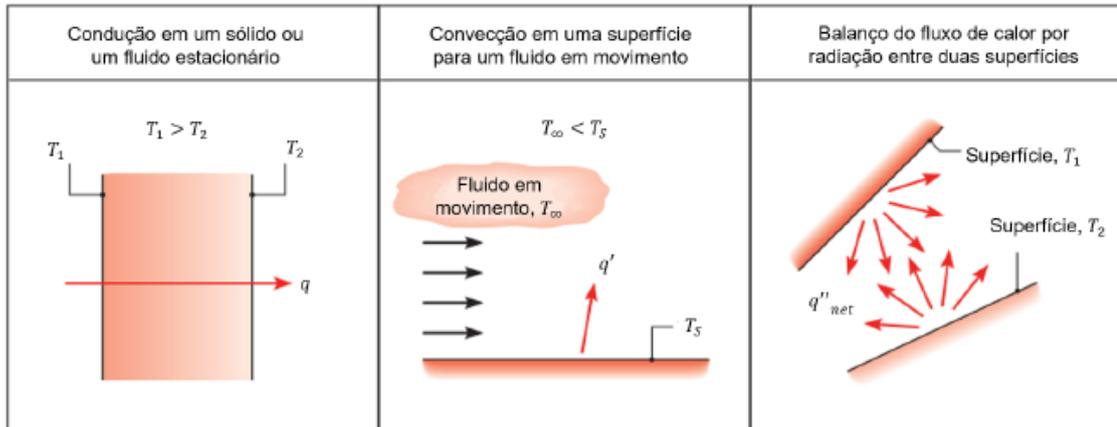


Figura 2.23 - Mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação, respectivamente) [48].

### 2.7.1 Balanço energético em um volume infinitesimal

A Figura 2.24 apresenta um volume de controle infinitesimal, em coordenadas. Considera-se que esse volume não se altera devido às variações de temperatura

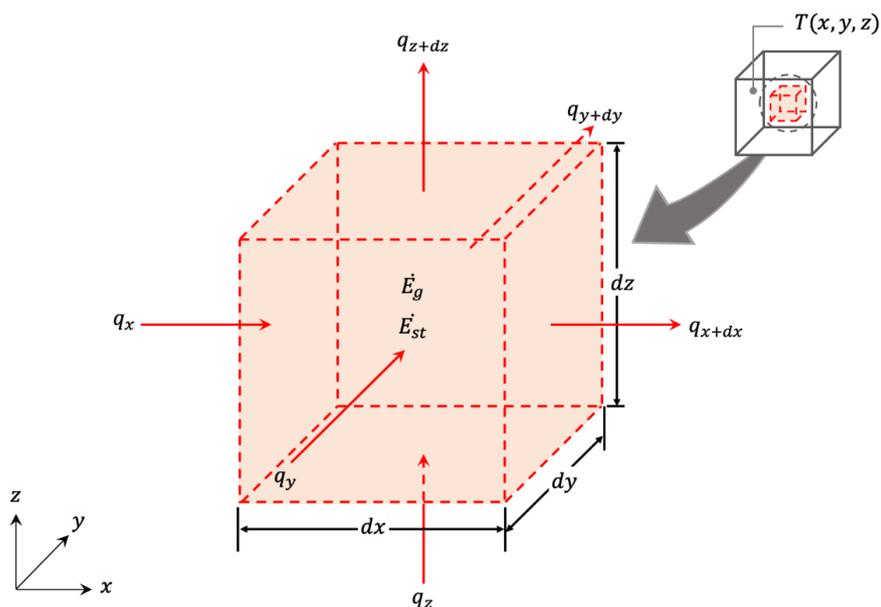


Figura 2.24 - Esquema para um volume infinitesimal das componentes envolvidas no balanço térmico para um material sólido [48].

Observa-se que a contribuição de cada uma das quantidades de calor nesse volume, que, desconsiderando a realização de trabalho, satisfaz a primeira lei da termodinâmica. Nesse sentido, tem-se:

$$\dot{E}_{int} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st} \quad (2.2)$$

Os primeiros dois termos correspondem a energia que entra e sai do sistema, respectivamente. O último termo do lado esquerdo da igualdade corresponde a parcela de energia gerada / consumida, associada a transferência de energia química, oriunda das reações, em energia térmica. O valor positivo de  $\dot{E}_g$  representa reações químicas exotérmicas, enquanto, valores negativos representam reações endotérmicas. Por fim, o lado direito da equação traz a parcela referente a quantidade de energia estocada.

### 2.7.2 Condução

O mecanismo de transferência de calor por condução está associado aos conceitos de vibração atômica e molecular, i.e., as entidades microscópicas responsáveis por tal mecanismo. Com o aumento da temperatura em um determinado sistema, aumenta-se também a energia vibracional dos átomos e moléculas. A taxa de transferência de calor é quantificada em termos de equações que computam a quantidade de energia transferida em uma determinada área por unidade de tempo [48].

A equação abaixo descreve o processo de transferência de calor em meios sólidos posicionados em um sistema de coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{s} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

onde  $\dot{s}$  é a taxa de geração de energia por unidade de volume [ $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-3}$ ], que considera as quantidades de energia gerada ou consumida durante as reações possíveis, i.e. a transformação de energia das reações químicas em energia térmica (e vice-versa). Os três primeiros termos do lado esquerdo referem-se ao

processo de condução. Adicionalmente, deve-se considerar a parcela associada a energia estocada, que se refere à taxa de variação da energia térmica no material, dada pelas suas propriedades  $\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ], e  $c_p$  [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]. A taxa de geração de energia por unidade de volume ( $\dot{s}$ ) é responsável pela conversão de diferentes fontes de energia (elétrica, química, mecânica, entre outras) em energia térmica, como é o caso da cura, calcinação e queima dos materiais refratários [41].

### 2.7.3 Convecção

A convecção ocorre pela transferência de energia entre uma superfície sólida, a uma dada temperatura, e um escoamento adjacente em uma temperatura distinta [39]. O fluxo de calor por convecção pode ser descrito pela lei de resfriamento de Newton:

$$q_{conv} = h (T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

sendo que  $q_{conv}$  o fluxo de calor convectivo [ $\text{W/m}^2$ ], o qual é proporcional a diferença de temperatura entre a superfície e o escoamento,  $T_s$  e  $T_\infty$ [K], respectivamente. O parâmetro  $h$  é denominado coeficiente de transferência de calor por convecção, o qual depende da camada limite, da geometria da superfície, do escoamento e de suas propriedades [31].

A convecção pode ser natural ou forçada. A convecção natural ocorre se o movimento do fluido é causado por forças de empuxo oriundo da diferença de densidade, a qual é decorrente da variação da temperatura no fluido [39]. Já a convecção forçada, ocorre se o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por meios externos, como, por exemplo vento, ventilador, bombas, etc. [39].

### 2.7.4 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria sob forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas [39]. Esse mecanismo de transferência de calor não exige a presença de um meio material como nos casos de condução e convecção. A radiação é um fenômeno volumétrico que todos os sólidos, líquidos e gases, emitem, absorvem ou transmitem radiação em diferentes graus.

Quando uma superfície de emissividade  $\varepsilon$  a uma temperatura  $T_s$  está em um ambiente com temperatura  $T_{amb}$ , o fluxo de calor por radiação é dado por:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{amb}^4), \quad (2.5)$$

sendo:

$\varepsilon$ : emissividade;

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman;

$T_s$ : Temperatura da superfície;

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente

Durante o pré-aquecimento, o revestimento é aquecido majoritariamente pelo calor proveniente da chama, em taxas definidas pelos mecanismos de transferência de calor por radiação. Nas temperaturas usuais de pré-aquecimento, a contribuição da convecção é muito baixa, abaixo de 5% do calor transferido. O calor transferido pelo mecanismo de radiação é predominante, porém a panela também é resfriada pelo ar e outros gases presentes em seu interior [31].

## 2.8 Simulação térmica via método dos elementos finitos

A simulação computacional auxilia na proposição de soluções de problemas térmicos dos processos siderúrgicos, e com isso, permite avaliar cenários (configurações dos revestimentos, rotas, tempo de processo, entre

outros) que representam as melhores condições frente a evitar a queda de temperatura do aço e, conseqüentemente, o consumo de energia.

O método dos elementos finitos (MEF), consiste de uma abordagem numérica que resolve as equações diferenciais a partir da discretização do problema [3]. O MEF pode ser usado para prever comportamentos em sistemas estruturais, mecânicos, térmicos, elétricos e químicos, tanto para análise de projeto quanto para desempenho [31]. As principais etapas na resolução de problemas via método dos elementos finitos de um problema típico são [31]:

1. Discretização do domínio do problema em um conjunto de elementos finitos;
2. Construção das hipóteses para a resolução do problema físico em cada elemento;
3. Montagem do problema em um sistema global de coordenadas;
4. Imposição das condições de contorno (Dirichlet, Neumann ou Robin);
5. Resolução das equações;
6. Extração dos resultados;
7. Interpretação dos resultados.

A Figura 2.25 resume o processo de análise em MEF de uma análise de transferência de calor em um meio sólido. Para isso, há a necessidade de expressar o problema físico via equações diferenciais, condições de contorno e condições iniciais. A solução aproximada do campo de interesse, nesse caso, temperatura, dá-se pela discretização do domínio. Deve-se verificar a convergência a partir do refinamento sucessivo de malhas de elementos finitos, verificando a partir de qual discretização não se tem variação significativa da resposta.

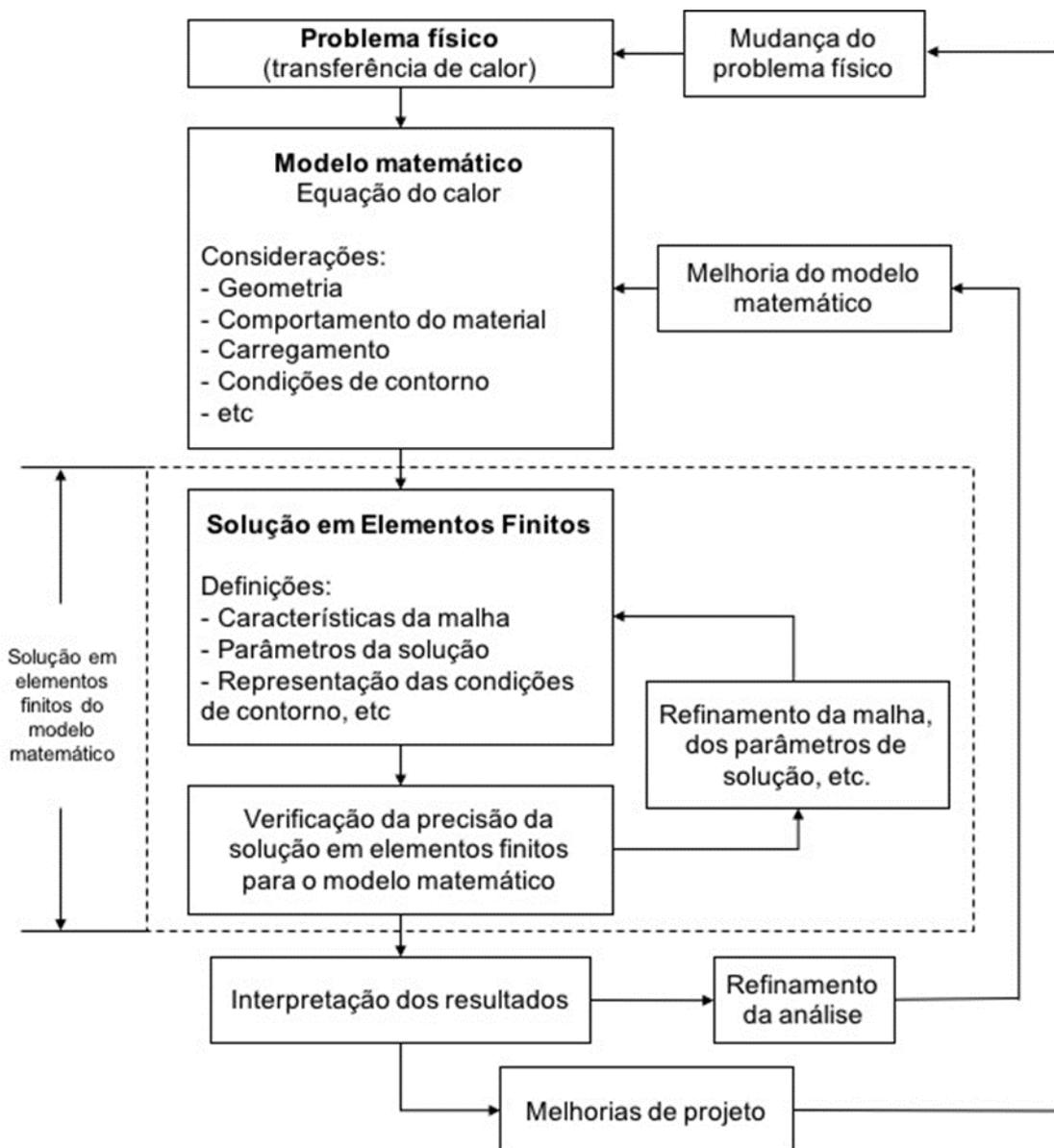


Figura 2.25 - Diagrama de resolução de problemas de transferência de calor pelo método dos elementos finitos [31].

A complexidade do pré-aquecimento das painéis de aciaria é evidenciada na modelagem do problema, que faz com que a representação dessa etapa seja simplificada. Contudo, o MEF é hoje uma das formas mais acessíveis e aplicadas na análise de problemas térmicos durante essa etapa, permitindo a investigação de cenários a um baixo custo operacional.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais refratários analisados

##### 3.1.1 Concreto aluminoso de pega hidráulica (5CAC)

Para o desenvolvimento desse trabalho, em todas as etapas experimentais será utilizado um concreto refratário aluminoso com 5% de cimento de aluminato de cálcio – Secar 71 (5CAC). A composição de cada fração em massa utilizada (Tabela 3.1) foi escolhida visando um bom empacotamento e fluidez, utilizando o modelo de Andreasen, com o módulo de distribuição igual 0,21 para obter uma melhor resistência mecânica a frio [49].

Tabela 3.1 - Formulação do concreto refratário.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Fração em massa</b>
Alumina tabular 6-3mm (Almatis)	18,00%
Alumina tabular 3-1mm (Almatis)	10,00%
Alumina tabular 1-0,5mm (Almatis)	11,00%
Alumina tabular 0,6-0,2mm (Almatis)	9,00%
Alumina tabular 0,2-0mm (Almatis)	16,00%
Alumina tabular < 45# (Almatis)	10,00%
CL 370 (Almatis)	11,00%
CT 3000SG (Almatis)	10,00%
CAC (Imerys)	5,00%
Dispersante FS60 (BASF)	0,20%
Água	4,50%

##### 3.1.2 Materiais utilizados em painéis de aciaria

Para a simulação da placa de aciaria foi considerado materiais da literatura [10] aplicados em cada região do vaso, os quais apresentam as características necessárias de cada solicitação. As propriedades foram obtidas da literatura. A Figura 3.1, ilustra a placa considerada nas simulações.

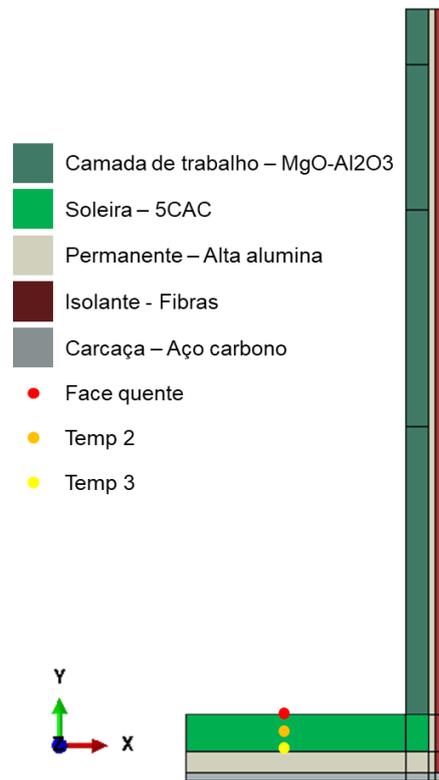


Figura 3.1 - Representação da parede de aciaria destacando os materiais utilizados e posição dos termopares para análise térmica.

A camada de trabalho está em contato direto com o aço líquido e a escória durante o refino secundário. Na parede (linha de metal e escória) foram considerados tijolos refratários sem carbono.

No fundo, foram realizadas investigações quanto ao material. Foram considerados o mesmo tijolo da literatura utilizado na parede, também um concreto 5CAC queimado, ou seja, sem possuir transformações e o 5CAC verde, considerando a energia para transformar esse material.

A camada permanente e o isolante foram os mesmos para todos os cenários. A camada permanente está localizada entre a camada de trabalho e a carcaça. Sua função é proteger a carcaça das temperaturas elevadas do processo e de infiltração de metal líquido ou escória, nos casos em que há falhas na camada de trabalho. Já o isolante tem a composição e a microestrutura projetados para ter baixa condutividade térmica nas diversas faixas de temperatura, reduzindo a quantidade de calor perdida para o meio ambiente pela carcaça.

## 3.2 Determinação experimental das propriedades térmicas do concreto 5CAC

### 3.2.1 Preparação das amostras

Os concretos refratários foram processados em um reômetro tipo planetário (Figura 3.2 (a) e (b)), o qual é conectado a um computador que, via software, exibe o comportamento reológico do material em função do torque. O aumento na magnitude do torque implica na maior dificuldade de mistura.

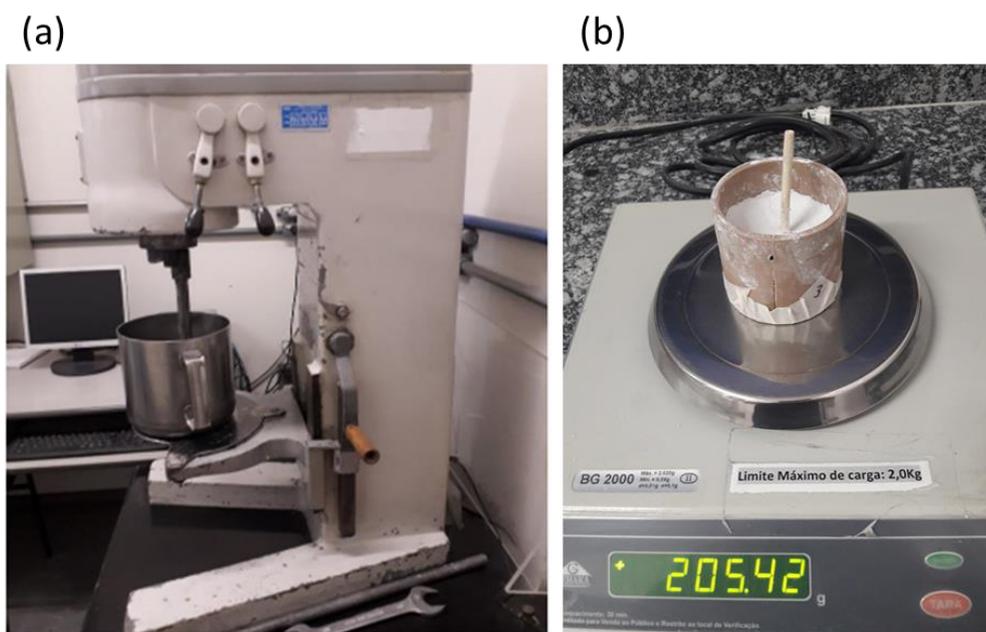


Figura 3.2 – (a) Reômetro planetário utilizado na preparação do concreto aluminoso (5CAC). (b) Molde e corpo de prova antes da cura.

A etapa de processamento compreende três estágios: mistura a seco, ponto de virada e homogeneização final [50]. Em seguida são moldados os corpos-de-prova cilíndricos (4,0 x 5,25 mm) e curados em estufa a 30 °C por um período de 24 horas.

### 3.2.2 Termogravimetria e densidade

A perda de massa e a densidade do concreto foram obtidas pelo ensaio de termogravimetria. O método consiste na avaliação termogravimétrica da secagem das amostras sob condições de pré-aquecimento, realizado com o auxílio de um aparato (Figura 3.3) que registra informações sobre a perda de massa durante o pré-aquecimento e perfil térmico da amostra [50].

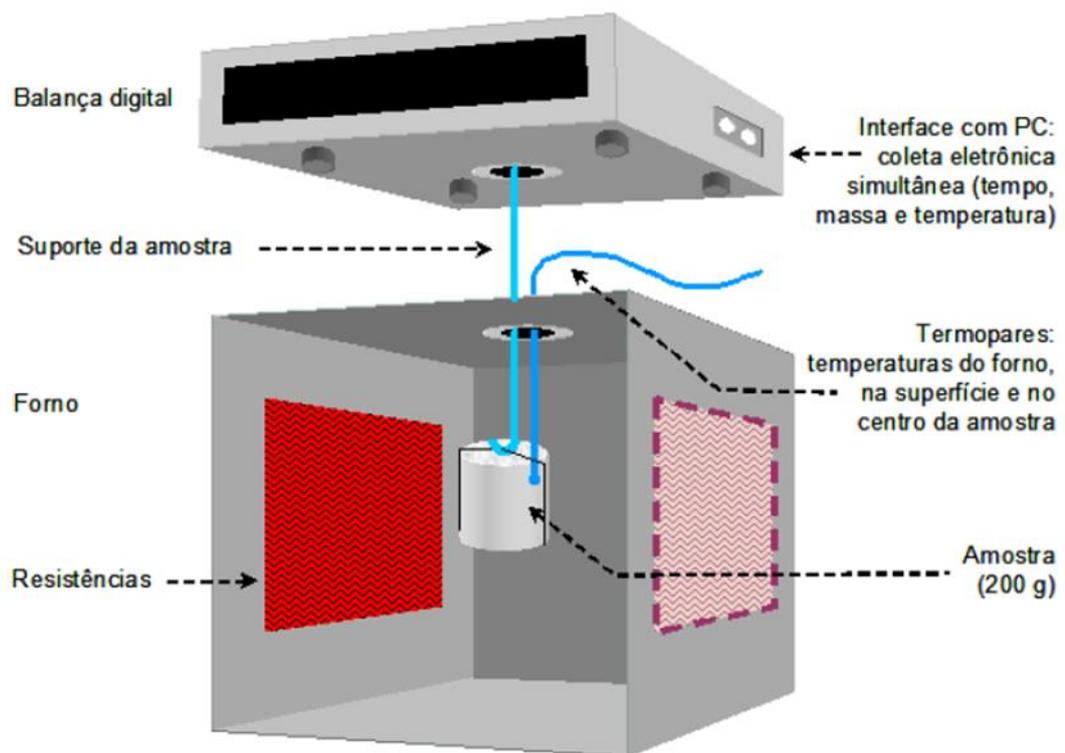


Figura 3.3 – Montagem experimental utilizado no ensaio de termogravimetria.

A TG para registro da perda de massa foi realizada com amostra cilíndrica (5,25 x  $\varnothing$  4,0 cm) curada por 24 horas. Já o registro das temperaturas é feito com outra amostra cilíndrica na mesma dimensão, curada por 48 horas, por meio de um termopar tipo K, localizado no meio da amostra, conforme Figura 3.4. Ambas seguem a mesma curva de aquecimento da temperatura ambiente até 800 °C, a uma taxa de 2 °C/min.

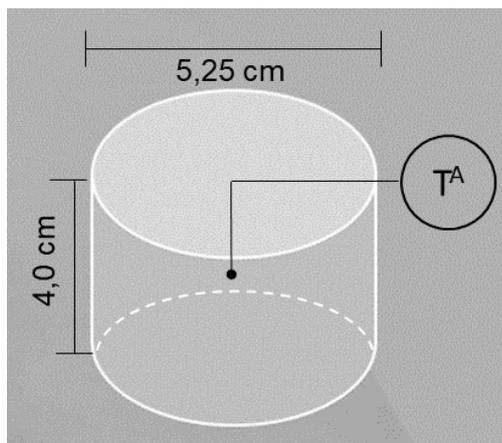


Figura 3.4 - Representação da amostra utilizada no ensaio de TG. TA representa um termopar posicionado no centro da amostra.

As densidades utilizadas nas simulações foram as obtidas na literatura e/ou experimentalmente e apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Densidades aparentes dos materiais utilizados na simulação da panela.

Região	Material	Tipo	Temp. [°C]	Densidade [kgm-3]	Referência
Camada de trabalho	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tijolo	–	3210	[10]
Soleira	5CAC	Concreto verde	42	3150	Obtidos experimentalmente para esse trabalho
			207	3144	
			414	3111	
			579	3062	
			785	3036	
		Concreto queimado	–	3036	[10]
Permanente	Alta alumina (98.7%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Tijolo	–	2660	[10]
Isolante	Fibras (80.0%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		–	510	[10]
Carcaça	Aço Carbono		–	7840	[10]

### 3.2.3 Calor específico e condutividade térmica

Os valores de calor específico ( $c_p$ ), condutividade térmica ( $k$ ) dos materiais considerados neste trabalho foram obtidos da literatura [31], inclusive do 5CAC. Os valores estão apresentados na Tabela 3.3, juntamente com os demais materiais considerados nas análises da panela de aço.

Tabela 3.3 - Condutividade térmica e calor específico dos materiais utilizados na simulação térmica da panela de aciaria.

Material	Propriedade	Temp. [K]	Valor
A - MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Tijolo Camada de trabalho e soleira	k [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	400	4,65
		700	3,49
		1000	4,65
		1300	5,81
	cp [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	–	1090
B - 5CAC Concreto Soleira	k [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	306	10,65
		462	7,43
		667	5,16
		868	4,40
		1069	3,86
	cp [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	306	650
		462	816
		667	849
		868	866
		1069	876
C - Alta alumina (98.7%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Tijolo Permanente	k [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	400	2,60
		800	2,10
		1200	2,00
	cp [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	200	890
		700	1060
D - Fibras (80.0%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Isolante	k [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	250	0,15
		800	0,25
		1350	0,34
	cp [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	–	1047
E - Aço Carbono Carcaça	k [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	200	47,34
		350	42,34
		500	37,35
	cp [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	200	530,0
		350	539
		500	666

### 3.2.4 Análises térmicas do refratário durante o pré-aquecimentos

A amostra cilíndrica de concreto refratário (5CAC), Figura 3.5 (a), curada por 24h a 30 °C foi submetida a um pré-aquecimento com taxa de 2 °C/min até a temperatura de 800 °C, seguindo a curva da Figura 3.5 (b).

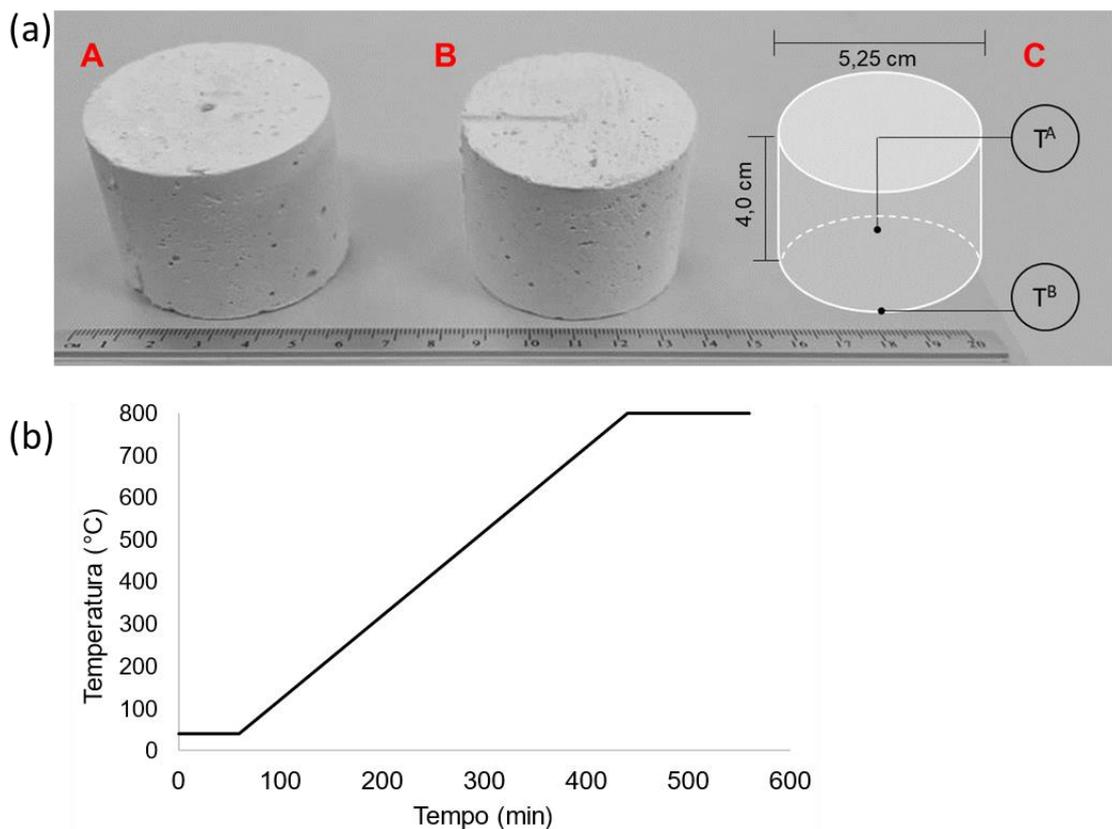


Figura 3.5 - (a) Amostras cilíndricas 5CAC utilizadas durante os testes e simulações. Em A, observa-se o orifício do termopar utilizado para medir a temperatura do centro da amostra. Em B, o entalhe utilizado para posicionar o termopar, que mediu a temperatura da superfície. Em C, tem-se uma representação da amostra, com os termopares e dimensões. (b) Rampa de pré-aquecimento utilizada no ensaio experimental, com taxa de 2 °C/min.

Durante o ensaio foram registradas as temperaturas com o auxílio de termopares do tipo K (faixa de medição de -270 a 1370 °C), e os valores da potência ativa da mufla com o auxílio de um sistema de aquisição de medidas (Sensoft), com uma taxa de aquisição de 0,5 Hz. Os termopares foram colocados no meio e fundo do eixo de assimetria da amostra,  $T^A$  e  $T^B$ , respectivamente, como apresentado na Figura 3.5 (a), através de um orifício com diâmetro de 5 mm e comprimento de 20 mm.

Foi utilizado uma mufla (EDG 3000) com pré-aquecimento por resistências laterais para realização dos experimentos com dimensões mostradas na Figura 3.6. Após esse primeiro aquecimento, a amostra foi mantida na mufla até retornar a temperatura de início do teste (30 °C). Em seguida, a

mesma curva de aquecimento foi repetida para essa amostra, registrando-se as temperaturas e potências.

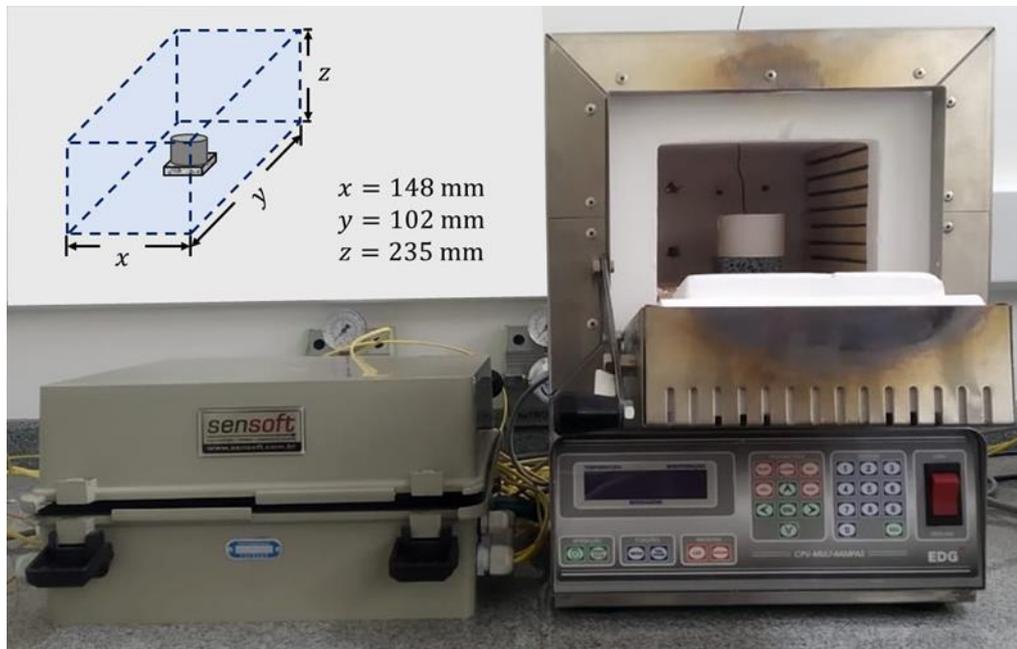


Figura 3.6 - Esquema e imagens do sistema de pré-aquecimento e registro de temperatura utilizado para realização dos experimentos.

### 3.2.5 Calorimetria de varredura diferencial (DSC)

Para verificação do comportamento térmico do material, foram realizados ensaios de DSC (Netzsch STA 449F3) de todas as matérias-primas que compõem o 5CAC separadamente, além de análise do 5CAC.

A preparação das amostras dos componentes individuais diferiu da apresentada para o concreto 5CAC, pois cada componente exigiu condições específicas. A seguir cada condição é apresentada em detalhe.

Foram preparadas amostras de cimento de aluminado de cálcio, Secar 71 com 25% de água (cimento) e curadas por 24h a 30°C. Após, foram moídas e analisadas no DSC, a uma taxa de 20 °C/min, seguindo a curva de pré-aquecimento descrita na Figura 3.7. O ensaio foi realizado sob uma atmosfera de ar sintético (20% de O<sub>2</sub> e 80% de N<sub>2</sub>) com um fluxo de 20 mL/min. Após o primeiro pré-aquecimento, a amostra foi reaquecida, seguindo essa mesma

curva. Foram realizadas duplicatas dessas amostras para garantir a reprodutibilidade do ensaio.

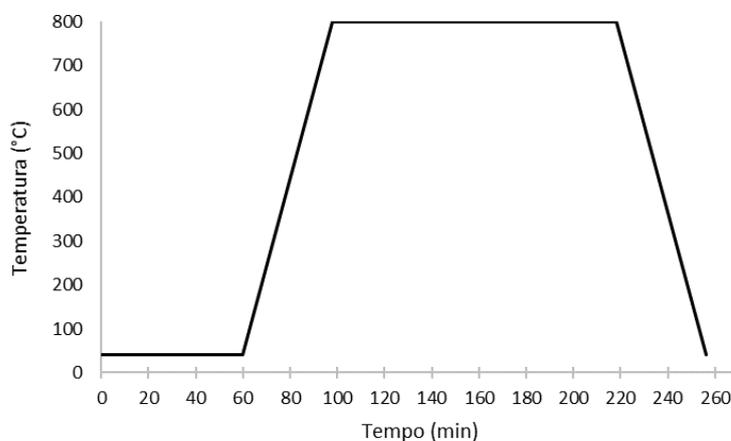


Figura 3.7 - Curva de pré-aquecimento utilizada nos ensaios de DSC.

O dispersante FS60 também foi analisado puro, a uma taxa de 20 °C/min, seguindo a curva da Figura 3.7. Para esse material foi feito apenas um pré-aquecimento, pois ele se degrada quase que por completo durante o primeiro pré-aquecimento. Também foi realizada duplicata dessa amostra para garantir a reprodutibilidade do ensaio.

As amostras contendo alumina foram preparadas conforme a Tabela 3.4. Essas amostras foram curadas a 30 °C por 24h. Após, foram moídas e analisadas no DSC, a uma taxa de 20 °C/min, seguindo a curva de pré-aquecimento descrita na Figura 3.7. Após o primeiro pré-aquecimento, a amostra foi reaquescida, seguindo essa mesma curva. Foram realizadas duplicatas dessas amostras para garantir a reprodutibilidade do ensaio.

Tabela 3.4 - Composição das amostras analisadas no DSC.

Matéria-prima	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FS60		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CAC		5CAC	
	%	g	%	g	%	g	%	g
AT 6-3mm	18,00%	18,00	18,00%	18,00	18,00%	18,00	18,00%	18,00
AT 3-1mm	10,00%	10,00	10,00%	10,00	10,00%	10,00	10,00%	10,00
AT 1-0,5mm	11,00%	11,00	11,00%	11,00	11,00%	11,00	11,00%	11,00
AT 0,6-0,2mm	9,00%	9,00	9,00%	9,00	9,00%	9,00	9,00%	9,00
AT 0,2-0mm	16,00%	16,00	16,00%	16,00	16,00%	16,00	16,00%	16,00
AT < 45#	10,00%	10,00	10,00%	10,00	10,00%	10,00	10,00%	10,00
CL 370	11,00%	11,00	11,00%	11,00	11,00%	11,00	11,00%	11,00
CT 300056	10,00%	10,00	10,00%	10,00	10,00%	10,00	10,00%	10,00
CAC	-	-	-	-	5,00%	5,00	5,00%	5,00
Dispersante	-	-	0,20%	0,00	-	-	0,20%	0,20
Água	8,00%	8,00	4,50%	0	8,00%	8,00	4,50%	4,50

### 3.3 Métodos de análises

#### 3.3.1 Determinação da taxa de energia volumétrica

A determinação da taxa de geração de energia por unidade de volume ( $\dot{s}$ ) para o caso dos concretos refratários estudados está relacionado às quantidades de energia envolvidas nas reações que ocorrem durante seu processamento e aquecimento inicial.

Os materiais refratários devem ser aquecidos previamente ao uso, respeitando-se uma curva de aquecimento adequada para que as reações previstas ocorram a uma taxa máxima que não ofereça riscos de explosão dos concretos e para que não haja um gradiente térmico muito alto em todo o material, evitando gradientes térmicos internos severos.

A etapa de aquecimento necessita de um grande aporte energético. Parte dessa energia é utilizada para elevar a temperatura dos materiais e a outra é perdida devido a ineficiência das resistências e do aquecimento (rendimento,  $\eta$ ). No domínio do sistema refratário, a energia útil é transportada no material considerando a equação do calor:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) - \dot{s} = 0 \quad (3.1)$$

sendo que  $\dot{s}$  é quantidade de calor associada às transformações de fase se essas ocorrerem. Os demais termos da equação correspondem a variação de temperatura do material e a quantidade de energia armazenada em um determinado volume em função do tempo.

É possível determinar o ( $\dot{s}$ ) via análises diferenciais entre o primeiro e segundo aquecimento, por meio da diferença entre as quantidades de energia envolvidas nesses aquecimentos. Chen apresenta um procedimento de três passos, onde uma curva correta e normalizada de fluxo de calor é encontrada. O primeiro passo se dá pela subtração da linha de base instrumental. O segundo passo foi a subtração da linha de base do efeito calor, que foi feita usando um

polinômio ou uma função gaussiana. Por fim, a curva foi normalizada dividindo-se pela massa da amostra [51].

Com base nesse procedimento descrito por Chen, e adotando algumas simplificações e considerações, é possível obter a taxa de geração de energia por unidade de volume ( $W / m^3$ ) característico para o material analisado. Nesse trabalho, dois procedimentos para a obtenção dessa quantidade de energia são apresentados. Um procedimento analítico com os dados experimentais da análise térmica a partir do calor específico do material, da densidade e da taxa de pré-aquecimento, e outro a partir dos resultados obtidos do DSC.

### 3.3.1.1 Procedimento a partir dos dados experimentais do forno

Após a preparação das amostras e obtenção das propriedades do 5CAC, bem como a aquisição de temperatura e potência ativa dos aquecimentos, é possível determinar uma curva para o  $\dot{s}$ , a partir da diferença entre os consumos de energia durante os dois aquecimentos. O procedimento a partir dos dados experimentais para quantificação do  $\dot{s}$  está descrito na Figura 3.8. O desenvolvimento e resultados serão demonstrados na seção resultados e discussões.

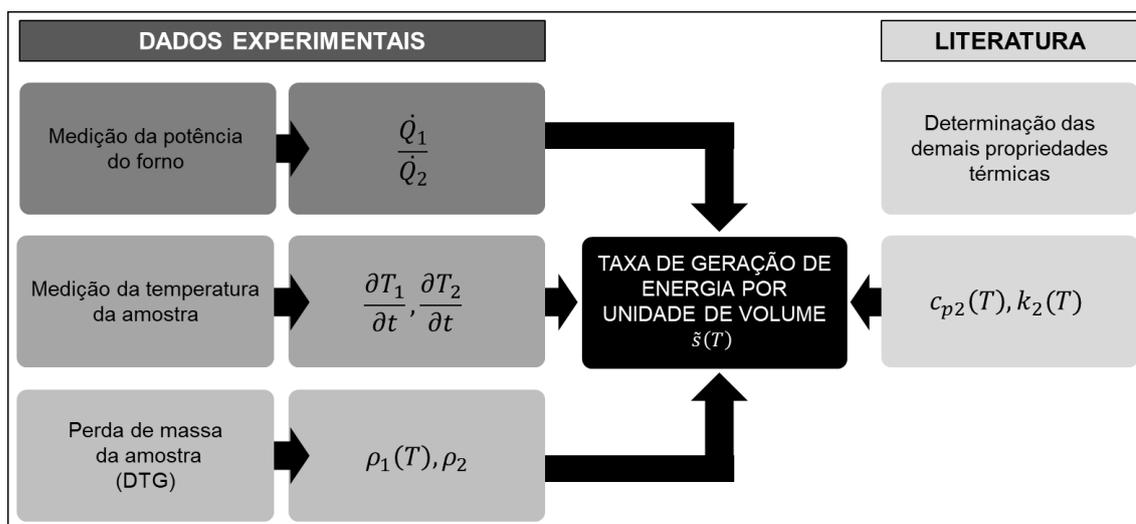


Figura 3.8 - Fluxograma representativo da metodologia de cálculo do  $\dot{s}$

### 3.3.1.2 Procedimento a partir dos ensaios de DSC

A taxa de geração de energia por unidade de volume também foi calculada a partir do resultado obtido pelo ensaio de DSC. Para tal, o valor do DSC ( $W / g$ ) foi multiplicado pela perda de massa final do ensaio e pela densidade ( $kg / m^3$ ), resultando no valor do  $\dot{s}_{DSC}$ , ( $W / m^3$ ) para ambos os aquecimentos [51]. Com esses valores a taxa de geração de energia por unidade de volume foi obtida por meio da diferença entre o primeiro e segundo aquecimento.

### 3.3.2 Modelo térmico em elementos finitos

Modelos em elementos finitos foram desenvolvidos para resolver a equação do calor e estimar o consumo energético durante o pré-aquecimento do revestimento refratário. Para tal, foi desenvolvido um modelo simples, para verificação do método de análise apresentado na seção anterior, onde foi considerado a curva ajustada da taxa de geração de energia por unidade de volume ( $\dot{s}$ ). Também foi elaborado um modelo para as painéis a fim de analisar o consumo energético e o perfil térmico durante o pré-aquecimento. Nesse trabalho, o MEF é empregado para o estudo do problema de transferência de calor transiente, e o software utilizado foi o Abaqus 6.14© para realizar as simulações computacionais.

#### 3.3.2.1 Descrição do problema – aquecimento do cilindro no forno mufla

O modelo foi desenvolvido com uma condição de axissimetria (Figura 3.9), utilizando-se uma discretização com uma malha estruturada composta por elementos quadrilaterais de 8 nós. O modelo em elementos finitos considera a taxa de geração de energia por unidade de volume em função da temperatura.

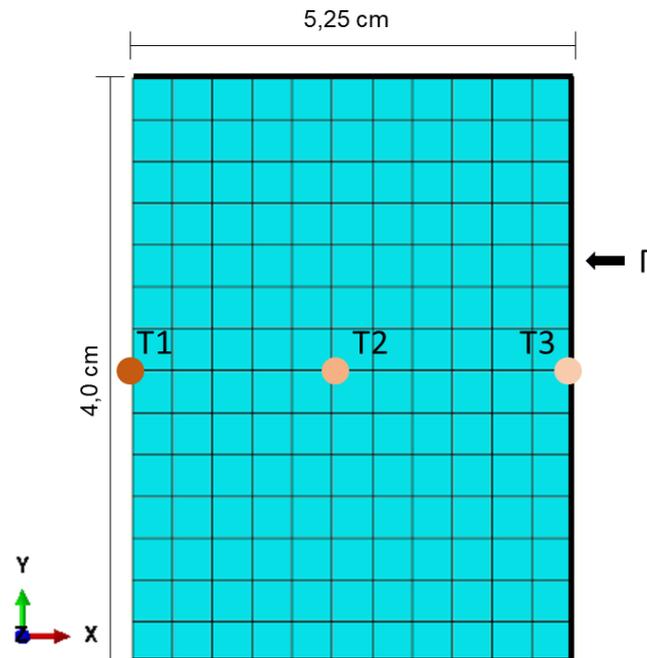


Figura 3.9 - Geometria utilizada no modelo via MEF.

Visto que as dimensões da amostra são relativamente pequenas em relação às dimensões da câmara da mufla, as condições de contorno que reproduzem as condições de pré-aquecimento do equipamento são definidas como a temperatura medida pelo termopar de superfície. Esse valor é considerado como uma média da temperatura em toda a superfície da amostra.

Para determinar a quantidade de energia utilizada durante o pré-aquecimento das amostras, simulou-se o segundo pré-aquecimento, aplicando como condição de contorno nas superfícies externas, a temperatura da amostra obtida experimentalmente  $T^B(t)$  da Figura 3.5, equivalente no modelo,  $T(\Gamma, t) = T^B(t)$ . Com isso, foi possível determinar o fluxo de calor na superfície,  $q_2(t)$  [W]. Esse fluxo de calor foi utilizado como condição de contorno do primeiro pré-aquecimento e essa condição é dada por  $q_1(t)$ , onde  $q_1(t)$  é o fluxo de calor na superfície  $\Gamma$ , durante o primeiro pré-aquecimento, e  $q_2(t)$  é o fluxo de calor na superfície  $\Gamma$ , durante o segundo pré-aquecimento.

No primeiro pré-aquecimento, a taxa de geração de energia por unidade de volume também foi adicionada no balanço térmico da amostra. Para avaliar os resultados, as temperaturas no centro das amostras foram comparadas ( $T^A$ ) com os valores na mesma região, obtidos pela simulação. As propriedades

utilizadas nas simulações foram as obtidas na literatura e/ou experimentalmente e apresentadas na Tabela 3.2 e Tabela 3.3.

Em ambos os pré-aquecimentos a condição inicial foi obtida experimentalmente a partir do termopar localizado no centro da amostra ( $T^A$ ) no momento inicial do ensaio:

$$T(r, z, t = 0) = T_1^A(t = 0) = T_2^A(t = 0) \quad (3.2)$$

O tempo considerado de aproximadamente 6 horas foi o mesmo nas duas simulações, o qual corresponde a duração do ensaio experimental.

### 3.3.2.2 Descrição do problema - panela de aço

Na construção do modelo da panela, também se adotou um modelo axissimétrico apresentado na Figura 3.10 (a). Os domínios do modelo são particionados para realizar a aplicação de diferentes materiais em regiões distintas, bem como facilitar o processo de geração da malha. A interface de contato entre cada camada é considerada perfeita e não oferece resistência térmica à condução de calor. A temperatura do revestimento da panela no instante inicial é 40 °C. Para promover o pré-aquecimento, foi determinado como condição de contorno na superfície interna da panela, a temperatura desejada na face quente. Foi considerado um gradiente térmico vertical de 300 °C ao longo da parede e outro gradiente térmico de 150 °C no fundo, como pode ser observado na Figura 3.10 (a). A Figura 3.10 (b) traz o histórico de temperatura considerado na simulação da panela.

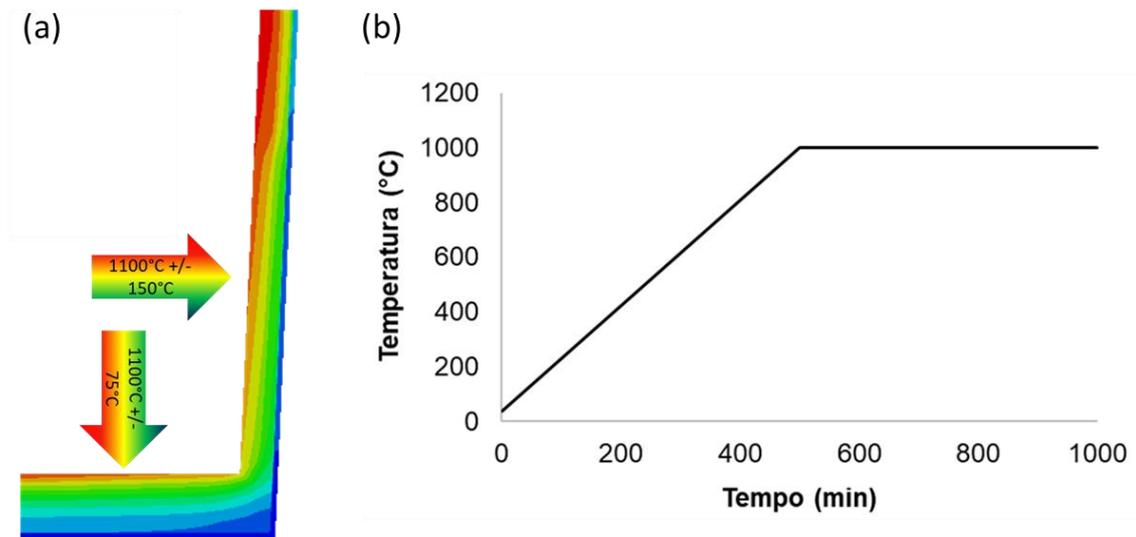


Figura 3.10 – (a) Gradiente térmico utilizado como condição de contorno na simulação da panela. (b) Rampa de pré-aquecimento utilizada na simulação.

Considera-se que a superfície externa do modelo está submetida a radiação e convecção, i.e.:

$$q(\Gamma_p) = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4) + h_{ar}(T)(T_{ar} - T) \quad (3.3)$$

onde:

$q(\Gamma_p)$ : fluxo de calor na superfície externa da parede;

$\varepsilon$ : Emissividade;

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman;

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente;

$T$ : Temperatura da superfície;

$h_{ar}$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção;

$T_{ar}$ : Temperatura do ar;

### 3.3.3 Determinação do consumo de energia / combustível

#### 5.4.3.1 Cálculo de energia

A energia transferida através de cada uma das superfícies é calculada a partir do fluxo de calor durante todo o tempo de análise. O consumo de energia pode ser calculado considerando as quantidades de calor de entrada e saída do sistema. Para cada superfície, a quantidade de energia num instante  $t$  é dada por:

$$E(t) = - \int_0^t \int q(r, t, z) dr dt \quad (3.4)$$

sendo  $\Gamma$  a superfície de interesse do modelo.

Os pré-aquecimentos foram realizados seguindo as curvas propostas nesse trabalho. Foi utilizada uma curva padrão representativa no pré-aquecimento de uma panela real, i.e. composta por rampas e patamares.

#### 5.4.3.2 Conversão combustível

Para o cálculo da energia proveniente da chama foi utilizado as entalpias dos produtos e reagentes da combustão. O modelo termoquímico foi desenvolvido em uma planilha e para o cálculo da temperatura adiabática da chama foi considerada a composição química dos gases fundamental para se definir o seu potencial energético.

Os combustíveis, gás natural e gás de aciaria (LDG), utilizados para a simulação são usualmente empregados na unidade de pré-aquecimento de panelas. A Tabela 3.5 apresenta a composição química e o poder calorífico desses combustíveis.

Tabela 3.5 – Composição e poder calorífico dos combustíveis utilizados [52], [53].

Gases Combustíveis		
	LDG	Gás Natural
H <sub>2</sub> (%)	3	-
N <sub>2</sub> (%)	21,2	0,5
O <sub>2</sub> (%)	0,3	-
CO (%)	60,4	-
CO <sub>2</sub> (%)	15,1	1,8
CH <sub>4</sub> (%)	-	88,5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (%)	-	6,2
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (%)	-	2,2
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (%)	-	0,8
Poder calorífico (kcal/Nm <sup>3</sup> )	2000	9400

O calor proveniente da reação de combustão pode ser calculado, desde que conhecidos o poder calorífico inferior (PCI) e a taxa de consumo de combustível no queimador. Se for assumido que todo o calor gerado é transformado em entalpia dos produtos de combustão, sem nenhuma perda de calor por radiação ou convecção ao ambiente externo (uma situação, na prática, impossível) ou perda de temperatura por dissociação, é possível calcular a temperatura adiabática de chama:

$$T_{ad} - T_0 = \frac{m_{comb} PCI}{m_{gases} C_{p_{gases}}} \quad (3.5)$$

onde:

T<sub>ad</sub>: Temperatura adiabática de chama (k);

T<sub>0</sub>: Temperatura inicial (k);

m<sub>comb</sub>: Taxa de consumo de combustível (kgs<sup>-1</sup>);

PCI: Poder calorífico inferior (kJkg<sup>-1</sup>);

m<sub>gases</sub>: Massa do gás combustível (kgs<sup>-1</sup>);

C<sub>p gases</sub>: Calor específico dos gases (kJkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>).

Para o balanço da energia do processo de combustão foi utilizado a expressão:

$$\dot{Q}_s = \sum \dot{n}_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r - \sum \dot{n}_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p \quad (3.6)$$

onde:

$\dot{Q}_s$ : taxa de saída de calor do processo de combustão;

$\bar{h}_f^o$ : entalpia de formação no estado de referência padrão;

$\bar{h}$ : entalpia sensível no estado especificado;

$\bar{h}^o$ : entalpia sensível no estado de referência padrão a 25 °C e 1 atm;

$n_r, n_p$ : taxas de fluxo molar dos reagentes e produtos, respectivamente.

A quantidade de calor proveniente da chama ( $q_{\text{útil}}$ ) foi calculada e por meio do modelo pode-se estimar a quantidade de energia necessária para aquecer o refratário ( $q_{\text{refratário}}$ ). Como o sistema não é isolado, há perdas térmicas no processo. Para estimar essas perdas, foi aplicado um rendimento ( $\eta$ ) de 60 % utilizando a equação abaixo.

$$q_{\text{refratário}} = \eta q_{\text{útil}} \quad (3.7)$$

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nas próximas seções serão apresentados os resultados que identificam as propriedades térmicas de um concreto refratário, bem como a verificação da metodologia descrita anteriormente e a aplicação dessas propriedades em painéis de aço via MEF.

### **4.1 Resultados experimentais**

#### **4.1.1 Termogravimetria e densidade**

Parte das transformações que ocorrem no material durante o pré-aquecimento envolvem reações de perda de massa como mostrado na Figura 4.1 (a), na qual podem ser identificadas as faixas de temperatura, a taxa de liberação de massa do refratário, além da variação percentual de massa do concreto refratário estudado. O resultado apresentado foi obtido por meio da análise de termogravimetria (TG), com uma amostra processada nas mesmas condições utilizada na determinação da variação da taxa de geração de energia por unidade de volume. No caso do concreto refratário 5CAC, cujo processamento e resistência mecânica envolvem a adição de água e ligantes hidráulicos, nota-se que durante o primeiro pré-aquecimento cerca de 80% da água residual não reagida do material é eliminada em temperaturas próximas a 100 °C (evaporação da água), o restante, água quimicamente ligada é eliminada entre 200 e 350 °C, originada a partir dos hidratos de aluminato de cálcio [54]. Por fim, em temperaturas mais altas, próxima a 490 °C, temos a decomposição do dispersante.

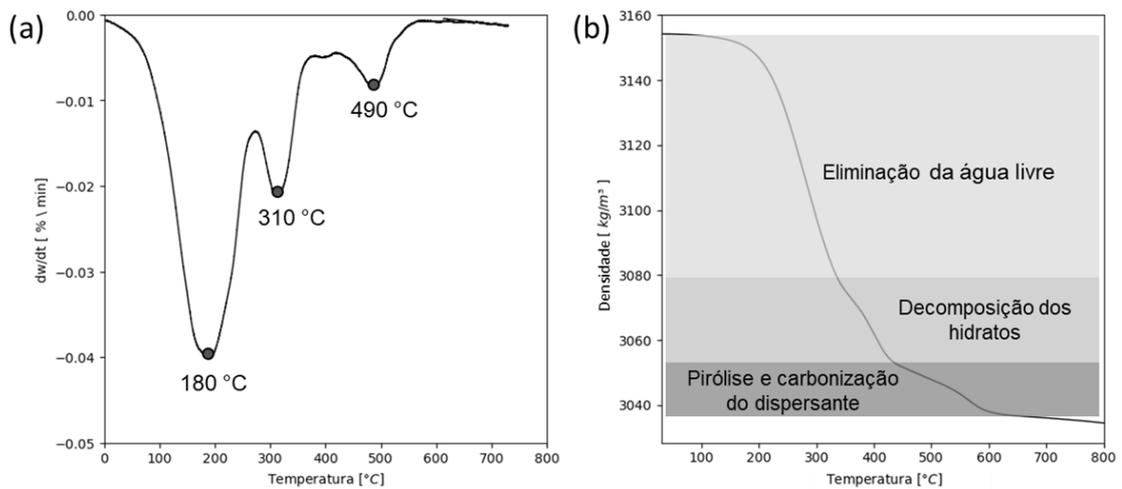


Figura 4.1 – Resultados experimentais (a) DTG do 5CAC. (b) Densidade do 5CAC.

O gráfico da Figura 4.1 (b) corresponde a variação da densidade volumétrica do material em função da temperatura durante o primeiro pré-aquecimento devido à perda de massa. Nota-se que há uma variação de aproximadamente 4,2 % na massa em relação ao valor inicial após a cura, alterando assim a densidade volumétrica do material, assumindo-se que a variação de volume durante o tratamento térmico é pequena. Os valores obtidos para algumas temperaturas são apresentados na Tabela 3.2. Para o caso da condição após o pré-aquecimento até 800 °C, ou seja, o segundo aquecimento, tem-se que a densidade desse material ( $\rho_2$ ) é pouco influenciado pela temperatura e seu valor é próximo a 3036 kg m<sup>-3</sup>.

Além dos dados obtidos experimentalmente para o 5CAC, têm-se os valores considerados de densidade para os outros materiais na Tabela 3.2.

#### 4.1.2 DSC

Para verificar o comportamento térmico desse concreto refratário, também foram realizados ensaios de DSC, pois é uma técnica padrão e normatizada (ISO 11357-1), agregando mais confiabilidade à medição da propriedade [55].

Os resultados do DSC do 5CAC (primeiro e segundo aquecimento) são apresentados na Figura 4.2 (a). Aplicando o passo 2 apresentado por Chen [51],

descrito na metodologia, ou seja, fazendo a diferença entre o DSC do primeiro pelo segundo aquecimento, pode-se observar na Figura 4.2 (b) que existem nesse concreto, reações endo e exotérmicas. A parte endotérmica provavelmente está associada a eliminação da água e a parte exotérmica provavelmente é influência da combustão do polímero. Outra informação presente na Figura 4.2 (b) é a curva de DTG desse material. Ela apresenta dois picos. O primeiro relacionado à liberação da água livre e o segundo à decomposição dos hidratos. Percebe-se que o primeiro pico é menor quando comparado à curva da DTG de uma amostra maior (cilindro usado na TG - Figura 4.1 (a)). Como a massa utilizada nessa técnica é muito pequena, parte da água pode ter sido eliminada na estufa durante a cura. O pico de perda de massa do dispersante não foi evidenciado, provavelmente por causa da pequena massa utilizada na técnica, e devido à pouca quantidade adicionada no concreto (0,2 % em massa), ou seja, na perda de massa não é significativa a ponto de ser observada, mas o poder calorífico desse dispersante é alto, sendo evidente a influência dessa liberação de energia na curva de DSC.

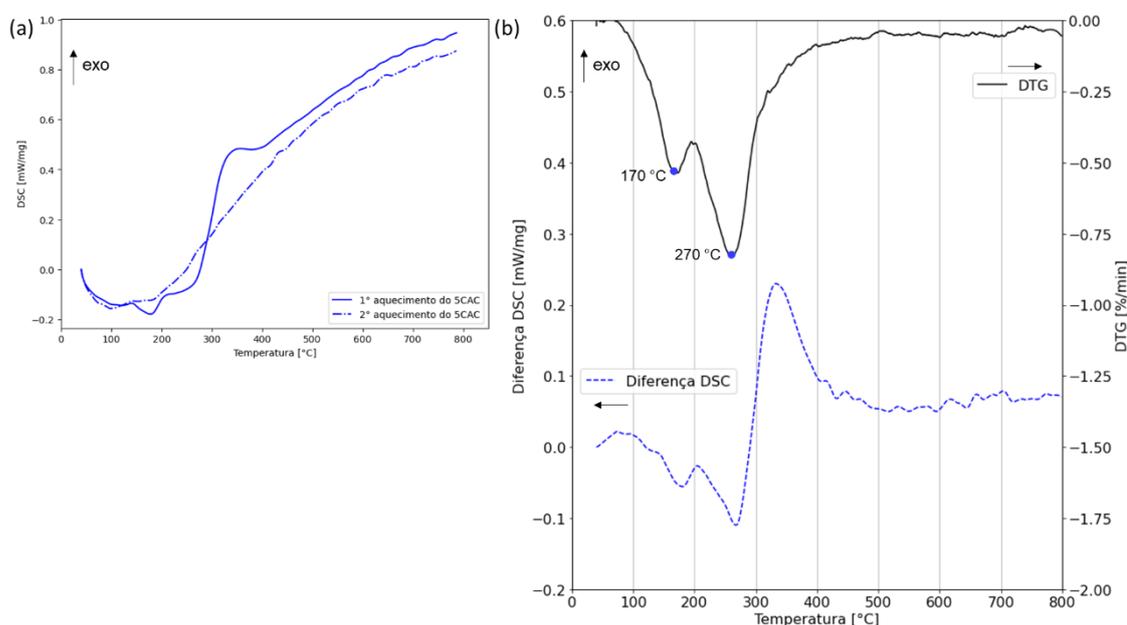


Figura 4.2 – Resultados do DSC do concreto refratário 5CAC. (a) Curvas extraídas do equipamento de DSC para o primeiro e segundo aquecimento do 5CAC. (b) Perda de massa e diferença entre os DSCs do primeiro e segundo aquecimento do 5CAC.

Também foram feitas análises de DSC em cada constituinte desse concreto, bem como em algumas variações de combinação entre as matérias-primas.

Foram analisadas amostras do cimento Secar 71, sendo que os resultados do primeiro e segundo aquecimento do DSC podem ser observados na Figura 4.3 (a). Aplicando também o passo 2 descrito na metodologia, pode-se observar na Figura 4.3 (b) que basicamente todos os picos encontrados no DSC foram endotérmicos, semelhante aos resultados encontrados na literatura [45], [46], [56]. Segundo Barakat, o primeiro pico está relacionado com a decomposição da alumina gel,  $CAH_{10}$  e  $C_2AH_8$ , o segundo relacionado com a decomposição do  $AH_3$  e o terceiro com a decomposição  $C_3AH_6$ .

Já a perda de massa pode ser analisada na Figura 4.3 (c). Os valores encontrados também são semelhantes aqueles da literatura [46], e pode-se observar os hidratos se decompondo.

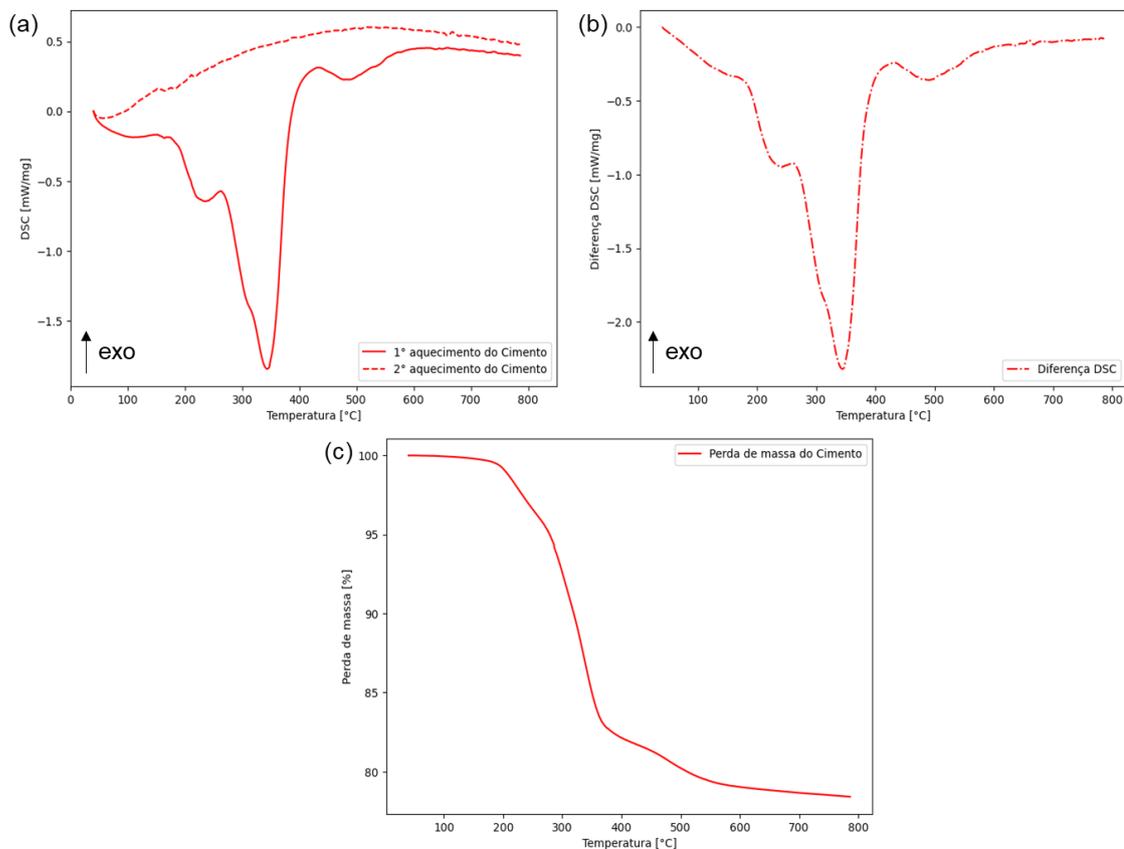


Figura 4.3 - DSC do primeiro e segundo pré-aquecimento do cimento Secar 71.

Após a análise do cimento, foi feito o DSC de amostras do dispersante FS60. O gráfico da Figura 4.4 (a) mostra que praticamente todos os picos são exotérmicos, exceto o primeiro a 70 °C, que está associado a eliminação de umidade do material [47]. Os picos exotérmicos provavelmente estão relacionados a pirólise e a carbonização desse polímero. Vale ressaltar que a ordem de grandeza do valor encontrado no DSC para o polímero é aproximadamente 10 vezes maior que os picos encontrados no cimento. Por isso, mesmo em pouca quantidade, no concreto, o efeito exotérmico desse polímero foi observado, como visto na Figura 4.2.

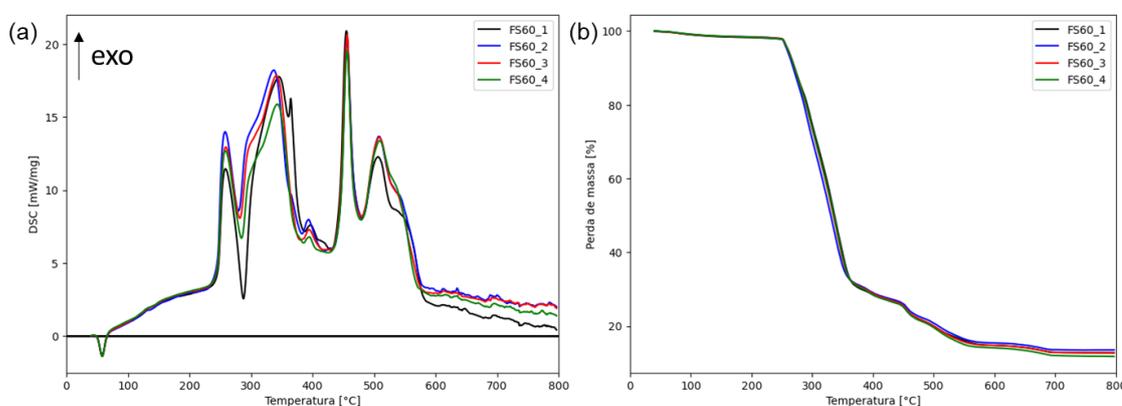


Figura 4.4 – DSC e perda de massa do dispersante.

O gráfico da perda de massa do dispersante, na Figura 4.4 (b), mostra que após o primeiro pré-aquecimento, o polímero é praticamente consumido por completo, sobrando apenas aproximadamente 10 % de cinzas. Por esse motivo não foi realizado o segundo pré-aquecimento desse material.

Por fim, foram realizadas análises de DSCs em algumas variações de combinação entre as matérias-primas. A Figura 4.5 traz um compilado dos resultados de DTG e a diferença entre os DSCs do primeiro e segundo pré-aquecimento respectivamente das amostras contendo alumina.

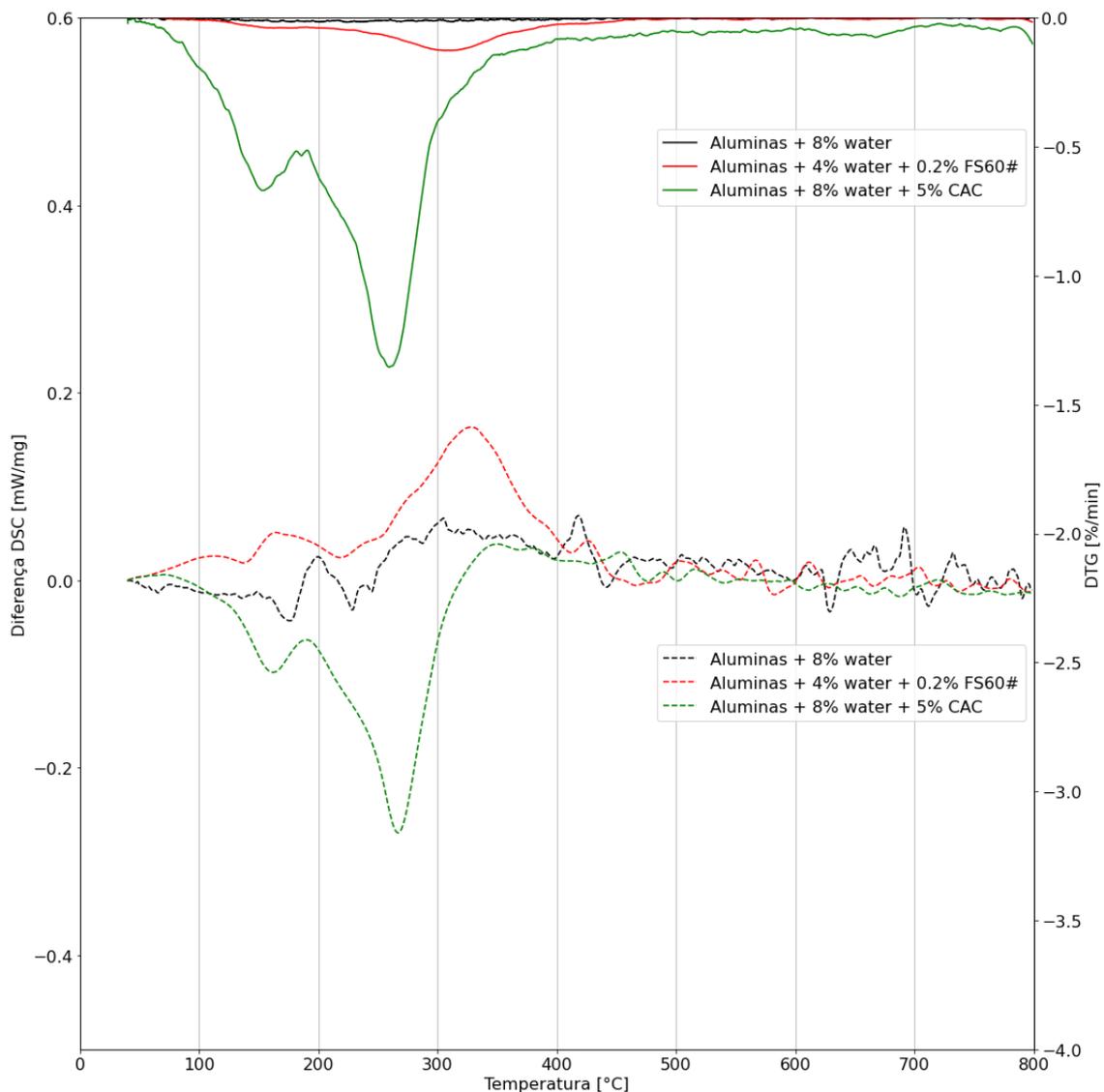


Figura 4.5 - DSC e DTG das amostras ensaiadas.

A curva preta é o resultado da DTG e DSC da amostra de alumina e água. Grande parte dessa água não reage com a alumina, e parte dessa água livre é perdida na estufa durante a cura. Isso é evidenciado no gráfico da DTG da Figura 4.5. Analisando a curva do DSC, não há picos endo e exotérmicos significativos nesse material, quando se consideram as diferenças entre o primeiro e o segundo pré-aquecimento. Nota-se a presença de ruídos oriundos da medição do experimento. Resultados em duplicatas foram omitidos para todos os casos, devido à similaridade encontrada.

Para verificar o comportamento do dispersante com a matriz, foram feitas amostras contendo alumina, dispersante e água. Observando-se as curvas

vermelhas da Figura 4.5, nota-se a influência da energia exotérmica do polímero. Isso fica mais evidente quando se faz a diferença entre o DSC do primeiro e segundo pré-aquecimento, onde só foi encontrado picos exotérmicos.

Também foram feitos DSCs de amostras sem o dispersante para verificação do comportamento térmico do material, curva verde da Figura 4.5. Vê-se que quando o dispersante é removido da amostra em análise, apenas picos endotérmicos são observados.

A principal limitação da técnica de DSC, quando aplicada ao material refratário, é que, devido à medição ser feita em uma massa de material muito pequena, por vezes, não é representativa para o concreto, visto que, esses materiais possuem agregados que por si só, superariam a massa utilizada na medição, e devido ao fato de que os agregados não são passíveis de reação com a matriz até 800 °C. Isso reforça a importância de um melhor entendimento sobre comportamento do concreto durante o pré-aquecimento e o desenvolvimento de técnicas que sejam representativas para os materiais refratários.

### **4.1.3 Análise térmica experimental**

Dois pré-aquecimentos de amostras cilíndricas do concreto refratário foram realizados (Figura 3.5 (a)). A potência ativa, ou seja, as quantidades de energia consumida pela fonte de pré-aquecimento foram determinadas para os dois casos. Para tal verificação foi registrada a potência ativa consumida da rede elétrica pelas resistências da mufla nas condições de ensaio e os consumos de energia.

Na Figura 4.6 é apresentada a razão, potência ativa do primeiro aquecimento dividido pela potência ativa do segundo aquecimento, e nota-se pequenas diferenças entre o total utilizado para cada etapa. Vale destacar que o primeiro pré-aquecimento consumiu mais energia visto que para o controle de temperatura da mufla é necessário fornecer uma maior quantidade de energia, já que parte desta está sendo utilizada para transformar o material. De qualquer forma, essa razão foi considerada para remover os efeitos do consumo de

energia nos cálculos da taxa de geração de energia por unidade de volume, apesar da pequena influência nos resultados. Com isso, assegura-se que o consumo de energia é equivalente para os dois pré-aquecimentos em questão e, complementarmente, tem-se que a amostra apresenta dimensões significativamente menores que a câmara da mufla e suas condições pouco afetariam o controle da potência. Logo, a diferença dos fluxos de energia volumétrico em cada pré-aquecimento está associada apenas as quantidades de energia relacionadas as transformações que ocorrem material.

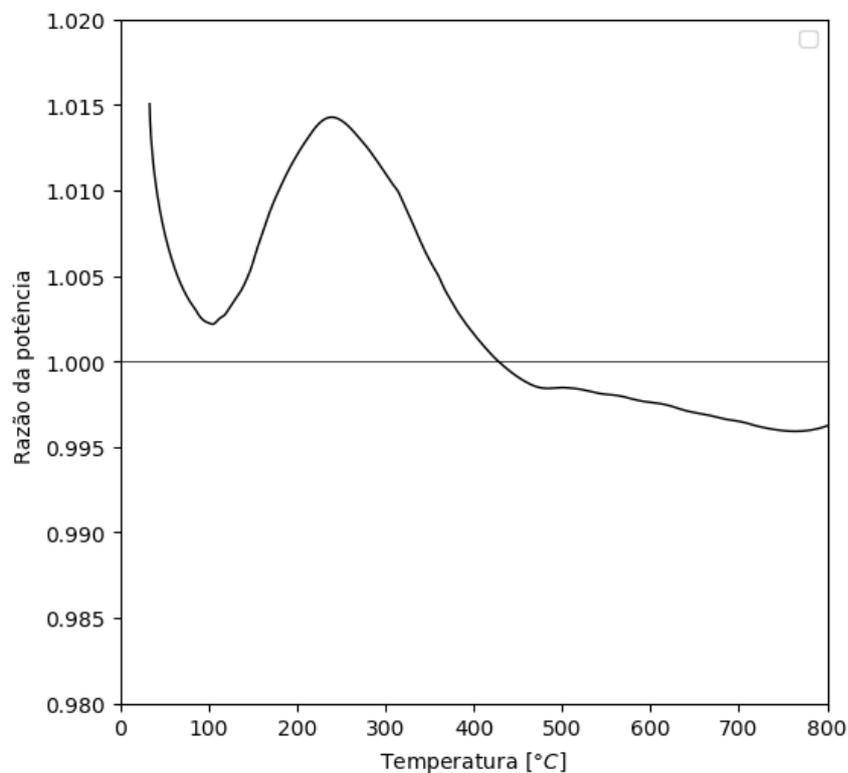


Figura 4.6 – Diferença do consumo de energia entre o primeiro e segundo pré-aquecimento.

Durante o pré-aquecimento, diversas transformações e reações ocorrem na microestrutura do refratário que consomem ou liberam energia, com ou sem perda de massa do sistema. A presença de transformações endotérmicas durante o pré-aquecimento de cerâmicas refratárias consome a energia fornecida pela fonte de calor (resistências elétricas, queimadores, etc.) de forma que esta não é utilizada para efetivamente aquecer o material, o que retarda o aumento de temperatura.

Também ocorrem reações exotérmicas no material, liberando calor e aumentando a taxa de aquecimento no interior da amostra. Quando realizado dois pré-aquecimentos de um mesmo sistema refratário, sob as mesmas condições (nos experimentos foram utilizadas curvas de 2 °C/min), como mostra a Figura 4.7, têm-se temperaturas mais baixas no aquecimento das amostras em que as transformações no material estão ocorrendo (1° aquecimento).

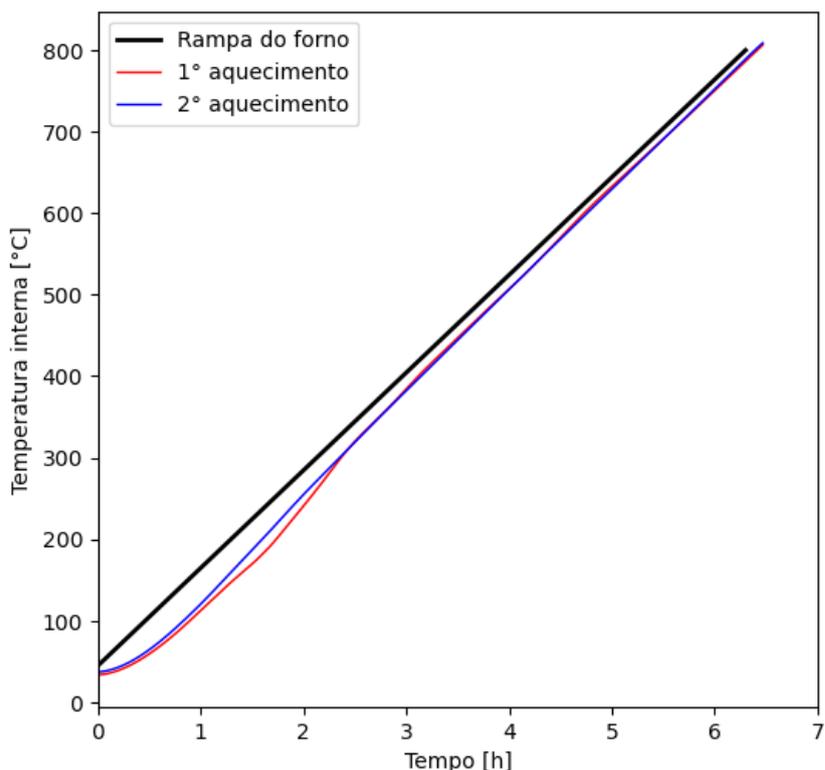


Figura 4.7 - Temperatura das amostras e forno durante os pré-aquecimentos.

Também pode-se observar que em determinados períodos do pré-aquecimento, a temperatura das amostras em que as transformações no material estão ocorrendo, fica superior à temperatura da amostra na qual não há mais transformação (2° aquecimento). Isso pode ser melhor visualizado, quando fazemos a diferença de temperatura entre o primeiro e segundo aquecimento, na Figura 4.8.

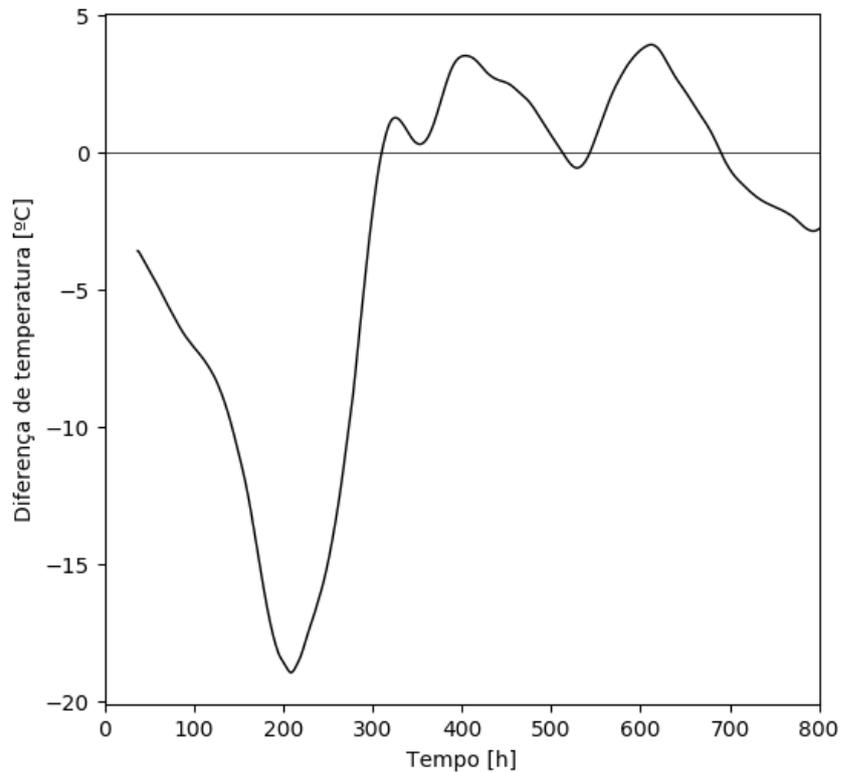


Figura 4.8 - Diferença de temperatura entre o primeiro e segundo aquecimento.

Pode-se observar que até aproximadamente 300°C, a temperatura do primeiro aquecimento se manteve inferior à temperatura do segundo. Após isso, o comportamento térmico muda, ou seja, a temperatura do primeiro aquecimento fica maior que a do que o segundo aquecimento, o que sugere que pode estar ocorrendo reações exotérmicas no material.

#### 4.2 Modelo de determinação da taxa de energia volumétrica

A seguir serão apresentados os resultados dos dois procedimentos de determinação da taxa de energia volumétrica do 5CAC. Primeiramente, o procedimento analítico a partir dos dados experimentais, calor específico do material, densidade e da taxa de pré-aquecimento, e por fim, o procedimento a partir dos resultados do DSC.

Para a solução do modelo em elementos finitos foi necessário determinar as propriedades térmicas do material e a taxa de geração de energia por unidade de volume.

Para o procedimento a partir dos dados experimentais, calor específico do material, densidade e da taxa de pré-aquecimento, a taxa de energia por unidade de volume em função da temperatura foi estimada a partir de dois aquecimentos sucessivos da mesma amostra no forno. A taxa de transferência de calor do primeiro aquecimento é expressa por:

$$\dot{Q}_1 = \rho_1 (T_1) c_p (T_1) \frac{\partial T_1}{\partial t} + \dot{s} \quad (4.1)$$

sendo a primeira parcela do lado direito referente a quantidade de energia estocada pelo corpo e o segundo termo do lado direito a quantidade de energia trocada oriundas das reações químicas. De forma análoga, o segundo aquecimento pode ser descrito por:

$$\dot{Q}_2 = \rho_2 c_p (T_2) \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad (4.2)$$

onde,  $\rho_2$ ,  $c_p (T_2)$ ,  $T_2$  são respectivamente, a densidade, o calor específico e a temperatura do material calcinado, e  $\rho_1$ ,  $c_p (T_1)$ ,  $T_1$ , são respectivamente a densidade, o calor específico e a temperatura do material apenas curado.

Na Equação 4.2 não se tem o termo  $\dot{s}$ , pois foi considerado que todas as reações químicas, exo e/ou endotérmicas, aconteceram durante o primeiro aquecimento.

Nas equações (4.1) e (4.2), considerou-se a amostra como um volume de controle no qual toda ela está em uma mesma temperatura, que se altera uniformemente com o tempo, isto é, considerando a amostra como um ponto, portanto, toda variação de temperatura da amostra é devido à variação da energia estocada e à conversão de energia das reações.

Dividindo-se (4.1) por (4.2), obtém-se:

$$\dot{s}(T) = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} \left[ \rho_2 c_p (T_2) \frac{\partial T_2}{\partial t} \right] - \left[ \rho_1 (T_1) c_p (T_1) \frac{\partial T_1}{\partial t} \right] \quad (4.3)$$

É difícil estimar os valores de  $\dot{Q}_1$  e  $\dot{Q}_2$ , entretanto, a razão entre eles foi aproximada pela razão das potências útil, apresentado na Figura 4.6.

Em ambos os aquecimentos, o gradiente de temperatura entre o centro da amostra e a superfície foi considerado muito pequeno. Para o segundo aquecimento da amostra, a taxa de geração de energia por unidade de volume ( $\dot{s}$ ) foi considerada igual a zero e a densidade do material considerada constante. Diferentemente, no primeiro pré-aquecimento a densidade é função da temperatura visto que se verificou a alteração de massa da amostra devido as reações presentes. Como simplificação do modelo, o calor específico e a condutividade térmica em função da temperatura foram considerados iguais para os dois pré-aquecimentos, de acordo com a Tabela 3.3.

Para a representação da taxa de geração de energia por unidade de volume, nota-se que os valores seguem o comportamento aproximado da sobreposição de funções gaussianas. Logo, a curva que descreve o comportamento do  $\dot{s}$ , obtida do método experimental foi ajustada a partir de um somatório de gaussianas, cujos parâmetros que a descrevem (A - amplitude, n - abertura e P - temperatura do pico) fornecessem os valores do fluxo em função da temperatura para outros modelos, como do MEF:

$$\tilde{s}(T) = \sum_0^k A_k e^{\left[-\left(\frac{T-P_k}{n_k}\right)^2\right]} \quad (4.4)$$

onde  $\tilde{s}$  é uma equação de soma de funções gaussianas encontrada para representar o modelo ajustado da equação  $\dot{s}$  associados aos parâmetros A, n e P, também ilustrados na Figura 4.9.

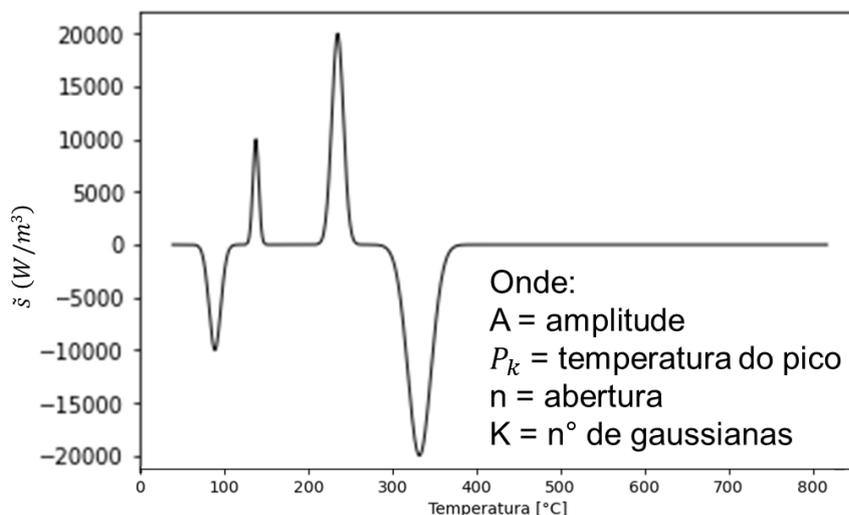


Figura 4.9 - Gráfico ilustrativo da somatória de quatro funções gaussianas centradas em diferentes valores de temperatura. A primeira e a última representam processos exotérmicos, enquanto a segunda e a terceira, processos endotérmicos.

A partir das curvas de temperatura obtidas na Figura 4.7 calculou-se a derivada da temperatura em relação ao tempo no centro do material, sendo esta utilizada na determinação da taxa de energia necessária para promover o pré-aquecimento do material. Na Figura 4.10, tem-se os valores da taxa obtidos em função da temperatura da amostra.

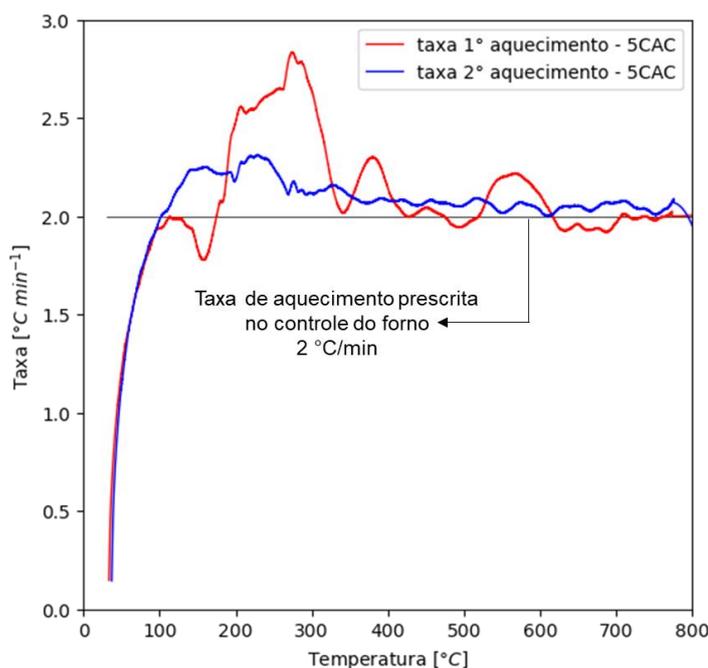


Figura 4.10 - Taxa de pré-aquecimento da amostra durante o primeiro e segundo pré-aquecimento.

Observa-se que, ao comparar as taxas em cada aquecimento com a taxa imposta pela mufla, existem variações significativas para a amostra apenas curada e uma pequena diferença para a mesma em seu segundo pré-aquecimento. A exceção ocorre no início (até 120 °C) onde o sistema composto pela amostra e mufla, ainda não entraram em regime estacionário e parte da energia fornecida foi utilizada para encharcar a massa térmica do sistema, justificando um aumento de temperatura menor que o programado na rampa de pré-aquecimento. A diferença observada para amostra curada pode ser devido às transformações e reações no concreto, que atrasa (reações endotérmicas) ou acelera (reações exotérmicas) o aquecimento no interior da amostra, e, conseqüentemente, altera a variação de energia no volume observado. Vale destacar que no primeiro aquecimento, a taxa de aquecimento do material fica boa parte do ensaio superior que a taxa imposta no forno, o que também corrobora com que possíveis reações exotérmicas podem estar ocorrendo no material. Já no segundo pré-aquecimento, os valores obtidos foram bem próximos a 2 °C/min e mostram boa concordância entre o resultado do experimento e o controle da mufla. Tal proximidade ocorreu principalmente durante o segundo pré-aquecimento, visto que não houve transformações de fase no concreto, quando comparado com a amostra apenas curada. Vale ressaltar que a influência do método de coleta da temperatura também está presente no primeiro caso, e que nos dois casos, o sistema de controle PID que define a taxa de aquecimento da mufla também influencia na medição de temperatura das amostras. Essas influências de medição, são os principais gargalos do método e merece atenção e novos estudos posteriores, pois interfere diretamente a taxa de geração de energia por unidade de volume.

Vale destacar que na determinação da taxa de geração de energia por unidade de volume  $\dot{q}$  multiplicou-se a razão entre o consumo de energia dos dois aquecimentos em cada instante de tempo pelo primeiro termo da Equação 4.3. A taxa de geração de energia por unidade de volume obtido para o concreto aluminoso é apresentada na Figura 4.11 em função da temperatura, juntamente com a curva de ajuste.

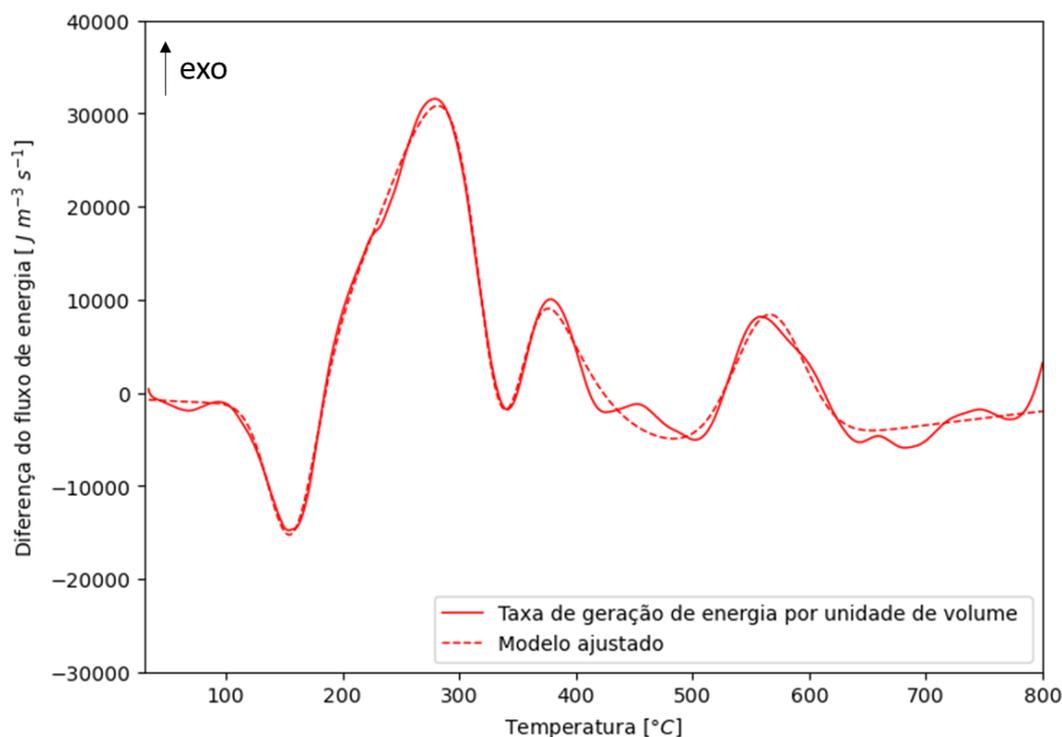


Figura 4.11 – Ajuste do modelo aos dados experimentais do procedimento analítico do 5CAC.

A Figura 4.11 diz respeito ao ajuste de um somatório de cinco gaussianas para obtenção dos parâmetros de uma curva que descreve o comportamento da amostra nas condições apresentadas. A taxa de geração de energia por unidade de volume apresenta um comportamento onde são encontrados picos e vales, onde para cada um deles existe uma amplitude, temperatura e abertura específica, logo, esse modelo ajustado é uma boa aproximação para ser considerada em modelos matemáticos que computam tal fenômeno. Com esses parâmetros é possível estimar como a energia térmica é transportada em sistemas diversos de aplicação de materiais refratários em que o primeiro pré-aquecimento é realizado logo após o processamento.

Já a determinação da taxa de geração de energia por unidade de volume pelo resultado do DSC, Figura 4.12 foi efetuada multiplicando-se o valor obtido no DSC (mW/mg) pela densidade do 5CAC (3036 kg/m<sup>3</sup>), resultando-se na unidade do  $\dot{s}_{DSC}$  (W/m<sup>3</sup>). A curva do  $\dot{s}_{DSC}$ , bem como a curva ajustada ( $\tilde{s}_{DSC}$ ) são apresentadas na Figura 4.12.

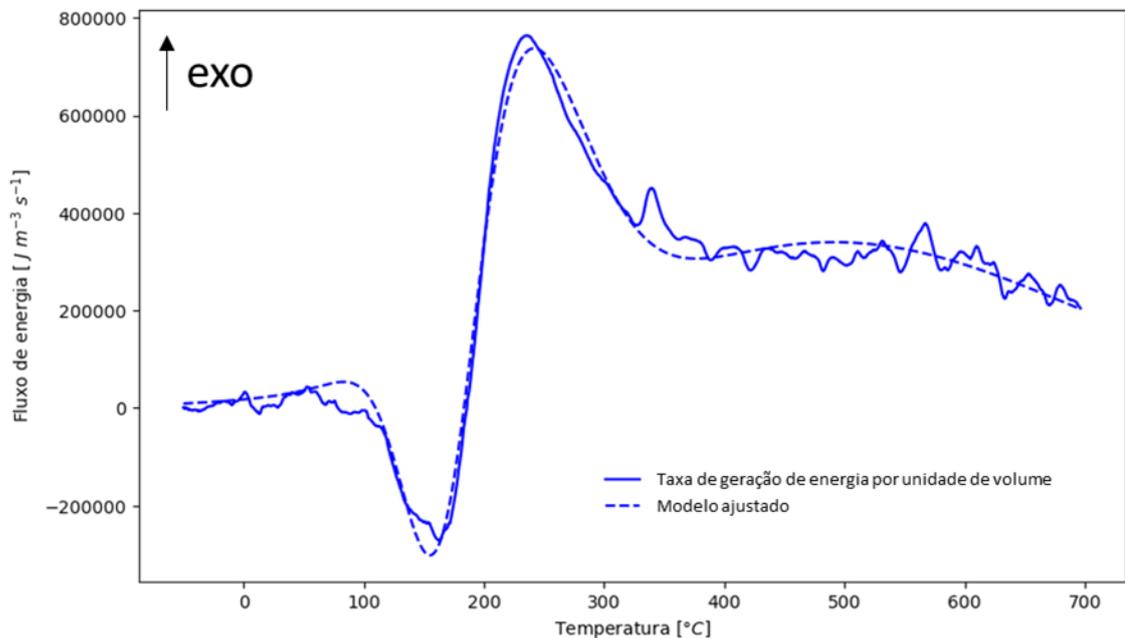


Figura 4.12 – Ajuste do modelo obtido por meio do resultado do DSC do 5CAC.

Apesar das magnitudes das curvas da Figura 4.11 e Figura 4.12 serem distintas, pode-se perceber que há semelhança no comportamento térmico do material.

Em ambos os resultados há um pico endotérmico, provavelmente relacionado com a eliminação da água desse material e um pico exotérmico, possivelmente relacionado ao dispersante.

### 4.3 Simulação do aquecimento do corpo de prova no forno mufla

O modelo de transferência de calor em elementos finitos considerado foi apresentado na metodologia e busca reproduzir os efeitos na temperatura da amostra considerando as taxas de geração de energia por unidade de volume apresentados na Figura 4.11 e Figura 4.12.

Primeiramente, simulou-se o segundo pré-aquecimento com as condições do experimento (temperatura inicial e temperatura da superfície da amostra) e obteve-se o fluxo de calor na superfície do modelo que corresponde à quantidade de energia total efetiva que a mufla transferiu para a amostra.

Em seguida, numa segunda simulação, o fluxo de calor foi aplicado como condição de contorno do primeiro pré-aquecimento, igualando-se as quantidades de energia útil durante os ensaios. Isso foi feito considerando a curva ajustada do  $\dot{s}$  encontrado a partir do experimento analítico e também com a curva ajustada a partir do DSC.

A Figura 4.13 mostra a variação percentual da diferença entre a temperatura do experimento e a simulação para o caso do  $\dot{s}$ . Pode-se ver que as temperaturas encontradas na simulação são muito próximas às do experimental. Nota-se que a reprodução dos efeitos térmicos durante o primeiro pré-aquecimento foi efetiva, visto que a diferença entre as temperaturas experimentais e simuladas foi pequena, menor que 2%.

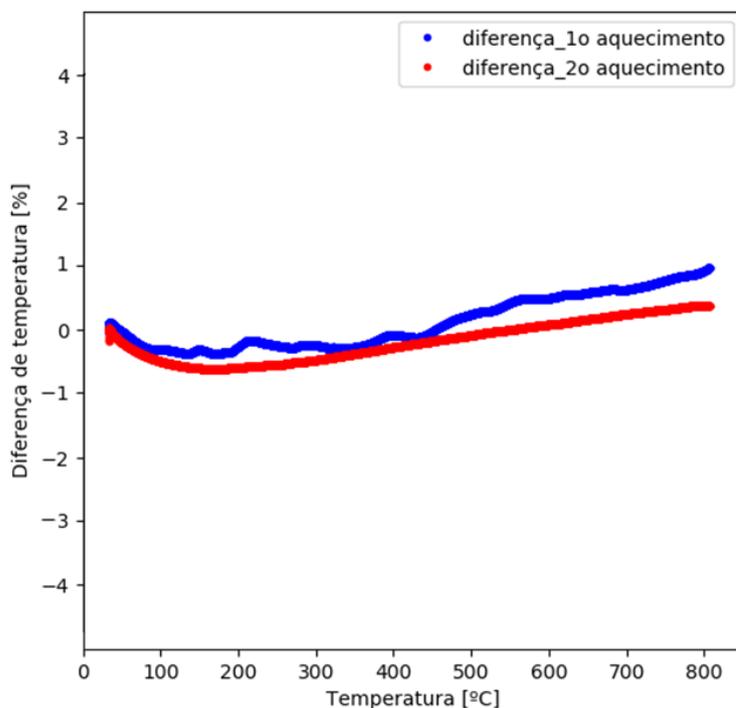


Figura 4.13 - Diferença de temperatura entre o experimento e a simulação para o caso do  $\dot{s}$  calculado.

Já para o caso do  $\dot{s}_{DSC}$  encontrado a partir do DSC, a Figura 4.14 mostra a variação percentual da diferença entre de temperatura entre o experimento e a simulação.

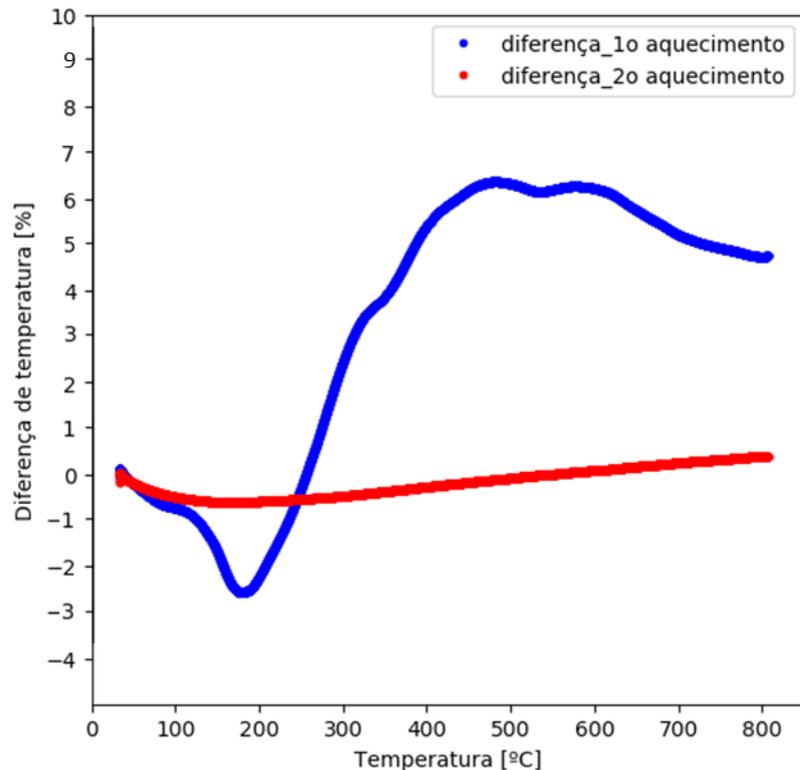


Figura 4.14 - Diferença de temperatura entre o experimento e a simulação para o caso do  $\tilde{s}_{DSC}$  a partir do DSC.

Pode-se observar que essa diferença de temperatura entre o experimento e a simulação é bem mais significativa, mostrando que a curva do  $\tilde{s}_{DSC}$  encontrada, nesse caso, não foi satisfatória para representar a taxa de energia por unidade de volume do concreto 5CAC. Um dos possíveis motivos é a quantidade de massa utilizada no ensaio, visto que são desconsiderados os efeitos microestruturais durante os aquecimentos do DSC. Além disso, a taxa de aquecimento aplicada na simulação foi de 2 °C/min, mas a taxa praticada no ensaio de DSC foi de 20°C/min, podendo ter tido influência na diferença do resultado. Baixas taxas de aquecimento no DSC causa várias oscilações no perfil térmico, dificultando a análise e procedimento usado neste trabalho.

#### 4.4 Simulação da panela de aço

O gráfico da Figura 4.15, traz o perfil de temperatura na camada de trabalho do fundo da panela, onde é notável a influência da parcela de geração

de energia na evolução da temperatura durante o aquecimento. Considerar o valor do  $\delta$  na panela permite uma maior aproximação do modelo com os casos reais, visto que no pré-aquecimento existe perda de massa e consequente consumo de energia para transformar esses materiais.

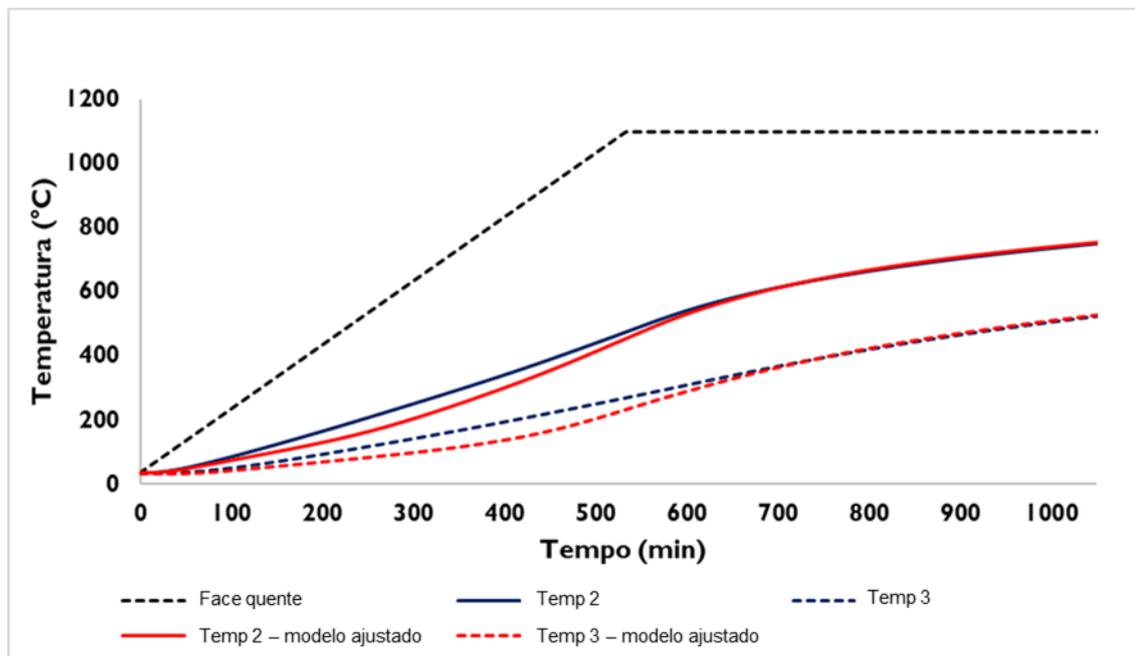


Figura 4.15 - Temperatura da camada de trabalho (fundo) da panela. As posições dos termopares estão indicadas na Figura 3.1.

A informação do perfil térmico ao longo do revestimento é muito importante para a programação da curva de pré-aquecimento. Isso fica mais evidente, quando se olha para a diferença entre os perfis térmicos da Figura 4.15, ou seja, subtraindo a temperatura da simulação não considerando o valor de  $\delta$ , pela temperatura considerando o valor de  $\delta$ , para ambos os termopares analisados. Essa diferença está plotada na Figura 4.16. Percebe-se que quanto mais distante da face quente, maior é a diferença de temperatura entre as simulações, além de que ao longo do revestimento as temperaturas são diferentes no mesmo instante de tempo. Alguns patamares para homogeneização da temperatura, ou taxas diferentes em momentos distintos do pré-aquecimento podem ser necessários durante o pré-aquecimento.

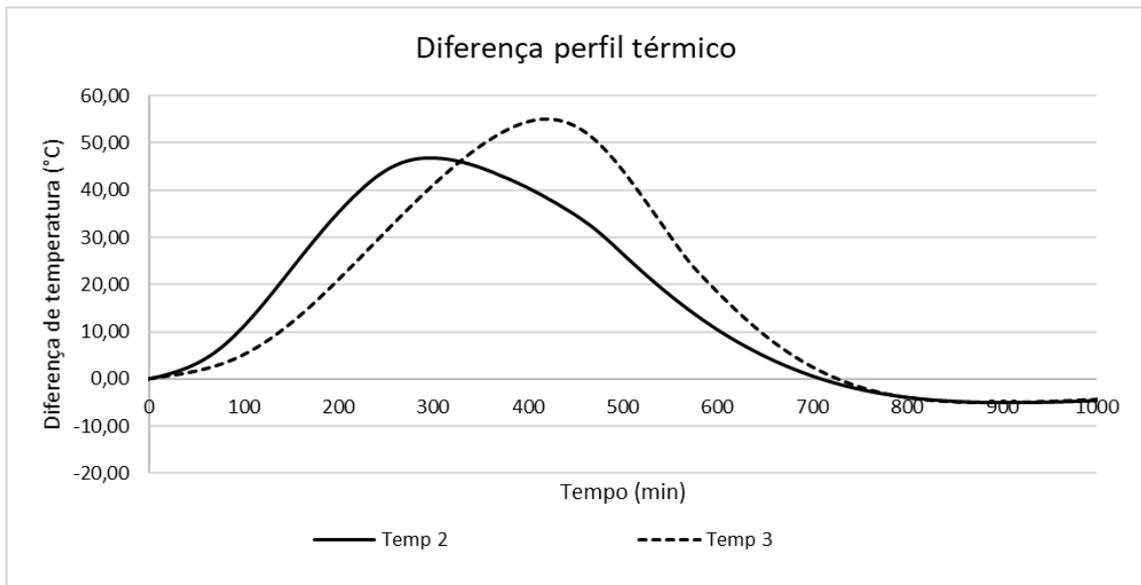


Figura 4.16 - Diferença entre o perfil térmico da simulação não considerando o valor de  $\delta$  pela simulação considerando esse valor.

Pode-se perceber no gráfico da Figura 4.17, que as taxas verificadas ao longo da camada de trabalho do fundo são bem menores que a aplicada na superfície. Isso indica que uma determinada região está em um estado térmico, já com algumas fases transformadas e outras regiões ainda não transformaram. Reforçando a necessidade de uma curva de aquecimento que atenda esses requisitos térmicos.

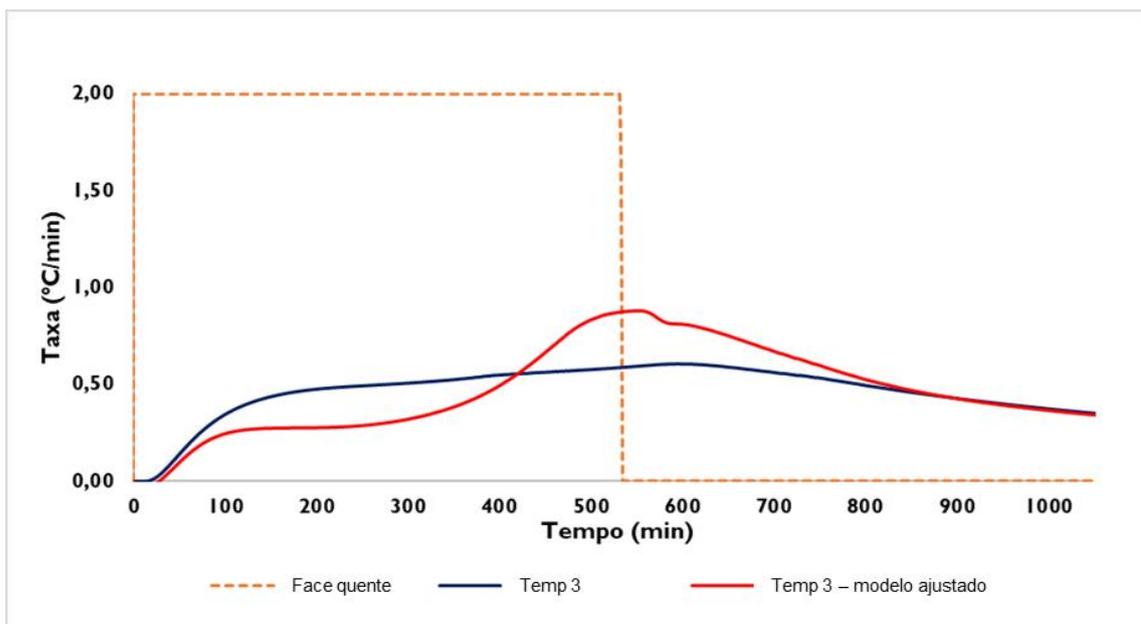


Figura 4.17 - Taxa de pré-aquecimento das faces quente e fria da camada de trabalho (fundo) da panela.

#### 4.5 Consumo de energia

Além do perfil térmico, outro ponto que merece destaque é o consumo de energia para promover o pré-aquecimento das panelas de aciaria.

Definir as condições para garantir eficiência energética em uma aciaria requer elevado conhecimento e controle do processo. Uma maior previsibilidade na programação do pré-aquecimento de panelas de aciaria, é fundamental na redução do consumo energético. Reduzir o consumo de combustível ajuda a minimizar os impactos ambientais, visto que a maioria dos combustíveis utilizados liberam gases do efeito estufa na sua combustão. Esta relação também interfere diretamente na produtividade da planta, visto que uma panela parada por mais tempo na estação de aquecimento é um vaso a menos para operação. O pré-aquecimento bem programado e bem executado, minimiza possíveis danos ao refratário, reduzindo a necessidade de paradas para manutenção. Além disso, contribui para melhor estabilidade no processo e menor perdas térmicas do aço.

Na Tabela 4.1, pode-se observar que considerando uma energia para transformar o material, o consumo de combustível é maior, 1,8% superior para o caso do modelo ajustado. Isso aumenta a previsibilidade dos modelos existentes, servindo de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão e planejamento de produção.

Tabela 4.1 - A energia total para pré-aquecer a panela

	Sem	Com
Energia Refratário (MJ)	56.118	57.168
Energia Refratário (kcal)	13.412.571	13.663.507
Vazão GN (Nm <sup>3</sup> )	1.459	1.486
Vazão GN (Nm <sup>3</sup> /h)	88	89
Vazão BOF (Nm <sup>3</sup> )	6.706	6.832
Vazão BOF (Nm <sup>3</sup> /h)	402	410
Energia Chama (kcal)	223.543	227.725
Vazão GN (Nm <sup>3</sup> )	24	25
Vazão GN (Nm <sup>3</sup> /h)	1	1
Vazão BOF (Nm <sup>3</sup> )	112	114
Vazão BOF (Nm <sup>3</sup> /h)	7	7
Diferença do consumo energético por pré-aquecimento, ao considerar o valor da taxa de geração de energia por unidade de volume		1,8%

Se tratando de concretos refratários, esse controle deve ser ainda mais rigoroso, pois irão sofrer mais transformações, por exemplo evaporação de água livre e decomposição dos hidratos, além disso, irão adquirir boa parte das propriedades requeridas para o processo durante a etapa de pré-aquecimento.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, a metodologia aplicada avalia a etapa de pré-aquecimento de refratários de forma holística. Com o método proposto foi possível determinar a taxa de geração de energia por unidade de volume de materiais refratários que apresentam reações durante a etapa de aquecimento, consumindo ou liberando energia. Para isso foi desenvolvido um procedimento para quantificar a taxa de energia por unidade de volume de um concreto refratário, foi também analisado o comportamento desse material no DSC (uma técnica normatizada e usualmente utilizada para demais materiais), além da verificação do procedimento e simulação de uma panela de aciaria, considerando essa taxa de energia, via elementos finitos.

O modelo em elementos finitos da amostra cilíndrica, considerando o  $\dot{s}$  calculado via resultados do forno mufla, apresentou bons resultados tendo uma diferença entre o valor de temperatura experimental e o simulado de menos de 2% para o primeiro aquecimento e menos de 1% para o segundo aquecimento.

Já o modelo, via MEF, considerando a taxa de geração de energia via DSC, não foi satisfatória. Isso ocorreu, provavelmente, devido à limitação da quantidade de massa utilizada no ensaio, mostrando que essa técnica não é a mais adequada para produzir resultados representativos para esse material.

Na simulação térmica da panela via MEF, verificou-se que considerando um valor de  $\dot{s}$ , altera o perfil de aquecimento do revestimento. Considerar esse parâmetro na panela permite uma maior aproximação do modelo com os casos reais, visto que no pré-aquecimento desses materiais existe perda de massa e consequente consumo de energia para transformá-los. A informação do perfil térmico ao longo do revestimento e consumo de energia / combustível é muito importante para a programação da curva de pré-aquecimento. Isso traz uma maior previsibilidade no planejamento de produção, tanto quanto do consumo de combustível / energia para o aquecimento, como também de programação da rampa de pré-aquecimento. Possibilita também a adição de alguns patamares para homogeneização da temperatura, ou as vezes, taxas diferentes em momentos distintos do pré-aquecimento.

Além disso, tais análises podem direcionar o desenvolvimento de materiais que reduzam o consumo de energia durante o aquecimento, mostrando as vantagens ambientais e sociais desse estudo.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Aprimoramento do procedimento de identificação e quantificação da taxa de energia por unidade de volume, explorando outras rampas de aquecimento e avaliando o comportamento dos materiais nesses diferentes cenários;
- Realizar o procedimento desenvolvido neste trabalho em outros materiais refratários e outros modelos de pré-aquecimento;
- Novos experimentos com concretos modelos para identificação das transformações e reações do DSC.



## 7 REFERÊNCIAS

- [1] Gorni, A. A., A Siderurgia e a Indústria 4.0, *Industrial Heating*, pp. 28–29, 2018. Disponível em: [http://www.gorni.eng.br/Gorni\\_IH\\_Abr2018.pdf](http://www.gorni.eng.br/Gorni_IH_Abr2018.pdf) (acessado em 11 de abr. 2022).
- [2] Tropia, C., Silva, P. P., Dias, A., Indústria 4.0: uma caracterização do sistema de produção. Altec 201.
- [3] Reddy, J. N., Gartling, D. K., *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics*. 2010.
- [4] Mourão, M. B. *Introducao a siderurgia*. São Paulo, 2007.
- [5] Silva, H. G, Estudo sobre o pick-up de nitrogênio após a etapa de refino primário de aços. Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.
- [6] Lima, H. A. A., Thomaz, M. M., Santos, M. F., Ramos, V. P. S., Galesi, D. F., Avaliação de tijolos sem carbono em painéis de aço. *ABM Proceedings*, 2018, pp. 1–15.
- [7] Jenkins, J., Piper, A., Proctor, J., Important Considerations for Refractory Dryouts , Startups & Shutdowns. *Sulfur Recover. Symp. Vail, CO.*, pp. 1–15, 2011.
- [8] Christ, F. S., Melhorias no aquecimento de painéis aço de uma aciaria elétrica. UFRGS, 2001.
- [9] Drozd-Rys, M., Harmuth, H., Rossler, R., Simulation of the steel ladle preheating process. *Unitecr 2013*, pp. 839–844, 2014.
- [10] Santos, M. F. *et al.*, Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses, *Ceramics International*, vol. 44, no. 11, pp. 12831–12840, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.092.
- [11] Luz, A. P., Moreira, M. H., Braulio, M. A. L., Parr, C., Pandolfelli, V. C., Drying behavior of dense refractory ceramic castables. Part 1 – General aspects and experimental techniques used to assess water removal, *Ceramics International*, vol. 47, no. 16, pp. 22246–22268, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.05.022.
- [12] Schifman, J., The Entire History of Steel Leading refractory technology. *Popular Mechanics*, 2020. Disponível em:

- <https://www.popularmechanics.com/technology/infrastructure/a20722505/history-of-steel/> (acessado em 11 de abr. 2022).
- [13] Sugita, K., Historical Overview of Refractory Technology in the Steel Industry. Nippon Steel thechnical report, Japan, 2008.
- [14] Estadão, Bem-vindos à quarta revolução industrial, 2019. Disponível em: <http://patrocinados.estadao.com.br/mundodigital/ola-mundo/> (acessado em 11 de abr. 2022).
- [15] Kagermann, Wahlster, H., W., Helbig, J., Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Frankfurt, 2013. Disponível em: <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf> (acessado em 11 de abr. 2022).
- [16] Shipp, S. S. *et al.*, Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing. Nayanee Gupta Bhavya Lal Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing, Alexandria, 2012. Disponível em: [https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/IDA-STPI-report-on-Global-Emerging-Trends-in-Adv-Mfr-P-4603\\_Final2-1.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/IDA-STPI-report-on-Global-Emerging-Trends-in-Adv-Mfr-P-4603_Final2-1.pdf) (acessado em 11 de abr. 2022).
- [17] DIAS, Gabriel Martins. O que é Indústria 4.0?. Doutor IoT, São Paulo, 5 de abr. de 2022. Disponível em: <https://www.doutoriot.com.br/negocios/industria-40/o-que-e/>. Acesso em: 11 de abr. de 2022.
- [18] Carvalho, P. S. L., Mesquita, P. P. D., Araújo, E. D. G., Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética e competitividade. *BNDES Setorial*, vol. 41, pp. 181–236, 2016.
- [19] Mesquita, P. F. R., Souza, T., Lamez, F., Villegas, T., Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados - Segmento cadeia siderúrgica, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/Produto%205%20->

- %20Relatorio%20da%20cadeia%20sider%C3%BArgica.pdf. Acesso em: 11 de abr. de 2022.
- [20] SEEG, “Emissões por atividade econômica - Sankey,” 2022. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/sankey> (Acesso em: 02 de fev. de 2022).
- [21] SEEG, “Emissões por atividade econômica - Gráfico,” 2022. <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/processos-industriais> (Acesso em: 02 de fev. de 2022)..
- [22] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2017. Brasília, 2017. doi: 620.9:553.04(81).
- [23] World Steel Association, World Steel in Figures 2021, vol. 2020, p. 2021, 2021, [Online]. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/world-steel-in-figures-2021.html>. (Acesso em: 02 de fev. de 2022).
- [24] D. E. Sustentabilidade, “Sustentabilidade 2020,” 2020. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/index.html> (Acesso em 11 de abr. de 2022)
- [25] Mordon Intelligence, Refractories market - Growth, COVID-19 impact, and forecasts (2022 - 2027). Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/refractories-market> (Acesso em: 11 de abr. de 2022).
- [26] Kirschen, M., Badr, K., Jurgen, C., Drescher, A., Intelligent refractory systems : A cost-effective method to reduce energy consumption and CO2. Stahl und Eisen. Vol. 129. ISSN 0340-4803. 2009.
- [27] M. F. Santos, E. Y. Sako, and V. C. Pandolfelli, Análise numérica e in-situ de revestimentos refratários sem carbono para redução no consumo de energia em painéis de aço. ABM proceeding, 2019.
- [28] Pereira Netto, F., Stoco, B. N., Souza, G. N., Lima, H. A. A., Ramos, V. P. de S., Galesi, D. F., Revestimento De Trabalho Monolítico E Carbon Free Em Painéis De Aço Da Ternium Brasil – Pionerismo No Brasil E Vantagens. *ABM Proceedings*, 2020, pp. 729–738, doi: 10.5151/2594-5300-33785.

- [29] Callister, W. J., Rethwisch, D. G., *Ciência e engenharia dos materiais - Uma introdução*, 8ª Edição. 2012.
- [30] Hasanbeigi, A., Price, L. K., McKane, A. T., The State – of-the-Art Clean Technologies ( SOACT ) for Steelmaking Handbook. American Iron and Steel Institute, Berkeley, 2010. Disponível em:  
[http://www.gcpcenvi.nic.in/PDF/State\\_of\\_the\\_Art\\_Steelmaking\\_Clean\\_Technologies-APPCDC-200712.pdf](http://www.gcpcenvi.nic.in/PDF/State_of_the_Art_Steelmaking_Clean_Technologies-APPCDC-200712.pdf) (Acesso em: 11 de abr. de 2022).
- [31] Santos, M. F., Análise térmica e energética do revestimento refratário de painéis de aço via modelos computacionais. Universidade Federal de São Carlos, 2018.
- [32] Arantes, L. F. M., Martins, R. G., Ribeiro, V. A. P., Wiermann, A., Ferreira, W. R., Modelagem Matemática Do Processo De Secagem E Aquecimento De Painéis De Aço. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, vol. 8, pp. 160–167, 2011, doi: 10.4322/tmm.2011.025.
- [33] Santos, A. H. M., Simões, A. A., Martins, A. R. S., Viana, A. N. C., *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações*. Itajubá, 2006.
- [34] Garbers-Craig, A. M., How cool are refractory materials?. *The journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, volume 108, 2008.
- [35] Ewais, E. M. M., Carbon based refractories. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, vol. 112, pp. 517–532, 2004, doi: 10.2109/jcersj.112.517.
- [36] Brosnan, D. A., Robinson, G. C., *Introduction to Drying of Ceramics*. Westerville, Ohio: The American Ceramic Society, 2003.
- [37] Salomão, R., Bittencourt, L. R. M., Pandolfelli, V. C., Aditivos de secagem para concretos refratários: pó de alumínio e fibras poliméricas. *Cerâmica*, vol. 54, pp. 259–267, 2008, doi: 10.1590/s0366-69132008000200017.
- [38] Vivaldini, D. O., Engenharia de microestrutura de cerâmicas porosas. UFSCAR, 2013.
- [39] Çengel, *Termodinâmica*, 7ª edição. 2013.
- [40] Ramal Jr, F. T., Salomão, R., Pandolfelli, V. C., Comportamento de secagem e explosão de concretos refratários com diferentes teores de água. *Cerâmica*, vol. 50, pp. 197–201, 2004, doi: 10.1590/s0366-

69132004000300005.

- [41] Cengel Y. A., *Mass and Heat Transfer - A Practical Approach*. Fifth edit. 2017.
- [42] ALCOA, High aluminate cements and chemical binders. Frankfurt, 1996.
- [43] Flammersheim, H. J., *Differential Scanning Calorimetry*, 2nd ed. New York, 2003.
- [44] Haines, P. J., *Thermal Methods of Analysis*. Dordrecht, 1995.
- [45] Barakat, A. J., Direct observation of the moisture distribution in heated calcium alumina- and hydratable alumina-bonded castables during rst-drying , using NMR imaging, Technische Universiteit Eindhoven, 2019.
- [46] Litwinek, E., Madej, D., Structure, microstructure and thermal stability characterizations of  $C_3AH_6$  synthesized from different precursors through hydration. *Journal of thermal analusis Calorimetry*, vol. 139, pp. 1693–1706, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08656-0.
- [47] Baugh, S. F., The Thermal Degradation of Polyethylene Glycol and Polyvinyl Alcohol, Common Binders for Aluminum Oxide Ceramics, Colorado School of Mines, 1991.
- [48] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., *Heat and Mass Transfer*. 2011.
- [49] Oliveira, I. R., Stuart, A. R., Pileggi, R. G., Pandolfelli, V. C., *Dispersão e Empacotamento de Partículas - Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*. São Paulo, 2000.
- [50] Bezerra, B. P., “Otimização do processo de secagem de concretos refratários,” UFSCar, 2020.
- [51] Chen, Z., Liu, K., Elgallad, E., Breton, F., Chen, X. G., Differential scanning calorimetry fingerprints of various heat-treatment tempers of different aluminum alloys. *Metals (Basel)*, vol. 10, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/met10060763.
- [52] Turetta, L. F., Costa, E. F. J., da Costa, A. O. S., Estudo Da Influência Do Excesso De Ar Na Composição De Saída De Fornalha Siderúrgica Real Empregando Conceitos Termodinâmicos E Modelagem Matemática. *Engevista*, vol. 19, p. 109, 2017, doi: 10.22409/engevista.v19i1.804.
- [53] Gasmig. Disponível em:

<http://www.gasmig.com.br/GasNatural/Paginas/default.aspx> (Acesso em: 11 de abr. de 2022).

- [54] Luz, A. P., Braulio, M. A. L., Pandolfelli, V. C., *Refractory Castable Engineering*. 1. ed. Alemanha: Göller Verlag GmbH, 2015.
- [55] International Organization for Standardization, ISO 11357-1:2009 - Differential scanning calorimetry (DSC), 2009. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:11357:-1:ed-2:v1:em> (Acesso em: 11 de abr. de 2022).
- [56] Das, S. K., Mitra, A., das Poddar, P. K., Thermal analysis of hydrated calcium aluminates. *Journal of thermal analysis*, vol. 47, pp. 765–774, 1996.