



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG

Dissertação de Mestrado



“Avaliação Térmica e Estrutural de Portas Secas Usadas em Fornos de Reaquecimento de Placas para Laminação de Tiras de Aço a Quente”

Autora: Lays Augusta Leal Carvalho

Orientador: Prof. Paulo Santos Assis

Coorientador: Alex Milton Albergaria Campos



Março de 2022



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG

Lays Augusta Leal Carvalho

“Avaliação Térmica e Estrutural de Portas Secas Usadas em Fornos de Reaquecimento de Placas para Laminação de Tiras de Aço a Quente”

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Paulo Santos Assis

Coorientador: Alex Milton Albergaria Campos

Ouro Preto, Março de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C331a Carvalho, Lays Augusta Leal.
Avaliação térmica e estrutural de portas secas usadas em fornos de
reaquecimento de placas para laminação de tiras de aço a quente.
[manuscrito] / Lays Augusta Leal Carvalho. - 2022.
63 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Assis Assis.
Coorientador: Me. Alex Milton Albergaria Campos Campos.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro
Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais.

1. Materiais refratários. 2. Portas - Porta seca. 3. Laminação
(Metalurgia) - Laminação de tiras a quente. 4. Metalurgia. I. Assis, Paulo
Assis. II. Campos, Alex Milton Albergaria Campos. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lays Augusta Leal Carvalho

Avaliação térmica e estrutural de portas secas usadas em fornos de reaquecimento de placas para laminação de tiras de aço a quente

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Materiais

Aprovada em 17 de março de 2022.

Membros da banca

Prof. Dr. Ing. Paulo Santos Assis - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Carlos Roberto Ferreira - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Branco
Prof. Dr. Jorge Luiz Brescia Murta - Universidade Federal de Ouro Preto

O Prof. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva, Coordenador do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 03 de maio de 2022



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/05/2022, às 08:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0318437** e o código CRC **9692F781**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por iluminar o meu caminho. À minha família, por estar sempre comigo, me apoiar e incentivar durante essa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Assis, por me fazer enxergar mais à frente e alcançar voos mais altos. Ao meu coorientador, M.Sc Alex Campos, pela paciência, direcionamento e estímulo para a conclusão dessa etapa. À gloriosa Escola de Minas, à UFOP e à REDEMAT pelo ensino gratuito e de qualidade. À CAPES pelo apoio e fomento a ciência e pesquisa que são fundamentais para a evolução da engenharia e da sociedade.

À ArcelorMittal Tubarão, em especial ao Departamento de Engenharia e ao LTQ pela colaboração para que fosse possível realizar esse trabalho. À Saint-Gobain, IBAR e DSI pelo apoio.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão da dissertação.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
LISTA DE SIGLAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Panorama Siderúrgico.....	18
3.2 ArcelorMittal	20
3.3 Materiais Refratários.....	22
3.4 Fornos de reaquecimento para laminação.....	26
3.4.1 Refratários para fornos de reaquecimento.....	28
3.4.2 Portas para fornos de reaquecimento	29
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
4.1 Análise Térmica.....	33
4.2 Inspeção Dimensional.....	33
4.3 Inspeção de aparência.....	34
4.4 Teste de percussão.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1 Modelamento considerado para a análise por elementos finitos	35
5.2 Análise térmica da porta seca	37

5.3	Análise estrutural da porta seca	39
5.4	Análise térmica da porta seca alterada.....	43
5.5	Instalação da porta seca	46
5.6	Inspeção nos blocos refratários pré-moldados	47
5.6.1	Inspeção dimensional.....	47
5.6.2	Inspeção de aparência.....	48
5.6.3	Teste de percussão.....	49
5.7	Montagem da porta seca.....	50
5.8	Avaliação do desempenho da porta seca.....	53
6.	CONCLUSÕES	59
7.	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	59
8.	SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
9.	REFERÊNCIAS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Produção anual de aço bruto.	18
Figura 3.2: Produção brasileira de aço bruto.	19
Figura 3.3: Vista aérea da ArcelorMittal Tubarão.	21
Figura 3.4: Fluxograma de processos da ArcelorMittal Tubarão.	21
Figura 3.5: Vista aérea do Laminador de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão.	27
Figura 3.6: Vazamento de água decorrente da água de refrigeração da porta.	30
Figura 3.7: Passagem de chama da zona de encharque na porta de desenformamento.	31
Figura 4.1: Estrutura da porta seca montada.	31
Figura 4.2: Fluxograma do procedimento experimental.	32
Figura 4.3: Blocos refratários prontos para inspeção.	34
Figura 5.1: Modelamento da parte a) frontal da porta seca e b) posterior da porta.	36
Figura 5.2: Bloco refratário pré-moldado.	37
Figura 5.3: Configuração final da porta com o sistema refratário.	37
Figura 5.4: Divisão considerada nos refratários para inserção das condições de contorno.	38
Figura 5.5: Condições de contorno utilizadas no cálculo térmico.	37
Figura 5.6: Distribuição de temperatura no lado do refratário.	38
Figura 5.7: Distribuição de temperatura no lado da estrutura posterior da porta.	39
Figura 5.8: Tensões equivalentes devido a distribuição de temperatura mais peso próprio.	39
Figura 5.9: Alteração dos perfis retangulares, da chapa de fixação e da parte lateral da porta (tubo fechado).	40
Figura 5.10: Detalhes das alterações da porta eliminando interferência com a fixação dos refratários.	41
Figura 5.11: Centro de massa na parte estrutural da porta seca alterada.	42
Figura 5.12: Suporte de ligação da porta seca com a barra de carga.	42
Figura 5.13: Dilatação axial máxima da porta seca alterada.	43
Figura 5.14: Análise térmica da distribuição de temperatura no lado refratário.	43
Figura 5.15: Análise térmica da distribuição da temperatura no lado da estrutura.	44
Figura 5.16: Análise das tensões máximas na porta seca alterada.	44
Figura 5.17: Perfil térmico da porta seca.	45
Figura 5.18: Blocos danificados que foram retirados da porta seca.	46
Figura 5.19: Porta seca: A) Vista da metade da porta já desmontada; B) Imagem da lateral da porta.	46
Figura 5.20: Parte estrutural da porta seca.	47
Figura 5.21: Inspeção dimensional nos blocos da porta seca.	48
Figura 5.22: Projeto do bloco refratário pré-moldado.	48
Figura 5.23: Teste de aparência nos blocos pré-moldados.	49
Figura 5.24: Teste de percussão nos blocos da porta seca.	49

Figura 5.25: Montagem da porta seca.....	50
Figura 5.26: Desnível entre os blocos.....	51
Figura 5.27: Lixamento na face do bloco.....	51
Figura 5.28: Continuidade da montagem da porta.....	52
Figura 5.29: Montagem da porta seca concluída.....	52
Figura 5.30: Imagem da câmara interna do Forno mostrando a região de queda dos blocos.....	53
Figura 5.31: Região da porta seca que sofreu queda de blocos.....	54
Figura 5.32: Recuperação da região danificada da porta.....	54
Figura 5.33: a) Abertura da porta; b) Fechamento da porta.....	55
Figura 5.34: Detalhe do desprendimento de bloco na parte superior direita da porta seca.....	55
Figura 5.35: Monitoramento térmico da região com desprendimento de bloco.....	56
Figura 5.36: Região de desprendimento dos blocos refratários.....	56
Figura 5.37: Ventiladores utilizados para minimizar a temperatura da parte estrutural da porta.....	57
Figura 5.38: a) Termografia realizada antes a instalação dos ventiladores; b) Termografia após a instalação dos ventiladores.....	57
Figura 5.39: Condição da porta seca após ter sido retirada do forno.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1: Densidade dos materiais refratários utilizados na porta seca.....	32
--------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
°C	graus Celsius
nm	nanômetro
Mt	milhões de toneladas
kg	quilograma
US\$	dólar
t	tonelada

LISTA DE SIGLAS

AMT	ArcelorMittal Tubarão
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
IAB	Instituto Aço Brasil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LTQ	Laminação de Tiras a Quente
Hab	habitantes
O ₂	oxigênio
Fe	ferro
WSA	World Steel Association

RESUMO

Os materiais refratários são amplamente utilizados em indústrias siderúrgicas pois além de resistirem a situações que envolvem elevadas temperaturas, são desenvolvidos para atenderem as demandas associadas à resistência mecânica. Assim, para que os fornos e os equipamentos siderúrgicos tenham uma boa performance, é necessário que eles sejam revestidos com materiais refratários apropriados, e uma instalação economicamente viável. Na laminação de tiras a quente, os fornos de reaquecimento de placas utilizam refratários, de várias composições, compatíveis com as solicitações de uso. E, nesses fornos, as portas de desenformamento requerem atenção especial por se encontrarem em um ambiente agressivo quimicamente, de temperaturas e de tensões variadas. Comumente são usadas portas refrigeradas a água, que possuem algumas desvantagens quanto à manutenção e ao uso constante de água, porém há a alternativa do uso de uma porta seca que apresentam muitas vantagens em relação a porta refrigerada, trazendo ganhos econômicos e ambientais. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo, através do estudo térmico e estrutural e da análise da qualidade de fabricação e montagem dos blocos refratários, de avaliar o uso da porta seca nos fornos de reaquecimento da laminação de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão. A metodologia foi realizada através de modelagem computacional utilizando *Ansys*, com base nas temperaturas em que as portas de desenformamento estão submetidas e outras variáveis do sistema de refratamento adotado. Assim, de posse de informações como densidade, temperatura interna do forno, temperatura ambiente, coeficiente de convecção entre a porta e o ambiente e emissividade da estrutura, foi possível fazer a modelagem térmica e estrutural da porta utilizando o software e selecionar os materiais de revestimento para o forno de reaquecimento para laminação de tiras a quente.

Palavras-chave: Refratário, Porta seca, Laminação de tiras a quente, Metalurgia.

ABSTRACT

Refractory materials are widely used in the steel industry because, in addition to their resistance at high temperatures, they are developed to meet the demands associated with mechanical resistance. Thus, in order for the furnaces and steel mill equipment to ensure good performance, some equipment must use an appropriate refractory material, in a feasible way.

In hot-strip rolling, the reheating furnaces use refractories of different compositions compatible with the use requirements.

In these furnaces the doors require special attention because they are in a chemically aggressive environment, which has different kinds of temperatures and stresses.

Water-cooled doors are commonly used, which have some disadvantages such as maintenance and the constant use of water, but there is the alternative of using dry doors that have many advantages over the refrigerated ones, bringing economic and environmental gains.

Therefore, this work aims to evaluate the use of dry doors in ArcelorMittal Tubarão hot-strip reheating furnaces, through the thermal and structural study and the analysis of the manufacturing and assembly quality of the refractory blocks.

Therefore, this methodology includes thermal and structural analysis carried out through computational modeling using *Ansys*, related to the information of temperatures that the doors are subjected and other variables of the refracting system.

It was possible to adapt the coating materials for the reheating furnace for hot-strip lamination in a more economical and sustainable way using some information such as density, internal furnace temperature, convection coefficient between the door and the internal part, and the emissivity of the structure. It was possible to do the thermal and structural modeling of the door using the software and to select the lining materials for the reheating furnace for the hot-strip mill.

Key words: Refractory, Dry door, Hot-strip lamination, Metallurgy.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais refratários abrangem uma vasta gama de produtos, que têm como propósito resistir a altas temperaturas em condições específicas do processo e de operação dos equipamentos industriais, que geralmente envolvem variações bruscas de temperatura, esforços mecânicos, ataques químicos, entre outras solicitações. Muitos tipos de produtos foram desenvolvidos a partir de diferentes matérias-primas ou da mistura destas para suportar estas solicitações. Desse modo, é possível classificar os produtos refratários de acordo com o componente químico principal ou a partir das diferentes matérias-primas. Os materiais refratários são classificados em: sílica, sílico aluminoso, aluminoso, mulita, cromítico-magnesiano, grafita, carbetos de silício, carbono, zircônia, zirconita, espinélio, dentre outros (ABCERAM, 2020).

Os fornos de reaquecimento de placas são de grande importância no processo siderúrgico, através do reaquecimento das placas em elevadas temperaturas, até cerca de 1300°C, estas adquirem as propriedades requeridas para serem laminadas. Assim, os refratários usados nos fornos de reaquecimento desempenham um papel fundamental, eles servem como proteção para a carcaça metálica e conseqüentemente como redutores das perdas térmicas dentro do forno, colaborando assim para a redução de consumo de combustível e para a manutenção de altas temperaturas no interior do forno (CHAUDHARY et al., 2016).

As portas de enformamento e desenformamento dos fornos de reaquecimento de placas possuem grande importância na performance destes equipamentos, por serem o principal meio de troca de calor do ambiente interno com o ambiente externo do forno. Necessita-se que estejam em bom estado para funcionarem sem que ocorram imprevistos que possam prejudicar o processo de produção. A porta de desenformamento encontra-se na saída do forno, zona de encharque, ambiente de elevada temperatura e meio mais agressivo, sendo assim, pode interferir no funcionamento da mesma e causar danos.

A porta seca é uma porta sem refrigeração e apresenta-se como uma melhoria em relação à porta refrigerada. A sua utilização elimina os problemas de vazamento de água no local e conseqüentemente redução nos danos que podem ser causados na porta, contribuindo também com o fator ambiental por economizar a água utilizada no processo. Além disso, há um ganho de tempo e redução de custo do reparo gerando maior confiabilidade do equipamento.

Devido à competitividade do mercado siderúrgico, a crescente busca por redução de custos é fundamental na atualidade. Para isso, é importante que sejam criadas melhorias nos processos de produção que visem à redução de custo e sejam mais eficientes para obter um produto de qualidade e manter a empresa competitiva (SOUZA, 2016).

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma análise térmica e estrutural, utilizando o *Ansys, software* de modelagem computacional que utiliza elementos finitos, de uma porta seca que foi utilizada nos fornos de reaquecimento de placas da ArcelorMittal Tubarão. Com isso é possível otimizar o processo siderúrgico, reduzir os custos recorrentes com as trocas e/ou manutenções das portas refrigeradas, eliminar as perdas de água no processo e conseqüentemente aumentar a vida útil dos refratários utilizados próximos à região do desenformamento, além de minimizar as paradas inesperadas devido aos problemas relacionados aos fatores citados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso da porta seca nos fornos de reaquecimento da laminação de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão, através do estudo térmico e estrutural e da análise da qualidade de fabricação e montagem dos blocos refratários.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar térmica e estruturalmente a porta seca através de modelamento computacional;
- b) Inspeccionar dimensionalmente e realizar teste de percussão nos blocos refratários;
- c) Inspeccionar a aparência (trincas, cantos, arestas e cavidades) dos blocos refratários da porta seca para avaliação da qualidade de fabricação;
- d) Acompanhar a montagem dos blocos da porta seca na estrutura metálica da porta;
- e) Analisar o desempenho da porta seca após instalação no forno de reaquecimento de placas;
- f) Contribuir com a geração e disseminação de conhecimentos na área de engenharia de materiais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Panorama Siderúrgico

O Setor siderúrgico tem grande importância no panorama econômico brasileiro, com ampla cadeia produtiva dos segmentos ligados à metalurgia, usinagem e produção de metálicos. Além disso, é fundamental para outras atividades relevantes do país, como a construção civil, a indústria automobilística e bens de capital, dentre outras.

Este setor se encontra categorizado pelo CNAE – Classificação Nacional de Atividades Econômicas – IBGE, na Seção C – Indústrias de Transformação, Divisão 24 – Metalurgia, separado em cinco grupos: siderurgia, produção de ferro-gusa e de ferro-ligas; produção de tubos de aço, exceto sem costura; metalurgia dos metais não ferrosos e fundição.

A produção mundial de aço bruto somou 1,850 bilhão de toneladas em 2020. Com 1,064 bilhão de toneladas produzidas, a China permaneceu como líder mundial. O Brasil produziu 31,4Mt e colocou-se na 9ª posição do ranking mundial (WSA, 2021). A Figura 3.1 mostra a produção de aço no mundo de 2013 a 2020 em comparação com a produção da China.

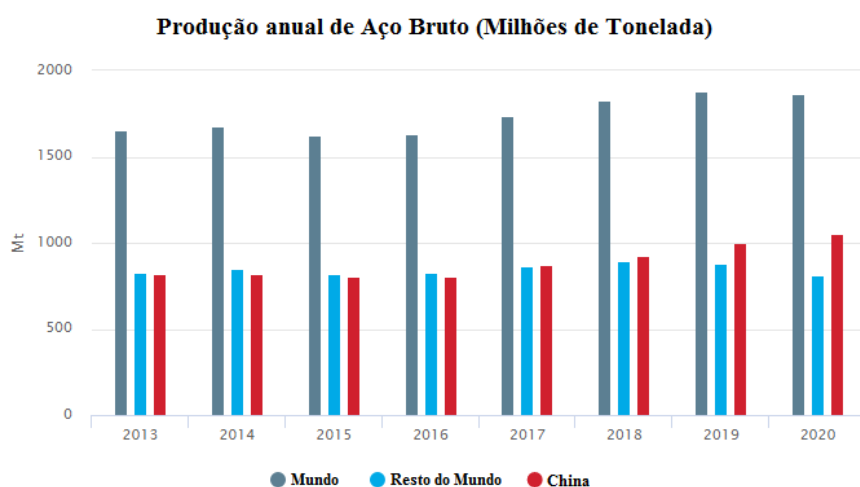


Figura 3.1. Produção anual de aço bruto (WSA, 2021).

É possível observar que a produção de aço na China está bem próxima a produção do resto do mundo de 2013 a 2017. Em 2018 a produção de aço da China ultrapassou a produção de aço do resto do mundo o que se torna mais expressivo em 2020. Além disso, observa-se que em 2020, quando o mundo reduziu a produção devido a pandemia do COVID-19, a China teve um pequeno aumento da sua produção em relação a 2019.

O Brasil começou a despontar para o cenário mundial como potencial produtor de aço a partir de 2005, quando a produção superou a casa dos 30 milhões de toneladas. Em 2018 o saldo comercial brasileiro do setor siderúrgico apresentou superávit de US\$ 6,3 bilhões, exportações somando em torno de US\$ 8,9 bilhões e as importações US\$ 2,6 bilhão. O principal destinatário dessas importações continua sendo os Estados Unidos.

O aço é 100% reciclável e é fundamental no modelo circular de negócio em que todos os produtos devem ser projetados e fabricados de maneira que tenham a possibilidade de serem reconicionados, reparados, reciclados e reutilizados.

O consumo aparente de produtos siderúrgicos no Brasil gira em torno de 21.207 milhões de toneladas, já o consumo per capita de aço bruto fica próximo de 112 kg/hab/ano. A receita da siderurgia somou, ao final de 2018, US\$ 27,3 bilhões empregando, direta e indiretamente, 102.692 colaboradores (Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico 2019). A Figura 3.2 mostra a evolução da produção brasileira de aço bruto de 1970 a 2020.

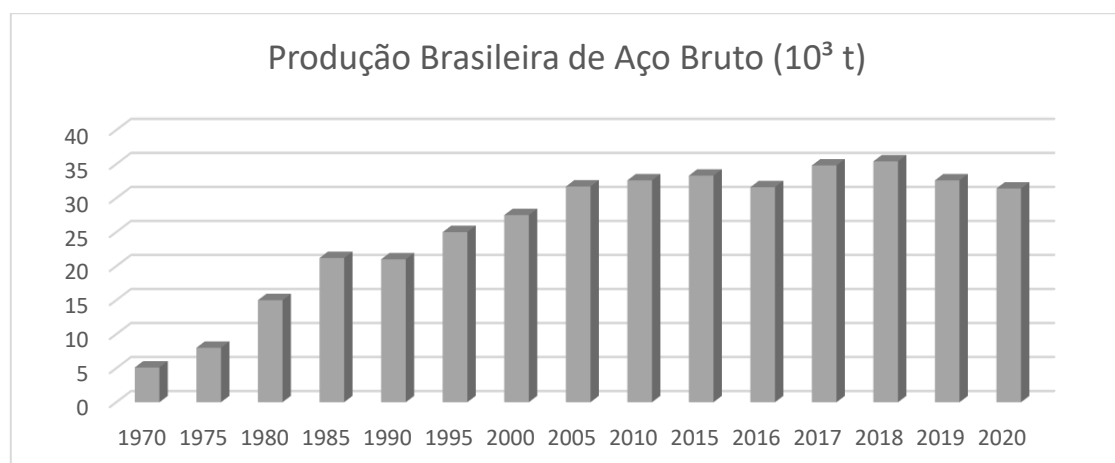


Figura 3.2. Produção Brasileira de Aço Bruto (Fonte: Aço Brasil, 2020).

Pode-se observar que a produção brasileira de aço bruto cresceu consideravelmente a partir de 2005, quando ultrapassa a marca de 30 mil toneladas. Além disso, o Brasil possui destaque na produção de aço na América Latina, produzindo mais que a metade de todo aço do continente (Instituto Aço Brasil, 2019).

Por fim, é importante dizer que a siderurgia é um setor com intensivo consumo de energia, água e materiais, dentre eles os refratários. Sendo assim, a quantidade de resíduos gerados é de igual relevância o que leva a busca constante por melhorar seus processos e buscar novas matérias-primas para se manterem competitivas e atingirem as metas ambientais. Neste contexto a busca por métodos e materiais que aumentem a vida útil dos equipamentos, como é

o caso da porta seca, nortearão o setor na busca pela excelência operacional e desenvolvimento econômico e ambiental.

3.2 ArcelorMittal

O Grupo ArcelorMittal, líder mundial na produção de aço e maior fornecedor de aço bruto no mundo, está presente em mais de 60 países com unidades industriais e comerciais. A ArcelorMittal Brasil opera 27 unidades e é considerada a maior produtora de aços planos e longos da América Latina com capacidade anual produtiva de 13 milhões de toneladas de aço. O processo produtivo de aços planos inicia-se na ArcelorMittal Tubarão, usina integrada localizada na Grande Vitória – Espírito Santo, abrangendo uma área de 13,5 milhões de m² e possui capacidade produtiva de 7,5 milhões de toneladas/ano de aço líquido e destes 4 milhões podem ser transformados em bobinas por meio da laminação de tiras a quente e o restante em placas de aço.

A ArcelorMittal Tubarão foi inaugurada em 1983, apresentava capacidade produtiva de 3 milhões t/ano, produzia somente placas de aço, sobretudo para exportação. Teve sua capacidade ampliada em 1998 para 4,7 milhões t/ano. Em 2002 iniciou a operação do Laminador de Tiras a Quente e começou a atuar também no mercado interno de aços planos. Em 2007 teve sua capacidade de produção estendida para o volume atual. Na Figura 3.3 tem-se uma vista aérea das unidades produtivas (AMT, 2015).



Figura 3.3 Vista aérea da ArcelorMittal Tubarão (Fonte: Catálogo de produtos laminados – Edição 2015 – ArcelorMittal Aços Planos América Latina – Brasil).

A ArcelorMittal Tubarão é uma usina integrada que utiliza o coque como redutor em seus três altos-fornos. O fluxo de produção integrado da usina é mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4. Fluxograma de processos da ArcelorMittal Tubarão (Fonte: Catálogo de produtos laminados – Edição 2015 – ArcelorMittal Aços Planos América Latina – Brasil).

Conforme a Figura 3.4 começa o fluxo produtivo da AMT com a produção das matérias-primas de coque, sinter e cal, através dos processos da Coqueria, Sinterização e Calcinação. Na Coqueria o processo de coqueificação ocorre quando uma mistura de carvões é submetida a uma destilação. E através dessa destilação acontece a liberação do material volátil do carvão restando, então, um resíduo sólido carbonoso, infusível, poroso e de alta resistência mecânica. No interior dos fornos de coqueificação este processo acontece devido ao aquecimento do carvão através da condução de calor das paredes do forno até o centro da carga (SILVA, 2011). Na Sinterização, ocorre a aglomeração à quente de materiais finos, produzindo o sinter. E na Calcinação por meio de decomposição térmica o calcário transforma-se em cal virgem.

O ferro gusa, principal matéria-prima do aço, é produzido a partir das reações que acontecem nos Altos-Fornos, onde as matérias-primas citadas anteriormente com adições de minério de ferro e pelotas são submetidas ao processo de redução ao passarem por reações químicas nesse equipamento. Os 22 carros torpedos existentes na AMT, cada um com capacidade de 450 toneladas, transportam o ferro gusa produzido nos Altos-Fornos para a Aciaria, onde acontece a transformação do ferro gusa em aço a partir do sopro de oxigênio e da adição de alguns elementos de ligas. O aço líquido será submetido ao beneficiamento através

do refino primário e secundário, e passará pelo resfriamento controlado nas máquinas de Lingotamento Contínuo, formando então as placas de aço.

Estas placas são inspecionadas e armazenadas na área de condicionamento de placas, algumas são enviadas diretamente para os clientes e outras irão para o LTQ, passam inicialmente pelo forno de reaquecimento. Dentro do forno passam pela zona de recuperação, pré-aquecimento, aquecimento 1, aquecimento 2 e por fim pelo encharque até serem reaquecidas uniformemente com um perfil de temperatura adequado. E atingirem temperatura de austenitização, próximo a 1400°C, as placas adquirem as propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas para serem laminadas que as reduzirá a pequenas espessuras e permitirá que se transformem em bobinas, passando no fim do processo pelas bobinadeiras. Muitas destas bobinas são enviadas diretamente para os clientes e algumas são enviadas a ArcelorMittal Vega, em Santa Catarina, para serem tratadas pelo processo de galvanização (Souza *et al.*, 2013).

3.3 Materiais Refratários

Os refratários, ou cerâmicas refratárias, são materiais policristalinos, multicomponentes, polifásicos e estáveis volumetricamente que possuem como propriedades a capacidade de resistir a ambientes hostis sob solicitações diversas sem fundir-se ou decompor-se e de permanecerem não reativos ou inertes quando expostos a ambientes severos (DUARTE, 2015; ALAFAR, 2015). Outro fator de considerável importância é a capacidade destes de proporcionar isolamento térmico.

Lens (2013) lembra que os materiais refratários compreendem uma vasta gama de materiais, como: óxidos, carbetos, boretos, carbono e suas misturas, que possuem propriedades superiores como térmicas, físico-químicas e estruturais, quando comparadas as de outros materiais. Quando utilizados em elevadas temperaturas (>1580°C) apresentam a capacidade de resistir a variações ambientais em meios agressivos, neste caso resistem ao aço, gusa e escória por determinado período de tempo.

Devido a estas propriedades estes materiais possuem como principais aplicações: revestimentos de fornos para o beneficiamento de metais, tratamentos térmicos metalúrgicos, fabricação de vidros e geração de energia. A forma mais comum de comercialização dos materiais refratários são os tijolos, apesar de serem comercializados de várias formas.

Existem diversos tipos de materiais refratários que podem ser classificados de acordo com a sua composição (DUARTE, 2015; ALAFAR, 2015):

- Refratários básicos: MgO (MgO-C, etc); cromita (Cromo-Magnesiano); doloma (Doloma-Carbono, etc); espinelizados.
- Refratários não básicos: sílico-aluminosos; aluminosos; sílica.
- Refratários especiais: carbono; carbetos de silício; zircônia e zirconita; outros.

Além disso, classifica-se os refratários também em relação à forma que são utilizados:

- Refratários monolíticos: concretos refratários; argamassas; massas de socar; massa de projeção; massa de cobertura; massa de injeção; plásticos refratários; pinturas refratárias; granulados refratários.
- Refratários moldados: tijolos padronizados (arcos, cunhas, radiais, paralelos); refratários especiais (variados formatos para aplicações especiais).

E podem ser classificados também quanto o poder de isolamento:

- Isolantes;
- Densos.

Outra classificação usual é mostrada por Callister (2018), que classifica os materiais refratários da seguinte forma:

- Refratários sílico aluminosos: têm como matérias-primas primordiais argilas refratárias de alta pureza, que são mistura de alumina e sílica e contêm normalmente entre 25% a 45% em peso de alumina. Conforme o diagrama de fases de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, a temperatura mais alta possível sem a formação de uma fase líquida é 1587°C , nessa faixa de composições. As fases presentes em equilíbrio, abaixo de 1587°C , são a mulita e a sílica.
- Refratários à base de sílica: também chamados de refratário ácidos, têm como principal componente a sílica. Esses materiais possuem a capacidade de suportar cargas em temperaturas elevadas, são utilizados normalmente nos tetos em arco dos fornos de fabricação de aços e vidros, onde podem ser atingidas temperaturas muito elevadas, em torno 1650°C . Nessa circunstância, uma pequena fração do tijolo se encontrará como líquido. De acordo com o diagrama de fases sílica-alumina, a presença de concentrações de alumina, mesmo que em baixos teores, exerce influência negativa na performance desses refratários. O teor de alumina necessita estar numa faixa mínima, comumente entre 0,2%p e 1,0 %p. Visto que a composição eutética (7,7 %p Al_2O_3) se encontra muito próxima da extremidade da sílica no diagrama de fases, então pequenas adições de Al_2O_3 diminuem a temperatura *liquidus* de forma considerável. Isso implica que podem

ser encontradas quantidades substanciais de líquido em temperaturas superiores a 1600°C. Estes refratários apresentam resistência às escórias ricas em sílica, também chamadas de escórias ácidas, e são utilizados como vasos de contenção para elas. Entretanto, tem facilidade de serem acometidos por escórias básicas, com alta proporção de CaO e/ou MgO, logo deve-se evitar o contato com esses óxidos;

- Refratários básicos: são ricos em periclásio, ou magnésia (MgO), e também podem conter compostos de cálcio, cromo e ferro. Em temperaturas elevadas a presença de sílica afeta a performance destes materiais. Os refratários básicos apresentam notável resistência ao ataque por escórias contendo altas concentrações de MgO e de CaO, e são amplamente aplicados em alguns fornos de produção e refino de aços.
- Refratários especiais: são materiais cerâmicos utilizados em aplicações bem específicas. Muitos desses materiais podem ser fabricados com baixíssima porosidade. Alguns deles são óxidos com pureza parcialmente altas. Encontram-se nesse grupo: sílica, alumina, magnésia, zircônia (ZrO₂), berília/óxido de berílio (BeO) e mulita (3Al₂O₃-2SiO₂). E outros materiais que contêm carbetos, além do carbono e da grafita. A grafita e o carbono são altamente refratários, mas por serem passíveis à oxidação em temperaturas superiores em torno de 800°C possuem aplicação limitada. O carbetos de silício (SiC) tem sido utilizado em componentes do interior de fornos, como cadinhos e também como elementos de aquecimento por resistência elétrica. Os refratários especiais apresentam um custo elevado devido a essas propriedades especiais.

As matérias-primas de muitos materiais comerciais baseiam-se em partículas finas, que podem ter composições distintas, e também em partículas grandes (chamotes). As partículas finas, na queima, estão geralmente vinculadas na formação de uma fase de ligação, esta fase é responsável pela maior resistência do tijolo e pode ser majoritariamente vítrea ou cristalina. Habitualmente, a temperatura de serviço é inferior à temperatura na qual a peça refratária foi cozida.

Para produção de tijolos refratários apropriados deve-se controlar a porosidade que é uma variável microestrutural de considerável importância. Com a redução da porosidade ocorre o aumento da resistência mecânica, da capacidade de suportar carga e da resistência ao ataque por materiais corrosivos. Enquanto, simultaneamente, as características de resistência a choques

térmicos e de isolamento térmico diminuem. Evidentemente, a porosidade ótima é dependente das condições de serviço (CALLISTER JR., 2018).

Os materiais refratários possuem uma ampla empregabilidade, podem ser aplicados em indústrias siderúrgicas, de cerâmica, cimento, vidro, fundição, alumínio, petroquímica e química. Para a devida operação de uma usina siderúrgica é essencial que os equipamentos sejam revestidos com refratários, devido às altas temperaturas de trabalho dos equipamentos, que pode ser prejudicial a performance dos mesmos e acarretar danos na carcaça caso não estejam revestidos apropriadamente. Os revestimentos refratários são utilizados nas indústrias siderúrgicas com o intuito de isolar termicamente os equipamentos e atuar na contenção do metal líquido.

Destaca-se como a principal consumidora de refratários a indústria siderúrgica, que absorve aproximadamente 70% da produção de refratários. Algumas outras indústrias que apresentam consumo de refratários considerável também são fundição de ferro e aço, metalurgia de metais não ferrosos como alumínio, cimento e cal, vidro, química e outros. Existe grande deficiência de dados estatísticos do setor. Os índices apresentados foram obtidos através da fonte do Projeto Estal/MME – consultor Emílio Lobato, agosto de 2009, que apontou a produção brasileira de 2008 de 543 mil toneladas, e destaca a Magnesita e IBAR como as maiores produtoras nacionais. A partir do levantamento do comércio exterior do setor de refratários dos últimos seis anos realizado pelo Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral – DTTM da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM, nota-se certa dependência do mercado externo desses produtos até 2015. Entretanto, a balança desse comércio apontou saldo positivo da ordem de US\$ 6,4 milhões promovido principalmente pelo crescimento das exportações de produtos provenientes da Magnesita, e em 2017 e 2018 retorna-se ao patamar histórico da dependência brasileira do mercado externo (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

Um exemplo de aplicação na siderurgia é a sílica, que é um material refratário muito utilizado nos fornos de produção de coque e também em regeneradores de calor dos altos-fornos, pois em altas temperaturas apresenta excelente refratariedade sob carga, elevada resistência ao choque térmico acima de 600°C, estabilidade volumétrica apesar das flutuações térmicas decorrentes da operação e resistência química ao ataque por poeira ou impurezas provenientes do gás. No entanto, a sílica possui alta taxa de expansão e requer um aquecimento e resfriamento extremamente controlado (NIEMEIJER, 2002).

A performance dos materiais refratários está diretamente ligada ao resultado das suas propriedades nas condições de trabalho. Conhecer o mecanismo físico-químico principal do

processo, a posição do refratário ao ser aplicado ao longo do equipamento e o tipo de interação com as matérias-primas e escória, além dos produtos das reações de transformações é fundamental para a escolha do material ideal específico para cada aplicação (COTTA, 2014).

3.4 Fornos de reaquecimento para laminação

Os fornos de reaquecimento são utilizados em usinas integradas e em miniusinas, e é praticamente o último equipamento da linha de produção de uma siderúrgica que é revestido com materiais refratários. Os fornos de reaquecimento são revestidos com materiais refratários ou fibrosos resistentes a altas temperaturas (1100°C a 1450°C) e tem como objetivo aquecer placas, blocos e/ou tarugos com o intuito de torná-los plásticos o suficiente para possa ocorrer a transformação mecânica. O projeto de revestimento refratário é composto pelo revestimento de trabalho e revestimento permanente. O revestimento de trabalho consiste no material utilizado na face quente do forno, essa região é afetada diretamente pelas condições operacionais, e o revestimento permanente ou de segurança pode ser composto por tijolos ou concretos densos e isolantes, placas e mantas isolantes, a principal funcionalidade desse revestimento é isolar o calor gerado internamente no forno contribuindo assim com o aquecimento da carga metálica (OLLMANN e COUTO, 2019).

A classificação dos fornos de reaquecimento pode ser feita da seguinte forma: viga caminhante (*walking beam*), empurrador (*pusher*), soleira caminhante (*walking hearth*) e soleira rotativa (*rotary hearth*) (ALVES *et al.*, 2016).

Os fornos *Walking Beam* possuem *skids* para a sustentação da carga. Os *skids* são constituídos de tubos metálicos revestidos de material refratário, por onde passa a água para a refrigeração do conjunto. Estes fornos possuem *skids* móveis e fixos, e a carga prossegue gradualmente ao longo do forno por meio do movimento contínuo dos *skids* móveis.

O forno de reaquecimento possui quatro regiões distintas: recuperação, pré-aquecimento, aquecimento e encharque. A recuperação é por onde ocorre o enformamento das placas, esta região não possui queimadores e a carga recebe energia vinda das outras regiões por meio dos gases de exaustão através de radiação e convecção. O escoamento dos gases de combustão acontece em contracorrente a movimentação das placas e o caminho para a chaminé encontra-se logo no início da região da recuperação. As outras regiões, pré-aquecimento, aquecimento e encharque, possuem queimadores e por via destes é que adentra no forno o combustível e o ar para a realização da combustão. E o encharque é por onde ocorre o desenformamento das placas, esta região possui queimadores no teto e nas paredes (MIRANDA *et al.*, 2006).

As principais fontes de calor para o aquecimento de placas são o ar pré-aquecido da combustão, o calor proveniente da formação de carepa na placa e a queima de combustível. E as perdas de calor acontecem através do calor irradiado pelas paredes do forno, pelos fumos aquecidos que saem na chaminé, pelas placas reaquecidas, pela água de refrigeração dos *skids* e por algumas outras perdas não muito significativas (GORNI *et al.*, 2002).

A transferência de calor no interior das placas, no processo de reaquecimento, ocorre somente por condução. Já no exterior das placas as trocas de calor acontecem por radiação, convecção e condução, pois o processo é bem mais complexo. A condução decorre do contato das almofadas dos *skids* com a superfície da placa. A convecção dá-se por meio dos gases no interior do forno e da superfície das placas. E a radiação ocorre por meio da superfície das placas, dos gases, da chama e das superfícies refratárias do forno (postes, *skids* e paredes).

O reaquecimento de placas para a laminação a quente é uma das fases mais importantes da produção de chapas e bobinas a quente. Esta etapa é fundamental para alcançar um bom processo de laminação, pois o movimento das discordâncias é termicamente ativado e então a alta temperatura do processo facilita essa mobilidade e conseqüentemente aumenta a plasticidade do material para atingir a qualidade desejada no produto final. Requer-se que isto seja alcançado com o menor consumo energético e maior produtividade possível (MIRANDA *et al.*, 2006).

O *start up* da área de laminação de tiras a quente da AMT ocorreu em agosto de 2002, portando a tecnologia mais avançada existente. Esta área é responsável pelo recebimento, reaquecimento e transformação das placas em bobinas. Na figura 3.5 tem-se uma visão geral do LTQ.



Figura 3.5. Vista aérea do Laminador de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão (Fonte: Álbum interno de fotografias- ArcelorMittal Tubarão 2015).

O processo de laminação de tiras a quente inicia-se a partir do recebimento e preparação das placas no pátio de estocagem do LTQ. Este pátio possui galpões com pontes rolantes que são compostas de tenazes para o manejo das placas e são operadas de modo automático. As máquinas de lingotamento contínuo produzem as placas, estas também podem advir de fonte externa com os atributos essenciais à sua transformação em bobina.

Antes das placas serem direcionadas ao forno de reaquecimento elas são empilhadas no pátio de estocagem de placas e ordenadas na sequência de laminação. As placas são enforadas e reaquecidas até a temperatura ideal de laminação. O aquecimento é feito continuamente e a movimentação das placas dentro do forno é realizada por meio das vigas móveis no interior do forno.

A temperatura de enforamento das placas pode variar, é considerado como enforamento a frio abaixo de 200 °C, a morno entre 200 e 400 °C e a quente acima de 400°C. Após serem aquecidas as placas são desenforadas a temperaturas entre 1100 e 1250°C, de acordo com o material processado. A capacidade nominal dos fornos da AMT é de 400t/h e o combustível utilizado é o gás misto, composto de gás de alto-forno (BFG), gás de coqueria (COG), gás de aciaria (LDG) e gás natural (GN), controla-se a combustão destes automaticamente e observa-se a emissão de particulados com o intuito de evitar impactos ambientais.

Antes de iniciar o processo de laminação das placas, é preciso remover as carepas formadas na superfície da placa. As carepas são formadas devido afinidade entre o O₂ e o Fe em elevadas temperaturas, e isto implica na formação de óxidos na superfície do aço ao longo de todo o processo de laminação de tiras a quente. Estes óxidos se formam em camadas aproximadamente regulares, sendo a de FeO (wustita) a de menor grau de oxidação junto ao metal, a de Fe₃O₄ (magnetita) uma camada intermediária, e a de Fe₂O₃ (hematita) a camada mais externa em contato com o ambiente, de nível mais alto de oxidação. As carepas são removidas através dos descarepadores, que são jatos de água de alta pressão que estão situados ao longo da linha de laminação (LEITE, 2008).

No processo de laminação de tiras a quente as placas passam pela fase de desbaste e depois pela fase de acabamento. No desbaste, as placas reaquecidas são submetidas aos passes de laminação (NETO, 2017).

3.4.1 Refratários para fornos de reaquecimento

As usinas siderúrgicas são as principais consumidoras de materiais refratários, por utilizarem materiais refratários em praticamente todas as suas áreas. Devido a isso, têm muito

interesse no aumento da performance desses produtos. É fundamental o estudo e análise do desempenho e da vida útil dos materiais refratários para processos produtivos em elevadas temperaturas.

O revestimento refratário de um forno de reaquecimento pode ter sua vida útil afetada por diversas causas: montagem do forno, projeto do revestimento refratário, projeto do forno, qualidade do refratário e as condições operacionais. E um dos fatores principais que causa a redução da vida útil do revestimento refratário é o choque térmico que ocorre através do resfriamento e aquecimento dos fornos em paradas programadas ou não da operação. A falha do revestimento refratário, uma parada emergencial do forno e da unidade de produção pode ocasionar severos prejuízos financeiros.

O monitoramento do revestimento refratário é fundamental para evitar problemas prematuros e degradações estruturais. E é essencial a aplicação de medidas corretas que evitem a redução da vida útil do forno (Junior *et al.*, 2018).

Diferentes tipos de materiais refratários podem ser utilizados nestes fornos: materiais isolantes e densos, moldados, monolíticos e pré-moldados. E são indispensáveis no interior dos fornos e em equipamentos que estão sujeitos a altas temperaturas. São utilizados como revestimento interno dos fornos de reaquecimento para que se consiga atingir altas temperaturas sem danificar a carcaça e a estrutura do forno.

Nos fornos de reaquecimento utilizam-se refratários na soleira do forno, nas paredes, no teto, nas longarinas, nos postes, e nas portas de enforamento e desenforamento dos fornos. A vida útil dos revestimentos refratários destes fornos é aproximadamente de 5 a 15 anos para o teto, 10 a 20 anos para as paredes, conforme as zonas do forno. (ALVES *et al.*, 2016).

Nos fornos da ArcelorMittal Tubarão utilizam-se materiais refratários nas paredes, no teto e na soleira do forno para evitar a perda de calor, por serem isolantes térmicos, e consequentemente reduzir o consumo de combustível e proteger a carcaça do forno. São utilizados, também, nos postes e longarinas do forno para proteger a estrutura metálica destes e permitir que os postes e longarinas trabalhem sem sofrer danos. E nas portas para proteger sua estrutura metálica, revestindo-a devidamente, e evitar perdas de calor nessa região.

3.4.2 Portas para fornos de reaquecimento

As portas de enforamento e desenforamento são de grande importância para os fornos de reaquecimento, uma vez que é através delas que acontece a troca de calor do meio interno para o meio externo do forno. As portas de saída dos Fornos de Reaquecimento de Placas do Laminador de Tiras a Quente da AMT no seu projeto original são refratadas e refrigeradas à

água através de uma estrutura tubular. Historicamente essa refrigeração tem causado problemas de vazamento, ocasionando empenos, danos estruturais e um custo elevado de manutenção. Ocorrem manutenções recorrentes o que aumenta o custo e o tempo do processo de produção. As portas são trocadas dos Fornos de Reaquecimento da AMT são trocadas de 6 em 6 meses.

Após uma visita a Dofasco, em Ontário - Canadá, no mês de outubro de 2016 e conhecimento da porta “seca” instalada nos fornos de reaquecimento, viu-se como uma boa solução para a utilização desse tipo de porta na AMT. Na ArcelorMittal Dofasco as portas refrigeradas a água foram substituídas por portas “secas”, portas sem refrigeração, utilizando apenas tijolos refratários e massa refratária. A ArcelorMittal Tubarão decidiu também empregar portas secas, por ser uma porta não refrigerada e poder solucionar muitos problemas frequentes, principalmente nas portas de desenformamento, diminuindo os custos de manutenção e das trocas das portas. Na Figura 3.6 observa-se vazamento de água decorrentes da água para refrigeração da porta.



Figura 3.6. Vazamento de água decorrente da água de refrigeração da porta.

O vazamento de água nas portas prejudica o material refratário da porta e também do lintel e as longarinas (*skids*) próximas à porta.

Na Figura 3.7 nota-se a passagem de chama na porta de desenformamento do Forno de Reaquecimento de Placas.



Figura 3.7. Passagem de chama da zona de encharque na porta de desenformamento.

Essa passagem de chama prejudica muito a porta, inclusive a parte metálica/estrutural, pois afeta também a parte externa. É importante que a operação do forno consiga adequar a pressão do mesmo para evitar esse tipo de ocorrência.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A presente pesquisa visa a análise do uso de portas secas nos fornos de reaquecimento de placas da laminação de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão, localizada na região da grande Vitória, ES. Na Figura 4.1 é possível ver a estrutura da porta seca.

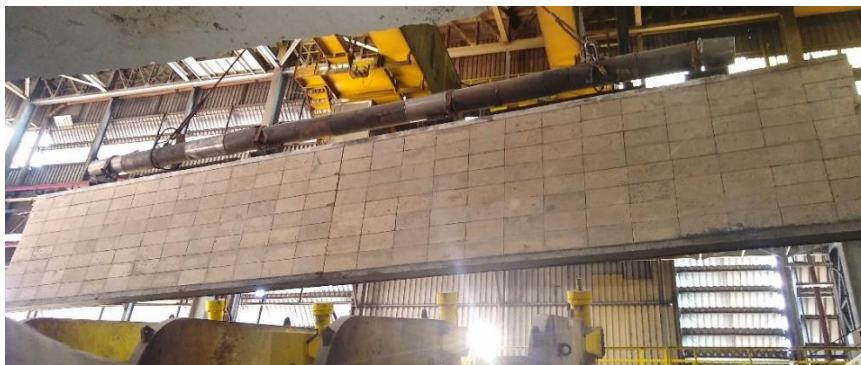


Figura 4.1. Estrutura da porta seca montada.

Este trabalho iniciou com a análise, via modelamento computacional, dos perfis térmicos e estrutural da porta seca a ser usada nos fornos de reaquecimento da LTQ da AMT. O procedimento experimental aplicado neste trabalho é apresentado de maneira simplificada na Figura 4.2.

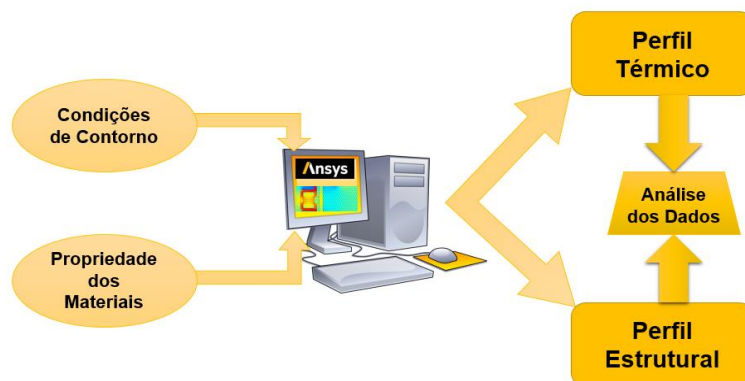


Figura 4.2. Fluxograma do procedimento experimental.

Foram adotadas algumas premissas para a realização da análise do projeto da porta seca para a ArcelorMittal Tubarão. As análises térmica e estrutural foram realizadas através de modelamento computacional, utilizando o software *Ansys*, pelo Método de Elementos Finitos. O *Ansys* é um *software* de elementos finitos e volumes finitos destinado a diferentes aplicações de engenharia, avaliações termo-estruturais, magnéticas, dentre outras (FILHO, 2013).

A Engenharia de Refratários da AMT contribuiu com as informações referentes às temperaturas a que são submetidas as portas de saída e os pesos próprios do sistema de refratamento adotado. Os dados relativos ao sistema de refratamento são apresentados na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 - Densidade dos materiais refratários utilizados na porta seca.

MATERIAL	DENSIDADE (kg/m³)
Concreto do Bloco Pré-Moldado	1750
Isolante de Preenchimento	200
Âncoras Cerâmicas	2880
Concreto Refratário	2640

A partir dos dados iniciais, as condições de contorno foram estabelecidas e as análises, que serão detalhadas abaixo, puderam ser realizadas.

4.1 Análise Térmica

Para a análise térmica foi realizado um modelamento total da estrutura da porta, incluindo todo o sistema de refratamento. As condições de contorno adotadas para a análise no *Ansys* foram:

- Temperatura interna máxima do forno de 1400°C;
- Temperatura ambiente de 50°C;
- Coeficiente de convecção entre a porta e o ambiente de 7,5W/°C m²;
- Emissividade da estrutura igual a 0,95.

O resultado da análise térmica com o perfil de distribuição da temperatura em toda a área da porta foi considerado na análise estrutural.

E através da ferramenta *Legasys*, de transferência de calor em refratários, foi calculado o perfil térmico da porta seca com o objetivo de obter a temperatura que atingirá a estrutura metálica da porta para confirmar se a porta poderá ser utilizada com segurança. As seguintes condições de contorno foram utilizadas no cálculo de perfil térmico do *Legasys*:

- Número de refratários utilizados no projeto;
- Espessura de cada um dos refratários (E);
- Espessura da parte estrutural (chapa metálica) (E_c);
- Condutividade térmica de cada um dos materiais (k);
- Condutividade térmica da parte estrutural (chapa metálica) (k_c);
- Tipo de convecção (natural ou forçada);
- Região de análise (parede, teto ou soleira);
- Temperatura interna do forno;
- Temperatura ambiente;
- Emissividade;
- Velocidade do ar.

4.2 Inspeção dimensional

Realizou-se inspeção dimensional por amostragem nos blocos refratários pré-moldados utilizando uma trena manual com o objetivo de verificar se as medidas dos blocos estavam condizentes com as medidas do projeto. A medição dos blocos foi realizada de acordo com as direções das medidas de projeto (comprimento, largura, altura, medida da face até a base do bloco e medida entre os parafusos).

4.3 Inspeção de aparência

Foi realizada inspeção de aparência por amostragem nos blocos refratários pré-moldados, a partir da observação visual do aspecto dos blocos e de anomalias como trincas, cantos, arestas e cavidades.

4.4 Teste de percussão

O teste de percussão foi realizado por amostragem nos blocos refratários pré-moldados com o objetivo de verificar a qualidade de fabricação dos blocos previamente à montagem da porta. Foi executado com o auxílio de um martelo manual, o qual foi utilizado para efetuar pequenas marteladas nos blocos para identificação do tipo de som emitido em cada batida, por meio desse som é possível prever se há trincas/porosidade interna.

Foram inspecionados no total 10 *pallets*, selecionando e retirando aleatoriamente 2 blocos de cada pallet contendo 20 unidades e 1 bloco do pallet com 8 unidades. A Figura 4.3 mostra alguns *pallets* com os blocos refratários pré-moldados prontos para inspeção.



Figura 4.3. Blocos refratários prontos para inspeção

Nos *pallets* observa-se os blocos refratários pré-moldados preparados para a inspeção, foi necessário inspecioná-los dimensionalmente, fazer teste de aparência e de percussão para verificar se a fabricação dos blocos ocorreu de acordo com os requisitos de qualidade requeridos para obter um bom desempenho do material.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Engenharia de Refratários da AMT, em conjunto com a empresa fornecedora de refratários e com os especialistas do LTQ, realizou a análise estrutural do projeto de portas secas para a saída de placas dos Fornos de Reaquecimento. Possuindo como dados básicos as informações para a análise térmica e visando o comportamento estrutural sob efeito da temperatura após o sistema de refratamento, além do comportamento estático proveniente de seu peso próprio, do sistema de refratamento e também de içamento quando houver manutenção.

5.1 Modelamento considerado para a análise por elementos finitos

Para a análise por meio da técnica de elementos finitos foi necessário fazer o modelamento da estrutura metálica da porta, assim como da porta com o material refratário instalado. Na Figura 5.1 tem-se o modelamento frontal e posterior da porta seca considerado para a análise por elementos finitos.

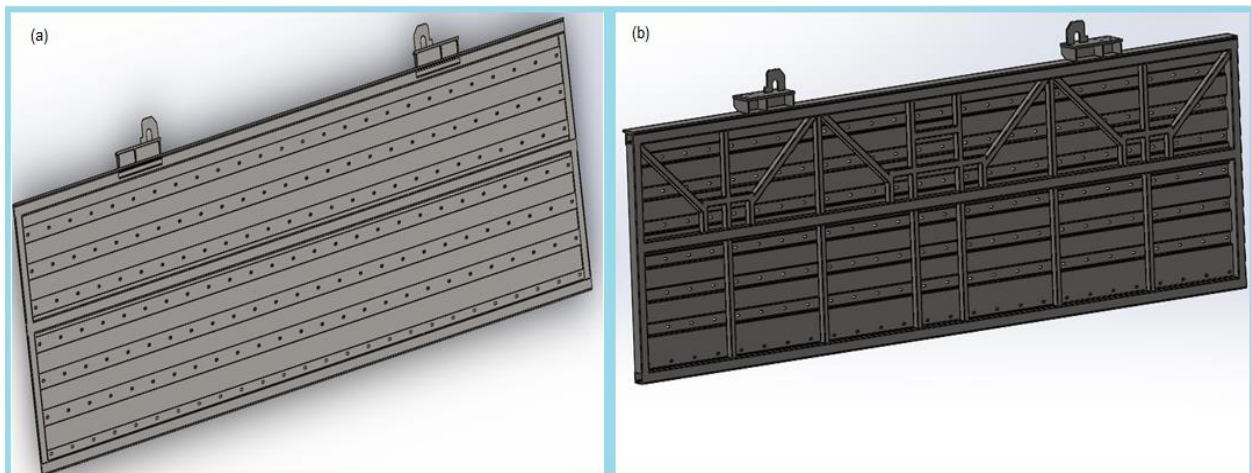


Figura 5.1. Modelamento da parte (a) frontal da porta seca e (b) posterior da porta.

Junto à estrutura, na parte frontal, são colocados blocos refratários pré-moldados primeiramente em chapas de inox e através de dois parafusos são fixados na estrutura metálica da porta e preenchidos por flocos de fibra cerâmica no espaço entre a estrutura metálica e a parte interna dos blocos, conforme mostrado na Figura 5.2.

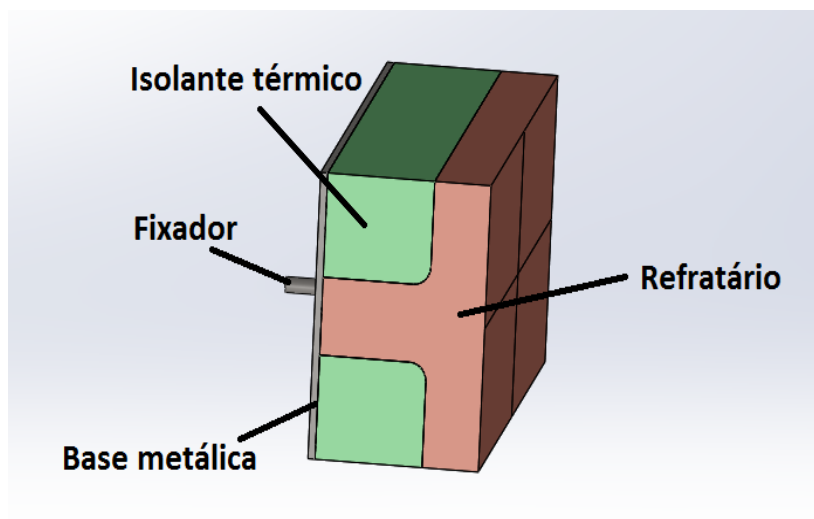


Figura 5.2. Bloco refratário pré-moldado.

Observa-se na Figura 5.2 o bloco já instalado na chapa metálica.

A porta com os blocos pré-moldados apresenta em sua parte frontal uma superfície plana, toda ocupada pelos blocos refratários. A Figura 5.3 mostra a configuração final da porta já com a instalação total de todos os blocos.

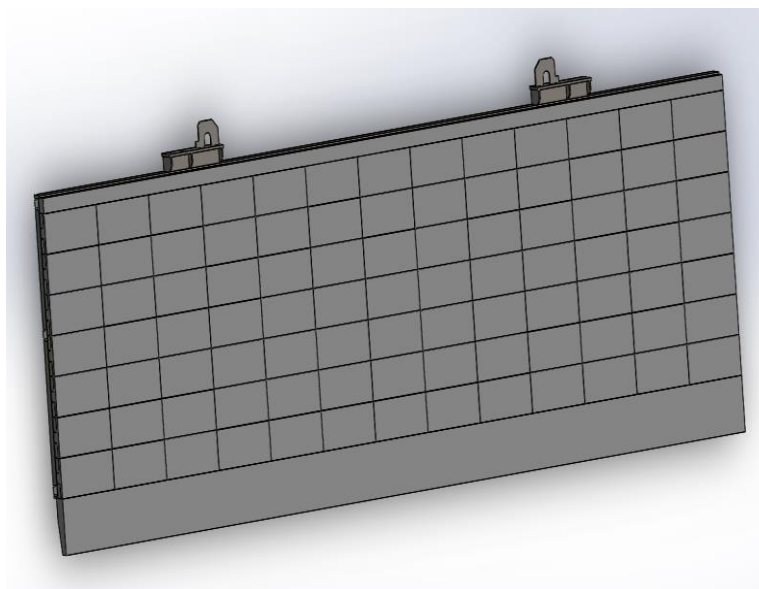


Figura 5.3. Configuração final da porta com o sistema refratário.

Como mostrado anteriormente o modelamento contemplou a parte estrutural da porta, parte frontal e posterior, e também a porta já com os blocos refratários pré-moldados para a realização da análise por elementos finitos.

5.2 Análise térmica da porta seca

A porta não é exposta de forma uniforme ao ambiente do forno, portanto para facilitar a introdução das condições de contorno foi realizada uma partição dos refratários conforme a Figura 5.4.

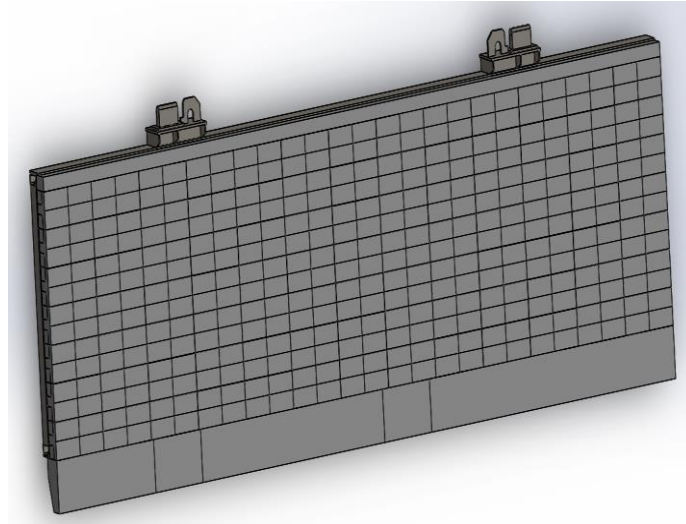


Figura 5.4. Divisão considerada nos refratários para inserir as condições de contorno.

Para o cálculo das tensões a que está submetida a estrutura da porta foi executado em primeiro lugar um cálculo térmico, utilizando posteriormente a distribuição de temperatura calculada como carregamento adicional. A Figura 5.5 apresenta as condições de contorno utilizadas no cálculo térmico.

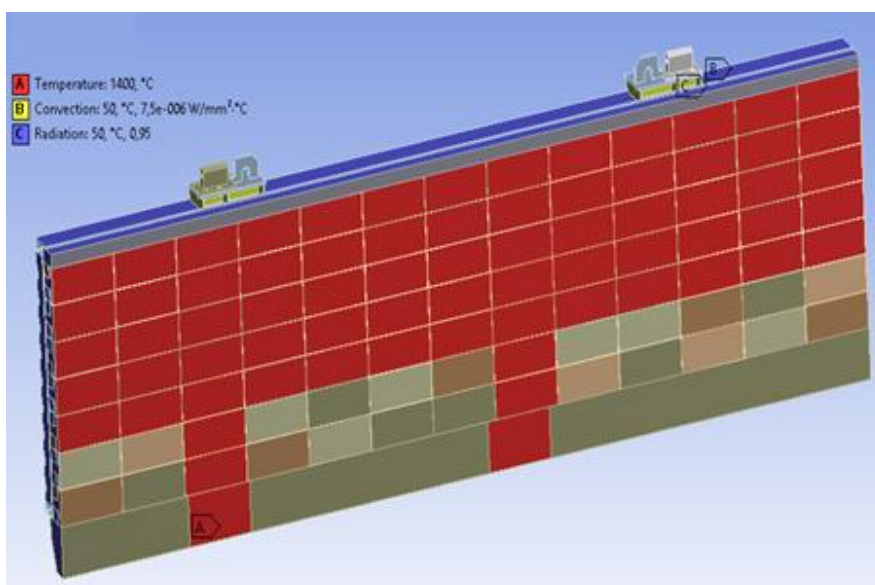


Figura 5.5. Condições de contorno utilizadas no cálculo térmico.

As condições de contorno utilizadas no cálculo térmico foram: a temperatura interna do forno de reaquecimento de placas, a condutividade térmica do material, a emissividade e a temperatura ambiente.

A parte central a mais exigida podendo chegar a 1425°C enquanto os cantos inferiores não passam de 100°C. A análise da distribuição de temperatura no material refratário da porta é mostrada na Figura 5.6.

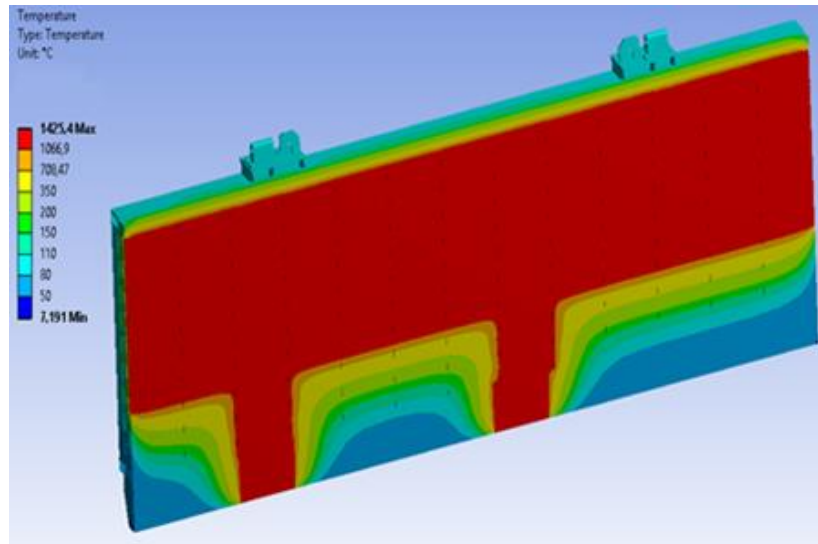


Figura 5.6. Distribuição de temperatura no lado do refratário.

Nota-se alto gradiente de temperatura do centro para as partes inferiores, mostrando que o mesmo material refratário está sujeito, nesta porta, a temperaturas diversas e apresentaram desgastes diferentes ao final da vida útil. Este material deve evitar a perda de calor no forno e consequentemente favorecer a economia de energia no processo.

Além disso, o material refratário é importante para não elevar a temperatura no ambiente exterior do forno, por isso foi realizada, também, a análise térmica da parte posterior da porta. A análise da distribuição de temperatura na estrutura posterior da porta é apresentada na Figura 5.7, a temperatura máxima atingida pela estrutura da porta é de 173°C.

A tensão equivalente de Von Mises atinge valores de até 264MPa, valor muito elevado para o material, cuja tensão admissível é de 170MPa. Em função disso conclui-se que a estrutura proposta não estava adequada para a aplicação. E então foi realizada uma alteração no projeto estrutural da porta seca.

As modificações no projeto estrutural para que as tensões máximas equivalentes fiquem abaixo do limite admissível de 170MPa foram:

- Os perfis tubulares retangulares tiveram alterações na espessura;
- A espessura da chapa de fechamento da porta foi alterada de 3,2mm para 6,35mm;
- Foi mantida a mesma filosofia do projeto da porta seca de forma a não modificar a fixação do sistema de refratamento.

Essas alterações foram realizadas com o objetivo de aumentar o momento de inércia e modificar as características geométricas dos perfis tubulares da estrutura metálica da porta, visando aumentar também a área e o momento de inércia da área. E nesse caso como a tensão é estática, então a tensão atuante tornou-se menor, ou seja, abaixo do limite admissível.

A Figura 5.9 mostra a alteração dos perfis retangulares e da chapa de fixação.

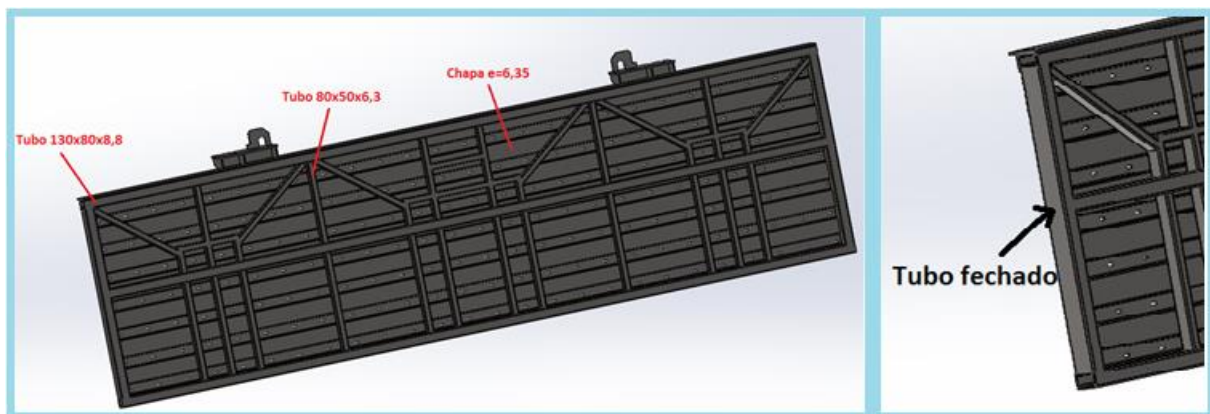


Figura 5.9. Alteração dos perfis retangulares, da chapa de fixação e da parte lateral da porta (tubo fechado).

A análise térmica e estrutural realizada através do método de elementos finitos no *Ansys* mostrou a necessidade de reforços para eliminação de pontos de elevada tensão que podem ocorrer, logo a estrutura tubular retangular e a chapa de fechamento da porta sofreram alteração na espessura para minimizar essa tensão e para que a estrutura metálica se adeque ao projeto refratário e a porta tenha um bom desempenho.

A Figura 5.10 apresenta os detalhes das alterações feitas na porta para eliminar a interferência com a fixação dos refratários.

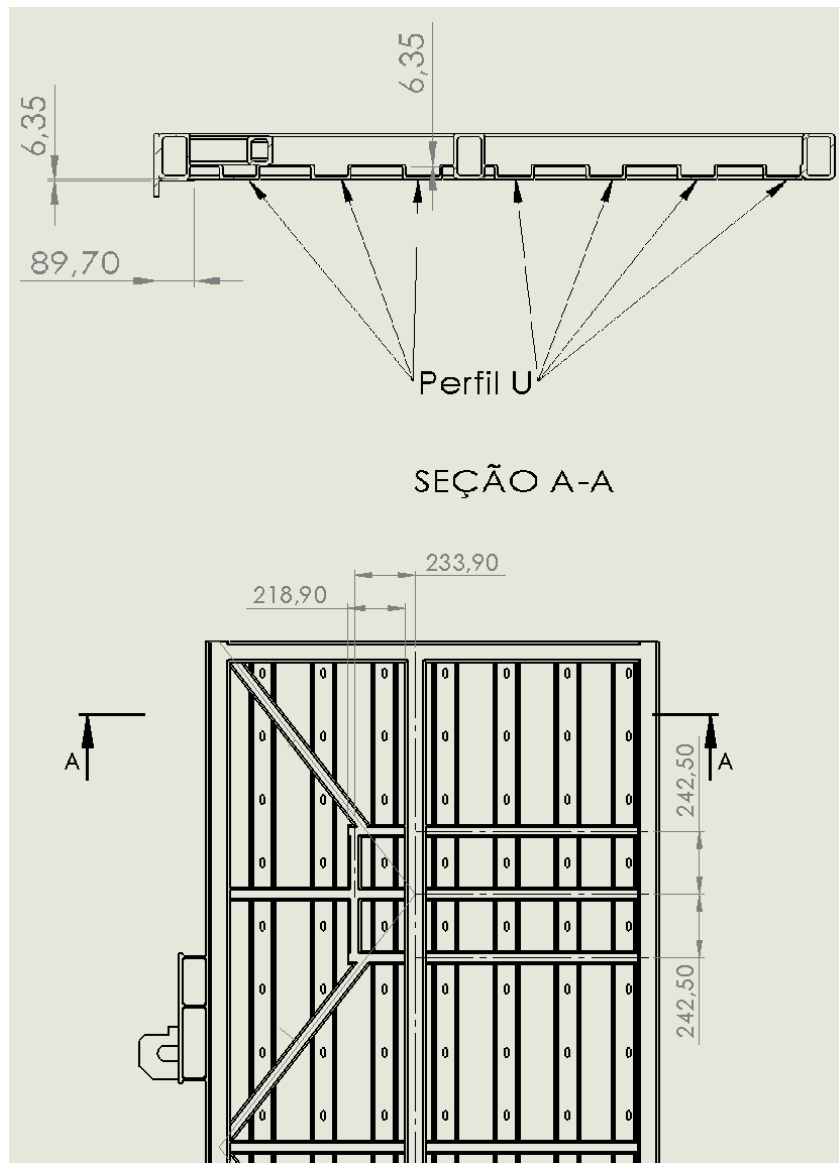


Figura 5.10. Detalhes das alterações da porta eliminando interferência com a fixação dos refratários.

As condições de contorno para a análise estrutural da porta seca alterada são as mesmas usadas anteriormente e já mostradas na Figura 5.5.

O peso da nova estrutura proposta é de 1782kg e com isso o peso total da porta é 4545kg. A posição do centro de massa na estrutura alterada da porta está deslocada 8,13mm em relação ao eixo dos suportes, no sentido do forno, conforme a Figura 5.11.

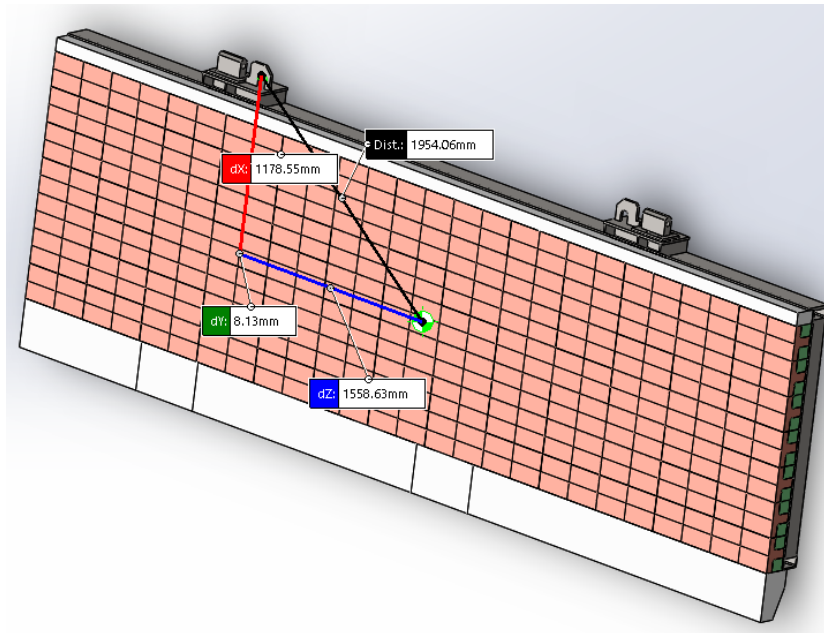


Figura 5.11. Centro de massa na parte estrutural da porta seca alterada.

O deslocamento do centro de gravidade gera um momento contrário na parte superior e a porta fica levemente desbalanceada, o ideal seria que o centro de gravidade não estivesse deslocado em relação aos eixos dos suportes, para evitar possíveis problemas na subida e descida da porta durante a abertura e fechamento da mesma. O desbalanceamento apresentado de 8,13mm é pequeno, mas é um ponto de atenção durante a operação e movimentação para manutenção da porta.

A Figura 5.12 mostra a ligação entre o suporte da porta e a barra de carga.

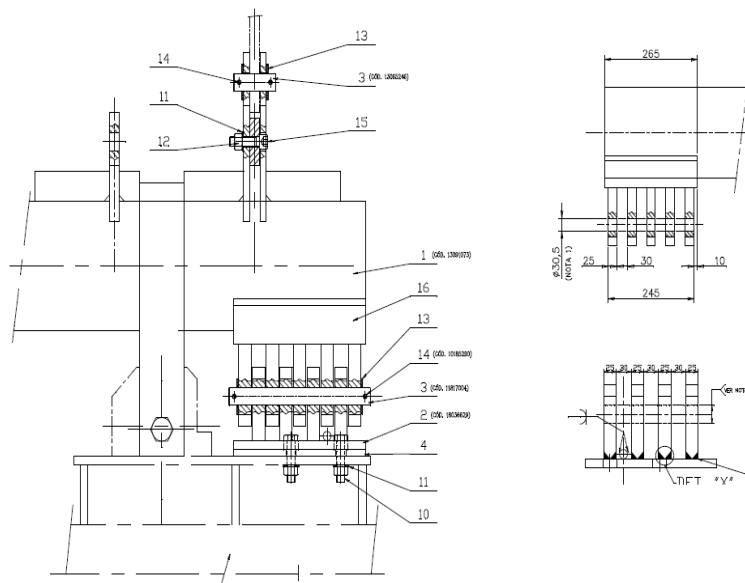


Figura 5.12. Suporte de ligação da porta seca com a barra de carga.

O limite de dilatação axial máxima permitida é de 5mm. Portanto, a porta não pode dilatar axialmente na região dos suportes mais do que esse valor, para garantir que a ligação funcionará adequadamente.

É possível ver na figura 5.13 as folgas axiais máximas de alguns pontos da porta. É possível notar que a folga máxima nos suportes é 4,1mm, o que atende ao critério pré-estabelecido de 5mm que corresponde a dilatação axial máxima permitida.

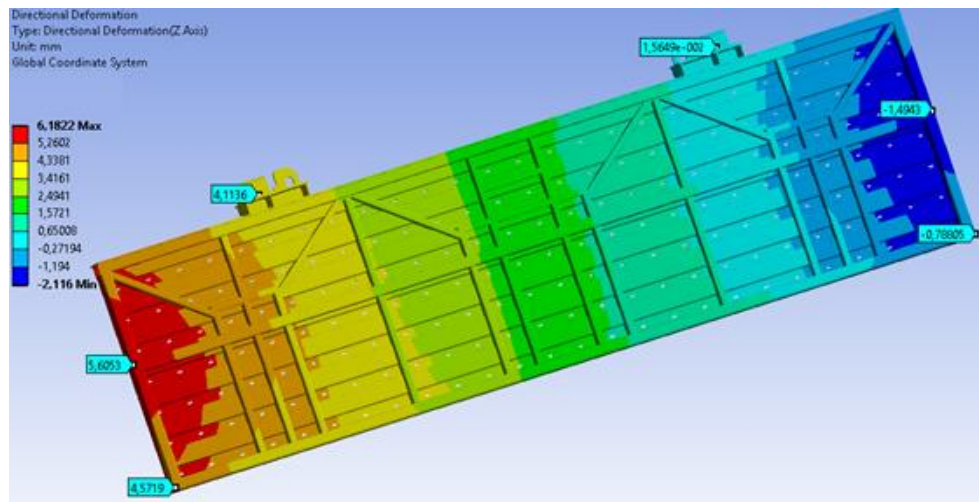


Figura 5.13. Dilatação axial máxima da porta seca alterada.

Os dados obtidos na análise estrutural da porta seca alterada mostram que a mesma pode ser instalada, pois cumpre o limite estabelecido para dilatação axial e esse fator contribui para um bom desempenho da porta.

5.4 Análise térmica da porta seca alterada

O resultado da distribuição de temperatura encontra-se nas Figuras 5.14 e 5.15. As temperaturas na estrutura são praticamente iguais ao caso anterior.

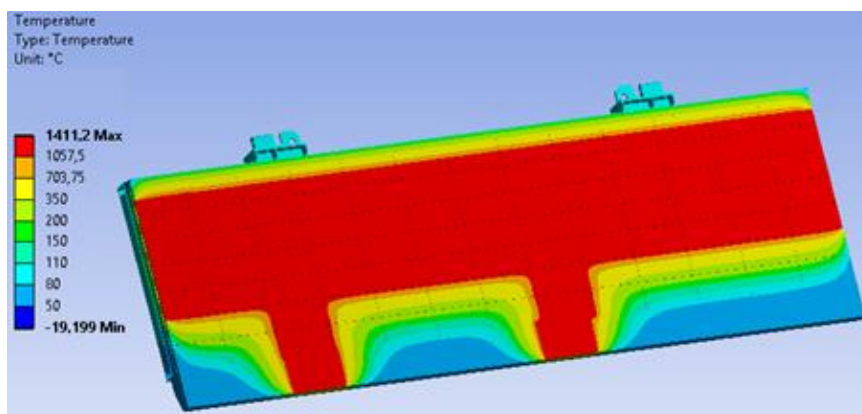


Figura 5.14. Análise térmica da distribuição de temperatura no lado refratário.

A temperatura máxima na estrutura é da ordem de 164°C, conforme a Figura 5.15.

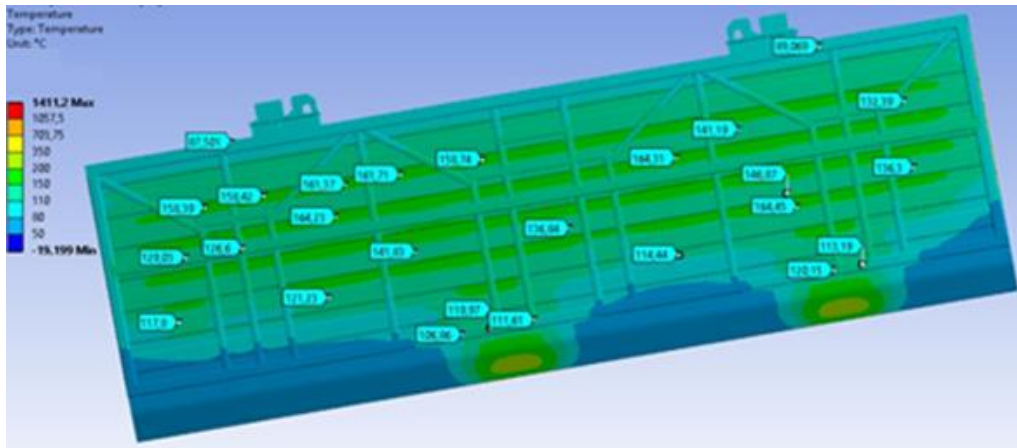


Figura 5.15. Análise térmica da distribuição da temperatura no lado da estrutura.

A temperatura na parte posterior da porta seca anteriormente à alteração realizada na porta seca era de 173°C e após a alteração tem-se então 164°C, ou seja, com a alteração obteve-se ganho térmico de 9°C para o forno. Além desse fator contribuir para um bom funcionamento da porta, devido a diminuição da temperatura incidente na estrutura metálica.

Análise das tensões máximas na porta seca alterada é mostrada na Figura 5.16.

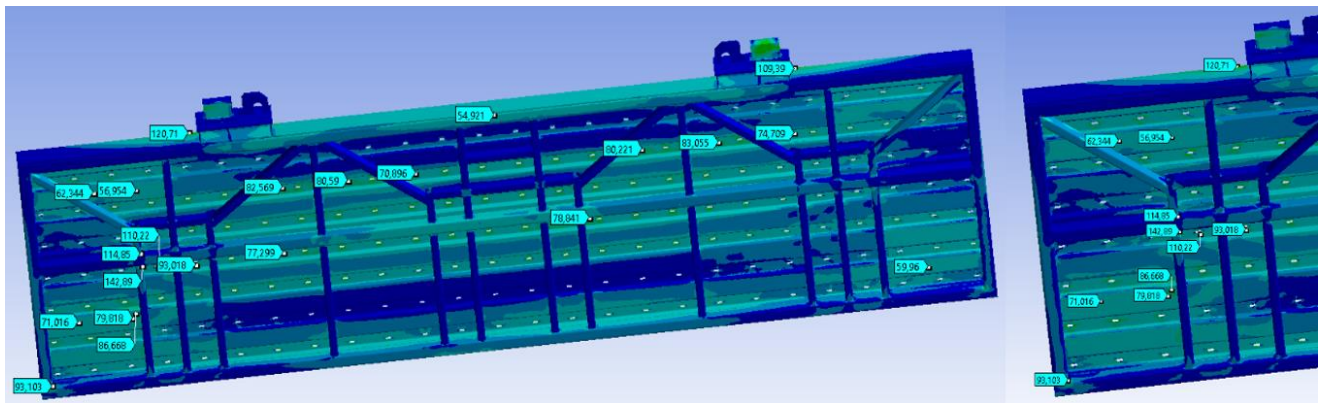


Figura 5.16. Análise das tensões máximas na porta seca alterada.

Com as alterações feitas no projeto estrutural da porta seca, nota-se que a tensão máxima equivalente (Von Mises) é de 142,89MPa, que é menor que a tensão admissível de 170MPa. Portanto as alterações estruturais feitas na porta seca foram consideradas no projeto detalhado. Logo, tendo como base o projeto de revestimento refratário da porta, as análises térmica e estrutural da porta seca de desenformamento dos Fornos de Reaquecimento de Placas do Laminador de Tiras a Quente mostraram que o projeto estrutural alterado atende às temperaturas submetidas durante as condições operacionais dos fornos.

Também foi calculado o perfil térmico da porta seca utilizando o software de transferência de calor em refratários feito pela *LEGASYS Industrial Solution* e utilizado na AMT para o cálculo de perfis térmicos. Como condições de contorno foram utilizados os seguintes dados: o número de materiais refratários utilizados na porta, a espessura de cada um dos refratários, a espessura da chapa metálica, o comprimento e a largura da área considerada no cálculo térmico, as condutividades dos materiais refratários e da chapa metálica, o tipo de convecção (natural ou forçado), a temperatura interna, temperatura ambiente, emissividade e velocidade do ar. Na Figura 5.17 tem-se o perfil térmico calculado.

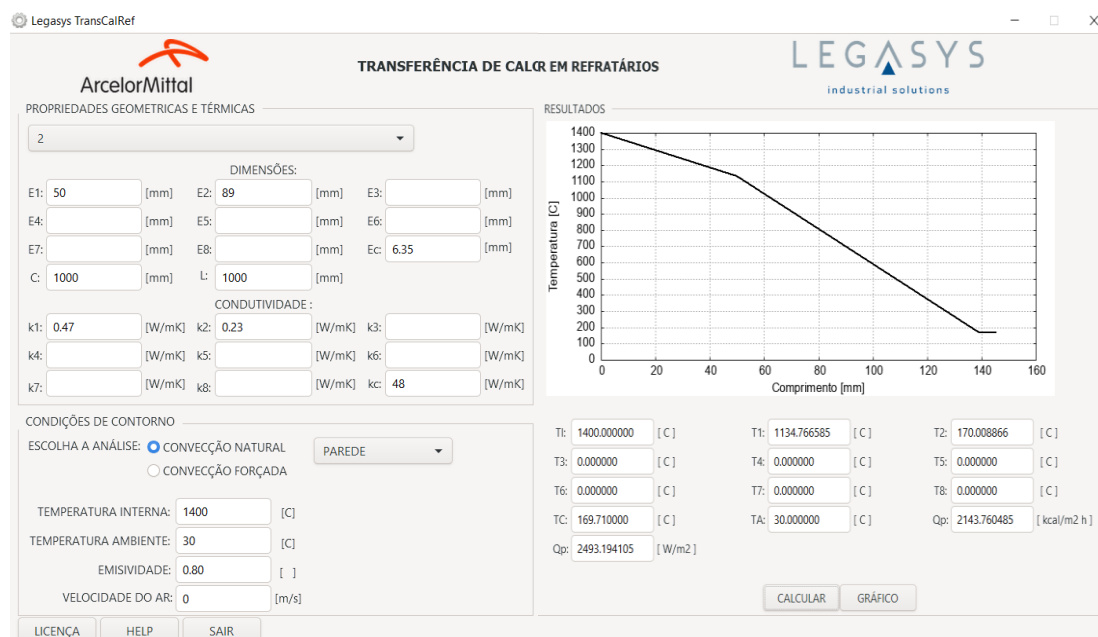


Figura 5.17. Perfil térmico da porta seca

A partir do gráfico mostrado na Figura 5.17, observa-se no perfil térmico da porta seca que a temperatura interna do forno de aquecimento de placas é de 1400°C, a temperatura que incide na face quente dos blocos refratários pré-moldados é 1135°C, e na face quente do papel cerâmico é 170°C e então a temperatura incidente na chapa metálica da estrutura da porta é de 169°C. Esse valor ratifica a análise térmica da porta seca alterada realizada no Ansys que teve um resultado de 164°C, ou seja, o perfil térmico calculado na ferramenta *Legasys* apresentou uma diferença de apenas 5°C para o resultado da análise térmica no *Ansys*. Então, a porta seca pôde ser instalada com segurança a partir das análises térmicas e estrutural realizadas.

5.5 Instalação da porta seca

A porta seca foi instalada na saída do forno de reaquecimento de placas do LTQ da ArcelorMittal Tubarão dia 20 de dezembro de 2019. Devido a problemas de ajustes mecânicos da porta, notou-se anomalias nos blocos refratários e o bom funcionamento da porta ficou comprometido após a queda de alguns blocos. Os blocos que foram retirados da porta, assim como os blocos danificados podem ser vistos na Figura 5.18.



Figura 5.18. Blocos danificados que foram retirados da porta seca.

Observa-se na Figura 5.18 trincas e marcas do atrito proveniente do contato da porta com o forno durante a movimentação para abertura e fechamento da mesma.

Na Figura 5.19 observa-se que a porta seca sofreu danos em locais específicos. Devido à problemas de ajustes mecânicos, os refratários foram danificados pontualmente em algumas regiões da porta afetando grande parte dos blocos ao seu redor. Nota-se maior degradação nas laterais e em alguns pontos centrais da porta, o que corrobora com o modelamento realizado, pois as maiores temperaturas se localizam na região central da porta, o que pode ter contribuído para degradação observada nos pontos centrais.



Figura 5.19. Porta seca: A) Vista da metade da porta já desmontada; B) Imagem da lateral da porta.

Os problemas notados na estrutura metálica lateral do forno e no suporte de fim de curso da porta foram modificados para a adequada instalação da porta seca, sem que haja anomalias novamente. A mesma foi substituída por uma porta refrigerada no dia 26 de dezembro de 2019.

Optou-se por trocar 100% dos refratários da porta seca por blocos refratários novos. A porta foi desmontada no dia 03 de março de 2020 e observou-se grande parte dos blocos apresentando anomalias e alguns ainda em perfeito estado.

A Figura 5.20 apresenta a parte estrutural da porta seca que foi reutilizada para montagem dos blocos refratários.



Figura 5.20. Parte estrutural da porta seca.

Os blocos refratários pré-moldados adquiridos para a nova montagem da porta foram inspecionados na ArcelorMittal Tubarão anteriormente à montagem da porta.

5.6 Inspeção nos blocos refratários pré-moldados

Após o recebimento dos blocos pré-moldados na AMT, foi realizada inspeção por amostragem nos mesmos para verificação da qualidade de fabricação.

5.6.1. Inspeção dimensional

O teste dimensional foi realizado com o auxílio de trena manual e foram verificadas todas as medidas dos blocos inspecionados de acordo com as medidas de projeto. A Figura 5.21 mostra a execução da inspeção dimensional nos blocos pré-moldados.



Figura 5.21. Inspeção dimensional nos blocos da porta seca.

No teste dimensional observou-se adequação das dimensões em relação ao projeto, conforme mostrado na Figura 5.22.

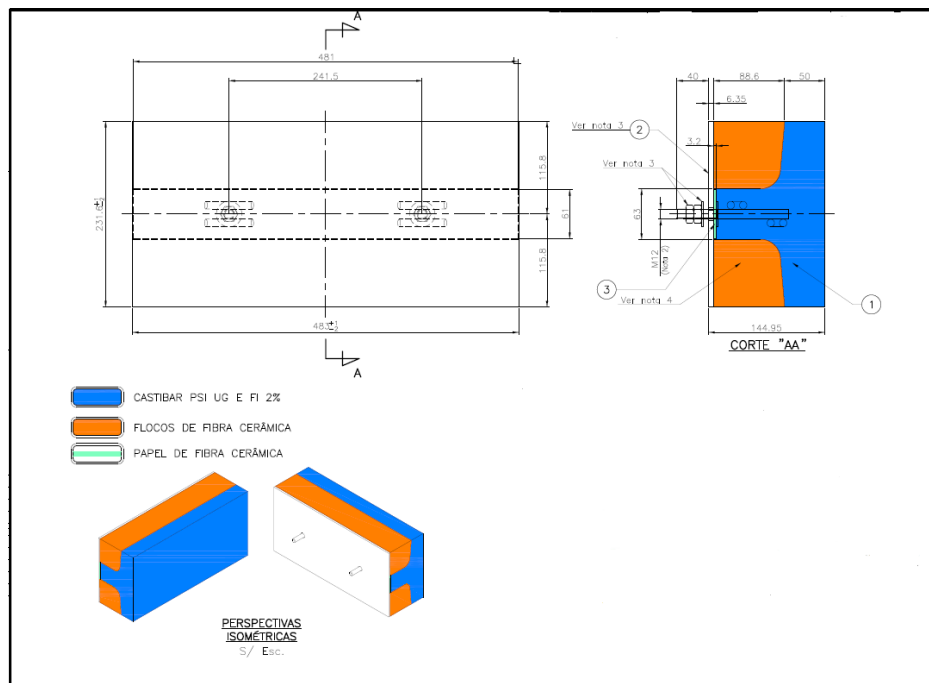


Figura 5.22. Projeto dos blocos refratários pré-moldados

Todas as medidas estavam condizentes e dentro do limite máximo aceito para mais ou para menos (+1 ou -2) conforme especificado no projeto.

5.6.2. Inspeção de aparência

O teste de aparência foi realizado visualmente a partir da observação minuciosa dos blocos refratários. Na Figura 5.23 tem-se uma imagem dos blocos posicionados para realização do teste.



Figura 5.23. Teste de aparência nos blocos pré-moldados

Notou-se em alguns blocos cavidades e defeitos de canto e aresta decorrentes da fabricação do material, mas a dimensão desses defeitos é mínima e não compromete o desempenho do material. Caso os defeitos encontrados fossem muito acentuados, seria inviável o uso dos blocos para a montagem da porta, pois um número considerável desses tipos de defeitos poderia causar danos precoces ao refratário e comprometer o desempenho do material e então seria necessária uma nova fabricação de blocos pré-moldados com acompanhamento minucioso de qualidade de fabricação.

5.6.3 Teste de percussão

O teste de percussão foi realizado em todos os blocos inspecionados com o auxílio de um martelo metálico com cabo de madeira. A Figura 5.24 ilustra a realização do teste.



Figura 5.24. Teste de percussão nos blocos da porta seca

O teste de percussão foi realizado em toda a extensão dos blocos com o intuito de observar a condição do som apresentado, como todos os blocos apresentaram um som metálico e não oco indica-se que não há trincas internas e o material está em boa condição para uso. Não foi encontrado nenhum defeito, como grandes trincas e cavidades, que pudesse inviabilizar o uso dos blocos na porta.

Caso o material apresentasse um som anormal, como por exemplo o som oco, o seu uso estaria comprometido, pois haveria grande possibilidade de haver trincas ou vazios no interior desses blocos. Estes defeitos diminuem a resistência mecânica destes materiais que provavelmente não resistiriam ao manejo e montagem na porta ou, se instalado, poderiam fraturar precocemente diante dos esforços que são solicitados.

A inspeção dos blocos foi concluída com sucesso a partir dos testes realizados, portanto os blocos estão aptos para serem montados na porta seca.

5.7 Montagem da porta seca

No dia 10 de agosto de 2021 foi iniciada a montagem da porta seca. A montagem dos blocos refratários pré-moldados foi realizada inicialmente pela lateral direita da porta e os blocos foram dispostos em fiadas verticais, como pode ser visto na Figura 5.25.



Figura 5.25. Montagem da porta seca.

Nas fiadas posteriores teve-se mais dificuldade na montagem dos blocos, devido a um desnivelamento encontrado na estrutura da porta. Foi realizado um levantamento geral do

nivelamento da estrutura metálica e notaram-se alguns pontos com até 12mm de desnível. A Figura 5.26 apresenta o desnível entre os blocos.



Figura 5.26. Desnível entre os blocos.

Em várias posições ocorreu o mesmo problema durante a montagem e foi consensado entre as partes responsáveis pela montagem da porta, que o desnível máximo permitido entre os blocos o total de 5mm, pois até esse valor não haveria interferência significativa no sistema de abertura e fechamento da porta.

E como solução para diminuir o desnivelamento entre os blocos foi realizado um lixamento na face dos blocos que apresentaram uma protuberância maior em relação aos outros. Conforme mostrado na Figura 5.27.



Figura 5.27. Lixamento na face do bloco.

Após o lixamento os blocos ficaram nivelados e com desvio entre blocos menor do que 5mm. A montagem da porta foi realizada simultaneamente do lado direito e esquerdo, devido

à dificuldade de montagem na região central da porta ocasionada pelo desnivelamento encontrado na estrutura e para compensar o atraso no cronograma de montagem, de acordo com a Figura 5.28.



Figura 5.28. Continuidade da montagem da porta.

A Figura 5.28 apresenta a continuidade de montagem dos blocos pré-moldados na porta. Finalmente a montagem da porta foi concluída com sucesso e a mesma ficou pronta para ser instalada no forno de reaquecimento de placas da laminação de tiras a quente conforme a Figura 5.29.



Figura 5.29. Montagem da porta seca concluída.

A porta seca foi instalada na grande parada programada dos fornos, em novembro de 2021.

5.8 Avaliação do desempenho da porta seca

A porta seca foi instalada na grande parada programada do LTQ, em novembro de 2021, e funcionou adequadamente durante alguns dias até que foi notada a queda parcial de alguns blocos durante a abertura da porta, conforme pode-se observar na Figura 5.30. De acordo com a imagem apresentada na Figura 5.30, nota-se a queda de alguns blocos localizados no lado direito do desenformamento do forno, no sentido que as placas caminham em direção a linha de laminação. Este comportamento anômalo chamou a atenção, e então durante a parada emergencial necessitou-se de avaliar os danos e buscar pelas possíveis causas do colapso.



Figura 5.30. Imagem da câmera interna do Forno mostrando a região de queda dos blocos.

Na parada emergencial a região que sofreu a queda dos blocos foi inspecionada conforme a Figura 5.31. Na inspeção da porta notou-se atrito de algumas regiões de refratamento da porta com a estrutura do forno, o que causou a degradação de alguns blocos com a abertura e fechamento da porta, levando ao colapso da face dos mesmos. Como pode ser observado, restou apenas o material remanescente da base dos blocos e o preenchimento com os flocos de fibra cerâmica.



Figura 5.31. Região da porta seca que sofreu queda de blocos.

A recuperação dessa região da porta foi feita através de calafetação, por meio de manta de fibra cerâmica, e massa isolante para recobrimento, pois não havia tempo suficiente para retirar a porta para trocar os blocos dessa região. A Figura 5.32 apresenta a estrutura após recuperação da porta.



Figura 5.32. Recuperação da região danificada da porta.

Após a recuperação da porta, foi necessário o acompanhamento do desempenho da porta através de medições com pirômetro óptico, termografia e por meio de observação da estrutura durante a abertura e fechamento da mesma, conforme mostrado na Figura 5.33.

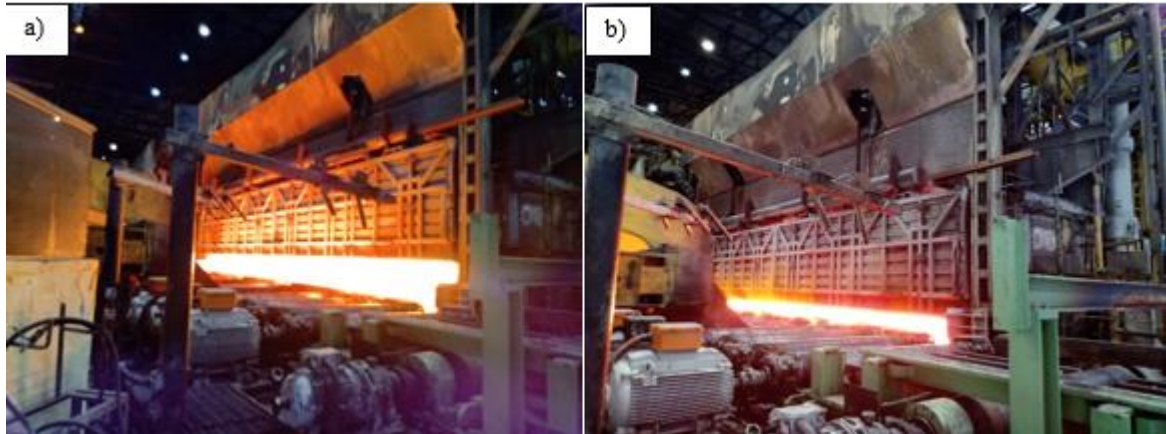


Figura 5.33. a) Abertura da porta; b) Fechamento da porta.

Durante o acompanhamento foi notado o desprendimento de um dos blocos na parte superior direita da porta no sentido linha de laminação. Sendo assim, fez-se necessário o monitoramento da temperatura na região do desprendimento. A Figura 5.34 mostra o detalhe da região onde o bloco se desprendeu.

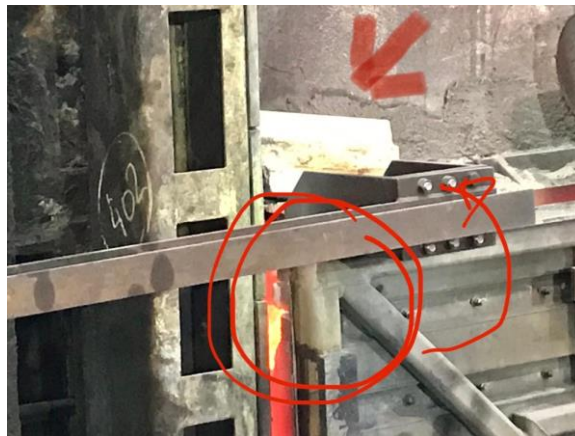


Figura 5.34. Detalhe do desprendimento de bloco na parte superior direita da porta seca.

A Figura 5.35 mostra o monitoramento térmico, realizado através de pirômetro óptico, para acompanhar a variação térmica que o desprendimento do bloco poderia causar.



Figura 5.35. Monitoramento térmico da região com desprendimento de bloco.

Na região da porta ao lado da que houve o desprendimento do bloco tem-se uma temperatura menor, 264,3°C, e no local de desprendimento do bloco observa-se que a temperatura é maior, 362,8°C. Fato que evidencia a importância dos refratários na estrutura da porta, principalmente para evitar a perda de calor no interior do forno e consequente desperdício de energia.

Ao longo do uso do equipamento, observou-se o desprendimento de mais alguns blocos. Fato que foi associado a um desajuste da porta em relação a estrutura do forno, sendo necessário o monitoramento térmico contínuo da região. A Figura 5.36 mostra o desprendimento de blocos, aparentemente da mesma região que havia sido recuperada na parada emergencial.



Figura 5.36. Região de desprendimento dos blocos refratários.

Após a queda dos blocos notou-se pontos quentes na parte estrutural da porta, portanto, recomendou-se a instalação de ventiladores direcionados para a região afetada com o intuito de minimizar o aumento de temperatura da região. A Figura 5.37 mostra os ventiladores instalados e direcionados para a estrutura posterior da porta seca.



Figura 5.37. Ventiladores utilizados para minimizar a temperatura da parte estrutural da porta

Com o uso de ventiladores em ambos os lados dos fornos a temperatura da região foi minimizada, o acompanhamento térmico da região após a instalação dos ventiladores mostrou que a temperatura se manteve estável em aproximadamente 400°C.

A Figura 5.38 mostra as análises termográficas realizadas durante o monitoramento de temperatura.

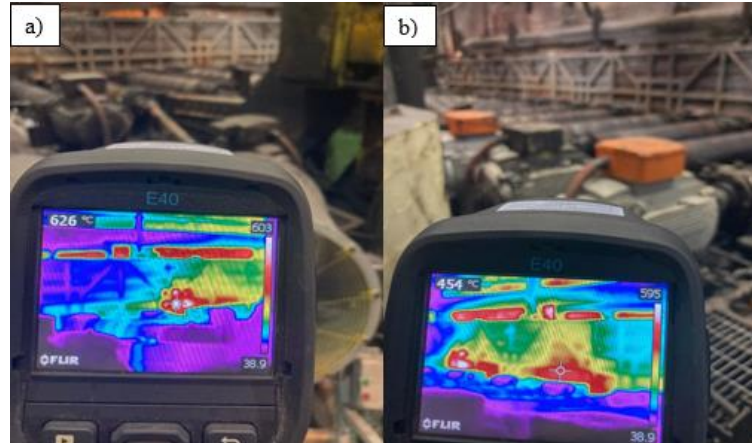


Figura 5.38. a) Termografia realizada antes a instalação dos ventiladores; b) Termografia após a instalação dos ventiladores.

Conforme mostrado nas termografias, a temperatura foi reduzida após a instalação dos ventiladores, mas como a temperatura da parte estrutural da porta estava superior a 400°C foi recomendado a troca da mesma. Esta decisão foi tomada, pois o aço utilizado na parte estrutural da porta não suportaria estas temperaturas por muito tempo e possivelmente já havia perdido resistência estrutural. A Figura 5.39 mostra a condição da porta seca após o uso e substituição.



Figura 5.39. Condição da porta seca após ter sido retirada do forno.

Após a retirada da porta e análise dos danos percebeu-se que devido a falha mecânica e desajuste da parte estrutural do forno, a porta tinha dois pontos de abaulamento e rompeu no ponto de flexão máxima perdendo a sua função estrutural. Notou-se, também, atrito da parte metálica com os blocos refratários em várias regiões da porta. Esse atrito provavelmente aconteceu durante o movimento de abertura e fechamento da porta, o que confirma o desajuste na parte estrutural do forno, afetando significativamente o revestimento refratário da porta, degradando e levando ao colapso de alguns blocos, além de gerar o surgimento de pontos de alta temperatura na estrutura da porta.

Constatou-se que, nas condições atuais, as portas refrigeradas também vinham sofrendo com o desajuste mecânico, pois foi observado várias regiões da porta refrigerada marcas de atrito do refratário com a estrutura metálica.

A medida a ser tomada é o levantamento topográfico dos fornos para adequação da parte estrutural das portas conforme o *as built* do forno para que sejam evitados os problemas de degradação de refratários devido a desajustes dimensionais.

6. CONCLUSÕES

Foi possível concluir que os refratários da porta seca estão expostos a diferentes temperaturas em toda a sua área. A área central é a mais solicitada, onde as temperaturas chegam a 1425°C, enquanto as extremidades inferiores não ultrapassam 100°C. Na estrutura posterior da porta, parte externa ao forno, a temperatura máxima é de 173°C próximo no centro e nas extremidades inferiores não ultrapassa 70°C. Esta análise é de fundamental importância para a escolha dos refratários, podendo ser utilizados diferentes tipos, visto que as solicitações térmicas, mecânicas e estruturais são diferentes nas diversas regiões das portas.

Apesar de todas as vantagens da porta seca em relação a porta refrigerada, apresentadas no trabalho, não foi possível uma comparação quantitativa das duas portas por desajustes mecânicos no forno e, em decorrência dos fatos expostos, a análise quanto aos aspectos financeiros do uso das portas ficou comprometida. O desajuste da parte estrutural do forno em relação a porta, fez com que os blocos se soltassem gerando pontos quentes e reduzindo as propriedades estruturais e térmicas do material utilizado na estrutura metálica da porta.

Por fim, foi possível concluir, que é necessário o levantamento topográfico dos fornos para adequação da parte estrutural das portas, conforme o *as built* do forno, para que sejam evitados os problemas de degradação de refratários devido a desajustes dimensionais. Além disso, uma reestruturação dos elementos de guia de subida e descida do equipamento se mostraram necessários devido a variação de pressão interna do forno (que é inerente do processo de aquecimento de placas). Qualquer readequação ao projeto deve ser evidenciada, como exemplo o mecanismo de subida e descida que possui limites e esses devem ser respeitados para o não redimensionamento.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Os resultados do trabalho mostram sua relevância na geração de dados que podem ser utilizados para avaliar qual porta poderá ser usada nos fornos de reaquecimento da AMT. A partir da análise térmica e estrutural, obtiveram-se informações importantes que poderão ser usadas na aplicação industrial. Além disso, o teste feito através da instalação da porta no forno industrial mostra os possíveis problemas no uso da porta seca e algumas soluções encontradas.

Por fim, vale a pena lembrar que o trabalho estimula as discussões para a busca por melhorias no processo de laminação que visam a viabilidades econômica e ambiental do processo.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se que se faça uma comparação de vida útil da porta seca, em perfeito funcionamento, com a porta refrigerada. Assim, com tempo hábil, será possível verificar o tempo de trabalho de cada porta e avaliar a viabilidade econômica mais precisamente. Além disso, é interessante o estudo de novos materiais refratários e teste de desempenho a partir da aplicação. Como sugestão inicial o estudo e aplicação de refratários em módulos de fibra cerâmica, pois esses materiais, quando comparados aos concretos refratários, são mais resistentes ao impacto. E, ainda, o uso de módulos de fibra em portas de saídas de fornos de reaquecimento, têm até o presente momento, apresentado resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em: <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 07 de abril de 2020.
- ALVES, G.S.; DUARTE, A.K.; LINS, V. de F.C.; SILVA, D.G. de M. Metodologia para previsão da vida útil de âncoras refratárias aplicadas em fornos de reaquecimento. Matéria (Rio J.). v.21, n.4, pp.906-920, 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762016000400906&lng=en&nrm=iso.
- AMT. ArcelorMittal. Aços Planos da América Latina - Catalogo de Produtos Laminados – Edição 2015. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/pdf/produtos-solucoes/catalogos/catalogo-acos-planos.pdf?asCatalogo=pdf> . Acesso em: 07 de abril de 2020.
- CALLISTER Jr., W.D.; RETHWISCH, D.G. Ciência e Engenharia de Materiais. 9 ed. Sergio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 882 p.
- CHAUDHARY, A. Biswas, S. Prince, R. Pal, A. Failure analyses of bullnose refractory in reheating furnace of hot strip mill. Engineering Failure Analysis, v. 60, p. 341-352. 2016.
- COTTA, L.S.; RODRIGUES, C.G. Avaliação do revestimento refratário no processo siderúrgico. E-xacta, Belo Horizonte, v.7 n.1, p. 185-203. 2014. Editora UniBH.
- FILHO, A.A. Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE. 6ª edição. São Paulo. Editora Érica, 2013. 300p.
- GORNI, A. et. al. Análise do desempenho de Fornos para Laminação e Tratamento Térmico Através de Balanço Térmico. In: XXIV Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, 2002, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, 2002.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. A Siderurgia em Números, 2019.
- JUNIOR, F.L.C.; LANA, S.L.B.; ASSIS, P.S.; SILVA, B.B. Pelletizing furnace refractory lining life cycle extension by applying thermography analysis and direct refractory injection. Metallurgy and Materials, Ouro Preto, 71 (3), 419-424, jul. sep. 2018.
- LEITE, W. F. Dissolução de Óxidos Formados a Altas Temperaturas nos Aços Elétricos Variando-se a Temperatura e Concentração da Solução Ácida na Decapagem. 2008. 62P. Dissertação (Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- LENZ, G. Apostila de Refratários. Cursos ABM – EAD 2013. 49p., 2013.

LIRA JUNIOR, J.C. Simulação Numérica de um forno de Reaquecimento. 2007. 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

MARIÑOS ROSADO, D. Economia de energia em fornos de reaquecimento utilizados na indústria siderúrgica. 2020. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratingueta, 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Anuário do setor Não Metálicos 2019. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral, 2020.

MIRANDA, L.; ZIVIANI, M.; JUNIOR, B. Modelagem Matemática do Processo do Forno de Reaquecimento Wb2 da LTQ da Acesita. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.3. n.2, p.34-38, out-dez., 2006.

NETO, E.F.M. Análise da Confiabilidade do Laminador de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão. 2017. 43f. Monografia de Especialização (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

NIEMEIJER, F.T. Refractory Properties of Hot Blast Stoves. In: AISE ANNUAL CONVENTION AND EXPOSITION. PR-990-129, 2002, Warrendale, USA. 2002. p. 1-49.

OLLMANN, A. Modernas Técnicas De Aplicação De Refratários Em Fornos De Reaquecimento, Portal do Aquecimento Industrial, Campinas, outubro, 2014. Disponível em: <<https://www.aquecimentoindustrial.com.br/modernas-tecnicas-de-aplicacao-de-refratarios-em-fornos-de-reaquecimento/>> Acesso em: 10 de junho de 2020.

OLLMANN, A.R; COUTO, R.I. Curso de refratários para siderurgia. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Módulo Fornos de Reaquecimento. Curso Online, 2019

SILVA, G.L.R. Otimização da mistura de carvão na produção de coque metalúrgico. 2011. 157f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT. Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

SOUZA, A.L.; BORGES, J.M.; JUNIOR, W.S.; PEREIRA, M.M.; SILVEIRA, J.H.D. Laminação de Tiras a Quente da Gerdau. In: 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2013, Ouro Preto, MG, Brasil. 12p.

SOUZA, R.D.S. Caracterização de coque metalúrgico produzido com adição de pneu inservíveis nas misturas de carvão mineral. 2016. 99f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT. Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016.

WSA-WORLD STEEL ASSOCIATION. Global crude steel output decreases by 0.9% in 2020. Disponível em:< <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/Global-crude-steel-output-decreases-by-0.9--in-2020.html>>. Acesso em: 27/02/2021