

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

**ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA
DO REVESTIMENTO REFRAATÓRIO DE PAINÉIS DE AÇO
VIA MODELOS COMPUTACIONAIS**

Matheus Felipe dos Santos

São Carlos
2018

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

ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA
DO REVESTIMENTO REFRAATÓRIO DE PAINÉIS DE AÇO
VIA MODELOS COMPUTACIONAIS

Matheus Felipe dos Santos

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

Orientador: Dr. Victor Carlos Pandolfelli

Co-orientador: Dr. Ricardo Afonso Angélico

Financiamento: Saint Gobain

São Carlos

2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que, durante esta jornada, compartilharam seu tempo para estabelecer uma conexão. Todos foram fundamentais para construir o conhecimento e o caráter que tenho hoje. Em especial à minha família, cujo precioso contato tem grande responsabilidade pela pessoa que me tornei.

VITAE DO CANDIDATO

Bacharel em Engenharia de Materiais pela UFSCar (2015)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

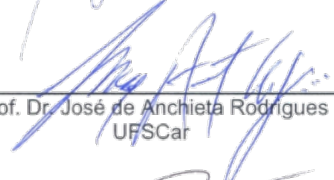
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Matheus Felipe dos Santos, realizada em 30/07/2018:



Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli
UFSCar



Prof. Dr. José de Anchieta Rodrigues
UFSCar



Prof. Dr. Madnilson Peter de Souza Ramos
Saint-Gobain

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Prof. Victor C. Pandolfelli e Prof. Ricardo A. Angélico, pelo tempo dedicado na nossa parceria, das muitas conversas, reuniões e discussões. Em especial ao Prof. Victor pelas oportunidades e confiança e ao Ricardo pela amizade e plena disposição. Posso afirmar que parte de quem eu sou hoje, é total contribuição deles.

À Maria Gabriela G. Campos, ao Murilo H. Moreira e ao André G. Ribeiro que mesmo durante a graduação, buscaram novas atividades e contribuíram brilhantemente nesse trabalho. Em especial, agradeço a Gabriela, cujo interesse e vontade a fizeram meu braço direito, pelo suporte nos momentos difíceis e pela empolgação a cada conquista.

Aos meus colegas de grupo Dra. Ana Paula da Luz, Dra. Vânia R. Salvini, Guilherme G. Morbioli, Tiago dos Santos Jr, pela ajuda no entendimento dos materiais refratários e como estudá-los.

Aos meus pais, que em nenhum momento deixaram de apoiar meus sonhos, minhas ideias de mundo, minhas definições de amor, amizade, respeito e ética. Por acreditarem e suportarem minhas decisões, me levando aos caminhos certos mesmo sem antes conhecê-los.

À minha família, que apesar de pequena sempre esteve presente, à minha avó Léo e minha tia Lúcia. Em especial ao meu irmão Rafael, que tem sido inspiração e um porto seguro para qualquer momento. Não cabe aqui, palavras para descrever nosso sincronismo e irmandade.

Aos meus amigos, todos, que de alguma forma construíram comigo parte de quem eu sou, que foram família, orientador, irmão, médico, psicólogo, etc. quando estes não estavam ali. Em especial a Laura, que trouxe a São Carlos uma hospitalidade e uma segurança que eu não imaginava encontrar, não há dúvidas que parte da minha força vem também dela. Ao Victor, Yuri, Dênis, Pedro, e tantos outros que fizeram desse tempo memorável.

À Saint-Gobain pelo suporte financeiro e motivacional, em especial ao Eric Y. Sako, Vladnilson Peter S. Ramos e Douglas F. Galesi, cuja paixão pelos refratários possibilitou uma interação tão próxima e produtiva.

Ao PPGCEM, ao DEMa e à UFSCar, instituições sólidas e renomadas, que sempre ofereceram apoio, fomentaram oportunidades e espaço para criação. A cada dia nesses espaços fui inundado de inspiração e ideais modernos.

RESUMO

O processo de refino secundário em aciarias consome grandes quantidades de energia devido à necessidade de controlar com precisão a composição e a temperatura do aço líquido, visto que esta é a última etapa do processo siderúrgico que permite tais ajustes em panelas de aço. A redução do consumo energético desses equipamentos e a importância das panelas na produção do aço são destacados, e nesse estudo investiga-se os efeitos de características do revestimento refratário no estado térmico do processo. Nesse contexto, ferramentas computacionais podem ser desenvolvidas e aplicadas na simulação da transferência de calor para panelas de forma a prever cenários e configurações que reduzam o consumo de energia. Para isso, adota-se a modelagem do processo em elementos finitos (MEF) – conduzidas no software Abaqus – para simular as três principais etapas do processo (aquecimento, esperas vazia e refino secundário). Afim de verificar sua representatividade, o modelo desenvolvido foi comparado com medidas experimentais coletadas em campo, mostrando a aproximação entre as temperaturas simuladas e as experimentais. O uso dos isolamentos térmicos entre a carcaça e a camada permanente impacta principalmente na redução das temperaturas de carcaça. A camada permanente pode ser substituída por materiais mais nobres ou reduzida para aumento de capacidade produtiva mantendo-se ganhos energéticos. Os sistemas mais recomendados para uso na camada de trabalho são os tijolos com baixo teor ou nenhum carbono, mas para resultados ainda superiores outros materiais precisam ser estudados para tal aplicação. Os modelos computacionais utilizados podem indicar possíveis caminhos no desenvolvimento de novos materiais e soluções para a indústria siderúrgica e de refratários. No geral, as soluções dependem do objetivo de cada processo, mas algumas tendências mostram que aumentar a eficiência energética das panelas é possível, considerando materiais refratários desenvolvidos para reduzir as perdas térmicas.

Palavras-chave: Panela de Aço; Refratário; Simulação; Energia; Perdas Térmicas

ABSTRACT

THERMAL AND ENERGY ANALYSIS ON STEEL LADLE REFRACTORY LINING VIA COMPUTATIONAL SIMULATIONS

The secondary metallurgy is an energy-intensive step in the steelmaking process that requires an accurate adjustment of the composition and temperature of the molten metal during the ladle refining. In this context, the steel ladle lining plays an important role on the energy consumption of the ladle processes, as the refractory thermal properties are strictly related to the ladle ability to keep constant the molten metal temperature. Aiming to improve the energy efficiency, reducing both costs and the environmental impacts, a transient numerical analysis of the ladle processes was developed using temperature dependent refractory properties. The present work proposes a holistic view of the ladle operational cycle to help the refractory design of such installations, according to their saving energy capability. The finite element modeling (FEM) was developed using a commercial software (Abaqus) to simulate the ladle cycle (pre-heating, holding and waiting steps). The temperatures predicted by the model were compared with in situ temperature data from a steel ladle to validate the model and the comparison showed good agreement between those temperatures. The results point out how the configurations with lining insulation reduces the energy consumption, keeping the molten steel temperatures higher, although it is mostly effective on reducing the shell temperatures. The safety lining could be replaced by more advanced materials with suitable properties or had its thickness reduced for expanding the working capacity and also saving energy. The refractories for the working layer application should have low or none carbon content and advanced materials for higher savings should be investigated. Computational models could indicate possible material designs and configuration solutions for the steel and refractory industries. In general, these solutions depend on each steel plant requirements, but some trends can be highlighted for improving the steel ladle energy efficiency, considering the refractory design for avoiding heat losses.

Keywords: Steel Ladle; Refractory; Simulation; Energy; Heat Losses

PUBLICAÇÕES

Trabalhos completos publicados em anais de congresso:

SANTOS, M. F., MOREIRA, M. H., CAMPOS, M. G. G., PELISSARI, P. I. B. G. B., ANGÉLICO, R. A., SAKO, E. Y., PANDOLFELLI, V. C., Steel ladle energy saving by refractory lining design, *UNITECR*, Santiago, Chile; 2017

Trabalhos publicados em revistas internacionais:

SANTOS, M. F., MOREIRA, M. H., CAMPOS, M. G. G., PELISSARI, P. I. B. G. B., ANGÉLICO, R. A., SAKO, E. Y., SINNEMA, S., PANDOLFELLI, V. C., Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses, *Ceramics International*, vol. 44, pp. 12831-12840, 2018.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
ÍNDICE DE ASSUNTOS.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
3 JUSTIFICATIVA.....	7
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	9
4.1 Siderurgia.....	9
4.1.1 Ciclo do aço.....	10
4.1.2 Ciclo da panela.....	12
4.2 Mecanismos de transferência de calor.....	20
4.3 Materiais refratários.....	26
4.3.1 Características e tipos de revestimento em painéis.....	27
4.3.1.1 Camada permanente e isolante.....	27
4.3.1.2 Camada de trabalho.....	29
4.3.2 Densidade.....	33
4.3.3 Condutividade térmica.....	34
4.3.4 Calor específico e difusividade térmica.....	38
4.3.5 Emissividade.....	39
4.4 Simulação em elementos finitos.....	39
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5.1 Descrição do problema.....	43
5.2 Determinação e estimativa de propriedades.....	44
5.3.1 Estimativa dos coeficientes de transferência de calor por convecção.....	44
5.3.2 Estimativa do calor específico dos refratários via simulação termodinâmica computacional.....	45
5.3 Modelos da panela de aço em elementos finitos.....	45
5.3.1 Geometrias.....	45

5.3.2	Materiais.....	48
5.3.3	Interações, condições iniciais e de contorno.....	49
5.3.4	Ciclo da panela.....	50
5.3.5	Diagrama de resolução do problema da panela de aço.....	51
5.4	Forma de análise dos resultados.....	52
5.4.1	Experimentos	52
5.4.2	Termografia da panela	53
5.4.3	Comparação de resultados experimentais e simulados.....	54
5.4.4	Cálculo da energia transferida.....	54
5.4.5	Crítérios de análise dos experimentos.....	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
6.1	Estudo do modelo computacional e comparação com resultados experimentais (caso 1).....	57
6.2	Influência da aplicação de isolantes térmicos e estudo da espessura dessa camada no revestimento (caso 2).....	65
6.3	Estudo da influência da camada permanente e sua espessura no estado térmico do processo (caso 2).....	78
6.4	Avaliação de diferentes sistemas refratários aplicados da camada de trabalho de painéis de aço (caso 2)	82
7	CONCLUSÕES.....	89
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	APÊNDICE A.....	99
	APÊNDICE B.....	103

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 Condições de contorno para cada etapa simulada.....	50
Tabela 6.1 Comparação entre as configurações de panela nova e desgastada para diferentes espessuras de isolante.....	74
Tabela 6.2 Comparação entre os resultados obtidos para as diferentes configurações de espessura da camada permanente em relação aos critérios de interesse.....	81
Tabela 6.3 Comparação dos resultados obtidos para a comparação e análise de diferentes materiais aplicados na camada de trabalho (alumina-magnésia – AM, alumina-magnésia-carbono – AMC, concreto de alumina – CA e magnésia-alumina-carbono – MAC).....	86
Tabela 9.1 Número de Nusselt considerado para cada superfície da panela, em relação a sua geometria, temperatura e velocidade do escoamento na camada limite [35, 36].	100
Tabela 9.2 Propriedades dos materiais utilizados na modelagem da panela, quando disponível, em função da temperatura: condutividade térmica, calor específico e emissividade.....	103
Tabela 9.3 Composição, densidade e porosidade dos materiais refratários e isolantes considerados.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Ciclo de produção do aço, destacando a diferença entre as rotas integrada e semi-integrada.....	10
Figura 4.2 Esquema de uma panela de aço com a identificação de cada região do revestimento refratário e da carcaça metálica [56].	13
Figura 4.3 Visão geral do ciclo operacional da panela de aço.	16
Figura 4.4 Mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação [35].	20
Figura 4.5.A) Emissão radial das superfícies sólidas e líquidas; B) Espectro da radiação eletromagnética mostrando a faixa de comprimentos de onda para a radiação térmica (10^{-7} a 10^{-4} m); C) Interação da radiação incidente em uma superfície com a quantidade de energia emitida e refletida [35].	26
Figura 4.6 Histórico do consumo específico médio de refratário por tonelada de aço [57].	30
Figura 4.7 Esquema representativo do método A) do fio-quente paralelo e B) do fluxo de calor transiente (laser flash) [41], [58].	37
Figura 4.8 Diagrama típico para resolução de problemas de transferência de calor em elementos finitos, adaptado de Bathe [45].	41
Figura 5.1.A) Geometria e características do revestimento de uma panela real usada para a validação experimental da ferramenta. B) Panela esquemática obtida na literatura usada para investigar os parâmetros do revestimento no consumo de energia [11].	46
Figura 5.2 Detalhes dos modelos das simulações para A) caso real (caso 1) e B) panela esquemática (caso 2).	47
Figura 5.3 Duração das etapas das simulações para o A) caso 1 e B) caso 2. 51	
Figura 5.4 Diagrama para criação e análise das configurações e casos propostos para o revestimento refratário de panelas de aço.....	52
Figura 6.1 Evolução de temperaturas para os 4 pontos na face quente da camada de trabalho e 4 pontos da carcaça durante os seis ciclos simulados,	

no caso 1. O esquema ao lado do gráfico mostra as regiões de onde foram obtidos os valores de temperatura no modelo de simulação.	58
Figura 6.2 Imagens de infravermelho das medidas de temperatura em painéis reais, realizadas em instantes distintos: A) e B) face quente na espera vazia 2, C) da parede na carcaça; e D), E) e F) da parede da carcaça durante o refino secundário.	59
Figura 6.3 Comparação dos resultados simulados com os coletados experimentalmente para a Painel A e B.....	61
Figura 6.4 Comparação entre as temperaturas médias do aço líquido no início e no fim do refino secundário.....	62
Figura 6.5 Comparação entre as temperaturas médias do aço líquido e da temperatura média da parede interna, juntamente com a variação do fluxo de calor durante o refino secundário.....	63
Figura 6.6 Comparação entre as quantidades de energia para cada ciclo da panela analisada no caso 1. Entradas e saídas de energia para cada etapa do ciclo da panela são identificadas pelas diferentes cores e números.....	64
Figura 6.7 Temperatura média do aço líquido para diferentes espessuras de isolante (Material F) no fundo e na parede para a panela nova e desgastada após 60 corridas.	67
Figura 6.8 Temperatura de carcaça para as diferentes espessuras de isolante (Material F).....	69
Figura 6.9 Perfil de temperatura para as diferentes espessuras do isolante (Material F), A) no início, e B) ao final do refino secundário na altura de 2.5 metros do revestimento.....	70
Figura 6.10 Diferença de distribuição de temperatura entre as configurações A) 21 com a de 0 mm; B) 42 e 21 mm e C) detalhe da região em análise.....	72
Figura 6.11 Energia estocada normalizada pela massa de revestimento na camada de trabalho e permanente, e quantidade de energia transferida do	

banho para o revestimento durante o refino secundário para diferentes espessuras de isolante – Material F (0 – 84 mm).....	73
Figura 6.12 Diferença de distribuição de temperatura para a configuração que utiliza o isolante entre a camada de trabalho e a permanente para o primeiro ciclo – ciclo 1.	76
Figura 6.13 Diferença de distribuição de temperatura para a configuração utiliza o isolante na face quente e padrão de 21 mm para o primeiro ciclo.	77
Figura 6.14 Taxa de perda de energia para diferentes espessuras de camada permanente para o caso 2.....	79
Figura 6.15 Variação da capacidade produtiva da panela para diferentes espessuras de camada permanente. O aumento produtivo é significativo para cada milímetro reduzido.	80
Figura 6.16 Temperatura média do aço no final do refino secundário para cada configuração analisada, quando altera-se o refratário da camada de trabalho (AM – alumina-magnésia, CA – concreto aluminoso, MAC – magnésia-alumina-carbono e AMC – alumina-magnésia-carbono) e considera-se a presença de uma camada isolante.....	83
Figura 6.17 Comparação entre as propriedades térmicas dos materiais considerados para a camada de trabalho (linha de metal) do revestimento de painéis de aço.	84
Figura 6.18 Distribuição de temperatura para as configurações: alumina-magnésia (AM), alumina-magnésia-carbono (AMC), magnésia-alumina-carbono (MAC) e concreto de alta-alumina (CA). Os detalhes A e B mostram	

as temperaturas próximas da face quente (30 mm), onde nota-se valores superiores para as configurações com isolamento térmico (detalhe B).....85

Figura 9.1 Coeficiente de transferência de calor calculado para as superfícies internas e externas (fundo e parede), nas etapas em que a panela é resfriada pelo ar.....101

Figura 9.2 Coeficiente de transferência de calor calculado para as superfícies internas (fundo e parede) para etapa de refino secundário, quando a panela transporta o aço líquido.....101

1 INTRODUÇÃO

O domínio e controle das fontes energéticas foram grandes responsáveis pela evolução da sociedade. Um acontecimento histórico que ilustra com clareza essa relação é a Revolução Industrial. Foi nesse momento que o homem pôde converter diversas fontes naturais de recursos nos mais variados tipos de energia (mecânica, sonora, térmica, etc) de maneira controlada, ainda que de forma pouco eficiente. O desenvolvimento tecnológico associado aos anos pós-Revolução transformou a sociedade, possibilitando um avanço grandioso no acesso de recursos e na expansão da espécie humana. Contudo, nem todos os resultados dessas transformações foram positivos. As principais fontes energéticas que ancoraram esses avanços são de origem fóssil como o carvão, o petróleo e o gás natural [1, 2]. Sendo que, o uso massivo desses combustíveis causa grandes impactos ambientais e, há vários anos, esse assunto é reportado por pesquisadores e ocupa pauta nas agendas políticas, principalmente devido a ainda crescente demanda energética [3]. Logo, desafios como esse tornam-se cruciais para o desenvolvimento da sociedade e, portanto, devem ser estudados e soluções devem ser propostas e implementadas.

Analisando essa questão, pode-se diminuir os impactos associados ao consumo energético buscando novas fontes de energia [2, 4] que degradem menos o ambiente e que sejam ilimitada (que são restrições dos combustíveis fósseis); e/ou pode-se reduzir o consumo atual de energia [5 –7], melhorando a eficiência das atividades que consomem esse recurso, diminuindo a quantidade de energia necessária para a realização de um mesmo processo. A partir disso, ações devem ser tomadas na escala local e individual, mas prioritariamente pelos grandes consumidores de energia, atualmente representado pelo setor industrial, o qual utiliza aproximadamente 50% de toda a energia produzida no mundo [4]. Tal setor, tem encontrado soluções a esses desafios prioritariamente por meio do uso de novas tecnologias e materiais para conservação de energia [5], aumentando a eficiência dos seus processos, reduzindo os custos e impactos ambientais.

Grande parte da energia consumida nos processos industriais está relacionada a geração de calor e diversos estudos relacionam a reutilização e a

conservação de calor como elemento fundamental para a elevação da eficiência energética de tais processos [8], principalmente, quando temperaturas elevadas são exigidas ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$), que é o caso da indústria siderúrgica, do cimento, de vidro, da petroquímica, entre outras. Nesses casos, os materiais refratários são fundamentais para o estudo térmico e energético de cada processo, assim como o entendimento dos fenômenos físicos e químicos aos quais eles estão submetidos.

Na siderurgia, o ferro é extraído do minério em temperatura superior a $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, por meio da redução do óxido de ferro com carbono, proveniente do carvão natural, obtendo-se ferro líquido e rico em carbono. Logo, todo o revestimento dos equipamentos que processam esse metal deve ser constituído de materiais refratários, já que estes são os únicos que garantem a integridade e eficiência do processo. Adicionalmente, o revestimento refratário dos equipamentos siderúrgicos também funciona como uma barreira térmica para conservar a energia térmica do metal até o momento em que é desejada sua solidificação, evitando paradas para reaquecer o banho e os gastos energéticos adicionais durante o processamento.

Nesse contexto, diversos autores apresentaram estudos cujo objetivo central foi quantificar e entender a transferência de calor nesses equipamentos siderúrgicos [9–24], buscando soluções tecnológicas em energia. Por exemplo, a panela de aço vem sendo intensamente investigada, devido à importância conferida a esse equipamento com os últimos avanços na produção de aços especiais. Tais funções, tornou-se fundamental o rigoroso controle térmico e químico do aço nas panelas, garantindo a alta qualidade do produto final e alta produtividade necessária às usinas siderúrgicas.

Contudo, buscando viabilizar tais estudos, faz-se necessário desenvolver uma ferramenta que permita a simulação dos processos da panela e auxilie no projeto dos refratários de panelas, visto que a experimentação desses equipamentos é custosa e de grande dificuldade. Modelos computacionais baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) são hoje uma das formas mais acessíveis e aplicadas na análise de problemas térmicos. É importante ressaltar que esses devem estar alinhados com medidas corretas de

propriedades dos materiais e dos parâmetros do processo. Embora muitos avanços já tenham sido realizados na panela de aço, ainda existe um enorme potencial para novas soluções em materiais, tendo como objetivo reduzir o consumo energético e otimizar o processo. Soluções essas que podem ser investigadas a um menor custo a partir de modelos computacionais, como o apresentado nesse trabalho.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos principais:

- Por meio da simulação computacional, avançar na compreensão do comportamento térmico das painéis de aço, visando encontrar soluções que otimizem o equipamento e reduzam o consumo energético e, conseqüentemente, os impactos ambientais da produção do aço (consumo de insumos reduzidos).
- Desenvolver uma ferramenta para análise térmica e energética de painéis de aço, para permitir a comparação entre o projeto de diversos revestimentos refratários quanto ao consumo de energia e de materiais, a capacidade produtiva e a condição térmica do revestimento.

Já os objetivos específicos do trabalho procuram avaliar a eficiência térmica e energética do processo considerando:

- i. o efeito da camada de isolante térmico no revestimento das painéis, bem como sua espessura e localização;
- ii. o efeito da espessura da camada permanente;
- iii. o efeito de diferentes refratários aplicados na camada de trabalho do revestimento quanto a sua classe, com a presença ou não de uma camada isolante térmica;

de onde busca-se destacar as configurações otimizadas.

3 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda energética para atender às necessidades industriais exige soluções cada vez mais complexas (novas fontes e conservação de energia). Logo, reduzir o consumo e evitar a dependência dos combustíveis fósseis pode resultar em melhorias ambientalmente favoráveis, bem como na redução do custo e aumento da produtividade dos equipamentos de alta temperatura, como a panela de aço. Nesse contexto, justifica-se desenvolver uma ferramenta para análise térmica e energética das panelas de aço buscando soluções para estes desafios, visto que essa abordagem tem mostrado elevado potencial, ainda mais considerando o avanço das tecnologias de refratários e de isolamento.

Além da panela de aço, a modelagem adotada nesse estudo pode ser estendida a outros equipamentos que consideram a aplicação de materiais refratários e do processamento metalúrgico.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Siderurgia

As indústrias siderúrgicas consomem anualmente enormes quantidades de energia devido ao seu grande volume produtivo. Atualmente, a produção mundial é de 1,6 bilhão de toneladas por ano [25] e essa elevada atividade está relacionada a uma tecnologia metalúrgica consolidada, na qual processa-se continuamente o metal líquido extraído na redução do minério de ferro ou reciclado em aciarias elétricas até sua solidificação nas características finais esperadas. Assim, é desejado dos equipamentos siderúrgicos que, durante todo o processamento, o metal líquido mantenha-se em temperaturas controladas afim de assegurar a continuidade do processo e a qualidade do produto final.

Apesar do elevado consumo energético, as usinas siderúrgicas ainda são muito mais eficientes nesse aspecto, quando comparadas com outras indústrias metalúrgicas, visto que a quantidade de energia por tonelada de aço produzida é menor que a razão do alumínio ou zinco, por exemplo [26]. Ainda assim, o processo de produção do aço oferece muitas oportunidades para otimização, principalmente nas áreas de conservação de energia. Tratando-se de um processo em alta temperatura, o gasto energético para a produção de calor é majoritário e bastante elevado (gás natural, eletricidade, carvão, etc.). Portanto, minimizar esse consumo é fundamental e isto pode ser realizado aumentando-se a eficiência do revestimento refratário dos equipamentos que processam o aço [17].

Nesse contexto, diversos autores têm mostrado alternativas em materiais e soluções para reduzir o consumo de energia por meio do uso de refratários [27–30] na siderurgia. O presente trabalho procura abordar, via simulações computacionais, os principais tópicos relacionados ao uso de refratários para conservação de energia em painéis de aço. Nas seções a seguir serão apresentados parte desses estudos e outros conceitos relevantes.

4.1.1 Ciclo do aço

O ciclo de produção do aço é classificado em duas rotas principais, como mostrado na Figura 4.1. A rota integrada considera o ciclo desde a extração do ferro no processo de redução, o refino primário e secundário nas aciarias e o lingotamento. Já a rota semi-integrada não apresenta a etapa de redução (obtenção do ferro a partir do minério) e a matéria-prima inicial dessas aciarias são majoritariamente sucatas. Cada rota difere no tipo de reator utilizado no refino primário: convertedor LD e forno elétrico à arco (FEA), respectivamente, rota integrada e semi-integrada. Mais detalhes das quatro principais etapas da produção do aço são apresentados a seguir:

Redução – consiste na etapa de extração do ferro a partir da redução do seu óxido metálico (Fe_2O_3 ou Fe_3O_4). Essa transformação ocorre dentro do alto-forno, no qual são adicionados de forma contínua pelo topo do reator o minério de ferro e o coque (material carbonáceo), e por ventaneiras instaladas na base do forno a mistura de gás oxigênio e nitrogênio é insuflada em alta temperatura. O oxigênio queima o carbono presente no coque produzindo CO_2 , que se liga a mais carbonos e é reduzido a CO, em temperaturas próximas a $900\text{ }^\circ\text{C}$. Com isso, a reação de redução entre o óxido de ferro e o CO é promovida, resultando no ferro líquido rico em carbono ($> 4\text{ \%p}$: ferro-gusa), que é vazado por canais

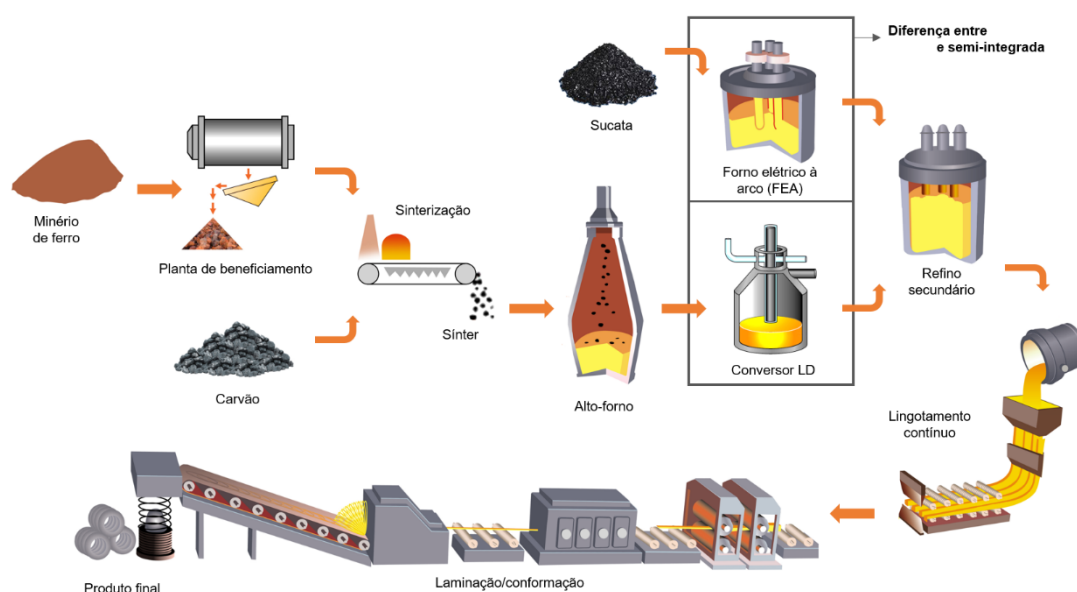


Figura 4.1 Ciclo de produção do aço, destacando a diferença entre as rotas integrada e semi-integrada.

na base do alto-forno. A partir disso, o ferro-gusa é transportado em carros torpedos até a aciaria. Vale ressaltar que, do momento em que o ferro líquido é obtido, deseja-se evitar quaisquer reaquecimentos desse material durante as próximas etapas do processo e, ainda mais, sua solidificação.

Refino primário – é a etapa na qual ocorre o refino do ferro-gusa. Esse processo é realizado para remover o excesso de carbono da liga metálica produzida, visto que as propriedades dos aços comerciais exigem quantidades inferiores a 2 %p C, em média. Na rota integrada, esse processo ocorre no conversor LD através do sopro de oxigênio por ventaneiras e lanças, que agitam o banho e oxidam o carbono em excesso, além de outros elementos como o silício, manganês e fósforo. Na rota semi-integrada, o ajuste da composição ocorre no FEA, no qual a sucata é fundida por eletrodos potentes e as impurezas são removidas, também pelo sopro de oxigênio. Durante o sopro, a temperatura do metal líquido também é ajustada, objetivando os valores desejados no lingotamento. No final desta etapa, o aço é vazado nas panelas de aço, para a realização do refino secundário.

Refino secundário – toda a etapa de refino secundário ocorre no interior das panelas de aço, independente da rota de produção. Essa etapa consiste no ajuste fino da composição química e temperatura do aço. Para tal resultado, diversas operações e técnicas são empregadas, como a remoção de impurezas pela agitação do banho (válvulas de injeção de gás), o reaquecimento por meio do forno-panela (consumo de eletrodos e energia elétrica) ou pela adição de metais como o alumínio e o silício que reagem com o oxigênio levando a formação de Al_2O_3 e SiO_2 (reações exotérmicas – aços acalmados) aquecendo o banho, a remoção de gases (degaseificador RH), entre outros. Após todos os ajustes, o aço é transferido para a estação de lingotamento e vazado no distribuidor.

Lingotamento – é a etapa na qual ocorre a solidificação do aço. Pode tanto ser realizada pelo método convencional (fundição) ou pelo método contínuo, no qual o aço é constantemente vazado nos moldes de cobre refrigerados, que dão a forma e a microestrutura desejada ao produto final [15, 16, 31].

O controle de temperatura durante as etapas descritas é fundamental para minimizar o consumo energético e garantir a qualidade do produto final, uma vez que os efeitos do correto ajuste de temperaturas antes da solidificação evitam a macro segregação, o aparecimento de defeitos superficiais e internos e melhoram o grau de limpeza do aço [32]. As perdas de temperatura não podem ser eliminadas, porém podem ser quantificadas e, quando possível, minimizadas. Ou seja, pode-se tanto evitar que haja exposição direta do metal líquido para o ambiente (devidos as perdas por mecanismos de convecção e radiação), quanto corretamente projetar o revestimento refratário de tais equipamentos, pois grande parte da energia térmica do metal é perdido para os materiais refratários. Adicionalmente, algumas etapas essenciais ao processo também reduzem a temperatura do metal líquido e não podem ser evitadas, como a injeção de gases para homogeneização ou a desgaseificação durante o refino secundário na panela.

Visto a importância do controle preciso das temperaturas durante o processamento do aço, pode-se destacar os estudos relacionados a panela de aço, pois neste equipamento ocorre a última etapa do processo que permite realizar ajustes de temperatura e composição do metal.

4.1.2 Ciclo da panela

4.1.2.1 Panela de aço

As panelas de aço modernas apresentam função principal muito mais complexa que simplesmente transportar o metal líquido do conversor LD ou FEA para os distribuidores. Nas últimas décadas, as panelas se tornaram reatores multifuncionais para atender à necessidade de produzir aços especiais, que exigem maior precisão e controle da temperatura e da composição do aço [31, 33]. Por esses e outros motivos que vários autores têm buscado estudar e modelar este equipamento para encontrar possíveis cenários de otimização. Aksel et al [30] listaram quatro alternativas para reduzir o consumo de energia e manter a temperatura do metal em panelas de aço: i) diminuir o tempo da etapa de refino secundário e, conseqüentemente, o tempo do aço dentro da panela; ii)

o isolamento da superfície do banho; iii) o uso de tampas durante o processamento na panela; e iv) melhorar as propriedades de isolamento do revestimento refratário. Outros autores estudaram em detalhe etapas específicas do ciclo da panela e de outras configurações de revestimento, buscando aprimorar o controle térmico do processo na panela. Uma representação esquemática desse equipamento é mostrada na Figura 4.2.

Pode-se observar que a panela apresenta geometria simples (um vaso cilíndrico), porém seu revestimento e sistema mecânico aumentam a complexidade de projeto do equipamento. Usualmente, a parede da panela é dividida em três camadas: de trabalho, permanente e metálica (carcaça). As duas primeiras são constituídas de materiais refratários e garantem a integridade térmica, mecânica e química do processo; e a carcaça metálica confere integridade estrutural e possibilita o transporte da panela. Dependendo das condições de processo e do tipo de aço produzido, as dimensões e os materiais utilizados em cada região são selecionados para atender esses requisitos.

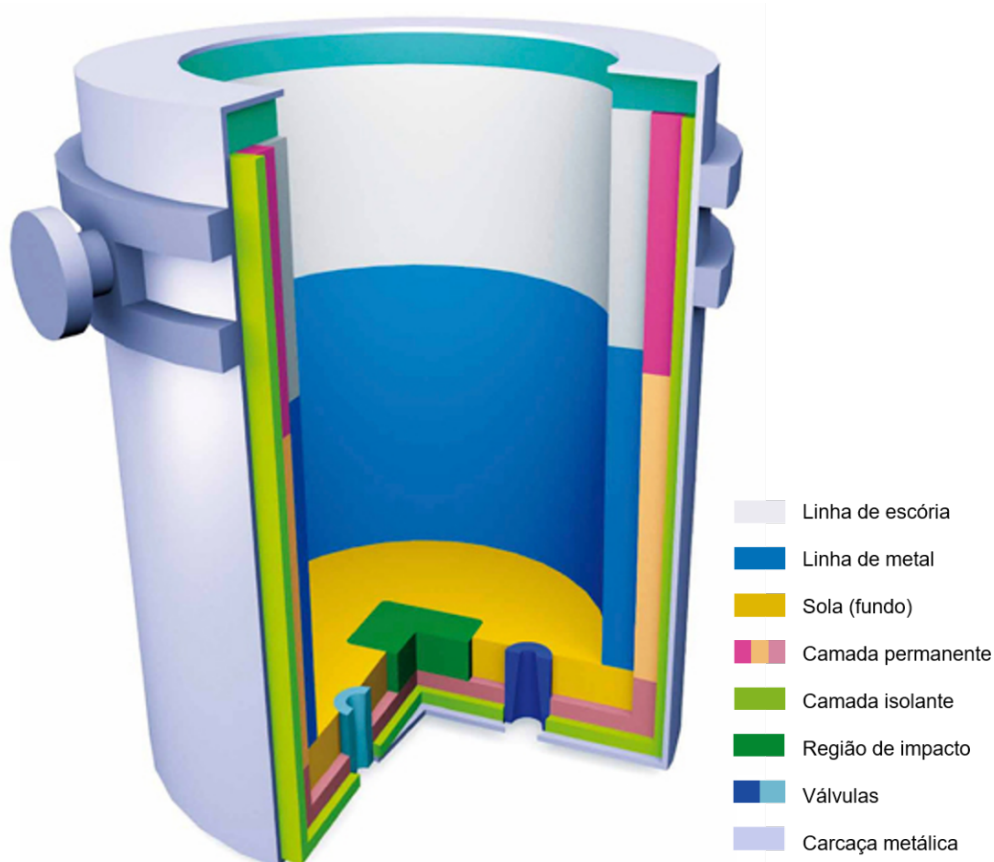


Figura 4.2 Esquema de uma panela de aço com a identificação de cada região do revestimento refratário e da carcaça metálica [56].

A carcaça metálica de painéis de aço precisa garantir o transporte seguro de cargas bastante elevadas por meio de carros de transporte ou mecanismos suspensos. Um painel transporta em média de 50 a 300 toneladas de aço líquido somados à massa do revestimento refratário e das partes metálicas de aproximadamente 100 toneladas. O projeto dessa estrutura metálica é complexo para atender requisitos de operação como repetibilidade, fluxo de produção e segurança [33].

Ainda, a carcaça usualmente apresenta mecanismos diversos acoplados (controle de temperatura, injeção de gás, canal de vazamento, etc.), além de munhões e alças para içamento e acoplamento nos sistemas de transporte. Essas partes possibilitam garantir a mobilidade do painel, a injeção de gases no banho por plugs refratários e o vazamento controlado no distribuidor por meio de válvulas-gaveta. Assegurar o perfeito funcionamento desses sistemas, evitando possíveis danos, é fundamental ao processo e deve ser levado em consideração quando o painel e seu revestimento são projetados.

A camada de trabalho está em contato direto com o aço líquido e a escória, também é subdividida em regiões com materiais distintos, no sentido vertical, de acordo com a solicitação física ou química predominante. Próximo à borda superior, encontra-se a linha de escória, com materiais refratários mais resistentes à corrosão; abaixo dessa região tem-se a linha do metal, que é região de maior contato com o aço líquido; e no fundo têm-se a linha de sola, com refratários mais resistentes mecanicamente, e a zona de impacto, região de elevado desgaste oriundo do carregamento do equipamento, cada qual com um refratário específico aplicado. No fundo do painel encontram-se também os sistemas de válvula-gaveta e de injeção de gás, com seus respectivos blocos e sedes de instalação.

O consumo de energia do painel está relacionado basicamente ao aquecimento do revestimento refratário e ao reaquecimento do banho de aço, quando as perdas térmicas são bastante acentuadas. Detalhes do processamento nos painéis são apresentados a seguir:

4.1.2.2 Ciclo operacional

O processo de aciaria estudado é mostrado esquematicamente na Figura 4.3. Na panela são realizados todos os processos e transformações exigidos durante o refino secundário. De forma simples, o processo pode ser dividido em dois principais momentos: panela vazia (tempo sem aço) e panela cheia (tempo de transporte e processamento do aço), cada qual associado a mecanismos físicos e químicos que agem distintamente [13].

Os momentos em que a panela está vazia devem ser consideradas no ciclo da panela, pois o estado térmico do equipamento é alterado significativamente, impactando diretamente na transferência de calor do processo. Ainda, a etapa de aquecimento do revestimento também ocorre quando a panela está vazia e sua importância é crucial para o estado térmico final do equipamento. Com isso, define-se quatro principais etapas:

a. Aquecimento

O aquecimento das panelas é uma etapa fundamental para a otimização do processo em relação ao consumo de materiais e de energia, motivando seu estudo por diversos autores [9–11]. O correto estado térmico ao final desta etapa minimiza possíveis danos no revestimento por choque térmico e evita gastos energéticos adicionais para reaquecer o metal líquido nas etapas posteriores, quando o aço com temperatura superior transfere calor ao revestimento, o que deve ser evitado.

Esta etapa é realizada na estação de aquecimento das aciarias, na qual queimadores acoplados em tampas de panela são posicionados sobre o equipamento. Nos queimadores, são injetados gás natural e oxigênio em taxas e proporções controladas, os quais entram em combustão, produzindo a chama na temperatura desejada. Com isso, o revestimento é aquecido majoritariamente pelo calor irradiado da chama, em taxas definidas pelos mecanismos de transferência de calor por radiação (nessas temperaturas a contribuição da convecção é muito baixa, abaixo de 5% do calor transferido). Dependendo do estado térmico pretendido, os parâmetros do aquecimento são ajustados, tais

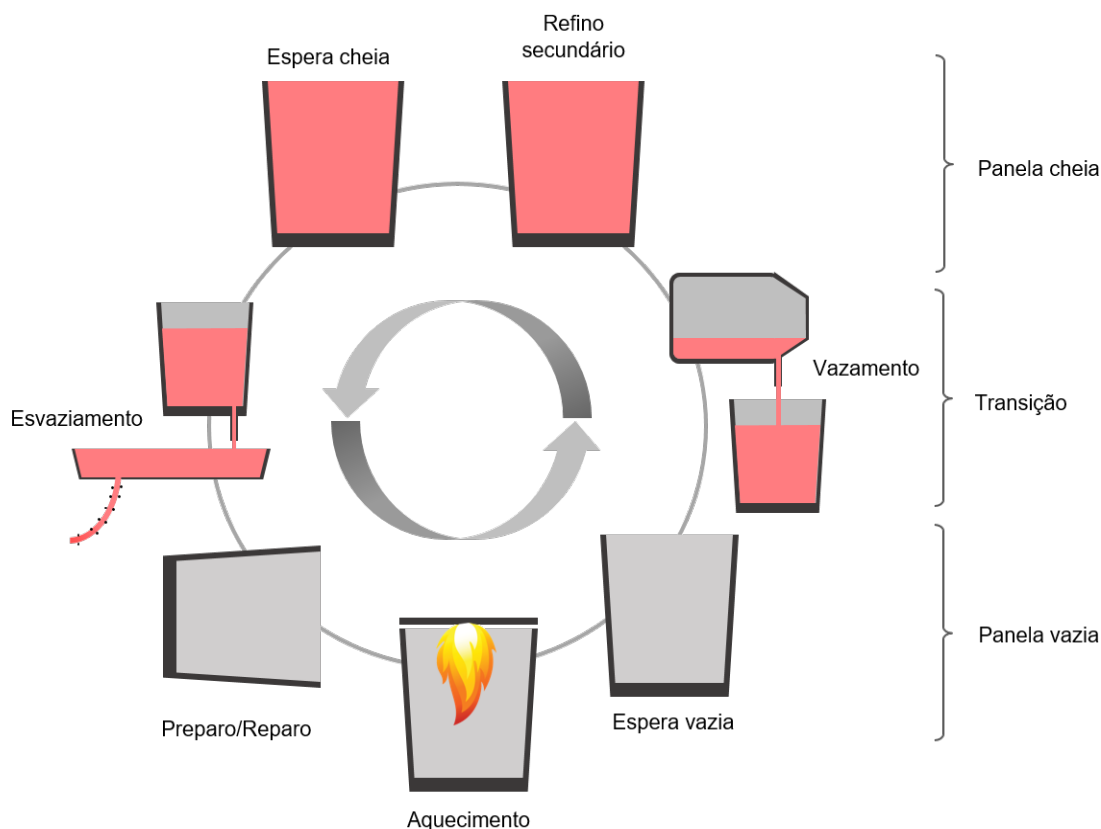


Figura 4.3 Visão geral do ciclo operacional da panela de aço.

como o tipo do queimador e do combustível; a vazão de oxigênio e de combustível; e a distância da tampa, que regula a entrada de ar na panela.

O tempo de aquecimento depende se a panela é nova (primeiro aquecimento) ou se já está em operação. No primeiro caso, os tempos são mais longos e muitas vezes responsáveis pela secagem, cura e queima do revestimento e materiais instalados. No segundo caso, o reaquecimento do revestimento somente ocorre se houverem perdas térmicas muito grandes no ciclo anterior (problemas operacionais ou ciclos produtivos muito longos) ou se algum material foi reaplicado no revestimento e necessite ser aquecido.

Durante o aquecimento a contribuição da quantidade de calor transferida por mecanismos de radiação é predominante, porém a panela também está sendo resfriada pelo ar e outros gases presentes no seu interior.

A complexidade dessa etapa é evidenciada na modelagem do problema, que faz com que a representação do aquecimento das panelas seja simplificada. Glaser et al [11] representam a chama como um sólido, no qual há uma

distribuição de temperatura entre 1473 a 2773 K. O aquecimento do revestimento ocorre a partir da irradiação dessa chama (sólido) que incide nas paredes internas da panela e tal simplificação atende aos objetivos comparativos propostos nas simulações.

b. Espera vazia

Nesta etapa, assim como no pré-aquecimento, a panela encontra-se vazia, mas agora nenhuma fonte externa de calor está presente. Devido ao estado térmico resultante da etapa anterior (energia armazenada no revestimento), ela irá perder calor para o meio tanto pelas superfícies internas quanto externas. Isso é resultado da diferença de temperatura das paredes da panela e do meio externo, que são proporcionais ao fluxo de calor correspondente aos mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação atuantes.

As paredes internas encontram-se nas temperaturas finais do pré-aquecimento ou do final do vazamento no distribuidor (temperatura de lingotamento do aço desejada), ou seja, na da faixa de 1300 °C e 1600 °C, dependendo de cada siderúrgica. Logo, as perdas de calor por mecanismos de radiação são bastante elevadas e correspondem a aproximadamente 90% do total [14, 16], quando representadas por um coeficiente de transferência de calor, sendo a parcela restante correspondente as trocas de calor por convecção. Devido a geometria cilíndrica da panela com abertura no topo, parte do calor é conservado no interior da panela, principalmente no fundo, pois o fator de visão dessas regiões é menor que no topo, diminuindo a transferência de calor por radiação. Outra forma de minimizar as perdas durante as esperas é utilizando tampas revestidas com materiais isolantes, que é uma prática não muito usual por problemas logísticos para acoplar estas partes [13, 23].

As superfícies externas da panela perdem calor em menor intensidade já que apresentam temperaturas inferiores, entre 100 °C e 450 °C, dependendo da região da panela e da configuração do revestimento utilizado. Os mecanismos responsáveis pelas perdas de energia nessas superfícies são convecção e radiação. As perdas pela carcaça podem ser evitadas reduzindo a temperatura

dessa região, por exemplo, aplicando-se isolantes térmicos no revestimento refratário.

c. Refino secundário

Durante a etapa de refino secundário do aço são definidas as características finais do banho para cada tipo de aço produzido. Para isso, são necessários ajustes de composição e temperatura precisos, que resultem na microestrutura e propriedades desejadas ao produto final. Algumas das etapas que são desempenhadas incluem a adição de elementos de liga, a homogeneização, a desgaseificação, o reaquecimento do banho, entre outros [31, 34].

Cada um dos processos realizados durante o refino secundário é responsável por corrigir as características do aço líquido e o impacto no balanço térmico de cada um deles pode ser estimado [13]. A adição de elementos de liga é necessária para atribuir características especiais ao aço, como resistência a corrosão e mecânica ou para aumentar a ductilidade e trabalhabilidade dos aços. Após a adição desses elementos é necessário homogeneizar o banho por meio do sopro de gases inertes, injetados por válvulas acopladas no revestimento do fundo, que promovem a agitação do banho e ajudam na remoção de impurezas pela escória. Usualmente, esse processo reduz a temperatura do banho, pois as reações de dissolução muitas vezes são endotérmicas e a agitação aumenta a transferência de calor do banho para o sistema refratário e para o ambiente. Nesse contexto, o papel da camada de escória é fundamental, visto que esta funciona como uma barreira térmica; protege o banho contra oxidação; e também atua como um absorvedor de impurezas e inclusões que venham estar presentes.

A desgaseificação do banho é feita para remover os gases aprisionados dentro do líquido, que podem resultar em defeitos nos produtos solidificados. Esse processo é realizado em reatores com uma câmara à vácuo, onde a baixa pressão remove os gases dissolvidos no aço quanto este percorre o compartimento despressurizado. Durante esta etapa, a temperatura do banho

também é reduzida, pois a movimentação do fluido aumenta a transferência de calor para os refratários.

Os processos descritos anteriormente estão ligados aos ajustes de composição e remoção de impurezas do aço, porém o ajuste de temperatura também é realizado. Tal procedimento é feito por meio do reaquecimento do banho no forno-panela ou por aluminotermia. O primeiro, é um forno que envolve a panela e possui eletrodos acoplados em seu teto, que aquecem o banho por meio de um arco elétrico. Já o processo aluminotérmico consiste em adicionar alumínio metálico ao banho, promovendo o aquecimento do aço devido a reação exotérmica de oxidação do Al. Ambos os casos, corrigem as temperaturas do banho, porém aumentam os gastos energéticos e o custo do processo, além levar a formação de inclusões que necessitam ser removidas (adicionando outro materiais como o Ca) para evitar a fragilização do aço. A intensidade da etapa de reaquecimento do aço líquido depende do estado térmico desejado no produto final e essa quantidade de energia (ou material) gasta, somadas ao volume de gás natural para aquecer o revestimento, permitem computar a quantidade de energia média gasta na produção do aço para um ciclo da panela.

d. Enchimento e vazamento

Na etapa de enchimento da panela, o aço líquido é vazado do conversor LD ou FEA por canais de vazamento que direcionam o fluxo do metal líquido na zona de impacto da camada de trabalho. Logo, a altura do metal líquido durante esta etapa varia em função do tempo de vazamento, usualmente entre 2 e 10 minutos dependendo de cada siderúrgica. Pode-se adicionar parte dos elementos de liga durante o vazamento para aproveitar a agitação do metal e adiantar a homogeneização do banho. O contato do aço líquido com as paredes mais frias do revestimento diminui bruscamente a temperatura do líquido e aumenta rapidamente a temperatura do revestimento, que são dois fatores bastante críticos dessa etapa. Já com a panela cheia, inicia-se a etapa de refino secundário.

O esvaziamento da panela para o distribuidor apresenta um tempo mais longo (em média 40 minutos) e, em algumas aciarias, a panela encontra-se

tampada durante esta etapa, que se justifica pela necessidade do controle preciso da temperatura do aço vazado no distribuidor e, também, para minimizar a variação de temperatura no revestimento de trabalho, quando a panela fica novamente vazia e o ciclo é retomado.

4.2 Mecanismos de transferência de calor

Em ambientes metalúrgicos como os da indústria do aço, tem-se simultaneamente a ação de mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação, e cada um deles está associado às condições específicas do processamento do aço. No caso da panela, mostrou-se anteriormente como tais fenômenos estão relacionados em cada etapa representada.

Basicamente, pode-se definir a transferência de calor como o trânsito da energia térmica devido a um gradiente de temperatura [35]. A Figura 4.4 apresenta esquematicamente cada um desses mecanismos de forma simplificada.

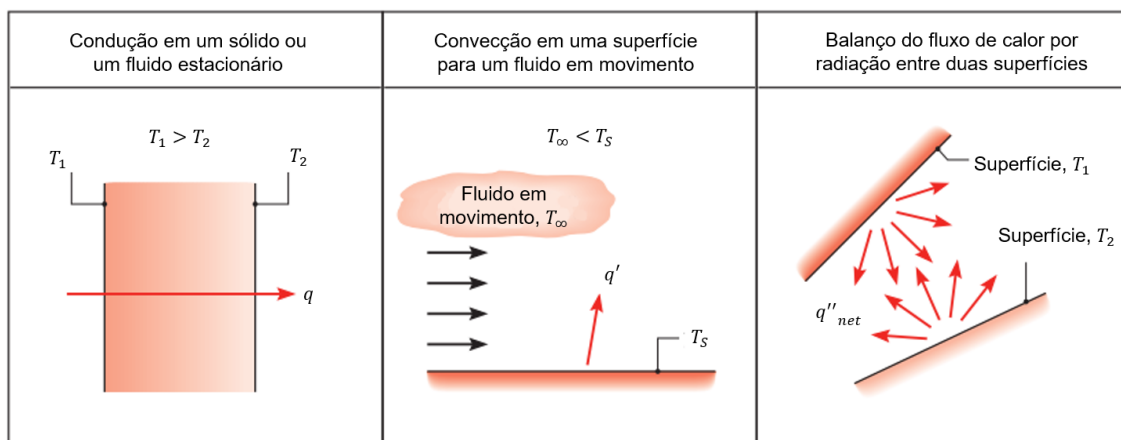


Figura 4.4 Mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação [35].

4.2.1 Condução

O mecanismo de transferência de calor por condução está associado aos conceitos de vibração atômica e molecular, que são 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. Para gases e líquidos, a condução está relacionada à difusão das

moléculas no fluido, enquanto nos sólidos, a condução está associada a atividade atômica na forma de vibrações da rede. Usualmente, a transferência de calor é quantificada em termos de equações de proporcionalidade que computam a quantidade de energia transferida em uma determinada área por unidade de tempo. No caso da condução, a equação é conhecida como lei de Fourier:

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (4.1)$$

Sendo que \mathbf{q} é o fluxo de calor e $T = T(x,y,z)$ a temperatura num ponto do meio. O parâmetro k é a propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica, sendo esta uma característica do material [35, 36].

Na visão moderna dos materiais, os sólidos podem ser descritos como átomos e elétrons ligados em um arranjo periódico. Assim, a condução térmica nesses materiais está ligada a dois fenômenos. Primeiro, nos materiais condutores, o transporte de energia é realizado pela migração de elétrons livres e fônons e, segundo, para os materiais não-condutores elétricos como os refratários, apenas por meio de fônons (ondas vibracionais da rede). Este último fenômeno, quando observado na ótica de partículas, transforma essas vibrações em fônons. A teoria cinética que origina a expressão para a condutividade térmica destes materiais é dada por:

$$k = \frac{1}{3} C \bar{c} \lambda_{mfp} \quad (4.2)$$

sendo que C é o calor específico dos fônons por unidade de volume [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$], \bar{c} é a velocidade média do som [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] e λ_{mfp} é o caminho livre médio dos fônons [m], que é a distância média que um fônon percorre antes de colidir com imperfeições da rede ou contra outros fônons em um material.

Outra propriedade importante associada aos mecanismos de transferência de calor por condução é a difusividade térmica, i. e.:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4.3)$$

sendo que ρ é a densidade volumétrica [kg.m^{-3}] e c_p é o calor específico do material [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$], que quando relacionados à condutividade térmica k [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] por meio da Equação (4.3) determina a capacidade do material em conduzir energia térmica em relação à sua habilidade de armazenar esta energia [35].

O principal objetivo dos estudos de condução térmica consiste em determinar as temperaturas de uma região no espaço. Nesse estudo, a partir da variação dessas temperaturas no tempo busca-se quantificar o fluxo de calor nas regiões de interesse e identificar quais configurações de revestimento reduzem o fluxo de calor do aço líquido para a panela. Tal problema de transferência de calor em sólidos é descrito a partir da equação do calor, i. e.:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) - s = 0 \quad (4.4)$$

sendo que 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.

A partir dessa equação é possível obter a distribuição de temperatura $T(t,x,y,z)$. A determinação da solução da equação (4.4) é possível a partir da imposição de condições de contorno e iniciais. Duas condições de contorno precisam ser apresentadas: uma de fronteira referente as variáveis espaciais e outra referente à temperatura e fluxo no contorno do problema; e uma condição inicial referente a temperatura no instante inicial $t=0$ para cada região do espaço. As condições comumente empregados são as condições de Dirichlet, Neumann e Robin [35, 36].

Vale destacar que o problema a ser tratado neste trabalho é transiente. Tais considerações serão, portanto, realizadas no modelo em elementos finitos, que será apresentado posteriormente.

4.2.2 Convecção

O modo de transferência de calor por convecção compreende dois principais mecanismos. Além dos mecanismos de difusão relacionado às energias vibracionais, existe também uma movimentação global das moléculas e partículas no escoamento, que também contribuem para a transferência de energia total.

A consequência da interação fluido-estrutura é o desenvolvimento de uma região em que o escoamento se encontra com velocidade nula no contato com a superfície sólida e uma velocidade u_∞ ao final da camada-limite formada, sendo a magnitude dessa velocidade dependente do tipo de regime do escoamento. Assim como a velocidade, a temperatura nessa camada também varia de T_s (temperatura na superfície) até T_∞ no final da camada-limite. Na superfície de contato entre o escoamento e a estrutura, a transferência de calor ocorre puramente por difusão [35].

O mecanismo de transferência de calor por convecção pode ser descrito pela lei de resfriamento de Newton:

$$q_{conv} = h (T_s - T_\infty) \quad (4.5)$$

sendo que q_{conv} é o fluxo de calor convectivo [$W.m^{-2}$], o qual é proporcional a diferença de temperatura entre a superfície e o escoamento, T_s e T_∞ [K], respectivamente. O coeficiente h é denominado coeficiente de transferência de calor por convecção, o qual depende das condições da camada limite, da geometria da superfície, da movimentação do fluido, do tipo de fluido e de suas propriedades. O cálculo desse coeficiente está descrito no Apêndice A.

O escoamento na camada limite pode ser tratado como laminar ou turbulento. Na parte da camada-limite em regime laminar, o escoamento é altamente ordenado e possibilita a identificação fácil de linhas que traçam o caminho das partículas. Esse comportamento ordenado continua até uma zona de transição, a partir do qual o escoamento passa a ser considerado turbulento. Dessa zona adiante, o escoamento turbulento é predominante e, em geral, há

uma grande aleatoriedade e irregularidade no movimento tridimensional das partículas. Fica evidente que em cada uma das regiões o perfil de velocidade e temperatura da camada limite é alterado e, conseqüentemente, a taxa de transferência de calor. Uma forma de computar e determinar esses limites do tipo de regime é pelo cálculo do número de Reynolds em cada condição. Valores abaixo de 5×10^{-5} o regime é considerado laminar e acima desse número, considerado turbulento.

Em muitos dos problemas industriais a convecção ocorre de forma natural e sem nenhuma fonte externa atuando no sistema (que seria o oposto da convecção forçada pela introdução de um ventilador ou exaustor, por exemplo). A convecção natural origina-se a partir de forças peso agindo no fluido que apresenta gradientes de densidade e o efeito resultante dessa movimentação é a força de Buoyancy (flutuabilidade) que induz correntes de convecção livremente. Na maioria dos casos, o gradiente de densidade está relacionado ao gradiente de temperatura presente no fluido [35].

Como na convecção natural o escoamento apresenta baixas velocidades, a correspondente taxa de transferência de calor por convecção também é pequena.

4.2.3 Radiação

A radiação térmica é a energia irradiada por toda matéria acima do zero absoluto (0 K). Normalmente, estuda-se a irradiação proveniente de superfícies sólidas, mas também há estudos relacionados a irradiação em líquidos e gases. Essa transferência de calor por mecanismos de radiação está associada às mudanças na configuração dos átomos e moléculas que constituem a matéria, por um processo radial de transporte de energia por ondas eletromagnéticas. Esse mecanismo de transferência de calor não exige a presença de um meio material como nos casos de condução e convecção [35, 36].

A equação de proporcionalidade que computa a radiação emitida (E_b) por uma superfície é descrita pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (4.6)$$

sendo que T_s é a temperatura da superfície [K] e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,68 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$). Tal superfície é considerada um radiador ideal ou um corpo negro, no qual toda energia absorvida nessa interface é emitida na forma de radiação. Como o fluxo emitido por uma superfície real é menor que um corpo negro, na mesma temperatura a quantidade de energia emitida (emissão, E) é dada por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4.7)$$

sendo ε a propriedade radiativa da superfície denominada emissividade, cujo valor mede a relação entre a quantidade de energia emitida por uma superfície real em relação a um corpo negro.

Um caso frequente que envolve a transferência de calor por radiação é aquele em que duas superfícies interagem termicamente, sendo uma delas com uma área muito maior, representada por um ambiente em menor temperatura. Nesse caso, o fluxo de calor depende das propriedades emissivas apenas da superfície quente e pode ser estimado por:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (4.8)$$

O efeito da radiação é muito mais importante em processos que ocorrem em altas temperaturas, devido a relação do fluxo de calor com a quarta potência da temperatura. Ainda, a radiação emitida por uma superfície apresenta-se numa faixa de comprimentos de onda para cada temperatura e sua emissão ocorre de forma radial (Figura 4.5.A). Ou seja, a radiação emitida E por uma superfície (como mostrado na Equação (4.7)), determina a quantidade de energia emitida por unidade de área em todos os comprimentos de onda (Figura 4.5.B) e em todas as direções. Porém essa superfície também pode receber energia de outras fontes, que é definida por irradiação (G), sendo esta a taxa de radiação incidente em uma superfície por unidade de área. Contudo, parte dessa radiação

incidente é automaticamente refletida (G_{ref}) pela superfície de acordo com a emissividade desta e a soma das parcelas E e G_{ref} é definida como radiosidade (J). O balanço dos fluxos radiativos em um sistema com diversas superfícies é dado pela diferença entre J e G em cada ponto, i. e., $q_{net} = J - G$ [35]. Uma representação desses mecanismos é mostrada na Figura 4.5.C [35, 36].

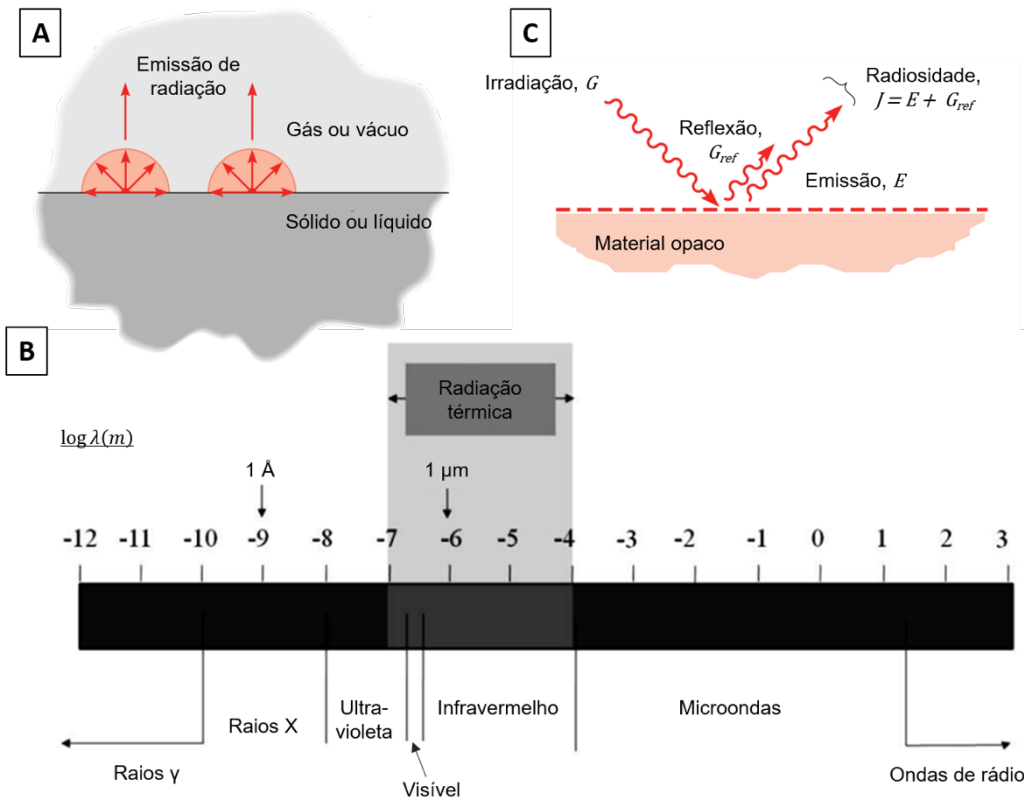


Figura 4.5.A) Emissão radial das superfícies sólidas e líquidas; B) Espectro da radiação eletromagnética mostrando a faixa de comprimentos de onda para a radiação térmica (10^{-7} a 10^{-4} m); C) Interação da radiação incidente em uma superfície com a quantidade de energia emitida e refletida [35].

4.3 Materiais refratários

Os refratários da panela são fundamentais para o processo de refino secundário tanto químico quanto termicamente, pois suas características podem interferir significativamente na qualidade do produto final, no tempo e no custo de produção do aço. Por exemplo, o desgaste excessivo em regiões específicas (camada de trabalho) da panela pode reduzir o tempo de operação do equipamento, tornando necessário interrupções para a realização de reparos ou a troca da região degradada. Ainda, a corrosão e o desgaste elevado do

refratário alteram a composição química do aço e da escória produzida, que podem trazer consequências negativas ao processo, como a precipitação de inclusões, maior viscosidade de escória, etc. Logo, cada região da panela tem o material refratário especificamente escolhido e aplicado na quantidade correta, para maximizar o tempo de serviço, considerando o menor custo possível.

Já em outras regiões da panela, é desejado que o revestimento apresente características de isolamento térmico, visto que a transferência de calor para a carcaça metálica, por exemplo, pode prejudicar as condições de trabalho nas aciarias e danificar outras partes mecânicas acopladas no exterior da panela. Menores temperaturas de carcaça também reduzem as perdas de energia, o que é bastante desejado por diversos aspectos já discutidos [23], relacionados ao controle preciso de temperatura do aço.

Contudo, a redução do consumo de energia das panelas não está apenas relacionada a minimizar as temperaturas de carcaça. Outros fatores devem ser analisados visando considerar toda a distribuição de temperatura no revestimento, pois assim identifica-se a eficiência de cada material utilizado em relação ao seu melhor desempenho durante o aquecimento do revestimento, nas menores perdas de energia durante as esperas e, conseqüentemente, nas menores perdas de calor do aço líquido nas etapas em que a panela está cheia.

Com isso, é evidente a necessidade de entender em detalhes a estrutura do revestimento refratário das panelas de aço, assim como as propriedades térmicas desses materiais, já que esses são parâmetros fundamentais na investigação do estado térmico e do consumo energético das panelas de aciaria. Além disso, essas propriedades representam os materiais nas simulações, visto que este é um dos meios materiais de condução de calor nos modelos

4.3.1 Características e tipos de revestimento em panelas

4.3.1.1 Camada permanente e isolante

A camada permanente, também chamada de camada de segurança, está localizada entre a camada de trabalho e a carcaça. Sua principal função é isolar as partes metálicas das temperaturas elevadas de processamento do aço no

interior da panela. Ainda, espera-se dessa camada que ela proteja a carcaça caso haja infiltração de metal líquido ou escória, nos casos em que há falhas na camada de trabalho. Sua espessura e material utilizado são definidos de acordo com essas necessidades, que são típicas de cada aciaria. Atualmente, os refratários utilizados são constituídos de matriz de mulita, devido a menor condutividade térmica e densidade dessa fase. Como a camada permanente supostamente não entra em contato com o aço líquido, sua resistência à corrosão e a erosão pode ser intermediária.

Na maioria dos casos não há distinção entre o tipo de material aplicado na camada permanente com relação as regiões da panela como no fundo, região de impacto ou linha de escória. Uma prática que se tem adotado em algumas panelas de aço é a substituição de parte da camada de segurança por um material isolante de baixa condutividade térmica (fibras cerâmicas), visando aumentar a proteção das partes metálicas externas. A investigação do uso de materiais isolantes no revestimento de panelas ainda é pouco detalhada, mesmo esse material se mostrando como uma alternativa para otimização do processo e do consumo de energia.

Zona densa

Os tipos de refratários utilizados nessa zona variam pouco e, no geral, são refratários à base de alumina e sílica, sendo que a fração de cada parte depende das características e do desempenho esperado para a panela de aço. Usualmente, são aplicados refratários de alta-alumina devido às suas propriedades como: resistência à abrasão, resistência mecânica, refratariedade e condutividade satisfatória [31]. A principal função da região densa da camada permanente é justamente minimizar a infiltração do aço ou escória líquida caso essa camada seja atingida e quando possível reduzir a transferência de calor para a carcaça.

Zona porosa (camada isolante)

Normalmente, os isolantes aplicados no revestimento de panelas de aço são do sistema $Al_2O_3-SiO_2$, das quais são produzidas fibras longas que são

conformadas em placas ou malhas isolantes (a primeira de muito menos flexibilidade). Esse produto de baixíssima condutividade térmica e densidade (alta porosidade) é aplicado entre a carcaça metálica e a camada permanente, constituindo uma camada isolante. Esta última funciona como uma barreira térmica evitando a propagação da onda de calor para as regiões externas a ela (carcaça metálica). Outros tipos de materiais isolantes podem ser também utilizados como as espumas cerâmicas, desde que estas apresentem características térmicas e mecânicas compatíveis com as solicitações que serão expostas, mostrando uma alternativa as fibras cerâmicas visto que elas apresentam riscos à saúde durante sua fabricação e utilização [37].

A inclusão dessa camada no revestimento é uma estratégia de diversos estudos que propõem reduzir o consumo de energia em painéis de aço. Li et al [14] utilizaram uma camada isolante térmica de material com microestrutura nanométrica e investigaram seu efeito no modelamento do comportamento térmico e mecânico de uma panela de 350 toneladas. Os resultados mostraram menor queda de temperatura do aço e um decréscimo de 114 °C nas temperaturas da carcaça.

4.3.1.2 Camada de trabalho

A camada de trabalho é a região do revestimento da panela que está em contato direto com o aço líquido e a escória durante o refino secundário. Grande parte do desempenho da panela está relacionado e depende das características do material utilizado nessa camada. Por exemplo, a produtividade das aciarias, o custo associado aos insumos refratários, a qualidade do produto final e o consumo de energia estão diretamente ligados às características do refratário aplicado na camada de trabalho.

Quanto maior for a resistência desse material às condições de processo, por mais tempo serão mantidas suas características originais, evitando que sejam necessários reparos ou a troca prematura do revestimento. Já que, caso ele venha a falhar, o processo deve ser interrompido e isso resulta em atrasos e descontinuidades da produção, podendo trazer prejuízos econômicos bastante elevados.

Adicionalmente, a maior durabilidade dessa camada leva a um menor consumo específico de refratários durante o refino secundário, que é uma tendência das últimas décadas, como mostrado pela queda do consumo médio de refratários por tonelada de aço, na Figura 4.6. O cenário mostrado é produto de avanços tecnológicos na produção de matérias-primas e no processo de fabricação dos refratários, que aumentou o desempenho deles em diversos cenários, especialmente na siderurgia.

A maior inércia química e física do revestimento de trabalho não traz apenas benefícios econômicos em relação ao consumo de refratários, essa característica também melhora significativamente a qualidade do aço produzido, ainda mais quando se trata de aços especiais de ultra-baixa concentração de impurezas.

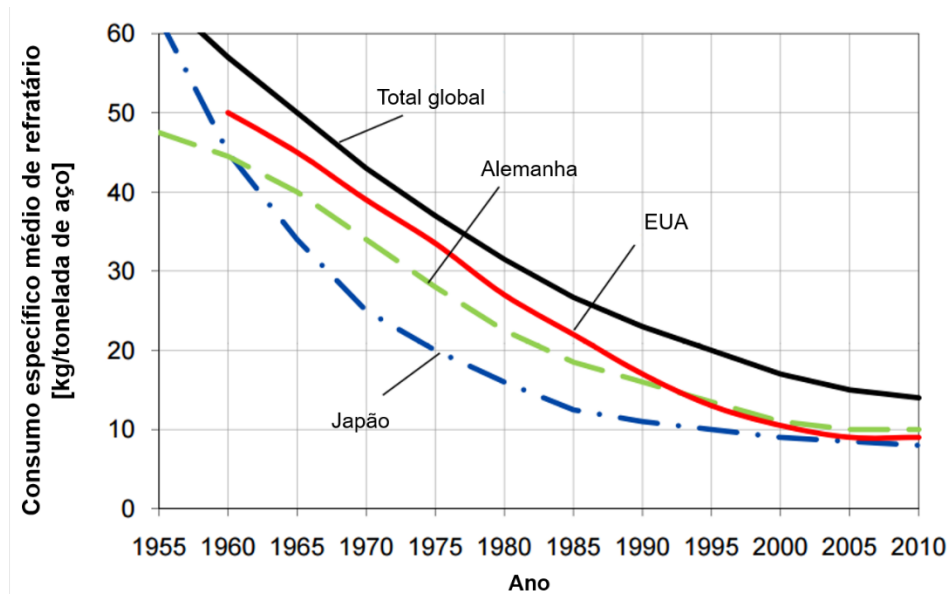


Figura 4.6 Histórico do consumo específico médio de refratário por tonelada de aço [57].

Já em relação ao consumo de energia, as propriedades térmicas e a distribuição de temperatura dos materiais aplicados na camada de trabalho estão diretamente relacionadas à capacidade do revestimento absorver calor do metal líquido e da chama durante o aquecimento. Ogata et al [38] investigou o uso de refratários de baixa condutividade térmica e capacidade calorífica, (devido a menor densidade dos agregados utilizados na composição) aplicados nessa

camada do revestimento. Tal estudo buscou minimizar a redução do consumo de energia diminuindo as perdas de energia pela carcaça e a quantidade estocada no refratário. Porém os diferentes materiais são comparados apenas durante a etapa em que o metal líquido está sendo processado.

Diferentemente da camada permanente, em cada região da camada de trabalho é aplicado um material distinto para atender as diversas solicitações de corrosão e desgaste provocados pela reação com o aço líquido e a escória.

Sola (fundo)

Na região inferior da panela, as solicitações mecânicas são as maiores possíveis, pois tais materiais devem suportar a pressão ferrostática da coluna de aço na capacidade máxima da panela. Os refratários utilizados para este fim apresentam composições bastante similares aos utilizados na linha de metal (parede da panela) e a matriz cerâmica majoritária está relacionada ao tipo de aço produzido e as exigências de composição em cada aciaria. Adicionalmente, parte da área do fundo da panela conhecida como zona de impacto apresenta uma espessura superior ao resto do fundo e o material nessa região também possui resistência mecânica superior. Tais requisitos são necessários uma vez que direciona-se nessa região o vazamento do aço líquido do convertedor ou FEA quando a panela está sendo preenchida e o desgaste associado a esse ponto é bem maior que nas demais regiões, o que justifica tal configuração. Em volta do plug de injeção de gás e do canal de vazamento da panela, devido a maior agitação do líquido, também são instalados materiais que resistem mais a essas solicitações (erosão).

Os sistemas refratários que podem ser aplicados na parte inferior da camada de trabalho (fundo) variam em diversos sistemas: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-C}$, entre outros, sempre buscando maximizar a vida e evitar reparos durante a campanha da panela. Nas panelas de aço atuais, evita-se utilizar composições que apresentem Si não combinados na estrutura, que segundo Hubble et al [33] pode causar problemas na qualidade do aço (Al pick-up).

Na sola, tanto materiais conformados quanto não conformados podem ser aplicados. Cada um apresenta suas vantagens e desvantagens quanto ao tempo de aplicação, facilidade de instalação e desempenho térmico e mecânico. Dessa seção, nota-se a existência de uma grande variedade de materiais refratários atualmente disponíveis para a aplicação no revestimento de painéis de aço.

Linha de metal

A linha de metal é a região do revestimento de trabalho menos susceptível ao desgaste durante o ciclo da panela. Sua espessura normalmente não varia (podendo conter também uma região de impacto para o jato de aço do BOF ou FEA), como ocorre nas outras regiões da panela que estão sob solicitações mais severas (zona de impacto e linha de escória). Essa região compreende todos os materiais aplicados na parede da panela, abaixo da linha de escória, e que apresentam maior área de contato com o aço líquido durante o processamento. Logo, é desejado dos materiais aplicados nessa região, que haja a menor interação possível com o metal evitando possíveis contaminações do banho.

Os sistemas refratários que são considerados na linha de metal apresenta similaridades aos aplicados na sola, pois estes apresentam maior compatibilidade com os aços produzidos atualmente. A forma dos refratários também varia entre conformados (tijolo) ou não-conformados (concreto).

Linha de escória

Essa região compreende a linha de refratários da camada de trabalho localizada no topo da panela, acima da linha de metal. São os materiais que estão submetidos a maior corrosão, pois durante o processamento do aço ficam em contato direto com a escória presente na superfície do aço líquido.

A escória é fundamental para o processo de refino secundário, pois ela protege o banho do contato com o ar (oxidação), evita perdas de calor excessivas pelo topo e, também, ajuda na remoção de impurezas e inclusões presentes no banho. Porém, como a escória é uma mistura de óxidos dissociados, sua reatividade é muito alta culminando na oxidação e na corrosão do material em contato com essa mistura. Nesse contexto, opta-se por refratários

que sejam resistentes a essas solicitações e, recentemente, os refratários que contém carbono como segunda fase (MgO-C, principalmente) têm se destacado. Tais materiais são um dos principais compósitos de alta tecnologia e de elevado desempenho, capazes de suportar condições operacionais cada vez mais agressivas e complexas. De maneira geral, o carbono/grafita muda a tensão superficial do refratário, diminuindo a molhabilidade por metais e escórias líquidas, o que faz com que eles apresentem elevada resistência a corrosão e a erosão [31, 33]. A principal desvantagem desses materiais está na produção de aços ultra-baixo teor de carbono, que podem não ser garantidas dependendo da qualidade e quantidade do carbono presente no refratário MgO-C.

Visto os diversos materiais aplicados nas regiões da panela, faz-se necessário entender as propriedades termofísicas desses materiais e como elas estão diretamente relacionadas aos problemas de transferência de calor. Vale ressaltar, que a precisão das análises de engenharia depende totalmente da qualidade na aferição e determinação dessas propriedades. Para o problema de transferência de calor, tanto a propriedade de transporte de energia térmica e de difusão do calor, quanto as propriedades termodinâmicas de representação do equilíbrio térmico, são importantes. São elas: condutividade térmica, densidade e calor específico. Nas próximas seções, também é discutido brevemente sobre a emissividade dos materiais envolvidos nas análises, já que esse parâmetro apresenta grande importância para o problema térmico em alta temperatura.

4.3.2 Densidade

A densidade é uma propriedade muito importante nas análises térmicas, pois ela interfere diretamente na condução de calor e na capacidade calorífica de um corpo. Devido as rotas de processamento, os materiais refratários sempre apresentam defeitos e descontinuidades no seu volume, que vão distanciando tais materiais dos seus valores teóricos de densidade.

A porosidade dos materiais influencia diretamente na densidade do corpo, pois quanto maior a porosidade, menor é a quantidade de massa em um determinado volume. Materiais que apresentam porosidade elevada (70 – 99%),

como as fibras e espumas cerâmicas, são muito leves e apresentam menores condutividade térmica e resistência mecânica que os refratários mais densos [37].

Existem diferentes métodos para medição de densidade, assim como diversas formas de analisar essa propriedade, por exemplo, as grandezas de densidade real e densidade aparente (considerada no trabalho).

4.3.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos materiais refratários é um parâmetro importante, uma vez que pequenos valores dessa propriedade indicam maior potencial de reter o calor durante os processos metalúrgicos, como é o caso da panela, evitando perdas de calor e reduzindo o consumo de energia.

Analisando os fenômenos microestruturais associados à condução de calor nos refratários, sabe-se que os três mecanismos de transferência de calor contribuem para o valor efetivo da condutividade térmica. Sabendo disso,

$$k_{ef} = k_{cond} + k_{conv} + k_{rad} \quad (4.9)$$

sendo que a condutividade térmica efetiva (k_{ef}) é a soma da condutividade térmica devido ao processo de condução na fração sólida (k_{cond}), ao de convecção (k_{conv}) nos defeitos e interfaces, e ao de radiação (k_{rad}). Para cada material, pode-se investigar a contribuição de cada um desses mecanismos no valor da condutividade térmica medida experimentalmente (k_{ef}), e que, nesse trabalho, é considerada isotrópica.

Cada aspecto microestrutural dos refratários pode alterar a capacidade do mesmo em conduzir calor. Sabendo que a condução nesses materiais se dá exclusivamente pelo transporte de fônons, visto que não há elétrons livres, uma forma de minimizar a contribuição desses fenômenos no k_{ef} é reduzir a quantidade de material disponível para o transporte dos fônons, adicionando poros por exemplo. A adição de vazios reduz significativamente o processo de condução de calor, como no caso dos isolantes térmicos, pois a fração sólida responsável pela condução é reduzida [37]. Outra forma de reduzir a

condutividade térmica é aumentar a densidade de contornos de grão, pois estes defeitos funcionam como uma barreira térmica, aumentando o espalhamento dos fônons [39]. De forma geral, escolher matérias-primas já com k_{cond} menor, é outra alternativa para reduzir a condutividade efetiva dos materiais refratários. Vale ressaltar, que com o aumento da temperatura, o valor de k_{cond} diminui, pois o caminho livre médio dos fônons (Equação (4.2)) é reduzido.

Quando se adicionam poros na microestrutura dos refratários deve-se atentar quais as características geométricas dessa segunda fase, pois a transferência de calor por convecção e radiação pode influenciar no valor efetivo da condutividade térmica. Para poros isolados de até 50 μm de diâmetro, pode-se desprezar a contribuição da convecção no interior do valor de condutividade efetivo k_{ef} .

Mais uma vez, tratando-se de aplicações que envolvam temperaturas bastante elevadas (superiores a 1000 °C), a condutividade por radiação é o mecanismo que mais contribui para a condutividade dos materiais. No nível microestrutural, a transferência térmica por radiação ocorre por meio da propagação, absorção e emissão de fótons. Quando a radiação atinge uma superfície (a interface de um poro, por exemplo), ela pode ser absorvida, refletida ou transmitida. Do ponto de vista da condução, a parcela transmitida é a que contribui para a condutividade térmica por radiação (k_{rad}). A expressão que quantifica tal parcela, no caso de defeitos que espalham a radiação, é dada por:

$$k_{rad} = \frac{16 \sigma n^2 T^3}{3\beta_{Rosseland}} \quad (4.10)$$

sendo σ a constante de Stefan-Boltzman [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$], n é o índice de refração do material (assumindo ar nos vazios) e T a temperatura [K]. A variável $\beta_{Rosseland}$ é o coeficiente de extinção médio, o qual é função da capacidade de absorção e de espalhamento da radiação pela microestrutura do material, ou seja, é uma medida da capacidade do material e sua microestrutura interagirem com a radiação e impedirem sua transmissão através do material [37].

Existem vários métodos para a determinação da condutividade térmica efetiva dos materiais. No caso dos refratários as principais técnicas utilizadas são o método do fio-quente e o método do fluxo de calor transiente (laser-flash), este último bastante indicado para os materiais com condutividade térmica elevada [31]. Cada uma dessas técnicas possui limitações e vantagens distintas:

Método do fio-quente: a técnica do fio-quente pode ser empregada na determinação da condutividade térmica de materiais refratários isolantes ou densos, que apresentem condutividades inferiores a 25 W/(m.K) . Esse limite é imposto pela difusividade térmica do material em relação a geometria das amostras (maiores condutividades poderiam ser medidas se amostras maiores fossem utilizadas).

No caso da técnica em que os fios são posicionados paralelamente na amostra, pode-se dinamicamente medir variações de temperatura em função do tempo em uma região específica, cuja distância de uma fonte térmica é bem definida. Nesse caso, a fonte térmica e o dispositivo de medição da temperatura são fios lineares posicionados na interface entre duas peças do material analisado, como mostrado no esquema da Figura 4.7.A. Todo o sistema é aquecido em um forno até a temperatura desejada e mantido nessa condição para garantir uma homogeneidade de temperaturas antes da aferição.

Assim que a temperatura da medida é atingida, o fio-quente (fonte térmica) produz uma potência a partir de uma corrente elétrica por efeito Joule, alterando o estado de equilíbrio térmico do sistema. Essa variação de temperatura no termopar posicionado a 15 mm de distância do fio-quente é medida em função do tempo. Do resultado é possível inferir o valor da difusividade térmica da amostra e, posteriormente, da condutividade térmica do material analisado [40].

Método do fluxo de calor transiente (laser-flash): a técnica do laser-flash é atualmente a mais utilizada para a medição da condutividade térmica mundialmente, apesar de também apresentar algumas limitações. Há uma maior facilidade em relação a preparação e tamanho das amostras utilizadas, que são bem pequenas e não são destruídas após o ensaio. Além disso, uma faixa maior

de difusividades térmica pode ser analisada, quando comparada ao método do fio-quente.

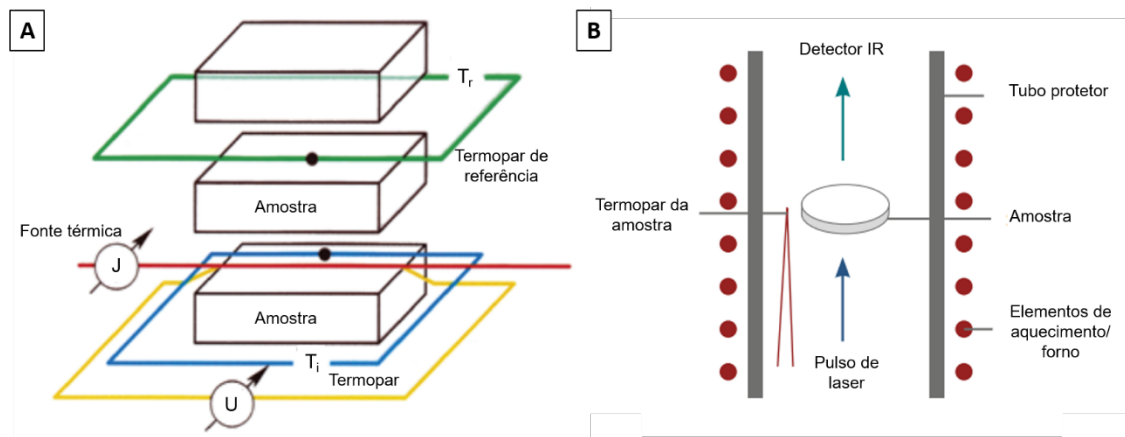


Figura 4.7 Esquema representativo do método A) do fio-quente paralelo e B) do fluxo de calor transiente (laser flash) [41], [58].

Uma representação esquemática do aparato utilizado é mostrada na Figura 4.7.B. A amostra é posicionada em um suporte dentro de um forno, que controla a temperatura das medidas realizadas. Assim que o estado térmico do sistema é estabilizado no patamar desejado, um pulso de laser é projetado em uma das faces da amostra e parte da sua energia é absorvida pelo material. Na face oposta, um detector de infravermelho computa a evolução da temperatura nesta superfície em função do tempo. Com esses dados, determina-se a difusividade do material e, a partir do seu calor específico e densidade, calcula-se sua condutividade térmica [41].

Uma das limitações dessa técnica está associada às medições feitas em alta temperatura, visto que a radiação tem uma contribuição muito elevada na transferência de calor e, na medida feita pelo detector infravermelho, desconsidera-se a dependência desse processo em relação ao comprimento de onda da radiação, especificamente da faixa de comprimentos cuja potência emitida pela superfície é maior [42]. Além disso, as vantagens no uso de amostras pequenas não são destaque para o caso dos refratários, visto que esses materiais apresentam alta heterogeneidade microestrutural e um pequeno volume de amostra muitas vezes não é representativo da microestrutura.

4.3.4 Calor específico e difusividade térmica

A capacidade calorífica de um corpo é uma variável fundamental para o estudo térmico do revestimento de painéis de aço. Ela determina a quantidade de energia necessária para variar a temperatura do corpo em um Kelvin ($J.K^{-1}$, ou grau Celsius, $J.^{\circ}C^{-1}$). Uma forma mais genérica dessa propriedade é o calor específico, que normaliza essa quantidade de energia por unidade de massa ($J.kg^{-1}.K^{-1}$ ou $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$) de material.

Em um sólido, a temperatura é uma medida do grau de agitação dos átomos na rede cristalina em relação as suas posições de equilíbrio [35]. Maiores temperaturas necessitam de mais energia para aumentar a vibração da rede. Quanto maior o calor específico, maior é quantidade de energia necessária para que o aumento das vibrações represente a adição de um grau na temperatura.

Definidas a capacidade do material em transferir o calor de um ponto a outro e sua capacidade de variar a temperatura em uma determinada posição, pode-se determinar a difusividade térmica do material, expressa pela Equação (4.3). Essa propriedade mede a capacidade de o material transferir calor de uma região mais fria para uma mais quente, proporcionalmente a um gradiente de temperatura quando não há mudanças de fase ($s=0$), como mostrado na Equação (4.4).

A forma mais simples de medir o calor específico de um material é por meio da precisa medição da variação de temperatura de um determinado corpo, quando uma quantidade conhecida de energia é transferida para tal. Por exemplo, as técnicas de calorimetria são amplamente empregadas para esses fins, pois atendem tais critérios de forma bastante eficaz.

Uma outra forma de determinar o calor específico dos materiais é por meio de simulações termodinâmicas, que se baseiam nas quantidades de energia teóricas de equilíbrio de fases e compostos, para computar o calor específico do material na faixa de temperatura desejada [43]. Sabendo que as técnicas de calorimetria normalmente trabalham com quantidades de material muito pequenas, essa técnica não é tão eficiente para ser aplicada nos materiais refratários. Isso deve-se ao fato de os refratários apresentarem uma grande heterogeneidade de composição a nível macroscópico, que dificulta obter essas

medidas experimentais precisas, mostrando a importância das técnicas de simulação. Vale destacar que em tais simulações, as características microestruturais da composição avaliada são desconsideradas e, o calor específico é determinado a partir da análise química e das equações de equilíbrio termodinâmico.

4.3.5 Emissividade

Essa propriedade determina a eficiência de uma superfície emitindo energia térmica em relação a um corpo negro. Seu valor varia entre $0 \leq \epsilon \leq 1$, sendo 1 o corpo negro perfeito, e para materiais em geral, essa propriedade depende fortemente do acabamento e da rugosidade superficial, com valores menores que 1 [35]. Usualmente, há uma dificuldade em medir os valores de emissividade para toda a faixa de temperaturas e comprimentos de onda de forma simples para diversos materiais. Porém existem valores médios para algumas classes de materiais, os quais serão considerados e apresentados posteriormente.

4.4 Simulação em elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma poderosa técnica computacional para a resolução de equações diferenciais e integrais, que são originadas dos mais diversos problemas físicos nos campos das engenharias e das ciências aplicadas. Logo, o desenvolvimento da ferramenta para análise térmica e energética de painéis de aço fez-se possível devido à possibilidade de modelar o processo e o comportamento térmico dos materiais utilizados a partir de tal método.

A abordagem do MEF consiste basicamente em discretizar o domínio de um problema com geometria complexa (Figura 4.2), cuja solução para as equações diferenciais não podem ser obtidas por meio de métodos analíticos, em finitos subdomínios onde funções de aproximação são adotadas para aproximar o campo de interesse. A representação da forma aproximada do problema por meio de um número finito de elementos possibilita resolver as mesmas equações diferenciais.

As principais etapas na resolução de problemas via método dos elementos finitos de um problema típico são [44]:

1. Discretização do domínio do problema em um conjunto de elementos finitos, que não é apenas uma entidade geométrica, mas também física, que carrega informações sobre o tipo de problema a ser resolvido;
2. Construção das hipóteses para a resolução do problema físico em cada elemento, juntamente com o desenvolvimento do modelo de elementos finitos a partir da escolha correta do método de aproximação para encontrar as soluções do problema;
3. Montagem do problema em um sistema global de coordenadas;
4. Imposição das condições de contorno (Dirichlet, Neumann ou mista);
5. Solução das equações;
6. Pós-processamento dos resultados.

Para construção do modelo de transferência de calor da panela de aço utiliza-se o software comercial Abaqus/CAE 6.14-1© da Dassault Systèmes Simulia Corp., 2014.

Uma representação do processo de análise em elementos finitos para o caso de transferência de calor e de interesse nesse estudo pode ser sumarizado como apresentado na Figura 4.8, na qual aproxima-se o esquema apresentado por Bathe [45]. O problema usualmente a ser resolvido consiste de um componente estrutural ou uma estrutura real que está submetida a diferentes carregamentos. A idealização desse problema físico em um modelo matemático requer algumas considerações, que juntas traduzem o problema em equações diferenciais que governam o modelo matemático. Como o processo de resolução em elementos finitos é um procedimento numérico, faz-se necessário verificar a proximidade e acurácia das soluções, que caso não atendida deve ser repetida a partir de parâmetros refinados da solução (como malhas mais refinadas) até que a acurácia desejada seja atendida. Vale ressaltar que as análises em elementos finitos são predições do problema físico. Além disso, quando é necessário obter respostas cada vez mais exatas, algumas melhorias podem ser

feitas no modelo matemático ou outros fenômenos físicos necessitam ser considerados a fim de buscar tal solução.

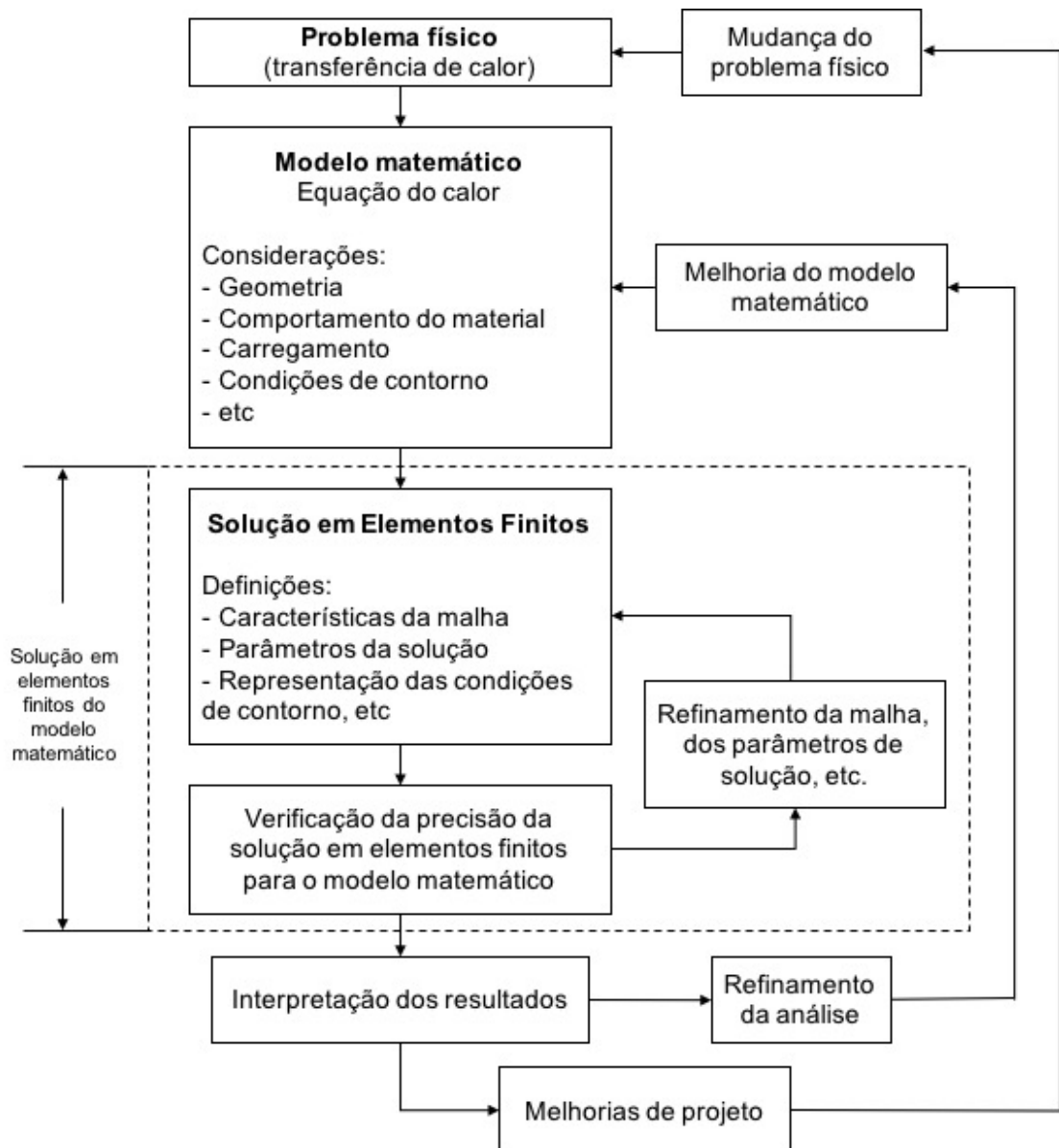


Figura 4.8 Diagrama típico para resolução de problemas de transferência de calor em elementos finitos, adaptado de Bathe [45].

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho é desenvolvida para a construção de uma ferramenta computacional que permita quantificar o consumo energético de painéis de aço, bem como propor soluções que melhorem o desempenho dos componentes em serviço. As possíveis soluções que serão investigadas estão associadas à transferência de calor nas camadas de material refratário e na carcaça metálica.

Como apresentado anteriormente, as condições do processo e do ciclo de operação são complexas e para fins de construção de um modelo, essas devem ser simplificadas. Ainda, esse modelo deverá permitir a comparação de distintos revestimentos refratários quanto ao consumo energético, a eficiência térmica e características do processo.

Os tópicos a seguir descrevem as principais etapas deste projeto. Inicia-se pela apresentação do problema de transferência de calor a ser resolvido numericamente. Então, segue-se para a determinação das propriedades necessárias (associadas às condições de contorno e as propriedades inerentes do material) para resolução do modelo. Por fim, apresenta-se como os resultados serão analisados.

5.1 Descrição do problema

O problema a ser resolvido pelo método dos elementos finitos consiste em definir as temperaturas $T(r,z,t)$ para um modelo de transferência de calor radialmente simétrico, descrito pela equação diferencial de transferência de calor (Equação (4.4)). Esse modelo considera a mudança do estado térmico do sistema em função do tempo e permite calcular o fluxo de calor para cada incremento de tempo, de onde é possível determinar a energia transferida entre cada nó do modelo. A equação diferencial que descreve o problema é:

$$\rho(T) c_p(T) \dot{T} - \nabla \cdot [k(T) \nabla T] = 0 \quad (5.1)$$

sendo ρ a densidade do material, c_p o calor específico e k a condutividade térmica. O calor latente associado às transformações de fases nos materiais foi

desconsiderado, visto que as comparações são feitas no sexto ciclo. No modelo utilizou-se elementos quadrilaterais lineares (DCAX4), com uma aresta da ordem de 0,01 m.

5.2 Determinação e estimativa de propriedades

5.3.1 Estimativa dos coeficientes de transferência de calor por convecção

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h , é um parâmetro que quantifica a razão entre o fluxo de calor e a variação de temperatura entre a superfície do corpo e o meio que o circunda, i.e., governados pela lei de resfriamento de Newton (Equação (4.5)). O valor de h está associado ao mecanismo de transferência de calor por convecção e sua magnitude depende das propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condutividade térmica, etc.), da temperatura, da geometria da superfície e, também, do tipo de regime no qual o fenômeno de convecção atua (natural, forçado, etc.).

No modelo da panela, não foram considerados os mecanismos de convecção forçada, assim, todos os coeficientes de transferência de calor utilizados representam a convecção natural (ou livre), na qual a movimentação do fluido decorre apenas das diferenças de densidade e pela flutuabilidade. No modelo aqui descrito, apesar da geometria cilíndrica da panela, suas paredes podem ser consideradas planos verticais uma vez que se verifica a relação:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \quad (5.2)$$

sendo que D é o diâmetro da panela, L a altura da panela e Gr_L o número de Grashof (veja Apêndice A). A Equação (5.2) é verificada tanto para o ar, quanto para o aço líquido. No caso do fundo (interno e externo) e do topo do banho, os coeficientes são calculados considerando placas horizontais e o comprimento característico L dessas superfícies é dado pela razão entre a área e o perímetro da placa.

Detalhes sobre os modelos utilizados na determinação de todos os coeficientes de transferência de calor deste trabalho são apresentados no Apêndice A. Nesta mesma seção, estão os valores considerados para as faixas de temperatura de interesse.

5.3.2 Estimativa do calor específico dos refratários via simulação termodinâmica computacional

O calor específico é uma das propriedades do material necessárias para obter a solução numérica do problema de transferência de calor. Nesse trabalho, os valores dessa propriedade para os refratários são simulados no software FactSage. Esse software tem uma base de dados integrada com propriedades termodinâmicas de diversos compostos e possui ferramentas que possibilitam estimar as propriedades termodinâmicas de diversos materiais. Isso é possível através do módulo *Equilib* que possibilita calcular o calor específico de constituintes puros e soluções sólidas, baseado em critérios de equilíbrio termodinâmicos [43]. Os resultados para cada material utilizado estão apresentados na seção correspondente a esta propriedade do Apêndice B.

5.3 Modelos da panela de aço em elementos finitos

5.3.1 Geometrias

Duas geometrias de panela de aço são investigadas nesse trabalho. A primeira considera um caso com dimensões e materiais utilizados em uma aciaria (Figura 5.1.A). Esse modelo (caso 1) será utilizado para a validação experimental da ferramenta computacional. A segunda é uma panela esquemática cujas dimensões foram obtidos da literatura (Figura 5.1.B), na qual serão investigadas diferentes combinações de materiais (caso 2).

Em ambos, adotou-se um modelo axissimétrico. No caso real, as panelas aproximam-se de uma condição de axissimetria, exceto por regiões próximas ao ponto de impacto do metal líquido durante o enchimento da panela. Porém, visando reduzir os custos computacionais do uso de um modelo tridimensional completo, pequenas diferenças de espessura foram desprezadas.

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. Detalhes dos modelos para cada caso são mostrados na Figura 5.2.

Panela real (validação experimental) – caso 1

O projeto da panela utilizada na validação experimental foi obtido diretamente de uma siderúrgica e, por questões confidenciais, alguns detalhes encontram-se omitidos. Nota-se a complexidade de materiais aplicados no revestimento, representados pelas diferentes cores na Figura 5.1.A, e também as dimensões deste equipamento projetado para transportar aproximadamente 200 toneladas de aço líquido. Tal projeto de panela é modelado como mostrado na Figura 5.2.A, na qual também estão identificadas as dimensões, superfícies e pontos de interesse, e as camadas e espessuras dos distintos materiais. Vale destacar que no caso real da panela, a camada de trabalho está dividida em

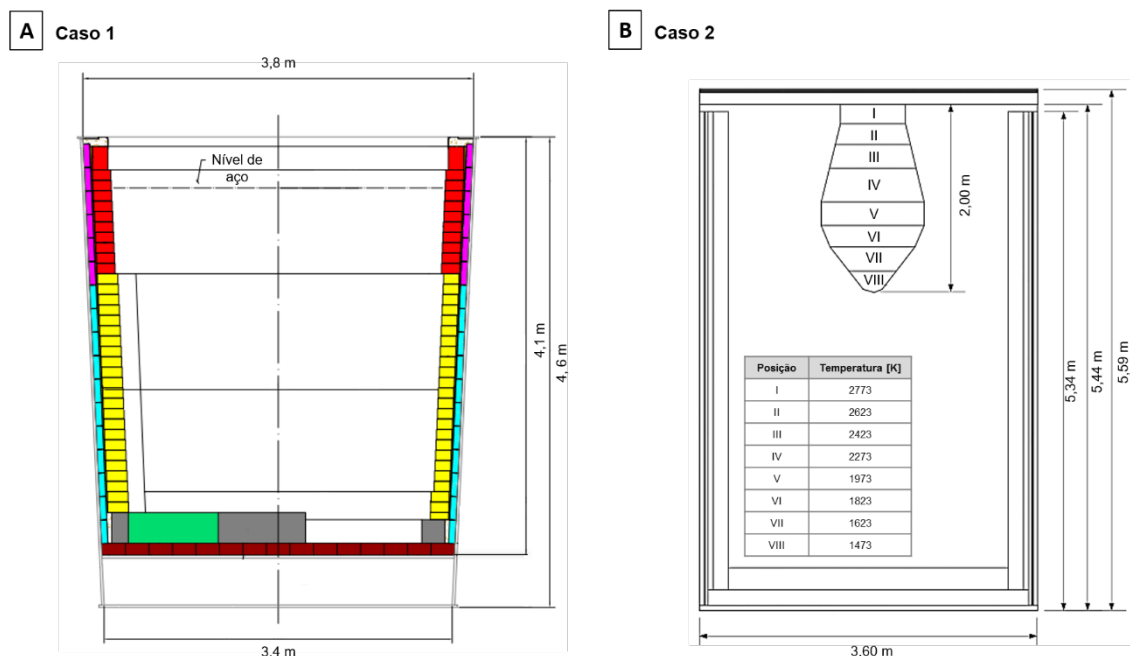


Figura 5.1.A) Geometria e características do revestimento de uma panela real usada para a validação experimental da ferramenta. B) Panela esquemática obtida na literatura usada para investigar os parâmetros do revestimento no consumo de energia [11].

mais de uma região, devido as variadas solicitações que os materiais aplicados nesta camada estão submetidos.

Como as medidas termográficas feitas na usina foram obtidas em um momento em que a panela já estava operando (aproximadamente 60 corridas), considera-se um desgaste homogêneo (78 mm na parede e 117 mm na sola), também no modelo simulado, para aumentar a representatividade dos resultados.

Os materiais considerados nesse modelo estão apresentados no Apêndice B, no qual a linha de escória considera a aplicação do Material D, a linha de metal do Material A, a sola do Material B, a camada permanente do Material C e a carcaça metálica do Material E. Tal configuração de revestimento não considera a aplicação de materiais isolantes térmicos entre a carcaça e a camada permanente.

Panela com dados da literatura – caso 2

Para fins investigativos e comparativos de diversos cenários de redução no consumo de energia, opta-se por utilizar uma panela esquemática como mostrado na Figura 5.2.B, na qual também são apresentadas as dimensões

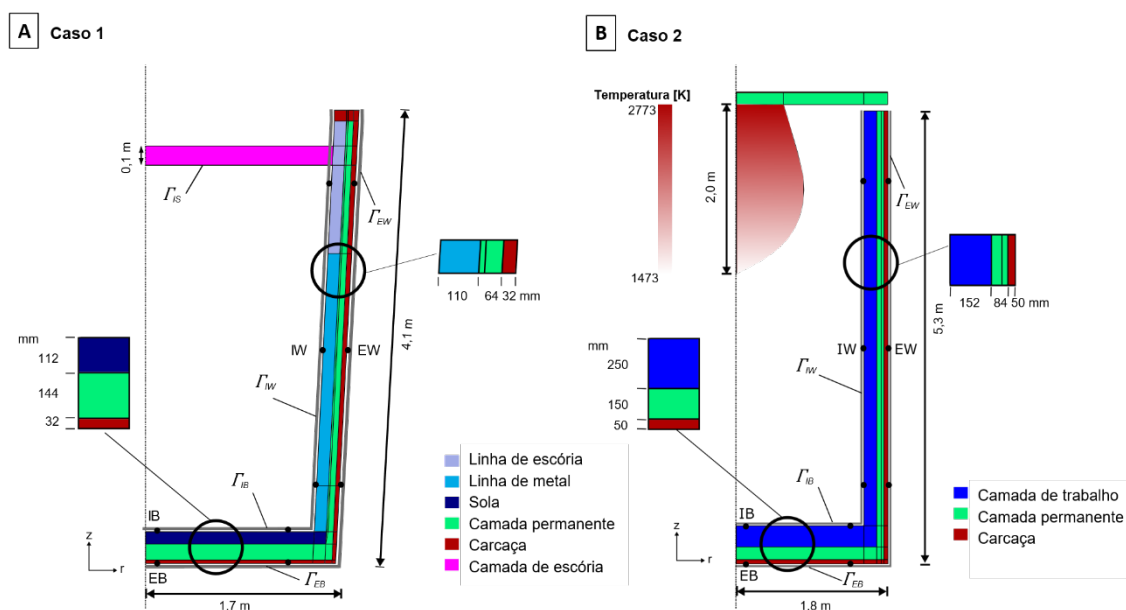


Figura 5.2 Detalhes dos modelos das simulações para A) caso real (caso 1) e B) panela esquemática (caso 2).

consideradas [11]. A espessura de cada uma das camadas é mostrada nos detalhes. Neste caso, é considerado apenas um material em cada uma das camadas e qualquer alteração em relação a configuração padrão (dimensão ou localização dos materiais) é apresentada junto ao resultado do problema investigado.

Nesse caso, o material considerado na camada de trabalho é o Material A, na camada permanente o Material C e na carcaça metálica o Material E. Nesse modelo, também será considerada uma camada isolante, cuja propriedade é dada pelo Material F, e diferentes materiais para a camada de trabalho: Material G, Material H e Material I.

Tampa e queimador

Durante as etapas de aquecimento, a panela de aço é tampada e na base dessa tampa é acoplado um queimador de gás natural, que promove a combustão liberando energia para aquecer o revestimento. A modelagem dessa parte é feita baseando-se em dados (dimensões e distribuição de temperatura na chama) apresentados por Glaser et al [11], Figura 5.2. A configuração da tampa aplica-se para todos os casos analisados, inclusive na validação experimental com uma panela real. A abordagem para modelar as etapas de aquecimento é simplista (a chama é um sólido irradiante), mas para critérios comparativos em relação às configurações de revestimento possui boa representatividade. Além disso, nessas condições, pode-se considerar que o principal mecanismo de transferência de calor da chama para o revestimento é a radiação, sendo a convecção responsável por uma pequena parcela desse total.

5.3.2 Materiais

Os materiais considerados nas simulações tiveram parte das suas propriedades medidas experimentalmente, parte das propriedades foram simuladas e outras retiradas da literatura. No Apêndice B são apresentados todos os materiais em questão, assim como a origem desses valores. Quando

possível, as propriedades de interesse são consideradas na faixa de temperatura mais ampla possível, dentro dos limites do problema.

5.3.3 Interações, condições iniciais e de contorno

A Tabela 5.1 mostra uma síntese das interações consideradas em cada superfície dos modelos. Nota-se que as considerações para as superfícies externas da panela são as mesmas durante todas as etapas simuladas, já as condições internas diferem apenas para a etapa em que a panela está cheia. Também é importante ressaltar que a temperatura média do aço durante a etapa de refino secundário ($T_{aço}$) é atualizada para cada instante de tempo, subtraindo-se a quantidade de energia térmica transferida para o revestimento, nesse mesmo intervalo, do total armazenado no banho, i.e.:

$$\frac{dT_{aço}}{dt} = -\frac{1}{\rho_{aço}c_{aço}V} \int_{\Gamma} q(r, z, t) d\Gamma \quad (5.3)$$

sendo $\rho_{aço} = 7000 \text{ kg m}^{-3}$ a densidade do aço líquido, $c_{aço} = 687 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ seu calor específico [46] e V o volume total. As superfícies Γ consideradas para o caso 1 são $\Gamma = \Gamma_{IW} \cup \Gamma_{IB} \cup \Gamma_{IS}$ e para o caso 2, $\Gamma = \Gamma_{IW} \cup \Gamma_{IB}$ (onde Γ_{IS} é a superfície inferior da camada de escória). A temperatura do revestimento da panela no instante inicial é $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, i.e.,

$$T(r, z, t = 0) = T_0 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.4)$$

A chama apresenta durante todo o pré-aquecimento o perfil de temperaturas mostrado na Figura 5.2. A temperatura do ambiente (T_{amb}) distante da panela é $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Já no interior da panela, a temperatura do ar (T_{ar}) é considerada $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e, quando a panela está cheia, a temperatura inicial do aço é $1680 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (caso 1) e $1650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (caso 2). Nessa última etapa (refino secundário), a panela do caso 1 também perde calor para a camada de escória, considerada um sólido com 100 mm de espessura situada a $3,853 \text{ m}$ da base da panela, cuja propriedade está apresentada no Apêndice B. Os mecanismos que atuam na base dessa parte

são iguais aos que ocorrem na parede e no fundo no qual aplica-se condições de convecção com a temperatura do banho dada pela Equação (5.3).

Tabela 5.1 Condições de contorno para cada etapa simulada.

Superfície	Γ_{IB}	Γ_{IW}	Γ_{IS}	Γ_{EB}	Γ_{EW}
Aquecimento	$\sigma \varepsilon f (T_{amb}^4 - T^4) + h_{ar}(T)(T_{ar} - T)$		-	$\sigma \varepsilon f (T_{amb}^4 - T^4) + h_{ar}(T)(T_{ar} - T)$	
Espera vazia			-		
Refino secundário	$h_{aço}(T)(T_{aço} - T)$				

* f é o fator de forma

5.3.4 Ciclo da panela

Na representação do ciclo da panela são consideradas algumas simplificações. Durante o refino secundário, quando a panela está cheia, despreza-se tanto as etapas que contribuem para as perdas de energia do metal (agitação, adição de elementos de liga, etc.), quanto às de reaquecimento do banho (forno-panela, aluminotermia, etc.), e considera-se que a panela espera e o fluido troca calor com as superfícies apenas por convecção natural. Os momentos de enchimento e vazamento da panela também são desconsiderados. Dentro de um cenário comparativo, essas simplificações são válidas visto que são aplicadas em todas as configurações de revestimento estudadas e funcionam como um parâmetro de comparação.

Portanto, o ciclo simulado resume-se em três principais etapas: aquecimento, panela cheia e panela vazia. Dependendo das práticas de cada usina, determina-se quais e qual duração dessas etapas devem ser consideradas. Para os dois casos propostos, é mostrado um esquema na Figura 5.3 do ciclo simulado e a duração de cada etapa. Nota-se que são simulados seis ciclos do processo em cada caso, para que as comparações sejam realizadas neste último ciclo, no qual as temperaturas do revestimento pouco variam com os demais ciclos e os efeitos do pré-aquecimento são minimizados. Nesse intervalo de seis ciclos também pode-se assumir que não há variação das propriedades dos materiais aplicados no tempo.

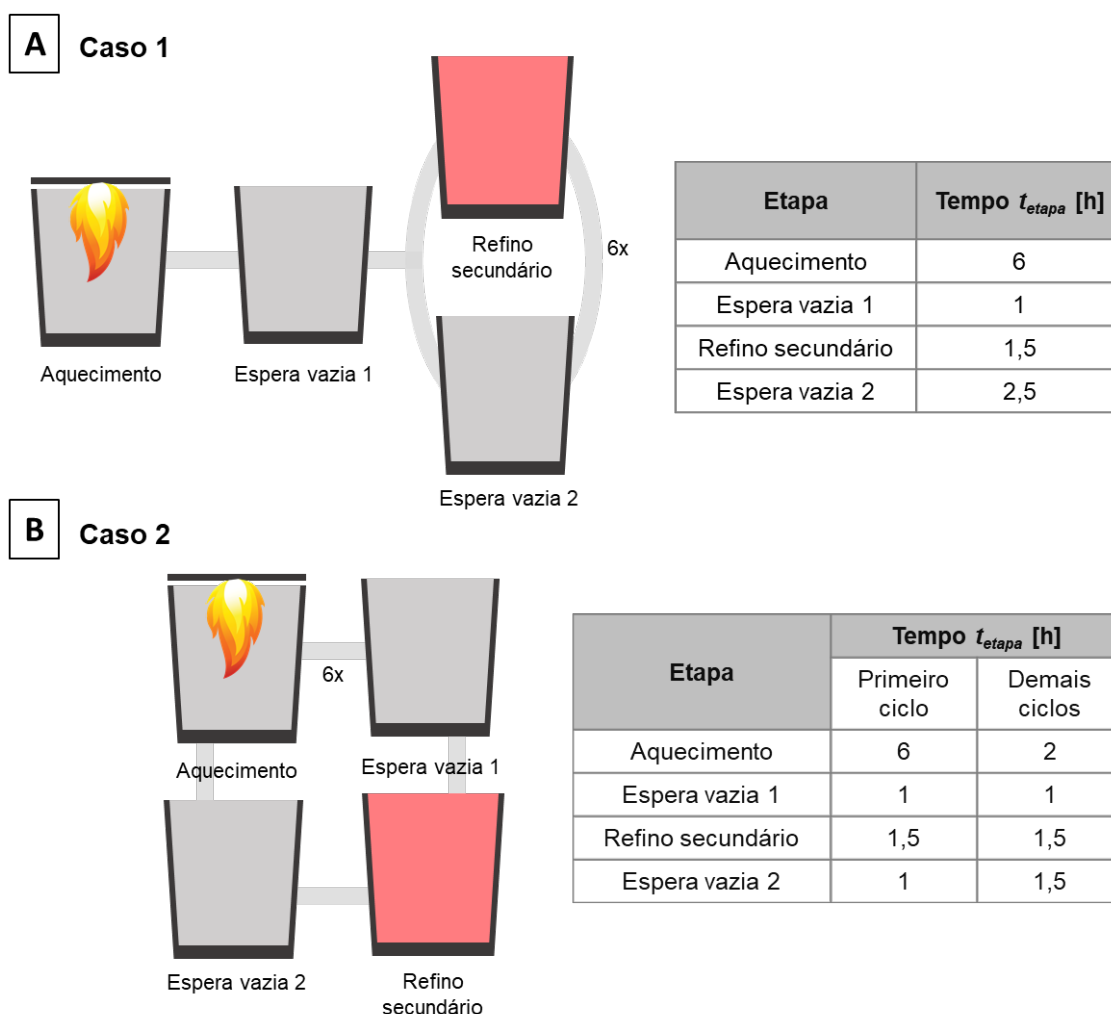


Figura 5.3 Duração das etapas das simulações para o A) caso 1 e B) caso 2.

5.3.5 Diagrama de resolução do problema da panela de aço

Uma forma esquemática de visualizar o método considerado na construção e análise dos modelos da panela pode ser vista na Figura 5.4. Para a criação dos modelos foi desenvolvido um algoritmo em Python cuja função era permitir a construção de modelos de forma prática, variando-se as condições de geometria, materiais, contorno e iniciais. Para cada etapa do ciclo da panela foi desenvolvido um modelo com as condições específicas, já descritas anteriormente. Logo, o resultado de cada modelo é importado como condição inicial das etapas subsequentes, da mesma forma como quando outros ciclos são simulados. Vale destacar que para representar a dependência da temperatura dos coeficientes de transferência de calor e a queda de temperatura

do banho metálico, faz-se necessário o uso de uma subrotina em Fortran (FILM), considerada em todas as etapas.

Após completado cada etapa (resolução do problema matemático) os resultados de interesse são arquivados em arquivos texto para posterior tratamento.

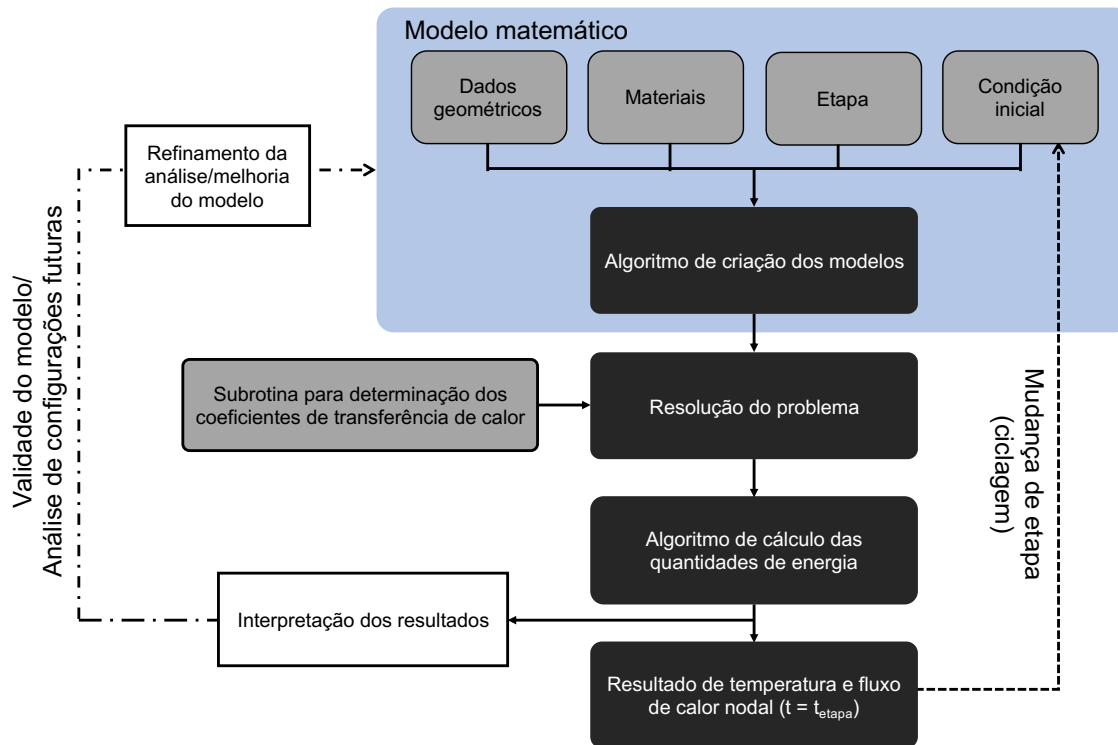


Figura 5.4 Diagrama para criação e análise das configurações e casos propostos para o revestimento refratário de painéis de aço.

5.4 Forma de análise dos resultados

As grandezas de interesse das análises realizadas, como exposto anteriormente, são a temperatura e o fluxo de calor.

5.4.1 Experimentos

Com o propósito de atender aos objetivos propostos neste trabalho, alguns experimentos que envolvem alterações na configuração e no tipo de material utilizado no revestimento das painéis são investigados. Para cada caso, busca-se identificar o efeito de tais alterações na quantidade de energia consumida no processo, que pode ser relacionada a temperatura média final do

aço logo ao final da etapa de refino secundário. Ainda, quando relevante, são investigadas as temperaturas de carcaça e outros fatores que podem impactar o desempenho de cada configuração no processo. Em suma, temos:

1. Validação experimental da ferramenta.
2. Análise da adição de uma camada isolante (Material F) no revestimento da panela, assim como sua espessura e localização no design proposto.
3. Variação da espessura da camada permanente (Material C) e do volume útil da panela.
4. Análise de quatro matrizes distintas de refratários aplicados na camada de trabalho: Alumina-Magnésia-Carbono (AMC – Material G), Magnésia-Alumina-Carbono (MAC – Material H), Alumina-magnésia (AM – Material A) e Concreto de Alta-alumina (CA – Material I).

Outros detalhes sobre cada item são apresentados na Seção 6, onde os resultados são analisados.

5.4.2 Termografia da panela

As análises termográficas da panela de aço são realizadas com o auxílio de uma câmera infravermelho FLIR, modelo T620, que captura a distribuição de temperaturas em uma superfície a partir da quantidade de energia térmica irradiada pela região analisada. A razão entre a quantidade total de energia irradiada na região da medida pela constante de Stefan-Boltzmann e pela emissividade dessa superfície determina a temperatura de cada região.

São obtidos valores de temperatura para as superfícies externas da panela (carcaça metálica) e também para as superfícies internas (camada de trabalho). Neste estudo, define-se as emissividades de 0.85 para o refratário da parede interna e para a carcaça metálica, quando são realizadas as medidas utilizando o pirômetro digital. Tais medidas possibilitam comparar os desvios entre as temperaturas calculadas pela ferramenta de simulação e as de uma panela real.

5.4.3 Comparação de resultados experimentais e simulados

Para a validação experimental são comparadas as temperaturas da carcaça metálica e da face quente com as medidas da câmera de infravermelho. São realizadas as medidas em duas painelas de aço de mesma configuração de revestimento, em instantes diferentes do processo. Para a primeira, as temperaturas são medidas na etapa de espera até o enchimento e parte do início do refino secundário. Para a segunda, as medidas de temperaturas são do final do refino do secundário até parte da espera subsequente.

5.4.4 Cálculo da energia transferida

A energia transferida em 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 entrada e saída de energia do sistema. Para cada superfície, a quantidade de energia num instante t é dada por:

$$E(t) = \int_0^t \int_{\Gamma} q(r, t, z) d\Gamma dt \quad (5.5)$$

sendo Γ a superfície de interesse do modelo. As perdas pela borda da panela no topo são desconsideradas do balanço energético.

A energia estocada no revestimento refratário durante o processo pode ser calculada a partir da quantidade total de energia que entra e deixa o sistema através das superfícies internas e externas da panela, ou seja, $\Gamma = \Gamma_{IW} \cup \Gamma_{IB} \cup \Gamma_{EW} \cup \Gamma_{EB}$. Vale ressaltar que as perdas de energia pela borda do topo da panela foram desconsideradas, devido à baixa magnitude do fluxo nessa região, comparado às demais. Essa abordagem de cálculo da energia estocada é equivalente ao cálculo feito a partir da integração da derivada da temperatura em relação ao tempo em todo o volume de refratário no revestimento, isto é:

$$E(t) = \int_0^t \int_V \rho(T) c(T) \frac{dT(r, t, z)}{dt} dV dt \quad (5.6)$$

Esta metodologia tem sido empregada por outros autores [28], porém a variação das propriedades dos materiais com a temperatura não é considerada

no cálculo (densidade e calor específico são constantes), o que poderia ser feito para aumentar a precisão dos resultados.

5.4.5 Critérios de análise dos experimentos

Os resultados das simulações permitem identificar a quantidade de energia transferida em cada região de interesse do modelo, a quantidade de energia estocada no revestimento e, também, a quantidade de energia perdida pelo metal. Além disso, obtém-se a distribuição de temperatura no revestimento e a temperatura média do aço líquido no final da etapa do refino secundário. Com isso, as configurações de revestimento são comparadas e as com melhor desempenho destacadas, considerando a:

1. Temperatura do aço no final do refino secundário.
2. Quantidade de energia estocada no revestimento.
3. Temperatura de carcaça.
4. Temperatura no ponto médio do revestimento de interesse.
5. Variação de temperatura da face quente.
6. Quantidade de aço produzida.
7. Quantidade de refratários consumida (massa).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma das grandes vantagens do uso de ferramentas computacionais para resolver problemas de engenharia é a possibilidade de explorar diversos cenários de aplicação de materiais, sem a necessidade de experimentar todo o espaço de opções. Contudo, a validação dos modelos computacionais é uma prática necessária para verificar a proximidade dos resultados obtidos pelos modelos computacionais na representação de um cenário real. A partir disso, pode-se fixar todas as variáveis relacionadas as condições do processo (tempo, condições de contorno, etc.) e avaliar como os diversos parâmetros do revestimento refratário podem ser alterados para que se identifique o efeito de cada configuração no desempenho esperado do processo. No caso da panela de aço, explorar diversos cenários de revestimento refratários pode indicar qual otimiza o processo, reduzindo o consumo de energia e materiais, melhorando a qualidade do ambiente e aumentando a vida do equipamento (refratários e partes metálicas). Para isso, são necessários o desenvolvimento e a aplicação da ferramenta desenvolvida em elementos finitos, para que de forma prática possa-se analisar cada caso de interesse, como proposto nos objetivos desse trabalho. Nas próximas seções são apresentadas novas configurações de revestimento e discutidas as suas implicações no processo das aciarias, quanto aos critérios propostos pela metodologia do trabalho.

6.1 Estudo do modelo computacional e comparação com resultados experimentais (caso 1)

Inicialmente, os resultados do modelo computacional foram comparados a dados experimentais para fins de validação. As temperaturas simuladas foram aferidas para 4 pontos da carcaça e 4 da superfície interna para todas as etapas do processo – seis ciclos com o total de 31 h (Figura 6.1) – para o caso 1, cuja geometria e materiais do revestimento são obtidos a partir de uma panela real. Essas regiões foram selecionadas para possibilitar a comparação, na parede e no fundo, com os valores obtidos das medidas *in situ*, realizadas com o pirômetro óptico.

A Figura 6.1 apresenta o histórico de temperaturas de carcaça e da face quente obtidas pelo modelo computacional, sendo que cada curva corresponde a um dos pontos indicados no esquema da panela, mostrado ao lado do gráfico. O histórico de temperaturas desse resultado foi obtido para todas as análises do presente trabalho, mas a discussão sobre eles muitas vezes é omitida, visto que há uma semelhança de comportamento entre os resultados, diferindo apenas em magnitude. Porém, quando o entendimento mais detalhado se faz necessário, esses dados são apresentados e discutidos. Tal curva é construída a partir do registro de temperatura realizado durante as análises de simulação. Logo, em cada incremento de tempo, obtêm-se os valores de temperatura para todos os nós da malha que definem o domínio da panela e escolhe-se quatro deles sobre a face quente e mais quatro para carcaça (ou quantos outros forem necessários para ilustrar o que é proposto) para obter as curvas de histórico de temperatura nessas regiões, como ilustrado na Figura 6.1. Também observa-se que após o ciclo 2, o comportamento térmico das regiões analisadas se altera pouco e se

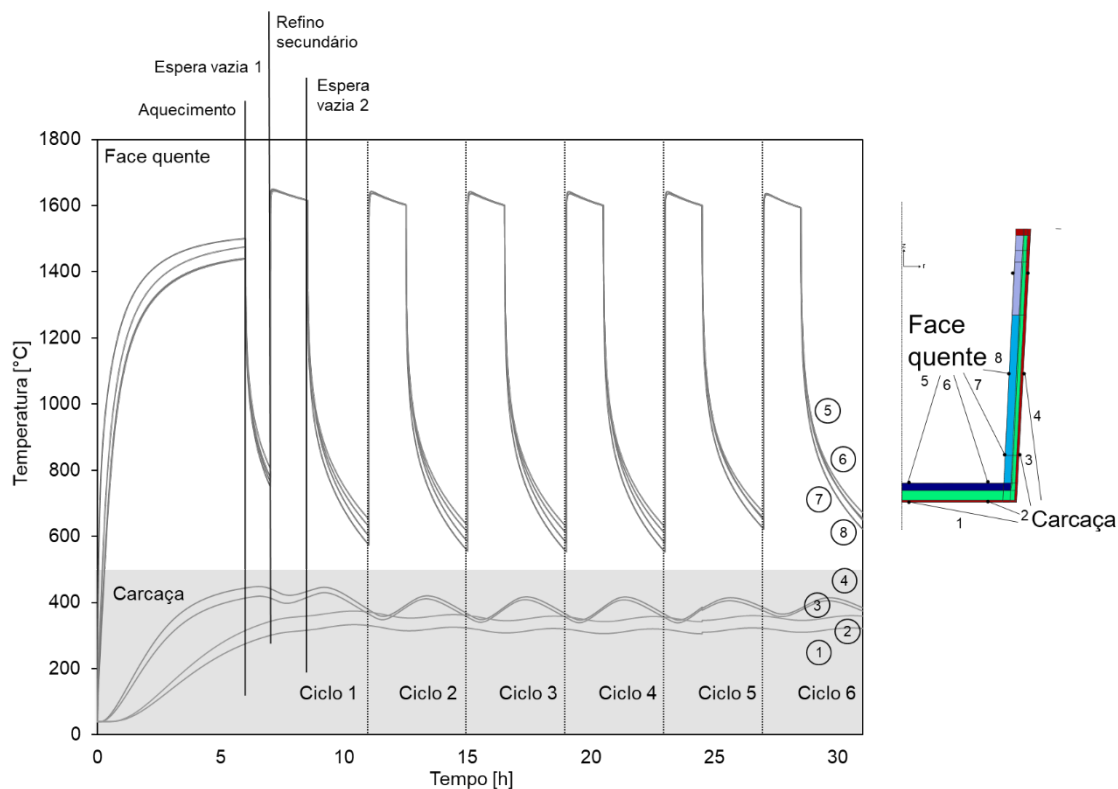


Figura 6.1 Evolução de temperaturas para os 4 pontos na face quente da camada de trabalho e 4 pontos da carcaça durante os seis ciclos simulados, no caso 1. O esquema ao lado do gráfico mostra as regiões de onde foram obtidos os valores de temperatura no modelo de simulação.

repete com os ciclos. Toda análise comparativa realizada sempre considera as informações do último ciclo como as mais representativas das condições de processo.

Quando analisadas as temperaturas de carcaça, observa-se que essa superfície atinge temperaturas próximas a 350 °C em média, após o primeiro ciclo completo. Até esta etapa, a carcaça é aquecida de forma incremental devido à propagação do calor pelo revestimento, cuja velocidade depende das características dos materiais utilizados. Quando o patamar é atingido, têm-se pequenas oscilações de temperatura, que passam a sofrer pequenas oscilações quanto à etapa do processo e aos fenômenos que estão ocorrendo na face quente (camada de trabalho). As temperaturas de carcaça são ligeiramente superiores para a parede da panela, em relação ao fundo, devido a menor espessura total do revestimento nesta região (menores oscilações).

Para as temperaturas da face quente, tem-se uma maior oscilação de temperaturas de acordo com a etapa do processo. No primeiro ciclo as temperaturas internas aumentam da temperatura ambiente (40 °C) até valores próximos a 1630 °C. Quando a panela está em operação (demais ciclos), as temperaturas na face quente variam entre 650 °C (fim das esperas) até 1635 °C (durante o refino secundário). Esses resultados revelam o comportamento

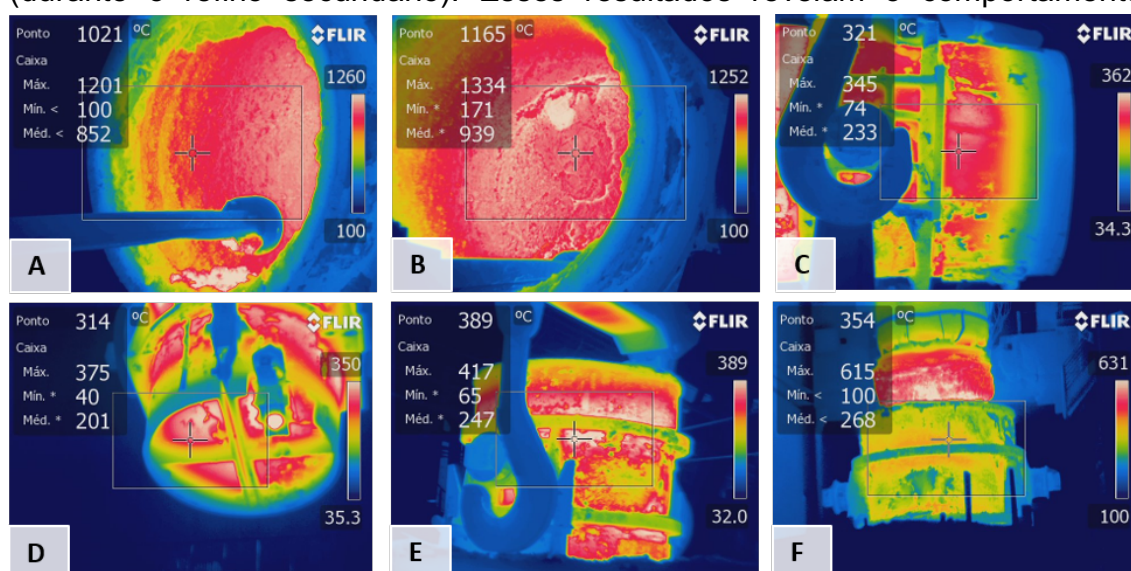


Figura 6.2 Imagens de infravermelho das medidas de temperatura em painéis reais, realizadas em instantes distintos: A) e B) face quente na espera vazia 2, C) da parede na carcaça; e D), E) e F) da parede da carcaça durante o refino secundário.

transiente da camada de trabalho, que tem seu estado térmico alterado de acordo com cada etapa do processamento.

Para realizar as comparações entre o caso experimental e as simulações, foram feitas medidas em duas painelas distintas com mesma configuração de revestimento (Painela A e Painela B), porém operando em diferentes momentos do ciclo da painela. Algumas das imagens realizadas são apresentadas na Figura 6.2, de onde é possível obter o valor de temperatura nos pontos de interesse a partir da escala de cores. Nessa figura, as imagens A e B são da face quente quando a painela está sendo reparada e o material aderido à parede removido. A imagem C mostra a distribuição de temperaturas na carcaça durante a mesma etapa. Já as imagens D, E e F apresentam as temperaturas da carcaça no período do refino secundário (na imagem F o aço está passando pela etapa de desgaseificação), que a única temperatura possível de ser medida durante esse momento do processo.

Quando realizada a validação, utilizou-se a maior sequência de medidas de temperatura (23 imagens para a Painela A e 30 imagens para Painela B) e, então, comparou-se com os momentos respectivos do último ciclo da simulação (ciclo 6). Na Painela A, as medidas acompanharam a painela vazia sendo transportada para receber o metal líquido e também parte da etapa do refino secundário, totalizando 108 minutos (9:26 AM – 11:14 AM). Na Painela B, as temperaturas foram obtidas para o final do refino secundário, quando a painela estava vazando o aço líquido no distribuidor, até parte da etapa posterior onde a painela estava sendo reparada (42 minutos, 3:56 PM – 4:38 PM). Tais momentos estão identificados na Figura 6.3, porém em relação aos instantes do ciclo 6 das simulações. Nos gráficos dessa figura, são mostrados tanto os valores das simulações (linhas) quanto das medidas experimentais (pontos). As temperaturas de carcaça experimentais são identificadas por círculos e as temperaturas da face quente por triângulos (preto para a parede e vermelho para o fundo).

A Figura 6.3 ressalta que as temperaturas de carcaça apresentam boa aproximação entre os valores simulados e os medidos em uma painela real, para ambos os casos. Comparando as médias entre os valores simulados e os

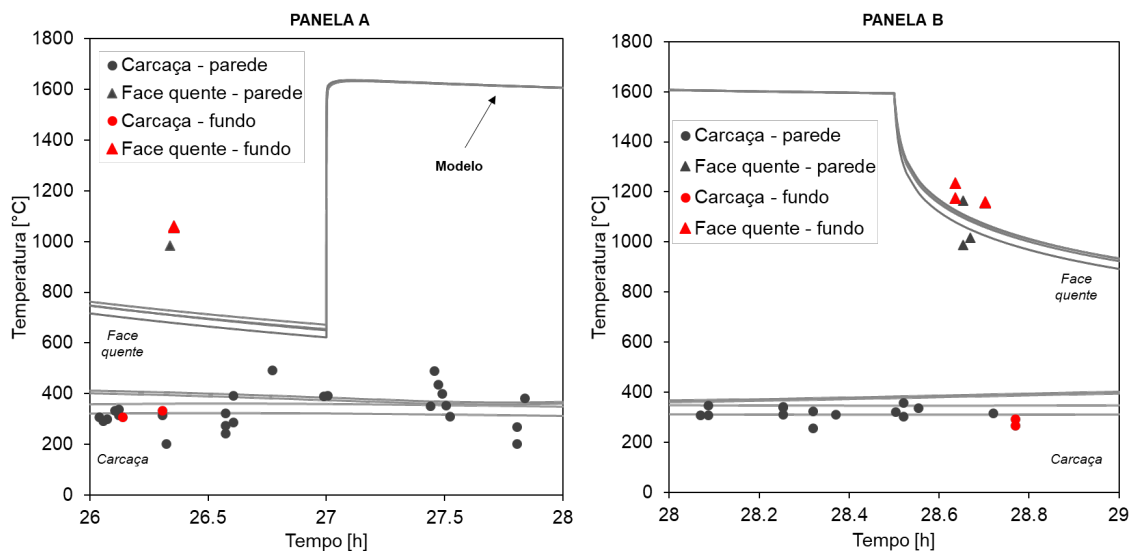


Figura 6.3 Comparação dos resultados simulados com os coletados experimentalmente para a Panela A e B.

medidos experimentalmente nota-se um desvio de aproximadamente 2,9% e 7,2% superior na média, respectivamente para as Painelas A e B. A temperatura média observada nas simulações foi de 351,6 °C e para os dados coletados de 340,3 °C e 321,5 °C (Painela A e B). Tal comparação é possível visto que essas temperaturas não variam significativamente com o tempo, fazendo com que o valor médio seja representativo. Já para as temperaturas da face quente no qual o comportamento transiente é evidente, dois resultados distintos são identificados comparando as temperaturas para a Painela A, no final da espera vazia, e para a Painela B, no começo da espera após o esvaziamento (Figura 6.3).

Na Painela A, há um desvio de 30,9% entre as médias de temperaturas da face quente, no intervalo de tempo das medidas realizadas (26 h 20 min e 26 h 30 min – ciclo 6). Esse resultado pode estar associado à incorreta correspondência das medidas com os instantes da simulação, visto que o conjunto de imagens fornecido não identificava o tempo total em que a painela já estava esperando para o vazamento do conversor. O resultado da simulação considera a painela resfriando pelo período de 1 h 50 min, ou seja, 40 minutos antes do vazamento (que foi a informação fornecida e descontada do tempo total médio de espera, 2 h 30 min). De qualquer forma, se as posições temporais das medidas estiverem corretas, outros fatores podem estar influenciando os

resultados como a adesão de escória e aço no refratário – que altera as propriedades radiativas da superfície e também pode provocar o destacamento de parte do revestimento (reportado pela usina) – ou a influência da rugosidade superficial no ângulo de medida do pirômetro.

Para a Panela B, os valores de temperatura simulados são mais próximos aos dados experimentais, sendo este último 3,1% inferior, no intervalo de tempo considerado (28 h 04 min até 28 h 50 min – ciclo 6). Tais resultados mostram a proximidade entre o modelo computacional e as medidas reais. Contudo, outras análises podem complementar a validação experimental, como a avaliação da temperatura média do aço líquido no início (temperatura de vazamento) e no final (temperatura de lingotamento) do refino secundário.

A Figura 6.4 apresenta o gráfico que compara os valores simulados com a média entre as temperaturas medidas no início e no final das sete corridas analisadas. O valor médio inicial da temperatura do aço líquido foi considerado 1680 °C nas simulações (obtido a partir da média dos setes valores de temperatura de vazamento). Já para a temperatura final nota-se que o valor simulado é aproximadamente 58 °C inferior à média experimental. Isso representa uma temperatura do aço média 3,6% superior para o modelo em relação ao caso real.

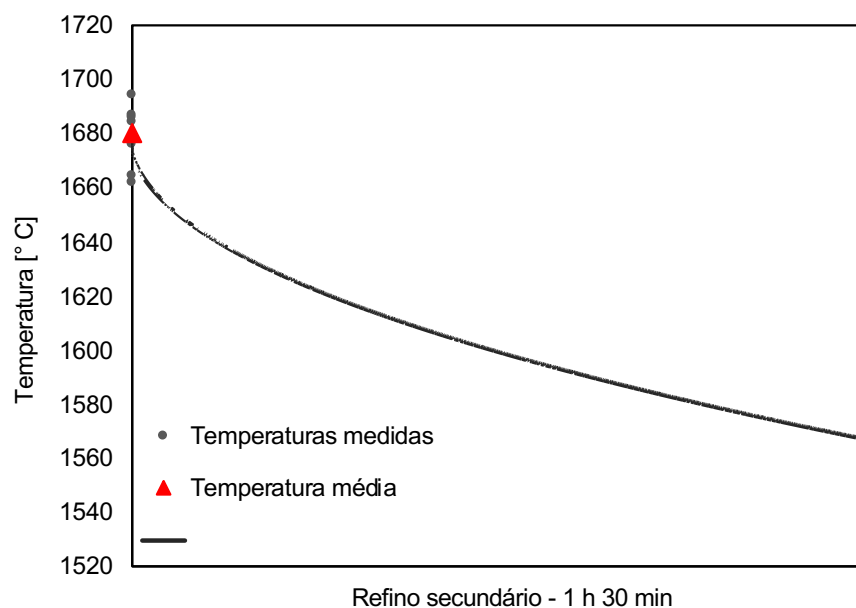


Figura 6.4 Comparação entre as temperaturas médias do aço líquido no início e no fim do refino secundário.

Vale destacar que a média da temperatura de esvaziamento foi obtida a partir de sete valores bastante distintos, destacando a particularidade de cada ciclo do processo e sua variabilidade, que leva a incerteza dessa média de temperaturas ao final do refino secundário.

De maneira geral, o modelo apresenta boa representatividade em relação ao caso real, principalmente quando utilizado para critérios comparativos a fim de identificar o consumo de energia e as temperaturas do equipamento associadas à diversas tecnologias e configurações de refratário aplicados em painéis de aço.

Para estimar o consumo de energia, obtém-se os resultados de fluxo de calor em cada elemento de área das superfícies do modelo para cada instante de tempo de análise. Em cada etapa do processo, o fluxo de calor nas superfícies corresponde aos diferentes mecanismos de transferência de calor atuantes (convecção e radiação), e ora fornecem ou removem calor do sistema. Na Figura 6.5 tem-se o fluxo de calor total para as paredes internas da panela, juntamente com as temperaturas do aço e da média dessas superfícies, durante a etapa de refino secundário para o ciclo 6. Como a diferença de temperatura entre a parede

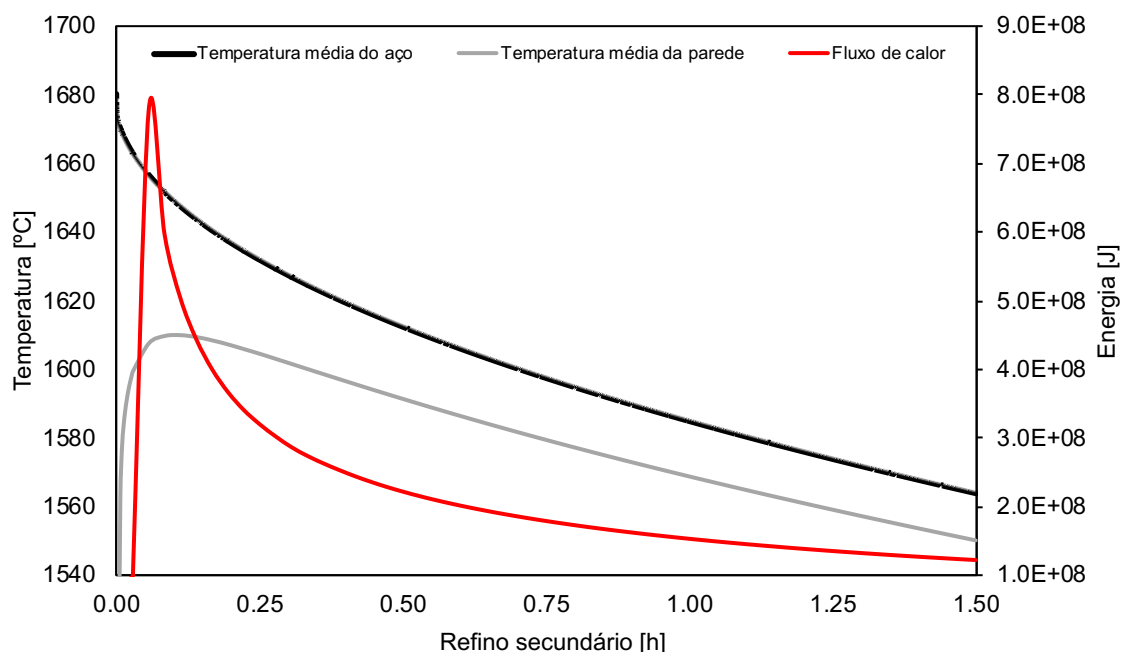


Figura 6.5 Comparação entre as temperaturas médias do aço líquido e da temperatura média da parede interna, juntamente com a variação do fluxo de calor durante o refino secundário.

e o aço líquido no início da etapa é grande e o fluxo de calor do banho para as paredes é proporcional a essa diferença, nota-se grandes quantidades de energia sendo transferida nesses primeiros instantes. Com o aquecimento do revestimento, a diferença de temperaturas é minimizada e o fluxo de calor reduzido.

A queda de temperatura do banho é completamente indesejada para fins de controle térmico e de tempo, e está associada a custos com energia e mão de obra. Portanto, configurações de revestimento que minimizem essas quantidades são preferenciais, assim como materiais que atendam e garantam as expectativas do que é desejado ao processo. A obtenção dessas quantidades de energia é feita integrando os valores de fluxo no tempo para cada etapa do ciclo, que possibilitam estimar as quantidades de energia de entrada e saída na panela de aço.

A Figura 6.6 apresenta essas quantidades de energia e possibilitam a discussão de alguns fatos. Em relação as quantidades de entrada de energia,

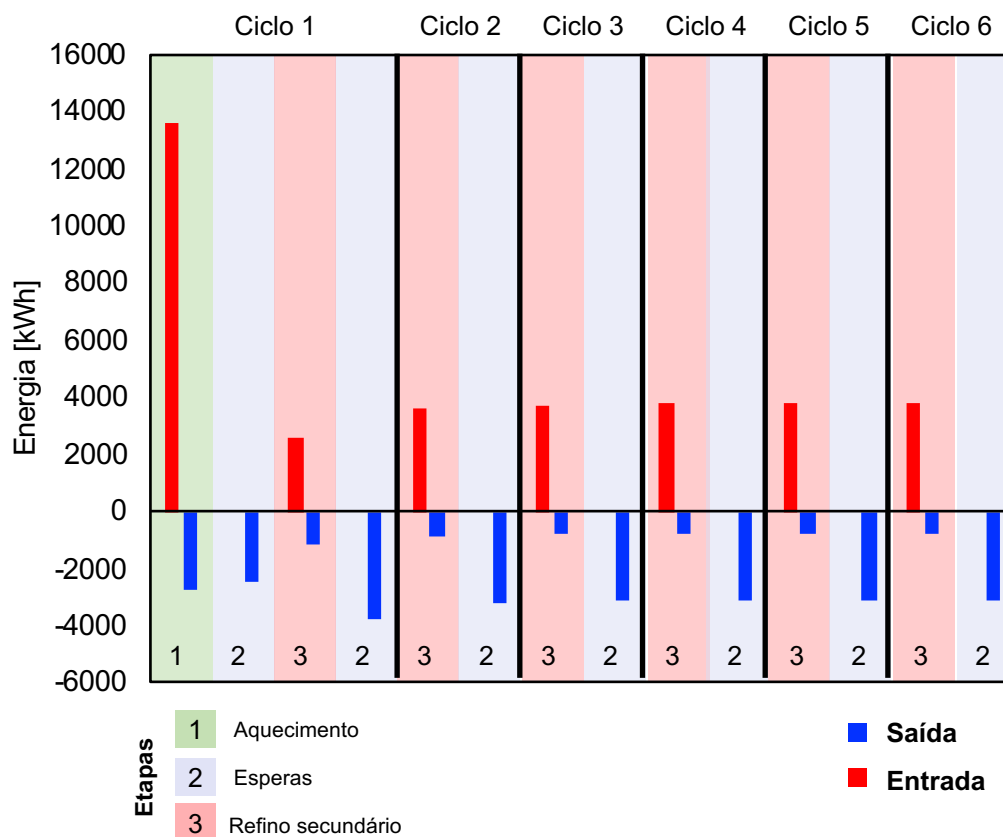


Figura 6.6 Comparação entre as quantidades de energia para cada ciclo da panela analisada no caso 1. Entradas e saídas de energia para cada etapa do ciclo da panela são identificadas pelas diferentes cores e números.

nota-se que apesar do pré-aquecimento do revestimento ser considerado uma simplificação dos mecanismos reais, cumpre a função de promover um gradiente de temperatura inicial no revestimento e mostra que grandes quantidades de energia são necessárias. Essa etapa contribui para o consumo total de energia do processo e deve ser estudada com mais detalhes. Nota-se que a quantidade de energia de entrada durante o refino secundário (ou seja, perda pelo banho) é menor que o primeiro aquecimento, pois o revestimento encontra-se encharcado, mas essa é a etapa principal do processo e utilizada na comparação entre as configurações, visto que na vida total da panela sua contribuição é mais significativa. Ainda na Figura 6.6, tem-se que durante as esperas o sistema da panela perde energia por todas as superfícies, e as quantidades de energia de saída durante o aquecimento e o refino secundário estão associadas as superfícies externas da panela (carcaça metálica) e são menores que as esperas vazias.

Nas próximas avaliações, a ferramenta computacional desenvolvida será aplicada na investigação dos parâmetros e características do revestimento e do processo, que influenciam no consumo energético e no estado térmico das panelas, possibilitando a proposta de soluções tecnologicamente viáveis de implementação em plantas industriais e outras a serem desenvolvidas. As condições de processo e as condições de contorno para cada etapa do modelo são mantidas as mesmas para todas as configurações avaliadas, possibilitando a comparação entre elas.

Os resultados a seguir se referem ao caso 2 apresentado na Metodologia (Seção 5), cuja maior simplicidade geométrica e de materiais facilitam o estudo e a discussão dos diversos cenários propostos, assim como dos resultados encontrados.

6.2 Influência da aplicação de isolantes térmicos e estudo da espessura dessa camada no revestimento (caso 2)

O uso de isolantes térmicos é a primeira alternativa quando busca-se reduzir o consumo de energia ou a transferência de calor, de maneira geral, em

equipamentos que operam em alta temperatura como as painéis de aço. Justamente porque a composição e a microestrutura desses materiais são selecionadas para bloquear a passagem das ondas térmicas nas diversas faixas de temperatura, evitando que o calor seja propagado para regiões não desejadas. Isto faz com que a aplicação desses materiais seja bastante ampla e, logo, é fundamental o entendimento de como cada configuração que contenha esse material afeta a distribuição de temperaturas e o consumo de energia (transferência de calor) dos equipamentos e processos de interesse. Além disso, a eficiência do uso desses materiais depende das solicitações térmicas e mecânicas sob as quais eles são submetidos, uma vez que grande parte das ressalvas em relação ao uso desses materiais concentra-se na sua durabilidade e efetividade quando em alta temperatura e solicitados mecanicamente, visto que a manutenção de sua efetividade é sempre discutida [47]. Nesse trabalho, investigou-se o uso dos isolantes térmicos em uma placa de aço de forma a entender como a espessura e a localização da camada isolante do revestimento afetam as variáveis de interesse no projeto e processo destes vasos. Usualmente, a espessura da camada isolante térmica considerada não ultrapassa 40 milímetros, podendo ser aplicada no fundo e na parede após a carcaça metálica ou regiões específicas. Aqui, os resultados também apresentam outras faixas e cenários do uso desse material.

Sabe-se que a temperatura do metal líquido é um critério importante a ser aferido durante o ciclo da placa, pois influencia as reações que irão ocorrer entre o metal e o refratário, assim como a garantia da continuidade do processamento (temperatura na etapa de lingotamento) e na qualidade do produto final. A Figura 6.7 apresenta a evolução da temperatura média do aço no final do refino secundário quando varia-se a espessura da camada isolante aplicada somente na parede (curvas vermelhas) ou no fundo (curvas pretas). O aumento da espessura dessa camada eleva a temperatura média do aço líquido, pois a transferência de calor do banho para o revestimento é menor. Uma vez que o aço transfere calor por convecção para o refratário da camada de trabalho devido a diferença de temperatura entre o banho e o revestimento. Logo, a temperatura do refratário de trabalho se eleva com o aumento da espessura da

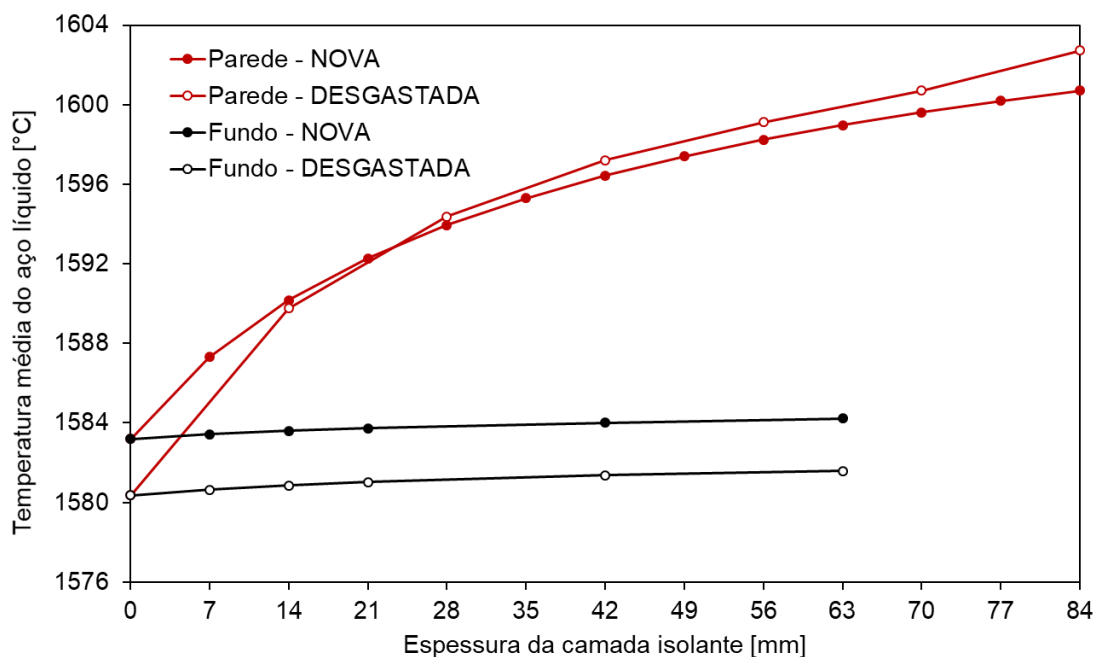


Figura 6.7 Temperatura média do aço líquido para diferentes espessuras de isolante (Material F) no fundo e na parede para a panela nova e desgastada após 60 corridas.

camada isolante e a perda de energia do banho diminui. Isso ocorre para ambas as posições, fundo e parede, porém o efeito no fundo é menos significativo (Figura 6.7), visto que a área de transferência de calor é aproximadamente 85 % menor e a espessura total do revestimento nessa região é superior (164 mm), o que já implica em reduções nas perdas do banho. Além disso, a variação da espessura da camada isolante da parede da panela provoca uma não linearidade no aumento da temperatura média do aço líquido ao final do refino secundário. A adição de 21 mm de isolamento no revestimento eleva em 9 °C a temperatura média do aço líquido, enquanto que a configuração com uma camada de 42 mm (dobro da espessura) aumenta em 13 °C essa mesma temperatura em relação a configuração sem isolamento.

Além disso, na Figura 6.7 observa-se que o efeito da espessura da camada isolante apresenta o mesmo comportamento nas condições para quando o revestimento de trabalho encontra-se desgastado. Neste caso, a camada de trabalho possui espessura de 68 mm e 150 mm na parede e fundo, respectivamente. A redução da espessura total (condição desgastada) faz com que as perdas de calor do revestimento durante as etapas de espera sejam

maiores, principalmente pelas superfícies internas, uma vez que a capacidade de armazenar energia do revestimento é inferior. Além disso, as perdas de calor pela carcaça são maiores, pois a menor espessura total do revestimento aumenta a condução do calor para as superfícies externas. Logo, há um aumento na quantidade de energia transferida do banho para o revestimento para compensar tais perdas. Como a panela desgastada apresenta volume útil superior, sua capacidade aumenta em 28 toneladas de aço e, conseqüentemente, a quantidade inicial de energia no banho. Isso mostra que a partir da espessura de 21 mm de isolante, a temperatura média do aço líquido é maior no final do refino secundário para a condição em que o revestimento de trabalho está desgastado, devido a essa maior quantidade de energia do banho (volume de aço). Já quando se analisa a aplicação do isolante no fundo da panela, percebe-se que este também não influencia significativamente a temperatura do metal líquido, mesmo quando o revestimento está desgastado, baseado nas mesmas justificativas apresentadas anteriormente.

Nota-se que além do aumento de 9 °C na média da temperatura do banho para a configuração cuja camada de isolante apresenta 21 mm (40% do ganho obtido pela configuração de 84 mm), essa indica uma menor diferença entre as temperaturas médias do aço durante a vida da panela (nova e desgastada), o que é desejado para um melhor controle do processo. Com isso, aumentar a camada além de 21 mm pode acarretar em custos elevados e ganhos menores, além do risco associado a baixa efetividade do isolamento ao longo do tempo (compactação).

Os valores médios de temperatura de carcaça são apresentados para cada configuração (panela nova e desgastada) na Figura 6.8. A partir das condições geométricas e de processos representadas, notou-se uma redução da temperatura média de carcaça com o aumento da espessura de isolante. Aproximadamente, cada milímetro adicional de camada isolante reduziu 2 °C a temperatura média de carcaça. A substituição do refratário de alta-alumina da camada permanente por um material mais isolante e de menor condutividade térmica (espuma cerâmica) reduz a quantidade de energia transferida e conseqüentemente a temperatura média da carcaça. Os valores apresentados

estão relacionados a superfície externa correspondente a região em que o isolamento foi adicionado, no instante final da etapa de refino secundário. Já na outra região vemos que há um aumento na temperatura média de carcaça, visto que quando a camada isolante é adicionada somente na parede ou no fundo, o

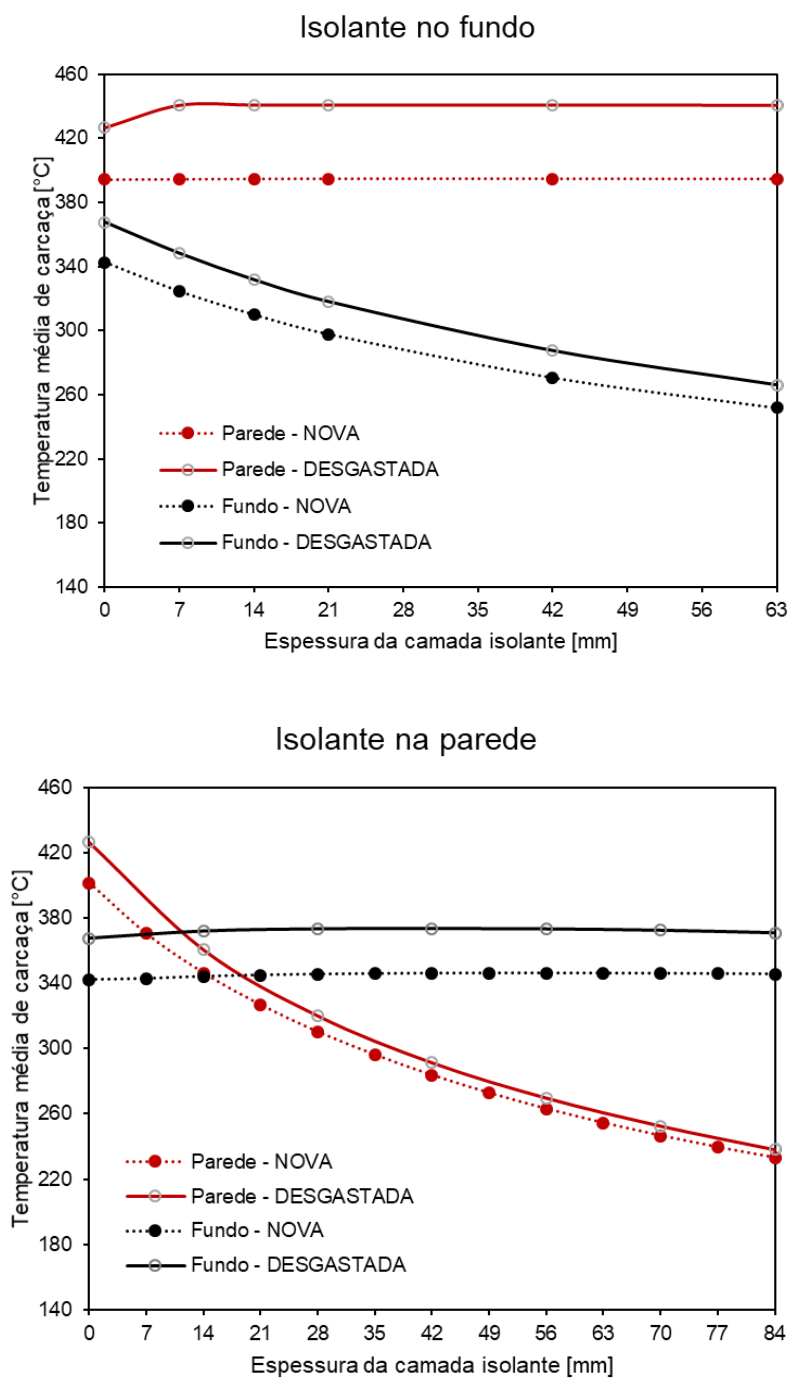


Figura 6.8 Temperatura de carcaça para as diferentes espessuras de isolante (Material F).

calor do interior da panela passa a ser transferido com maior intensidade pela região sem isolamento.

Uma das configurações propostas, considerou a aplicação de uma camada isolante de 21 mm no fundo e parede. Neste caso, as temperaturas de carcaça são reduzidas em ambas as regiões, mas a temperatura média do aço líquido é apenas um pouco superior quando comparada com a configuração que apresenta isolamento de 21 mm somente na parede (1593 °C e 1592 °C, respectivamente). Tal resultado mostra mais uma vez que o uso de isolantes no fundo da panela possui pouca influência na temperatura média do aço e é efetiva apenas na redução da temperatura de carcaça.

Além disso, nota-se que há uma redução da massa do revestimento refratário dada pelo aumento da espessura da camada isolante (material menos denso), o que reduz a capacidade total do revestimento da panela em estocar energia (carcaça mais fria e revestimento mais leve). Em compensação, a barreira térmica é intensificada com o aumento de espessura do isolante e os refratários internos a essa camada (permanente e trabalho) permanecem mais quentes e armazenando maiores quantidades de energia. A Figura 6.9 apresenta o perfil de temperatura em função da espessura do revestimento para cada configuração de panela nova estudada. Os perfis foram obtidos no início e

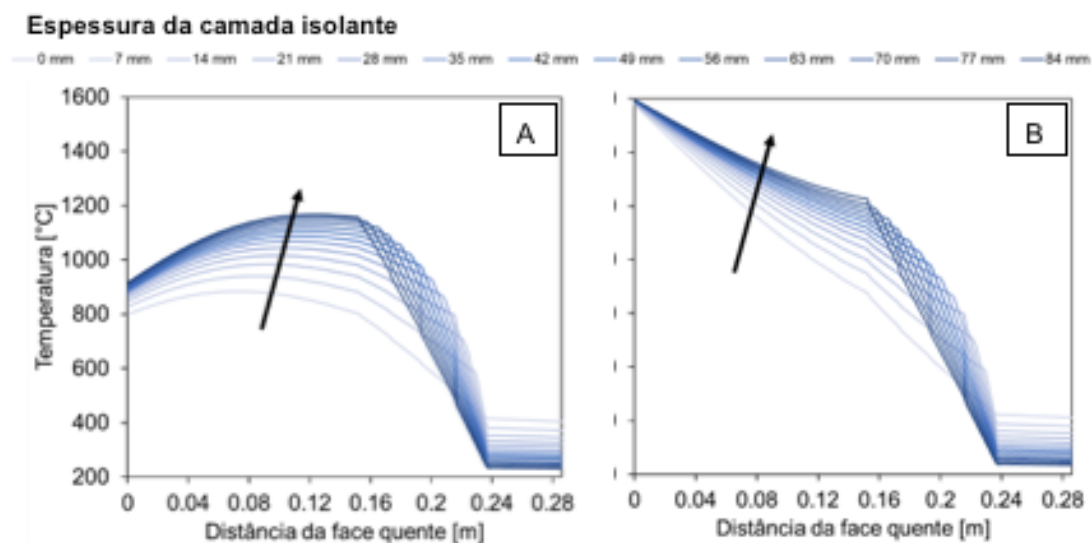


Figura 6.9 Perfil de temperatura para as diferentes espessuras do isolante (Material F), A) no início, e B) ao final do refino secundário na altura de 2.5 metros do revestimento.

final da etapa de refino secundário (no ciclo 5). O que se verifica é exatamente o que foi discutido anteriormente: o aumento da espessura de isolante reduz a temperatura de carcaça, apresentando uma diferença de 179 °C comparando a configuração sem isolante com aquela que possui 84 mm de espessura no início do refino secundário (e de 80 °C comparando-se com a de 21 mm). Já nas camadas de trabalho e permanente, o aumento da espessura do material isolante aumenta a quantidade de energia estocada nessas regiões, que é indicado pelo perfil superior de temperaturas, além de aumentar também a temperatura média da face quente. Ao final das esperas, a temperatura da face quente para a configuração de 84 mm é 122 °C superior à sem isolamento, enquanto ao final da etapa do refino secundário a diferença entre essas mesmas configurações é de apenas 20 °C. Portanto, maiores espessuras de isolante resultam em uma menor variação de temperatura no revestimento durante o processamento nas painéis, podendo evitar falhas devido ao choque térmico. Em contrapartida, a temperatura média de operação desses materiais também se eleva, o que pode aumentar as taxas de corrosão e diminuir a resistência à fluência do material.

O mesmo perfil de temperatura obtido na Figura 6.9 é extraído em função do tempo de análise para o último ciclo da panela e, neste caso, a temperatura do revestimento é representada pelo gradiente de cores (Figura 6.10). Nesta figura destaca-se a diferença de temperatura entre as configurações de 21 mm de isolante e a configuração sem isolamento (Figura 6.10-A) e entre a de 42 mm e a de 21 mm (Figura 6.10-B). A cor vermelha indica temperaturas superiores e a azul valores inferiores para a de 21 e 42 mm, respectivamente. Já a cor branca representa pouca ou nenhuma diferença de temperatura entre as configurações. O aumento da espessura de 0 para 21 e de 21 para 42 mm reduziu as temperaturas de carcaça em média de 80 e 30 °C, respectivamente, como é mostrado pelos tons azuis nas imagens.

Já o comportamento na camada de trabalho e permanente é oposto. As temperaturas são superiores (tons avermelhados) em aproximadamente 280 e 100 °C para as Figura 6.10-A e B, respectivamente. Esse aumento de temperatura, assim como de energia estocada, principalmente ao final das esperas, reduz a transferência de calor do aço líquido para o revestimento. Tal resultado pode ser verificado na Figura 6.11, que relaciona esse aumento de energia estocada no revestimento para cada espessura da camada isolante com a perda de energia do metal líquido no final da etapa de refino secundário. A

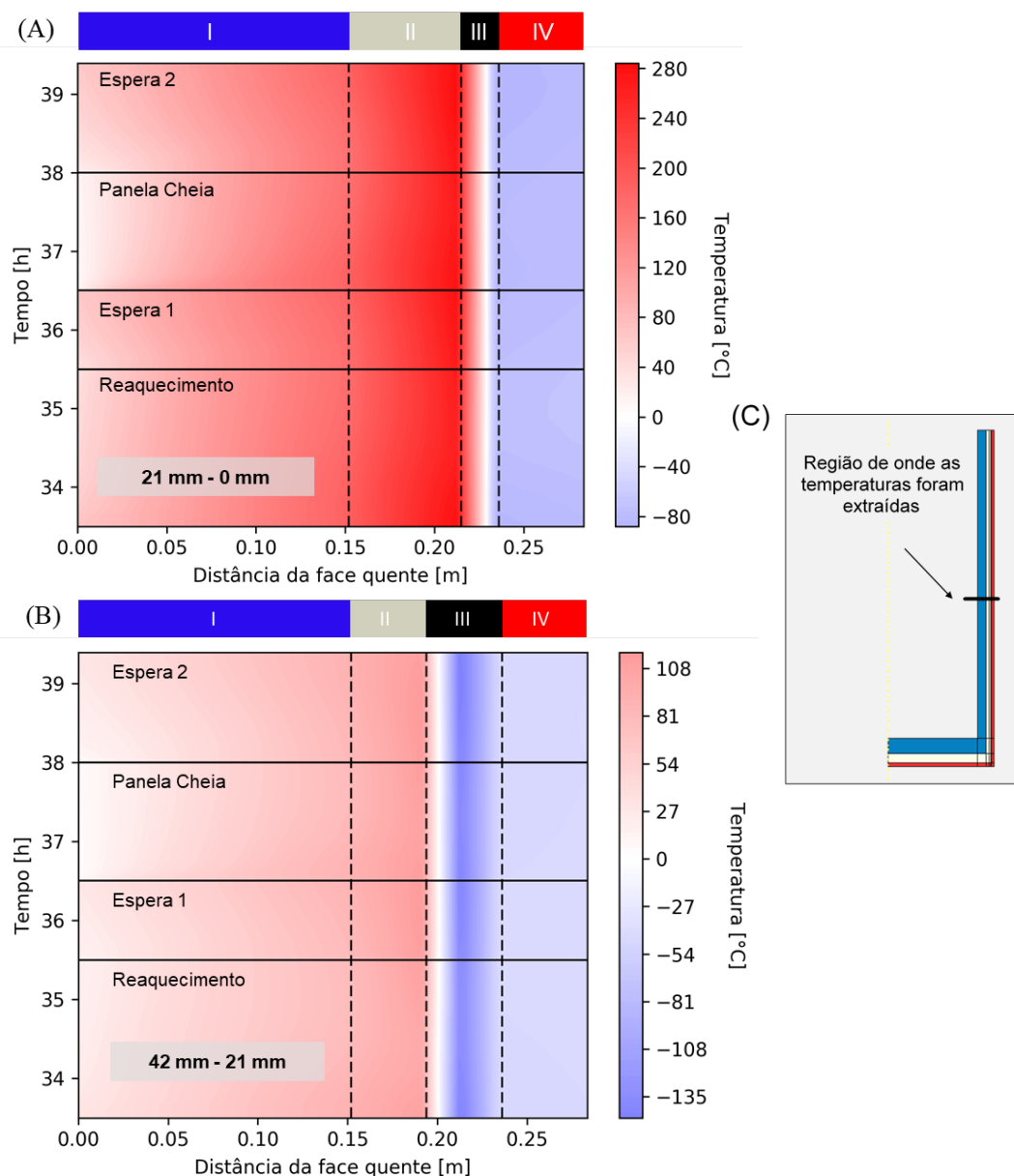


Figura 6.10 Diferença de distribuição de temperatura entre as configurações A) 21 com a de 0 mm; B) 42 e 21 mm e C) detalhe da região em análise.

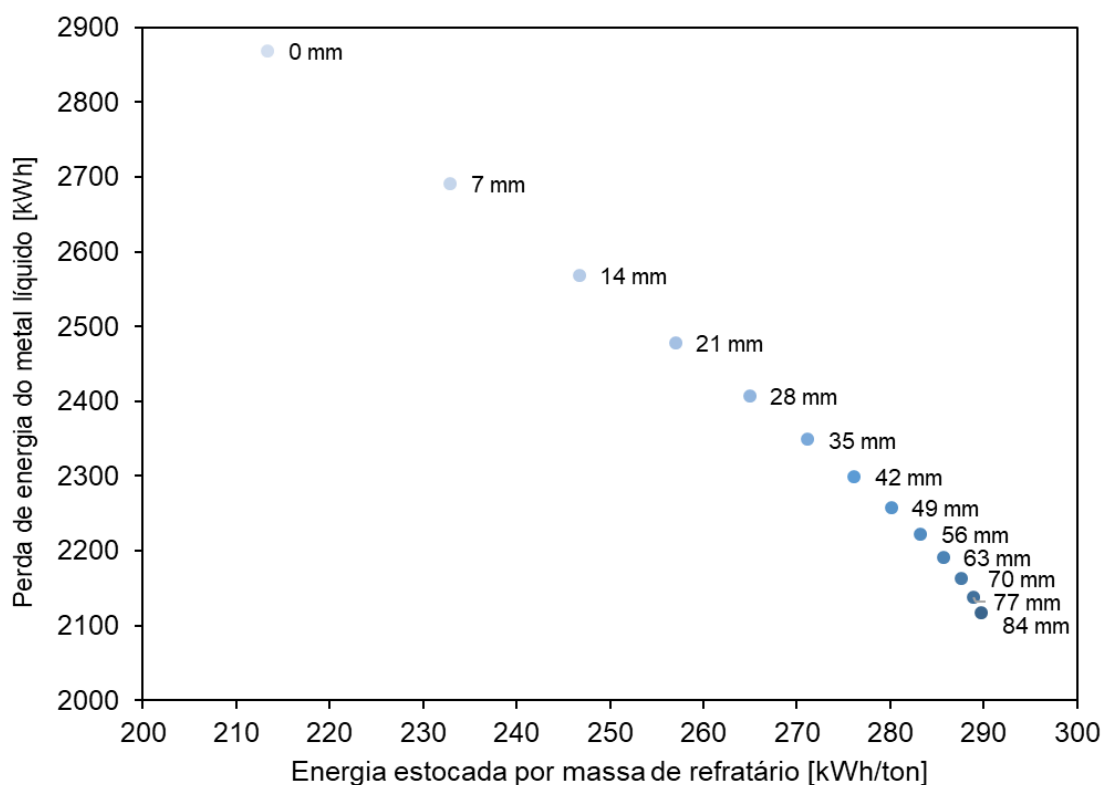






















Figura 6.11 Energia estocada normalizada pela massa de revestimento na camada de trabalho e permanente, e quantidade de energia transferida do banho para o revestimento durante o refino secundário para diferentes espessuras de isolante – Material F (0 – 84 mm).

energia estocada no revestimento foi normalizada pela massa de refratário presente na camada permanente e de trabalho, já que essas são as camadas da parede responsáveis por armazenar a energia durante o processo e, nas análises, o refratário permanente é reduzido com o aumento da espessura do isolante. Observa-se que quanto maior a densidade de energia estocada (maiores espessuras de isolante) menor a transferência de calor do metal para o revestimento refratário, o que manterá as temperaturas médias do aço mais elevadas, como visto anteriormente (Figura 6.7). Além disso, nota-se que a partir de espessuras superiores a 28 mm a transferência de calor do metal líquido reduz em taxas menores a cada milímetro adicional de isolante, que pode ser um indicativo do encharque do material da camada de trabalho a partir desta configuração.

A redução observada na quantidade de energia perdida pelo aço líquido com o aumento da espessura do isolante diminuiria o consumo de energia por tonelada de aço produzida (247 toneladas), supondo que haverá um ajuste

Tabela 6.1 Comparação entre as configurações de panela nova e desgastada para diferentes espessuras de isolante.

Configuração	Perda de energia [kWh/t]	Temperatura média do aço [°C]	Temperatura média da carcaça [°C]	Massa do revestimento [10 ³ kg]	Energia estocada [kWh/t]	Temp. média camada de trabalho [°C]	Temp. média camada isolante [°C]	Legenda	
								Camada de trabalho	Permanente
Nova	10 mm 	11,6	1583	402	71,7	213	1172	-	777
	07 mm 	10,9	1587	370	70,9	219	1216	512	753
	14 mm 	10,4	1590	346	70,2	226	1247	542	736
	21 mm 	10,1	1592	327	69,4	233	1270	564	725
	28 mm 	9,8	1594	310	68,7	241	1289	582	716
	35 mm 	9,5	1595	296	67,9	248	1303	597	709
	42 mm 	9,3	1596	284	67,2	257	1316	655	703
	49 mm 	9,2	1597	273	66,4	265	1327	662	698
	56 mm 	9,0	1598	263	65,7	275	1336	668	694
	63 mm 	8,9	1599	254	64,9	285	1344	692	690
	70 mm 	8,8	1600	247	64,2	295	1351	714	687
	77 mm 	8,7	1600	239	63,5	307	1359	717	683
	84 mm 	8,6	1601	233	62,7	319	1366	720	680
Desgastada	10 mm 	12,1	1580	426	56,8	254	1371	-	835
	14 mm 	10,5	1590	361	55,3	298	1427	517	775
	28 mm 	9,7	1594	320	53,8	321	1455	647	746
	42 mm 	9,2	1597	291	52,3	336	1475	723	728
	56 mm 	8,9	1599	270	50,8	347	1492	751	715
	70 mm 	8,6	1601	252	49,3	354	1513	808	712
	84 mm 	8,2	1603	238	47,8	357	1535	823	708

térmico do banho para correção da temperatura média do aço ao final do refino secundário. A Tabela 6.1 apresenta a perda de energia durante o refino secundário para cada configuração analisada, além de um resumo dos resultados discutidos anteriormente: temperatura do metal líquido, temperatura média de carcaça, massa do revestimento refratário e a densidade de energia estocada antes do refino secundário, nas regiões anteriores a camada isolante. Na segunda coluna temos a relação entre a energia perdida do banho por tonelada de aço produzida. As configurações que apresentam menores taxas de perda de energia possibilitam reduzir a temperatura inicial de vazamento do aço nas panelas ou a necessidade de reaquecimento, por meio do uso de eletrodos (forno-panela – energia elétrica) e de reações exotérmicas com outros metais

(aluminotermia) para ajuste da temperatura do aço. Tais procedimentos estão diretamente relacionados ao consumo de energia das aciarias.

Na antepenúltima coluna da Tabela 6.1 têm-se os efeitos da variação da espessura da camada isolante na temperatura média de operação do revestimento de trabalho (obtida do centro dessa camada na altura de 2,5 m em relação ao fundo da carcaça). Nos refratários, o aumento da temperatura média é um indicativo da probabilidade de danos térmicos e mecânicos do material, considerando-se que a magnitude dessa temperatura e pressão aplicada pelo banho sejam suficientes para ocasionar falhas por fluência. Os materiais refratários exibem uma queda na resistência a fluência com o aumento da temperatura [48], logo quanto maior o valor da temperatura média de operação, maiores são as chances de o revestimento ser danificado e, conseqüentemente, ter sua vida reduzida (aparecimento de trincas na face quente com posterior infiltração do metal e escória líquidos). O aumento de espessura da camada isolante mostra-se como uma desvantagem para a vida útil do revestimento devido ao aumento dessa temperatura média. O aumento da espessura de camada isolante reduz a quantidade de material na camada permanente, aumentando a densidade de energia térmica na camada de trabalho (aumento de aproximadamente 2 °C na temperatura média por milímetro de camada isolante) e o impacto disso na vida do material da camada de trabalho pode ser significativo. Além disso, o aumento da espessura de isolante também aumenta a temperatura média de uso dessa camada (penúltima coluna da Tabela 6.1) que, devido aos mesmos fatores discutidos anteriormente, pode ocasionar falha e a perda de eficiência no isolamento.

Quando analisada a máxima variação de temperatura na face quente do revestimento entre a etapa inicial e final do refino secundário (Tabela 6.1 e Figura 6.9), vê-se que o aumento da espessura da camada isolante minimiza as variações de temperatura na face quente, já que as regiões internas ao isolante térmico se tornam mais quentes, como discutido anteriormente. Portanto, quando a panela deixa a etapa de espera e recebe o metal líquido a 1650 °C, as configurações com maiores espessuras de isolante térmico estarão sujeitas a menores variações de temperatura na face quente, reduzindo a probabilidade

desses materiais estarem sujeitos ao choque térmico. Porém, comparando os valores entre as configurações notou-se mais uma vez que espessuras de isolante superiores a 28 mm são menos eficazes em minimizar a variação de temperatura da face quente.

Além da usual posição do isolante na parede e no fundo da panela entre a carcaça metálica e a camada permanente, há a possibilidade de aplicar tal camada utilizando o material 3 (espuma cerâmica) em outra posição, como entre a camada de trabalho e a permanente ou na face quente do revestimento (recobrimento isolante). Esses cenários são menos usuais, mas podem coincidir com a prática de algumas usinas siderúrgicas.

A partir das mesmas análises, notou-se pouca diferença entre a temperatura da camada de trabalho e da carcaça durante as etapas de espera quando considerou-se uma camada isolante de 21 mm na posição entre a camada de trabalho e a permanente, comparada com a configuração padrão de

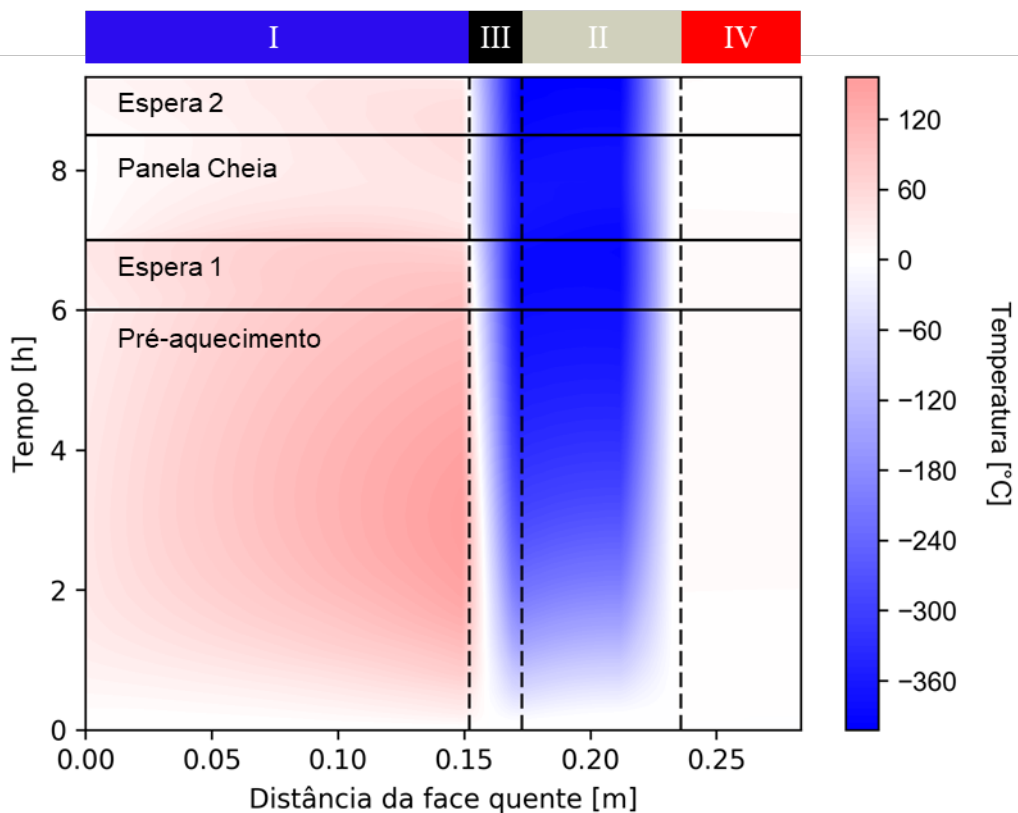


Figura 6.12 Diferença de distribuição de temperatura para a configuração que utiliza o isolante entre a camada de trabalho e a permanente para o primeiro ciclo – ciclo 1.

21 mm (Figura 6.12). As vantagens dessa aplicação estão na eficiência dessa panela em aquecer o revestimento durante as etapas de aquecimento. O avanço da barreira térmica em direção da fonte de calor faz com que a energia antes utilizada para aquecer a camada permanente seja aplicada para aumentar a temperatura do material da camada de trabalho (facilitando o encharque).

Já se essa camada fosse posicionada em contato direto com o aço líquido, agindo como um recobrimento de baixa condutividade, grandes alterações nas temperaturas do revestimento e no desempenho do processo seriam observadas (Figura 6.13). As temperaturas da camada de trabalho ficam inferiores em relação a configuração padrão, como pode ser visto pela cor azul, embora em relação a carcaça não se observa mudanças de temperatura entre as duas configurações. Apesar da provável baixa durabilidade, baixa resistência a corrosão (dependendo do tipo de material), entre outros fatores, esse cenário foi investigado com intuito apenas térmico e energético. Mesmo com todas as restrições nesse tipo de aplicação, tem-se estudos na literatura que investigam

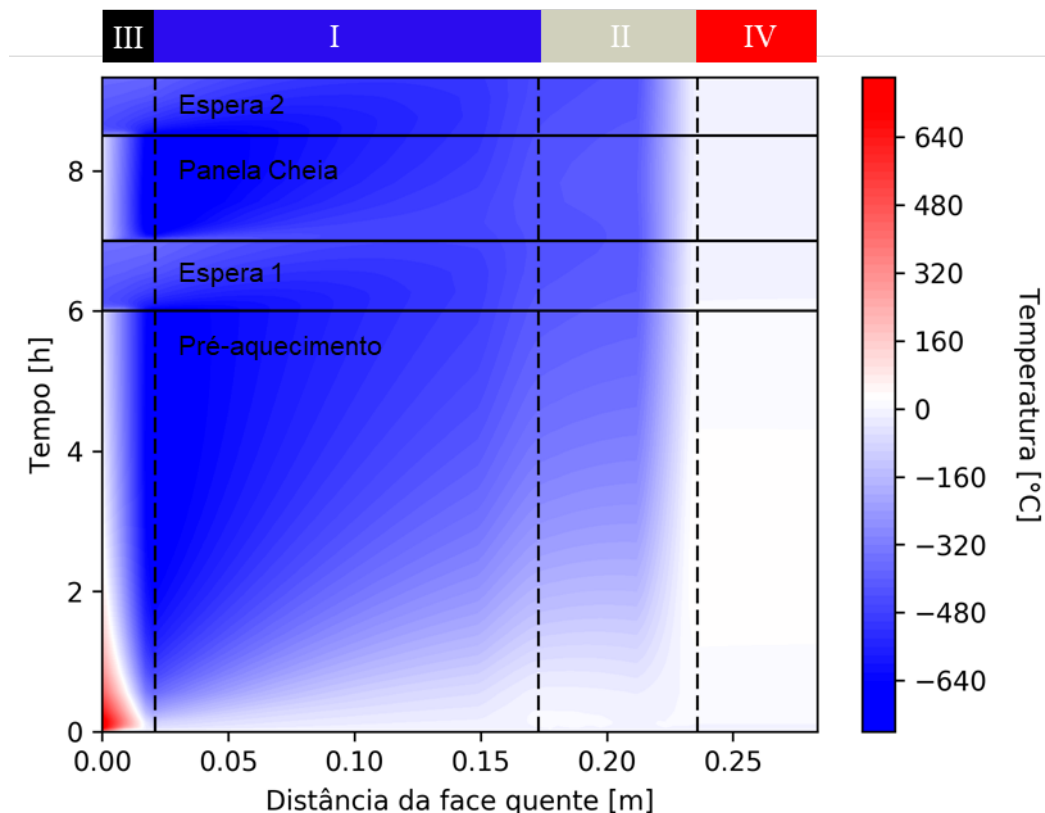


Figura 6.13 Diferença de distribuição de temperatura para a configuração utiliza o isolante na face quente e padrão de 21 mm para o primeiro ciclo.

o uso de materiais isolantes microporosos em contato com meios corrosivos como a escória ou metal líquido [49]. Essa configuração mostra uma temperatura média de metal líquido de 1617 °C, que representa um acréscimo de 34 °C na temperatura do metal em relação a configuração sem isolamento e de 25 °C em relação a configuração que apresenta 21 mm de isolante aplicados na posição usual.

Assim, o estudo mostra que a análise térmica e energética das placas de aço é bastante complexa, mas fundamental para o melhor entendimento do processo, principalmente quando se busca a otimização do revestimento refratário, em relação ao uso de materiais isolantes térmicos e de refratários em geral.

6.3 Estudo da influência da camada permanente e sua espessura no estado térmico do processo (caso 2)

Nas placas de aço, a camada permanente é utilizada para proteção térmica e contra infiltrações ou falhas que ocorram na face quente. Porém, normalmente esses materiais apresentam desempenho inferior em relação a resistência a corrosão que os materiais da camada de trabalho e quanto a resistência a transferência de calor comparado aos isolantes térmicos. Portanto, tais materiais aplicados nessa camada mostram propriedades intermediárias entre os outros do revestimento e, neste trabalho, tiveram suas características de projeto estudadas com relação à eficiência térmica do processo de refino do aço nas placas. Na prática não costuma-se operar sem a camada de segurança, porém pode-se reduzir parcialmente sua espessura ou substituir o material utilizado por outro com desempenho superior, desde que hajam garantias quanto a operacionalidade do processo.

No projeto do revestimento, a camada permanente impacta principalmente no estado térmico, no consumo de refratários e na capacidade produtiva das placas de aço. Para investigar o efeito desses possíveis cenários, variou-se a espessura dessa camada em passos de 14 mm, baseado no modelo apresentado no caso 2, considerando a remoção da camada permanente para aumentar a capacidade da placa. O caso em que essa camada é substituída

pelo material isolante, é equivalente às análises apresentadas anteriormente, onde destacou-se que a camada isolante de 21 mm de espessura seria mais indicada. Assim, as configurações de revestimento analisadas nesta seção consideraram a presença do isolamento de 21 mm, visto que essa configuração otimizaria os aspectos térmico e energético do processo.

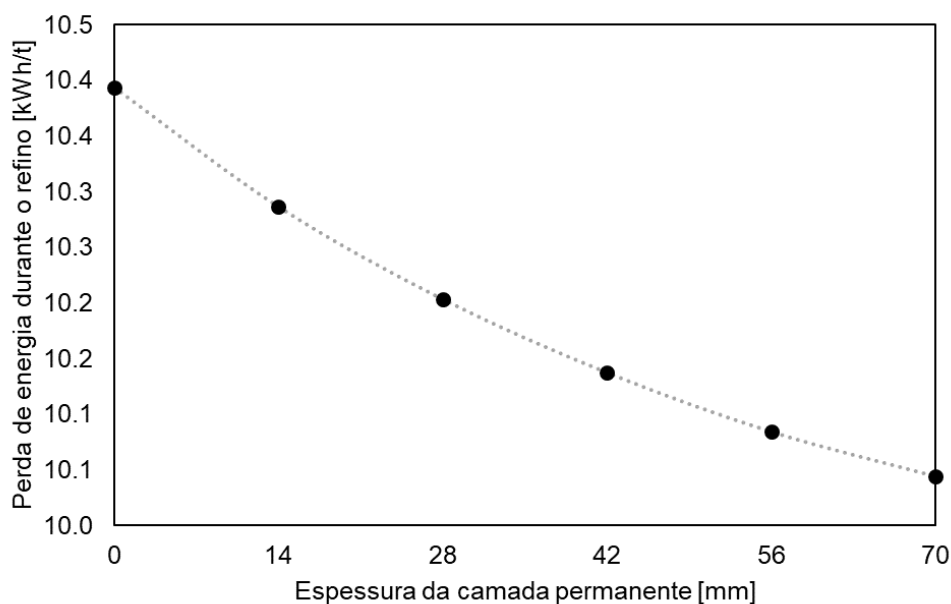


Figura 6.14 Taxa de perda de energia para diferentes espessuras de camada permanente para o caso 2.

Na Figura 6.14 são apresentadas as perdas de energia do banho por tonelada de aço produzida para cada configuração de camada permanente. O aumento de espessura dessa camada faz com que a perda de energia média por tonelada de aço seja reduzida, uma vez que ela também atua como uma barreira na transferência de calor para o ambiente através da carcaça metálica. Em contrapartida, o volume maior da camada permanente exige quantidades maiores de energia para que essas configurações atinjam o encharcamento, o que contribui negativamente no balanço energético. Tem-se também uma redução da área de transferência de calor entre o banho e o revestimento de trabalho, que diminui a perda de energia associada a queda de temperatura do aço líquido. Vale destacar que apesar do pior desempenho energético das configurações com menores espessuras de camada permanente, tais configurações aumentam o volume útil da panela, o que maximiza a capacidade

produtiva em aproximadamente 330 quilogramas de aço por milímetro linear reduzido da camada permanente (Figura 6.15).

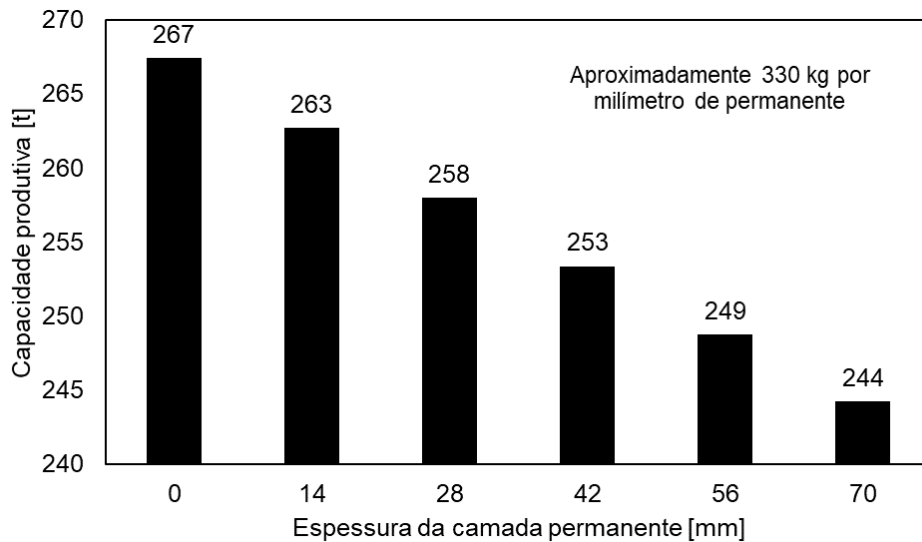


Figura 6.15 Variação da capacidade produtiva da panela para diferentes espessuras de camada permanente. O aumento produtivo é significativo para cada milímetro reduzido.

Na Tabela 6.2 são apresentados todos os casos analisados associado com algumas das informações obtidas nas simulações, como a perda de energia (segunda coluna) e a capacidade produtiva (terceira coluna), já brevemente discutidas. Na quarta coluna são apresentados os valores estimados da temperatura do média do aço ao final do refino secundário. Nota-se que a variação da espessura da camada permanente pouco influencia nesse valor, ou seja, apesar das perdas de energia serem maiores, o estado térmico do banho não é significativamente alterado. Porém, deve-se atentar que qualquer correção que deva ser feita na temperatura do banho será desfavorável energeticamente para os casos onde a capacidade produtiva é maior (menores espessuras da camada permanente). Enfim, a temperatura média do aço líquido ao final do refino secundário diminui com a redução da camada permanente (aproximadamente 2 °C, entre a configuração 0 mm e 70 mm), mas esse valor tende a estabilizar a partir da espessura de 42 mm.

Além de alterar o volume útil da panela, a variação de espessura da camada permanente implica diretamente no consumo de refratários. Maiores espessuras aumentam a massa total de refratários utilizada (quinta coluna –

Tabela 6.2 Comparação entre os resultados obtidos para as diferentes configurações de espessura da camada permanente em relação aos critérios de interesse.

Configuração	Perda de energia [kWh/t]	Capacidade produtiva [t]	Temperatura média do aço [°C]	Massa do revestimento [10 ³ kg]	Temperatura média da carcaça [°C]	Energia estocada [kWh/t]	Temp. média camada de trabalho [°C]	Temp. média camada isolante [°C]	Legenda	
									Camada de trabalho	Permanente
0 mm		10,4	267	1590	62,4	358	248	1243	697	754
14 mm		10,3	263	1591	64,0	348	250	1248	660	748
28 mm		10,2	258	1591	65,5	339	252	1255	629	742
42 mm		10,1	253	1592	67,1	331	253	1263	602	735
56 mm		10,1	249	1592	68,6	324	254	1271	580	728
70 mm		10,0	244	1592	70,2	317	254	1278	561	722

Tabela 6.2), elevando o consumo específico de refratários para produzir uma tonelada de aço.

O efeito do isolante é mais expressivo quando comparado ao da camada permanente na redução das temperaturas de carcaça, no qual as reduções são aproximadamente 4 vezes superiores por milímetro de isolante adicionado. Logo, as temperaturas de carcaça aumentaram em média 0,6 °C por milímetro de refratário permanente reduzido, considerando uma camada isolante (material F) de 21 mm. Ainda, a presença da camada permanente e sua maior espessura implicam na redução da temperatura média de operação do material isolante, ajudando a evitar possíveis falhas por fluência durante a operação.

No geral, reduzir a espessura da camada permanente traz desvantagens quanto aos aspectos térmicos e energéticos, porém a necessidade de otimizar o processo globalmente, por exemplo, diminuindo o consumo de materiais refratários ou aumentando o volume útil, tal redução pode se mostrar vantajosa. Logo, os ganhos associados a maior produtividade devem ser superiores as desvantagens térmicas e energéticas, considerando a melhor logística e agilidade de processamento. A camada permanente pode sofrer alterações de espessura no projeto ou mesmo de substituição do seu material por outro com desempenho superior, desde que estudos prévios para investigar o desempenho

térmico, mecânico e químico do revestimento em tais condições de operação sejam realizados. Qualquer cenário proposto exige também uma correta avaliação do material utilizado na camada de trabalho e da sua espessura, cujo papel no desempenho térmico e energético das painéis de aço também é fundamental. Na próxima seção, alguns pontos em relação a essa camada são discutidos.

6.4 Avaliação de diferentes sistemas refratários aplicados da camada de trabalho de painéis de aço (caso 2)

Por último, neste trabalho estudou-se o efeito de quatro diferentes materiais refratários aplicados na camada de trabalho, considerando as classes mais usualmente utilizadas. Essa camada apresenta grande importância quanto a eficiência do revestimento, na conservação de energia, vida da panela, frequência de paradas ou reparos, qualidade do processo e do produto final, entre várias outras. O material empregado é responsável por atender determinadas exigências operacionais, como resistência ao impacto, à corrosão e erosão, resistência mecânica, etc.. Na maioria dos casos, é encontrado uma combinação desses diferentes materiais nessa camada, a fim de maximizar e otimizar a eficiência das painéis de aço de acordo com as distintas solicitações no revestimento (tais distinções podem ser vistas na Figura 4.2).

Foram analisados quatro tipos de sistemas refratários aplicados na camada de trabalho da panela estudada no caso 2: tijolos de alumina-magnésia (AM), alumina-magnésia-carbono (AMC), magnésia-alumina-carbono (MAC), e concretos de alta alumina (CA). Cada um desses materiais tem suas propriedades apresentadas na Tabela 9.2 e composição na Tabela 9.3 (Apêndice B). As propriedades apresentadas foram obtidas da literatura ou fornecidas pelo fabricante do material. Cada um desses sistemas foi brevemente descrito na seção de materiais, mas agora o desempenho de cada um deles é estimado e comparado com os demais.

As configurações cuja camada de trabalho tiveram materiais com carbono aplicados mostraram os piores desempenhos, considerando a temperatura média do aço líquido ao final do refino secundário (Figura 6.16), pois tais

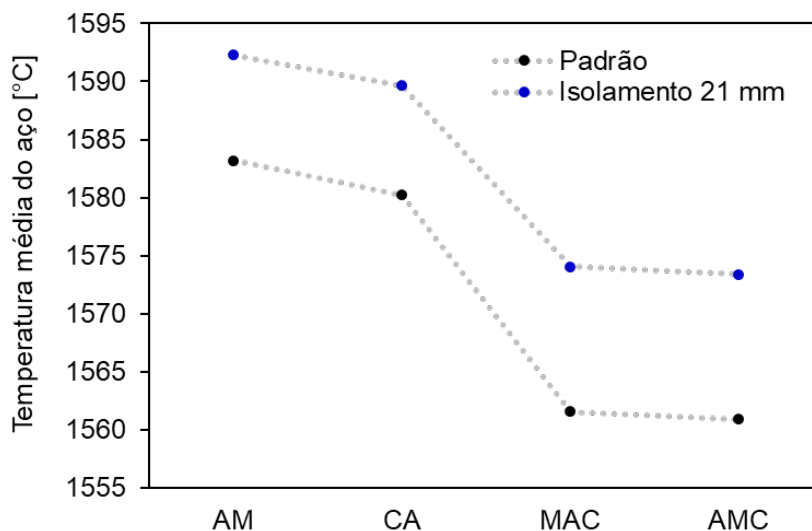


Figura 6.16 Temperatura média do aço no final do refino secundário para cada configuração analisada, quando altera-se o refratário da camada de trabalho (AM – alumina-magnésia, CA – concreto aluminoso, MAC – magnésia-alumina-carbono e AMC – alumina-magnésia-carbono) e considera-se a presença de uma camada isolante.

materiais possuem condutividade térmica superior comparado aos demais, especialmente em temperaturas elevadas (Figura 6.17). Tal contexto aumenta a condução do calor para o interior do revestimento, que passa a estocar uma maior quantidade de energia nas camadas permanente e de trabalho. Durante as esperas essa energia armazenada no revestimento vai ser responsável por manter o perfil de temperaturas elevado (AMC-espera e MAC-espera), minimizando também a variação da temperatura na face quente do tijolo, em comparação com as demais (Figura 6.18). Um dos motivos pelo qual revestimentos refratários com carbono são utilizados é justamente devido a essas características que evitam o aparecimento de trincas por choque térmico, além de que o carbono livre presente no material diminui a molhabilidade da superfície desses refratários pela escória, minimizando os efeitos corrosivos. Quando aplicados na camada de trabalho, os tijolos AMC e MAC são considerados apenas na linha de metal, onde ocorre o contato direto com o aço líquido (menos agressivo que a escória) e mostram bom desempenho quanto a durabilidade do revestimento. Materiais ainda mais ricos em carbono como os tijolos de MgO-C (desempenho corrosivo superior) são aplicados na linha de escória (região mais susceptível à corrosão). A otimização do processo em

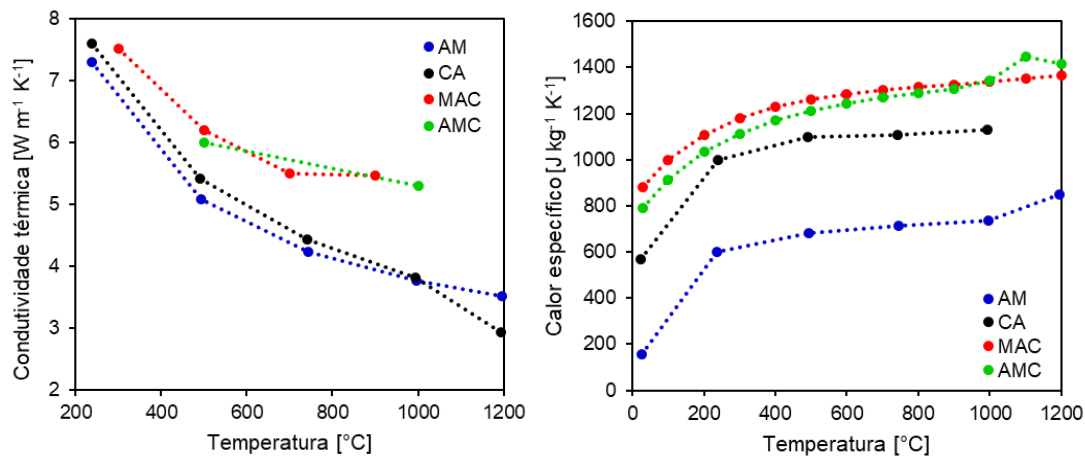


Figura 6.17 Comparação entre as propriedades térmicas dos materiais considerados para a camada de trabalho (linha de metal) do revestimento de painéis de aço.

relação ao consumo de energia exige que no desenvolvimento desses materiais, a microestrutura e composição minimizem a condutividade térmica para evitar a transferência de calor do banho para o ambiente. Muitas vezes não é possível atender todos estes requisitos e o uso de isolantes na face fria desses tijolos mostra-se como uma estratégia para minimizar parte das perdas térmicas. Ressalvas quanto a esses tipos de materiais ocorrem quando se produz aços com baixíssima concentração de carbono, das quais a contaminação do banho por inclusões originadas no revestimento pode alterar a qualidade do produto final.

Entre os dois sistemas que possuem carbono, nota-se bastante similaridade quanto aos outros critérios de análise (apresentados na metodologia, seção 5.4.5). Observando-se a composição desses materiais (Tabela 9.3 – Apêndice B), tem-se que o material AMC apresenta 1,6% a mais de carbono em sua composição comparado ao tijolo magnésia-alumina-carbono, sendo portanto responsável por elevar sua condutividade térmica. Contudo, como a matriz aluminosa é menos condutora e tem uma capacidade térmica menor que a magnésiana, os valores de propriedades térmicas mostram-se similares para essas duas composições. Logo, a avaliação térmica e energética do desempenho desses materiais também mostrou-se bastante próxima. Por exemplo, a temperatura média do aço ao final do refino secundário (Figura 6.16) para os dois casos é similar. Ambos ocasionaram a mesma perda de energia do

banho durante a etapa de refino secundário, tanto para o caso sem e quanto para o com isolamento térmico. Ainda, nota-se que a adição do isolamento nessas configurações não é suficiente para manter as temperaturas do banho no mesmo patamar das demais configurações (AM e CA) sem isolamento.

As temperaturas de carcaça são as mesmas para ambas as configurações com carbono, e o isolamento produz uma redução de aproximadamente 93 °C nesse valor médio.

Diferenças significativas no comportamento térmico são apresentadas quando materiais que não contém carbono têm seu desempenho analisado. Esse é o caso das configurações de alumina-magnésia (AM) e do concreto de alta-alumina (CA) cujos refratários têm suas composições também apresentadas na Tabela 9.3. Vale relembrar que o material A (AM) é o mesmo utilizado na camada de trabalho das análises anteriores (seção 6.2 e 6.3). Para essas

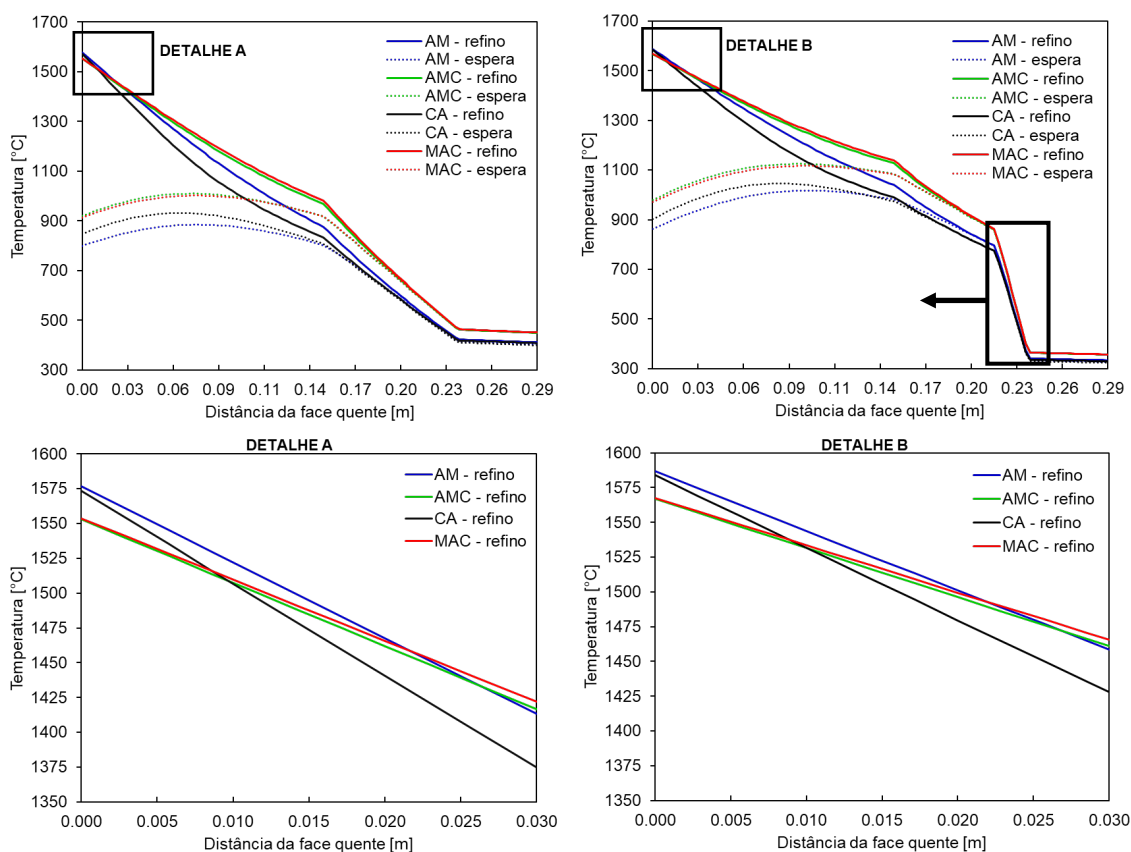


Figura 6.18 Distribuição de temperatura para as configurações: alumina-magnésia (AM), alumina-magnésia-carbono (AMC), magnésia-alumina-carbono (MAC) e concreto de alta-alumina (CA). Os detalhes A e B mostram as temperaturas próximas da face quente (30 mm), onde nota-se valores superiores para as configurações com isolamento térmico (detalhe B).

configurações, há uma redução na quantidade de energia perdida pelo banho e que resulta em temperaturas médias do aço superiores que as configurações que contém carbono, em média 18 °C (sem isolamento) e 16 °C (isolamento de 21 mm), como mostra a Figura 6.16. Tal resultado é devido a diferença nas propriedades dos dois sistemas (com e sem carbono), principalmente na capacidade de conduzir e armazenar energia térmica. Ainda, a menor condutividade do AM e CA dificulta a propagação da onda de calor para o interior do revestimento e o menor calor específico facilita o aumento de temperatura do material na região da face quente. Com isso, a transferência de calor do banho para os revestimentos sem carbono é reduzida, visto que rapidamente a diferença de temperatura entre a parede e o banho torna-se baixa.

Para os sistemas sem carbono nota-se uma maior diferença de comportamento entre os dois materiais analisados (AM e CA). O menor calor específico da configuração AM mostra ainda melhor desempenho em manter as temperaturas do banho elevadas (Figura 6.16), visto que a face quente eleva sua temperatura rapidamente e reduz a força motriz da transferência de calor por convecção. Essa elevação da temperatura é mostrada pelos perfis de

Tabela 6.3 Comparação dos resultados obtidos para a comparação e análise de diferentes materiais aplicados na camada de trabalho (alumina-magnésia – AM, alumina-magnésia-carbono – AMC, concreto de alumina – CA e magnésia-alumina-carbono – MAC).

Configuração	Perda de energia [kWh/t]	Temperatura média do aço [°C]	Massa do revestimento [10 ³ kg]	Energia estocada [kWh/t]	Temp. média camada de trabalho [°C]	Máx. variação de temp. na face quente [°C]	Legenda		
							Camada de trabalho	Permanente	Isolante
0 mm	AM	11,6	1583	402	71,7	213	1172	-	777
	CA	12,2	1580	398	72,9	240	1097	-	726
	AMC	15,5	1561	439	73,6	299	1214	-	633
	MAC	15,4	1562	441	72,5	294	1226	-	640
21 mm	AM	10,1	1592	327	69,4	233	1270	564	725
	CA	10,5	1590	322	70,7	282	1207	552	681
	AMC	13,2	1573	350	71,3	348	1306	608	588
	MAC	13,3	1574	350	70,2	342	1316	610	596

temperatura nos detalhes da Figura 6.18. O comportamento para ambos casos de isolamento é bastante similar, contudo na presença do isolante os valores de temperatura média do aço são ainda maiores.

Outros aspectos podem ser destacados na comparação entre materiais aplicados na camada de trabalho. A Tabela 6.3 apresenta um resumo dessas informações. Por exemplo, têm-se que a alteração do material da camada de trabalho por um material de maior condutividade (AMC e MAC) aumenta a transferência de calor pelo revestimento, elevando as temperaturas de carcaça. Isso ocorre mesmo com a presença da camada isolante, embora o efeito seja menor quando esta está presente. A diferença entre as temperaturas médias de carcaça para a configuração AMC e MAC com as configurações isentas de carbono é de 50 °C (padrão) e de 33 °C quando se instala o isolamento de 21 mm.

A temperatura média de operação desses materiais mostra que aqueles contendo carbono operam em temperaturas médias superiores, aproximadamente 90 °C, o que impacta também na temperatura média da camada isolante quando essa é considerada. Uma das grandes vantagens do uso dos materiais AMC e MAC está na menor variação de temperatura da face quente, relacionada a redução de possíveis danos por choque térmico, como discutido anteriormente.

Na escolha do revestimento mais adequado para atender as demandas do processo, não só os aspectos térmicos e energéticos devem ser considerados, e sim a relação desses com as características mecânicas e químicas necessárias. Além disso, o preço de cada material bem como a quantidade utilizada impactam na relação do consumo específico de refratário por tonelada de aço e no custo das aciarias. Conjuntamente a esses critérios, também faz-se necessário dimensionar corretamente o revestimento, para que haja máxima produtividade na usina.

7 CONCLUSÕES

Para atender as necessidades mundiais quanto às demandas energéticas (produção sustentável e conservação), muitos estudos e pesquisas podem ser desenvolvidos, especialmente direcionados aos setores cuja demanda é bastante elevada. A análise térmica e energética de painéis de aço por meio de modelos numéricos pode destacar cenários que reduzam o consumo de energia desses equipamentos, considerando o projeto adequado do revestimento refratário.

Neste trabalho, a metodologia aplicada estuda o processo de produção de aço nos painéis de forma holística, em que são consideradas as três etapas principais (aquecimento, espera vazia e refino secundário), diferentemente de estudos anteriores. Com isso, foi possível identificar e estudar a partir dos perfis térmicos e do consumo de energia, quais configurações de revestimento e materiais refratários apresentam potencial em aumentar a eficiência energética do ciclo do painel, gerando ideias e cenários para o desenvolvimento de refratários avançados e tecnológicos.

O uso de isolantes entre a carcaça e o revestimento refratário mostrou bastante efetividade em reduzir as temperaturas de carcaça, além de manter a temperatura do aço líquido mais alta ao final do refino secundário. Ainda, nessa posição usual, o aumento da espessura além de 21 mm não resultou em benefícios de mesma proporção, sendo que os ganhos energéticos e na temperatura de carcaça foram menores por milímetro adicional dessa camada. Já para as outras posições, tem-se que no fundo do painel os efeitos do uso do isolamento se resumiram na redução da temperatura de carcaça nessa região; a aplicação entre a camada permanente e a de trabalho resultou em uma maior eficiência durante o primeiro aquecimento do revestimento; e quando aplicado na face quente da parede interna, grandes benefícios foram constatados na temperatura do aço líquido e na distribuição de temperatura no revestimento.

A camada permanente que apresenta propriedades intermediárias em relação à resistência à transferência de calor e à corrosão poderia ser reduzida para aumentar a capacidade produtiva dos painéis ou para o aumento da

espessura da camada de trabalho que estenderia a vida da panela, sem alterar significativamente o consumo de energia e as temperaturas da carcaça.

Em relação aos refratários da camada de trabalho, notou-se que o uso do carbono nas composições aumenta a transferência de calor do aço para o revestimento durante o refino secundário, sendo estas indesejadas em cenários de redução do consumo de energia. Os materiais que contém alumina são mais vantajosos quando comparados aos de matriz magnésiana e os benefícios obtidos pelo uso do carbono podem ser superados por avanços tecnológicos na produção de tais materiais sem carbono, como é o caso de concretos aluminosos.

Apesar de grande parte dos aspectos qualitativos referentes ao uso de refratários para conservação de energia serem conhecidos, esse estudo mostrou uma metodologia para quantificar características fundamentais no ciclo da panela, como o consumo de energia e a distribuição de temperatura no revestimento apresentado nos resultados. A ferramenta desenvolvida faz-se fundamental para as indústrias de refratário e do aço, mostrando caminhos para a otimização das aplicações e processos que envolvem esses materiais. Logo, cabe definir as restrições para cada caso de projeto de revestimento (custo, temperatura de carcaça, consumo de energia, tempo de processo, etc.) e então considerá-las na tomada de decisão pela melhor configuração de panela.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimoramento do modelo e da ferramenta de análise para considerar outros aspectos do processo na tomada de decisão quanto a melhor configuração, principalmente para as etapas de pré-aquecimento e espera.
- Investigação de outros parâmetros do revestimento no desempenho térmico do processo como tamanho das panelas, número de camadas do revestimento, diferentes regiões e materiais. Além disso, parâmetros do processo podem ser investigados para otimizar o consumo de energia e de materiais durante o refino secundário.
- Considerar outros fenômenos físicos como a corrosão e as solicitações mecânicas nas quais os revestimentos são submetidos, visto que estes são também critérios de projeto dos revestimentos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WRIGLEY, E. A., Energy and the English Industrial Revolution, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 371, no. 1986, 2013.
- [2] International Energy Agency, *Energy, Climate Change & Environment*, 2016.
- [3] International Energy Outlook, *World energy demand and economic outlook*, 2016.
- [4] U.S. Energy Information Administration, *Industrial sector energy consumption*, 2016.
- [5] ABDELAZIZ, E. A., SAIDUR, R., MEKHILEF, S., A review on energy saving strategies in industrial sector, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 150–168, 2011.
- [6] European Industrial Insulation Foundation, Ecofys, *Climate protection with rapid payback: Energy and CO₂ savings potential of industrial insulation in EU27*, 2012.
- [7] MOCH, W., GREGOR, M. A., ADLER, W., BENDER, W., BURKAT, C., FRIES, U., MEES, H., WIEDEMEIER, F. J., ANGELIS, V., PAOLIS, G., MARCONI, U., CELIA, E., FALCIONI, F., MARTINI, U., PACCIELO, M., TONELLI, M., MUNHOZ, J. L., *Investigations and measures to reduce emissions and energy consumption during the preheating of steel ladles*, 2008.
- [8] CHAPAS, R. B., COLWELL, J. A., *Industrial Technologies Program Research Plan for Energy-Intensive Process Industries*, 2007.
- [9] CHRIST, F. S., *Melhorias no aquecimento de panelas de aço de uma aciaria elétrica*, Dissertação de Mestrado, 2001.
- [10] ZABOLOTSKII, A. V., Model of Heating of the Lining of a Steel-teeming Ladle, *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 51, no. 4, pp. 263–266, 2010.
- [11] GLASER, B., GÖRNERUP, M., SICHEN, D., Thermal modelling of the ladle preheating process, *Steel Res. Int.*, vol. 82, no. 12, pp. 1425–1434, 2011.
- [12] FREDMAN, T. P., Heat transfer in steelmaking ladle refractories and steel temperature: a literature review, *Scand. J. Metall.*, vol. 29, no. 6, pp. 232–258, 2000.

- [13] FERREIRA, N. F., *Controle da temperatura do aço líquido em uma aciaria elétrica*, Tese de Doutorado, 2000.
- [14] LI, G., LIU, J., JIANG, G., LIU, H., Numerical simulation of temperature field and thermal stress field in the new type of ladle with the nanometer adiabatic material, *Adv. Mech. Eng.*, pp. 1–13, 2015.
- [15] BRUCH, R., *Estudo das perdas térmicas de painelas entre o vazamento no forno elétrico à arco e o transporte para o forno-painela*, Dissertação de Mestrado, 2012.
- [16] OLIVEIRA, D. R., *Estudo do comportamento térmico das painelas da aciaria da Siderúrgica SINOBRAS S. A.*, Trabalho de Conclusão de Curso, 2013.
- [17] KRASNANSKII, M. V., KATS, Y. L., Improvement of the thermal operating conditions of steel-teeming ladles, *Russ. Metall.*, vol. 2016, no. 6, pp. 501–508, 2016.
- [18] DUARTE, I. D., SILVA, C. A., SILVA, I. A., FERREIRA, E. R., SESHADRI, V., Mathematical Modeling of Heat Losses in Steelmaking Ladles, *Adv. Mater. Res.*, vol. 1125, pp. 166–170, 2015.
- [19] KABAKOV, Z. K., PAKHOLKOVA, M. A., Reducing the loss of heat from steel in steel-pouring ladles, *Metallurgist*, vol. 56, pp. 9–10, 2013.
- [20] PUTAN, V., JOSAN, A., PUTAN A., Heat loss fluxes from steel melt to different boundary regions of a ladle, *Annals of International Symposium on Advanced Engineering & Applied Management*, 2013.
- [21] ZABOLOTSKII, A. V., Modeling of Cooling of a Steel-teeming Ladle, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, vol. 86, no. 1, pp. 50–58, 2013.
- [22] GLASER, B., *A Study on the Thermal State of Steelmaking Ladles*, Tese de Doutorado, 2012.
- [23] LOPES, H. L. P., *Modelo para previsão da condição térmica de painelas de aciaria*, Tese de Doutorado, 2007.
- [24] DORCAK, L., TERPAK, J., Monitoring and Prediction of the Liquid Steel Temperature in the Ladle and Tundish, *Metallurgija*, vol. 45, pp. 93–96, 2006.
- [25] World Steel Association, *World Steel in Figures 2016*, 2015.

- [26] RANKIN, J., Energy Use in Metal Production. *Annals of High Temperature Processing Symposium*, pp. 7–9, 2012.
- [27] SANTOS, M. F., MOREIRA, M. H., CAMPOS, M. G. G., PELISSARI, P. I. B. G. B., SAKO, E. Y., PANDOLFELLI, V. C., Enhanced numerical tool to evaluate the steel ladle thermal losses, *Ceramics International*, vol. 44, pp. 12831-12840, 2018.
- [28] UCHIDA, S., Heat Balance of ECONOS Low Thermal Conductivity Carbon Containing Brick Lining Applied for Torpedo Ladle, *Shinagawa Technical Report*, 2010.
- [29] VLADIMIROV, V. S. *et al.*, New types of light-weight refractory and heat-insulation materials for long-term use at extremely high temperatures, *Steklo i Keramika*, vol. 68, pp. 116–122, 2011.
- [30] AKSEL, L. M., MIZIN, V. G., FILYASHIN, M. K., SHULYAKOV, G. I., LESHCHENKO, A. V., The Steelmaking Ladle - Ways towards Saving Heat, *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 44, no. 3, pp. 123–126, 2003.
- [31] MOURÃO, M. B. *et al.*, *Introdução à Siderurgia*, 2007.
- [32] GUPTA, N., CHANDRA, S., Temperature Prediction Model for Controlling Casting Superheat Temperature, *ISIJ Int.*, vol. 44, no. 9, pp. 1517–1526, 2004.
- [33] HUBBLE, D. H. *et al.*, *Steelmaking Refractories*, vol. 3, pp. 227–290, 1998.
- [34] GHOSH, A., *Secondary Steelmaking: Principles and Applications*, 2001.
- [35] INCROPERA, F. P., BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S., DEWITT, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2011.
- [36] LIENHARD, J. H. V. I., *A heat transfer textbook*, 2003.
- [37] VIVALDINI, D. O., *Engenharia de Microestrutura de Cerâmicas Porosas*, Dissertação de Mestrado, 2013.
- [38] OGATA, M., NAMBA, M., UCHIDA, S., MAEDA, E., Saving Energy by using Working-lining Refractories with Low Thermal Conductivity, *J. Tech. Assoc. Refract.*, vol. 35, no. 3, pp. 181–184, 2015.
- [39] MALDOVAN, M., Phonon wave interference and thermal bandgap materials, *Nat. Mater.*, vol. 14, no. 7, pp. 667–674, 2015.
- [40] International Organization for Standardization, *ISO 8894-2 Refractory*

- materials - Determination of thermal conductivity (Hot-wire parallel method)*, 2007.
- [41] Netzsch, *Light Flash Apparatus - Method, Technique, Applications of Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity*, Manual técnico.
- [42] MEHLING, H., HAUTZINGER, G., NILSSON, O., FRICKE, J., HOFMANN, R., HAHN, O., Thermal diffusivity of semitransparent materials determined by the laser-flash method applying a new analytical model, *Int. J. Thermophys.*, vol. 19, no. 3, pp. 941–949, 1998.
- [43] FactSage, *Online*, available: <http://www.factsage.com/>, accessed: 20-Jun-2017.
- [44] FISH, J., BELYTSCHKO, T., *A First Course in Finite Elements*, 2006.
- [45] BATHE, K. J., *Finite Element Procedure*, 2014.
- [46] HERBERTSON, J., AUSTING, P. R., CAMPLIN, J. M., TAGGART, I., Mathematical Modelling of Thermal Stratification and Drainage of Steel Ladles, *ISIJ Int.*, vol. 32, no. 1 992, pp. 196–202, 1992.
- [47] Morgan Advanced Materials, *How to Ensure Effective Furnace Lining Efficiency*, 2017.
- [48] JIN, S., HARMUTH, H., GRUBER, D., Compressive creep testing of refractories at elevated loads - Devices, material law and evaluation techniques, *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 34, no. 15, pp. 4037–4042, 2014.
- [49] FU, L., GU, H., HUANG, A., ZHANG, M., LI, Z., Slag Resistance Mechanism of Lightweight Microporous Corundum Aggregate, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 98, no. 5, pp. 1658–1663, 2015.
- [50] TOULOUKIAN, Y. S., SAXENA, S. C., HESTERMANS, P., *Thermophysical properties of matter - viscosity*, 1970.
- [51] JIMBO, I., CRAMB, A. W., The density of liquid iron-carbon alloys, *Metall. Trans. B*, vol. 24, no. 1, pp. 5–10, 1993.
- [52] BEUTL, M., POTTLACHER, G., JAGER, H., Thermophysical properties of liquid iron, *Int. J. Thermophys.*, vol. 15, no. 6, pp. 1323–1331, 1994.
- [53] CEOTTO, D., Thermal diffusivity, viscosity and Prandtl number for molten iron and low carbon steel, *High Temp.*, vol. 51, no. 1, pp. 131–134, 2013.
- [54] NISH, T., SHIBATA, H., WASEDA, Y., OHTA, H., Thermal conductivities of

molten iron, cobalt, and nickel by laser flash method, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 34, no. 12, pp. 2801–2807, 2003.

- [55] Dry air properties, *Online*, available: http://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html, accessed: 20-Jun-2017.
- [56] Calderys, *Online*, available: http://www.calderys.com/images/Steel_Ladle_big.jpg, accessed: 20-Jun-2017.
- [57] PUHL, J., *European Refractory Markets*,” 2012.
- [58] Netzsch, *Instruments for Testing Refractories*, Manual técnico.

APÊNDICE A

Nesta seção são apresentados os cálculos dos coeficientes de transferência de calor para o ar e para o metal líquido. Esses coeficientes são determinados tanto para as superfícies internas quanto externas da panela. A angulação das superfícies e a temperatura do escoamento influenciam diretamente a magnitude desse coeficiente. Para o fundo da panela são consideradas superfícies horizontais (internas e externas) e, para a parede, a superfície apresenta uma pequena angulação no caso 1 e é perfeitamente vertical no caso 2. O escoamento nas superfícies externas e internas (nas etapas de panela vazia) ocorre no contato com o ar, porém nas superfícies internas, durante a etapa de refino secundário, o aço líquido é o fluido que transfere calor ao revestimento.

O coeficiente de filme (h) pode ser calculado pela expressão [35]:

$$h = \frac{Nu \ k}{L} \quad (9.1)$$

sendo que h é dado em $W \ m^{-2} \ K^{-1}$, Nu é um adimensional definido como número de Nusselt, k é a condutividade térmica ($W \ m^{-1} \ K^{-1}$) e L o comprimento característico da superfície (m). O número de Nusselt é função da angulação da superfície e da diferença de temperatura entre o escoamento e um ponto sobre a superfície. Logo, para cada superfície da panela tem-se o número de Nusselt que descreve o comportamento do escoamento, como mostrado na Tabela 9.1.

Nas relações apresentadas, o número de Prandtl é dado por:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (9.2)$$

sendo μ a viscosidade dinâmica ($kg \ m^{-1} \ s^{-1}$), c_p é o calor específico ($J \ kg^{-1} \ K^{-1}$) considerando a pressão constante. Todas as propriedades necessárias foram obtidas da literatura [42–47] e, quando disponível, considerou-se a dependência

Tabela 9.1 Número de Nusselt considerado para cada superfície da panela, em relação a sua geometria, temperatura e velocidade do escoamento na camada limite [35, 36].

Região	Superfície	Etapa	Número de Nusselt
Interna	Parede	-	$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/16}} \right)^2$
	Fundo	Com aço	$Nu = 0.82 Ra^{0.2} Pr^{0.034}$
		Sem aço	$Nu = 0.52 Ra^{1/5}$
Externa	Parede	-	$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/16}} \right)^2$
	Fundo	-	$Nu = 0.15 Ra^{1/3}$

com a temperatura. O número de Rayleigh é dado pelo produto do número de Grashof e o número de Prandtl, i. e.:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (9.3)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_{sink})L^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (9.4)$$

sendo g a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$), β o coeficiente de expansão térmica (K^{-1}), T_{sink} a temperatura do escoamento (K) distante da superfície, T_s a temperatura da superfície (K), L é o comprimento característico (m) e ν é a viscosidade cinemática [35, 36]. Os valores desses coeficientes para o ar foram aproximados por polinômios e regressões exponenciais, como apresentado na Figura 9.1.

Durante o refino secundário, o coeficiente de transferência de calor por convecção é função tanto da temperatura do aço líquido quanto da temperatura das superfícies internas da panela. A magnitude desse coeficiente para cada situação é apresentada na Figura 9.2. Pode-se destacar que a intensidade da transferência de calor pelas paredes é mais alta que no fundo, principalmente devido a temperatura maior do aço nas regiões superiores (estratificação

térmica) e a geometria dessas superfícies (parede vertical versus parede horizontal).

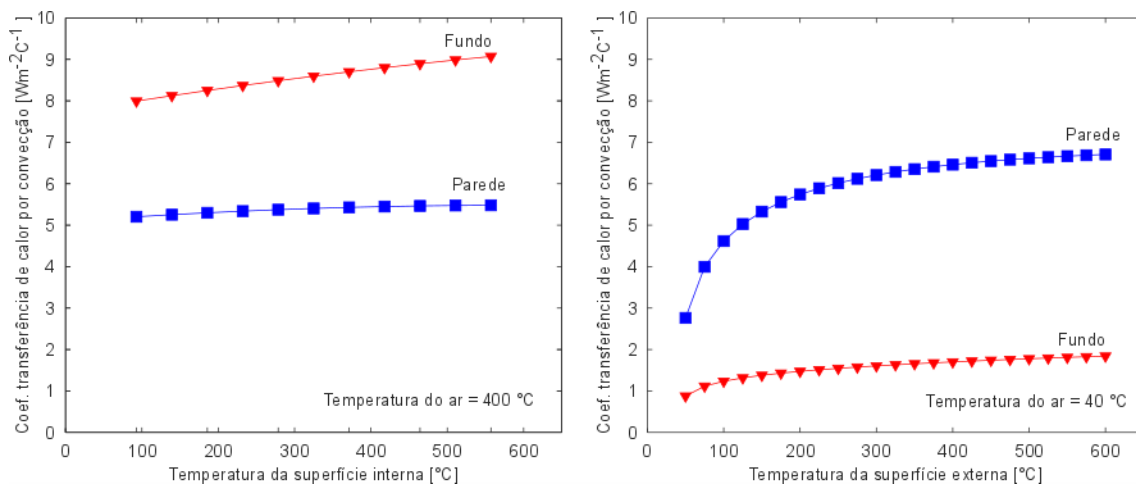


Figura 9.1 Coeficiente de transferência de calor calculado para as superfícies internas e externas (fundo e parede), nas etapas em que a panela é resfriada pelo ar.

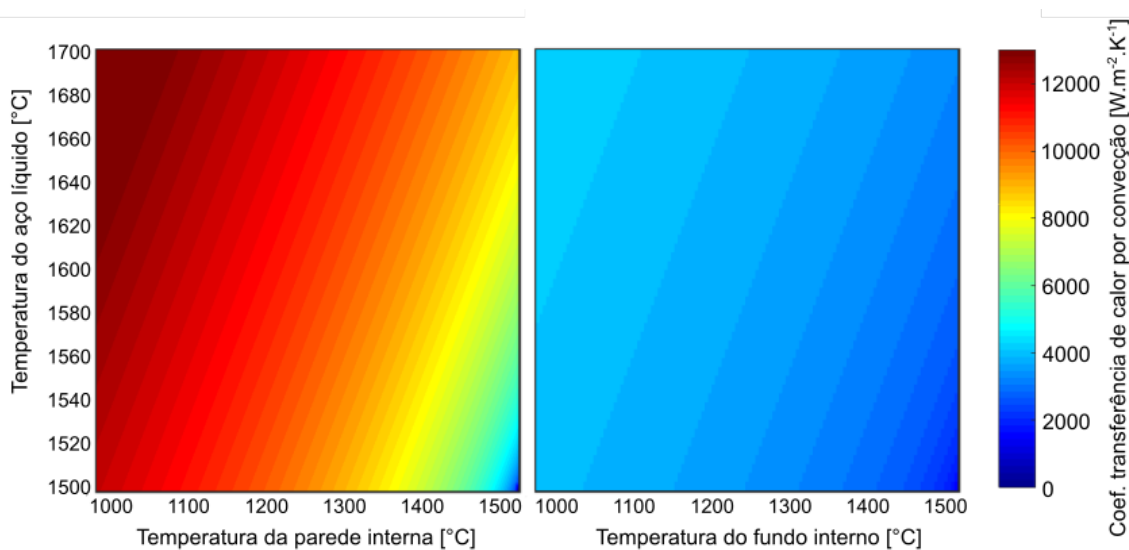


Figura 9.2 Coeficiente de transferência de calor calculado para as superfícies internas (fundo e parede) para etapa de refino secundário, quando a panela transporta o aço líquido.

APÊNDICE B

Apresenta-se abaixo a tabela com as composições e propriedades dos materiais utilizados nas análises da simulação.

Tabela 9.2 Propriedades dos materiais utilizados na modelagem da panela, quando disponível, em função da temperatura: condutividade térmica, calor específico e emissividade.

Material	Temperatura	Condutividade térmica [W/(m*K)]	Calor específico [J/(kg*K)]	Emissividade
A	25 °C	14,38	156	0,8
	238 °C	7,31	600	
	492 °C	5,08	682	
	744 °C	4,23	713	
	997 °C	3,77	735	
	1196 °C	3,51	848	
B	21 °C	13,23	789	0,8
	237 °C	8,19	1055	
	489 °C	5,85	1172	
	743 °C	5,21	1234	
	995 °C	4,62	1272	
	1245 °C	4,11	1330	
C	28 °C	2,66	843	-
	238 °C	2,19	1117	
	490 °C	2,03	1198	
	742 °C	2,03	1261	
	994 °C	1,93	1400	
	1244 °C	1,43	2249	
D	500 °C	8,20	770	0,8
	1000 °C	6,60	940	
E	200 °C	47,34	529,8	0,8
	350 °C	42,34	538,7	
	500 °C	37,35	666,5	
F	200 °C	0,26	965	0,8
	500 °C	0,28	1060	
	800 °C	0,31	1073	
	1000 °C	0,31	1114	
	1200 °C	0,31	1936	

Material	Temperatura	Condutividade térmica [W/(m*K)]	Calor específico [J/(kg*K)]	Emissividade
G	500 °C	6,00	1212	0,8
	1000 °C	5,30	1342	
H	301 °C	7,53	1180	0,8
	502 °C	6,21	1262	
	701 °C	5,50	1301	
	901 °C	5,47	1327	
I	24 °C	14,39	794	0,8
	238 °C	7,61	1025	
	491 °C	5,42	1181	
	742 °C	4,44	1227	
	994 °C	3,81	1275	
	1194 °C	2,93	1313	

Tabela 9.3 Composição, densidade e porosidade dos materiais refratários e isolantes considerados.

Material	Composição [%wt]						Densidade [kg/m³]	Porosidade [%]
	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	C	F ₂ O ₃	Others		
A	88,0	7,0	-	-	-	5,0	3,28	12,6
B	87,5	6,5	-	-	-	5,0	3,28	13,0
C	74,4	-	21,4	-	0,74	6,0	2,55	19,0
D	-	90,0	-	3,0	-	7,0	3,12	5,3
E	Aço baixo carbono						7,80	-
F	Espuma de alumina						0,57	80,0
G	75,0	8,0	-	8,0	-	9,0	3,29	5,1
H	25,0	64,0	-	6,0	-	5,0	3,17	3,5
I	93,0	5,5	-	-	-	1,5	3,21	-