



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**ALTERAÇÃO DO REVESTIMENTO REFRACTÁRIO DE TRABALHO DE UMA
PANELA DE AÇO, DE AL_2O_3 -MGO-C PARA MGO-C, PARA A REDUÇÃO DA
OCORRÊNCIA DE INCLUSÕES DE AL_2O_3 EM RODAS FERROVIÁRIAS.**

Eduardo Augusto Pereira Togni

Ouro Preto, Junho de 2022.

Eduardo Augusto Pereira Togni

Alteração do revestimento refratário de trabalho de uma panela de aço, de Al_2O_3 - MgO-C para MgO-C , para a redução da ocorrência de inclusões de Al_2O_3 em rodas ferroviárias.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Ouro Preto, Junho de 2022.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T645a Togni, Eduardo Augusto Pereira.

Alteração do revestimento refratário de trabalho de uma panela de aço, de AL₂O₃-MGO-C para MGO-C, para a redução da ocorrência de inclusões de AL₂O₃ em rodas ferroviárias.. [manuscrito] / Eduardo Augusto Pereira Togni. - 2022.

51 f.: il.: color., gráf., tab.. + Siglas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Rodas - Rodas Ferroviárias. 2. Painéis de Aço. 3. Inclusões Não-Metálicas. I. Assis, Paulo Santos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669,01

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Augusto Pereira Togni

Alteração do revestimento refratário de uma panela de aço, de Al₂O₃-MgO-C para MgO-C, para a redução da ocorrência de inclusões de Al₂O₃ em rodas ferroviárias.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 10 de agosto de 2022

Membros da banca

Dr - Paulo Santos Assis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. - Jorge Luiz Brécia Murta (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. - Cláudio Batista Vieira - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Paulo Santos Assis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Santos Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2022, às 13:51, 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 **0351784** e o código CRC **3A132F33**.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Ouro Preto e todos os professores do curso de Engenharia Metalúrgica por todas as oportunidades e conhecimento repassados por todos os anos de formação.

À empresa TOGNI S/A Materiais Refratários por possibilitar a execução desse trabalho disponibilizando suas instalações, pela experiência de trabalhar com pessoas altamente qualificadas e por garantir um ambiente de trabalho agradável.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Santos Assis, pelo seu apoio e conselhos dados para este trabalho e também para minha formação.

Aos meus amigos da minha cidade natal, Felipe, Gabriel, Matheus, Mateus, Mario e Rafael, que compartilharam meus melhores e piores momentos da minha vida e sempre estiveram ao meu lado.

À República Sem Destino, minha segunda família, pelo aprendizado e pelas grandes amizades que levarei por toda minha vida.

E por fim, à minha família, meus pais e meu irmão, pelo companherismo, pelo carinho, pela compaixão, pelo apoio, pelas críticas construtivas, pela amizade, pelo amor e por sempre acreditarem em mim até mesmo quando eu não fui capaz disso. Eu amo vocês.

RESUMO

O presente trabalho mostra o estudo realizado sobre a alteração do revestimento refratário de trabalho de painelas de aço para a redução de inclusões exógenas em rodas ferroviárias. O revestimento foi alterado de um material AMC (alumina-magnésia-carbono) para um MC (magnésia-carbono). Foram realizados testes físicos para a medição da porosidade aparente, densidade aparente, variação linear dimensional e das resistências à compressão e à flexão, e também foi feito o teste de espectrometria por fluorescência de raios-x para determinar a proporção de óxidos nos materiais refratários. Foi acompanhada a montagem das painelas e também foi realizado testes do processo de utilização das painelas, como a medição da temperatura da carcaça cheia e vazia, o tempo de residência do aço, a temperatura o metal líquido, entre outros, para determinar a constância do trabalho submetido sobre o revestimento. No final da campanha dos tijolos refratários foi feita a medição do perfil de desgaste para comparar o resultado dos mesmos na linha de escória da painela. E por fim foi analisado o gráfico fornecido pelo cliente e provou que houve uma redução da proporção de 0,06% para 0,04% de inclusões exógenas presentes nas rodas ferroviárias.

Palavras-chave: Rodas Ferroviárias. Painelas de Aço. Inclusões Não-Metálicas.

ABSTRACT

The present work shows the study made about the change of the work refractory lining of steel ladles to reduce exogenous inclusions in train wheels. The lining was changed from an AMC (alumina-magnesia-carbon) material to a MC (magnesia-carbon). Physical tests were made to measure the apparent porosity, apparent density, linear dimensional variation and the compression and flexion resistances, it was also done a x-ray fluorescence spectrometry to determine the proportion of oxides in the refractories. The assembly was accompanied and also tests of the use of the ladles were made, such as, measure of the carcass while full and empty, the residence time of the steel, the liquid metal temperature, between others, to determine the constancy of the work subjected on the lining. At the end of the campaign of the refractory bricks it was measured the wear profile to compare the result of them on the ladle slag line. And finally the graph provided by the client was analyzed and proved that indeed there was a reduction of the proportion of exogenous inclusions from 0,06% to 0,04% in the train wheels.

Key words: Train wheels. Steel Ladles. Non- Metallic Inclusions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Inclusões não metálicas na superfície de uma roda ferroviária (figura fornecida pelo cliente).....	14
Figura 3.2: Fratura total da roda (ZERBST <i>et al.</i> , 2005, <i>apud</i> OLIVEIRA, 2013).....	15
Figura 3.3: Perda de material da roda por falha (LIU <i>et al.</i> , 2006, <i>apud</i> OLIVEIRA, 2013).....	15
Figura 4.1: Zonas do revestimento refratário de acordo com as solicitações (LEITE <i>et al.</i> , 2014).....	17
Figura 4.2: Corrosão da linha de escória causada de acordo com a convecção de Marangoni (PÖTSCHKE e ROUTSCHKA, 2004).....	19
Figura 5.1: Projeto das painelas de aço e classes dos materiais utilizados (autoria própria).....	23
Figura 5.2: Corpo de prova para o ensaio de resistência à flexão (autoria própria).....	24
Figura 5.3: Corpo de prova para o ensaio de resistência à compressão (autoria própria).....	24
Figura 5.4: Máquina de ensaio de resistência à flexão (autoria própria).....	25
Figura 5.5: Máquina de ensaio de resistência à compressão (autoria própria).....	25
Figura 5.6: Balança de precisão utilizada para obtenção da densidade aparente e porosidade aparente (autoria própria).....	26
Figura 5.7: Corpo de prova sem medidas definidas para testes de densidade aparente e porosidade aparente (autoria própria).....	27
Figura 5.8: Equipamento de espectrometria por fluorescência de raios x (autoria própria).....	28
Figura 5.9: Lâmina translúcida, denominada de Pérola (autoria própria).....	28
Figura 5.10: Fluxograma da produção dos materiais conformados (autoria própria)....	29

Figura 5.11: Fluxograma da produção de materiais não conformados (autoria própria).....	30
Figura 5.12: Revestimento permanente da panela de aço (autoria própria).....	31
Figura 5.13: Regularização da sola da panela com concreto regular de 80 % de Al_2O_3 (autoria própria).....	32
Figura 5.14: Assentamento dos tijolos da sola da panela (autoria própria).....	32
Figura 5.15: Arremate de concreto regular de 80 % de Al_2O_3 feito entre os tijolos AMC e o revestimento permanente (autoria própria).....	33
Figura 5.16: Papel cerâmico de 6mm de espessura do "pé de banho" (autoria própria).....	33
Figura 5.17: Tijolos AMC aplicados no "pé de banho" (autoria própria).....	33
Figura 5.18: Tijolos do "pé de banho" até a 4ª fiada (autoria própria).....	34
Figura 5.19: Tijolos MC aplicados na frente dos AMC no "pé de banho" (autoria própria).....	34
Figura 5.20: Demarcação onde o tijolo AMC estará em contato com o aço (autoria própria).....	35
Figura 5.21: Última fiada e preenchimento com concreto a base de MgO (autoria própria).....	35
Figura 5.22: Concreto regular de 80% de Al_2O_3 aplicado na bica da panela (autoria própria).....	36
Figura 5.23: Panela aquecida e demarcações dos tijolos de cada região (figura fornecida pelo cliente).....	36
Figura 6.1: Revestimento 1, Panela 22 (autoria própria).....	42
Figura 6.2: Revestimento 2, Panela 23 (autoria própria).....	43
Figura 6.3: Revestimento 3, Panela 22 (autoria própria).....	43
Figura 6.4: Revestimento 4, Panela 23 (autoria própria).....	43

Figura 6.5: Gráfico da proporção de inclusões de alumina nas rodas por mês (figura fornecida pelo cliente).....45

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1: Dados coletados da panela 22, Revestimento 1.....	38
Tabela 6.2: Dados coletados da panela 23, Revestimento 2.....	39
Tabela 6.3: Dados coletados da panela 22, Revestimento 3.....	39
Tabela 6.4: Dados coletados da panela 23, Revestimento 4.....	40
Tabela 6.5: Análise química do material de MC.....	40
Tabela 6.6: Ensaio físicos do material de MC.....	40
Tabela 6.7: Análise química do material AMC.....	41
Tabela 6.8: Ensaio físicos do material de AMC.....	41
Tabela 6.9: Análise química do concreto refratário.....	41
Tabela 6.10: Ensaio físicos do concreto refratário.....	41
Tabela 6.11: Perfil de desgaste dos tijolos.....	42
Tabela 6.12: Análise química das escórias e suas basicidades.....	44

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

DA – Densidade Aparente.

PA – Porosidade Aparente.

RCTA – Resistência à Compressão a Temperatura Ambiente.

RFTA – Resistência à Flexão a Temperatura Ambiente.

CF – Carbono Fixo.

VLD – Variação Linear Dimensional.

AMC – Alumina- Magnésia-Carbono.

MC – Magnésia-Carbono.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	15
	2.1 Objetivo Geral	15
	2.2 Objetivos Específicos	15
3	JUSTIFICATIVA	16
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
	4.1 Painelas de Aço na Aciaria Elétrica.....	18
	4.1.1 Painelas de Aço – Revestimento Refratário	18
	4.1.1.1 Revestimento Permanente	19
	4.1.1.2 Revestimento de Trabalho	19
	4.2 Mecanismos de Desgaste dos Refratários	20
	4.2.1 Corrosão Química.....	20
	4.2.2 Termoclase.....	21
	4.2.3 Choque Térmico	22
	4.2.4 Temperaturas Elevadas.....	22
	4.2.5 Erosão e Abrasão	22
	4.2.6 Impacto	22
	4.3 Inclusões	23
	4.3.1 Inclusões Endógenas.....	23
	4.3.2 Inclusões Exógenas	23
	4.3.3 Efeito das Inclusões	24
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
	5.1 Revestimento Refratário	25
	5.2 Ensaaios Laboratoriais	26
	5.2.1 Ensaios Físicos	26
	5.2.2 Ensaio Químico	29
	5.2.3 Fluxograma dos Processos	30
	5.3 Painelas	33
	5.3.1 Montagem.....	33
	5.3.2 Escória	38
6	RESULTADOS	40
	6.1 Trabalhos das Painelas.....	40
	6.2 Resultados dos Ensaaios Laboratoriais	42
	6.3 Perfil de Desgaste dos Revestimentos.....	44

6.4 Escórias.....	46
6.5 Inclusões nas Rodas.....	47
7 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Mundialmente as linhas ferroviárias são utilizadas para transporte, como o de pessoas e o de cargas, vivas ou não, por esse motivo existe uma grande necessidade de produção de trilhos, rodas e outros componentes essenciais neste meio de transporte.

As rodas ferroviárias podem ser produzidas por processos diferentes, dentre eles existem os processos de forjamento, por conformação mecânica e de fundição, sendo que o último será o processo em que foi realizado este trabalho.

No processo de fundição existe a necessidade da fusão do metal para o preenchimento do molde de grafite que foi feito no formato da roda, e para o transporte e refino deste metal líquido são utilizadas painéis de aço revestidas com material refratário.

É comum a utilização de materiais AMC (alumina-magnésia-carbono) no revestimento refratário destas painéis, que possuem uma grande resistência ao ataque das escórias provenientes do processo de refusão dos aços.

Durante o processo de transporte do metal líquido, este submete o refratário a um meio agressivo, ocasionando vários tipos de solicitações ao mesmo tempo, como o ataque químico, a erosão, a abrasão, o choque térmico e o impacto, fazendo com que pedaços do revestimento que se soltam sejam incorporados no metal ou na escória e isto pode resultar em inclusões exógenas nas rodas, prejudicando a sua qualidade.

As inclusões de alumina são as mais preocupantes, já que a sua total retirada do metal líquido é difícil, por esse motivo este trabalho foi realizado para diminuir a quantidade deste óxido no revestimento, assim reduzindo a ocorrência de inclusões, sem prejudicar a campanha das painéis e a produtividade do processo de produção das rodas ferroviárias.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo sobre alteração do revestimento refratário de trabalho de panelas de transporte de aço para obter a redução do número de inclusões de Al_2O_3 presentes em rodas ferroviárias.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar perfis de desgaste *post mortem* para determinar o desgaste total dos materiais usados nas panelas, podendo assim correlacionar o desgaste do revestimento com a quantidade de inclusões.
- Analisar o gráfico da proporção de inclusões providenciado pelo cliente para definir se a alteração do revestimento teve o efeito desejado.

3 JUSTIFICATIVA

A ocorrência de inclusões em peças metálicas pode acarretar em falhas prejudiciais à roda, podendo causar danos nos trilhos e dormentes, na suspensão e rolamentos dos trens, podendo ocasionar no descarrilamento da locomotiva, causando prejuízos financeiros e até perdas de vidas humanas (ZERBST *et al.*, 2005; GUAGLIANO; PAU, 2007; HANDA; MORIMOTO, 2012, *apud* OLIVEIRA, 2013). Assim, esse projeto busca a diminuição da ocorrência destas inclusões alterando o revestimento de trabalho das painéis de aço.

Na Figura 3.1 pode ser visto as inclusões não metálicas presentes na superfície das rodas.



Figura 3.1: Inclusões não metálicas na superfície de uma roda ferroviária (figura fornecida pelo cliente).

Segundo Oliveira (2013) as falhas causadas nas rodas podem ocasionar a quebra total da roda ou a perda de uma parte da mesma, como pode ser visto respectivamente nas Figuras 3.2 e 3.3.

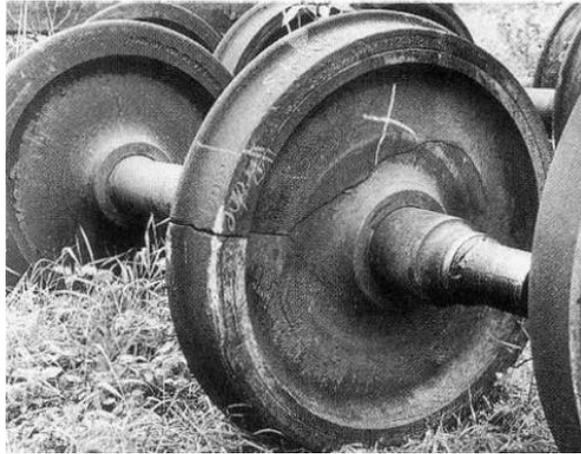


Figura 3.2: Fratura total da roda (ZERBST *et al.*, 2005, *apud* OLIVEIRA, 2013).



Figura 3.3: Perda de material da roda por falha (LIU *et al.*, 2006, *apud* OLIVEIRA, 2013).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Painelas de Aço na Aciaria Elétrica

Segundo Leite *et al.*, (2014), painelas de aço são recipientes que transportam o aço líquido durante todo o processo nas aciarias, desde o vazamento do refino primário até o lingotamento, ou até o vazamento na fundição, como é o caso das rodas neste estudo.

Por vários anos as painelas de aço utilizavam o processo de basculamento para o vazamento do metal contido no seu interior, em seguida essa tecnologia foi alterada pelo vazamento pela parte inferior da painela, primeiramente por um sistema de haste tampão. E atualmente as painelas utilizam a tecnologia de vazamento pelo fundo por meio de válvulas-gavetas (IISI, 2009, *apud* ANDRADE, 2009).

O cuidado necessário durante o tempo de vida de uma painela não se dá somente quando a mesma possui metal no seu interior. Segundo Andrade (2009), durante a alteração da situação da painela, sem metal, para, com metal, ou vice-versa, a mesma sofre as seguintes solicitações: altas temperaturas, escórias corrosivas, grandes tempos de residência e agitação violenta do banho. Outra solicitação não citada é o choque térmico que as painelas podem sofrer durante o aquecimento ou, se necessário, o resfriamento.

4.1.1 Painelas de Aço – Revestimento Refratário

Os refratários das painelas de aço são divididos principalmente entre revestimentos, de trabalho e permanente. E o revestimento de trabalho pode ser dividido entre várias zonas diferentes, isso pois cada uma destas zonas solicita algo diferente dos refratários. Na Figura 4.1 pode ser visto as diferentes zonas no qual o revestimento de trabalho é dividido de acordo com as solicitações impostas (Leite *et al.*, 2014).

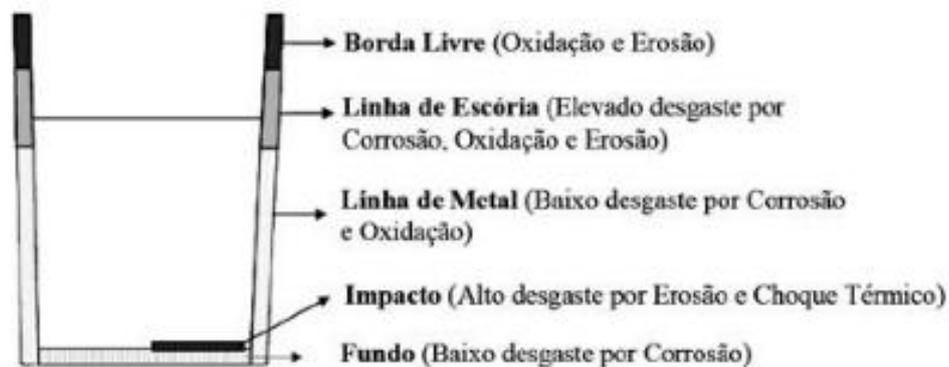


Figura 4.1: Zonas do revestimento refratário de acordo com as solicitações (LEITE *et al.*, 2014).

Tanto o revestimento permanente quanto o de trabalho possuem as suas funções básicas, sendo a do primeiro, principalmente, o isolamento térmico, e às vezes é uma camada de proteção secundária para prevenir o vazamento do metal líquido caso o material de trabalho falhe. E a do segundo é ficar em contato direto com o metal líquido e a escória e resistir aos ataques químico e térmico, assim como as solicitações mecânicas que estes líquidos impõem.

4.1.1.1 Revestimento Permanente

O revestimento permanente pode ser feito utilizando materiais refratários formados, tanto silico-aluminosos ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), por toda a panela, ou, segundo Andrade (2009), utilizar materiais de alta alumina na linha de metal e no fundo e para a linha de escória utilizar materiais de magnésia-carbono (MgO-C) ou magnésia plena (MgO).

4.1.1.2 Revestimento de Trabalho

Os materiais que podem ser utilizados para esta função variam dependendo da região onde este será utilizado, estas regiões são: borda livre, linha de escória, linha de metal, fundo e zona de impacto.

Na borda livre, como os materiais sofrem oxidação, temperaturas elevadas, variação de temperatura, ataque por erosão e corrosão das escórias (FRUEHAN 1985, *apud*, ANDRADE, 2009), eles precisam ter resistência a estas intempéries. Para

Andrade (2009), estes materiais podem ser da mesma classe dos que são utilizados na linha de escória, outro tipo utilizado é o concreto refratário de alta alumina.

A linha de escória é a região onde existe a maior solicitação no refratário em uma panela de aço (RIBEIRO e SAMPAIO, 1996, *apud*, ANDRADE, 2009). Para atender a estas solicitações, um dos materiais utilizados nesta região, são os materiais formados de alumina-magnésia-carbono ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$), já para Andrade (2009) os materiais formados de MgO-C são utilizados nesta região por suportarem as diversas solicitações impostas pela região da escória.

Em algumas aciarias os refratários para a linha de metal são de alumina-magnésia-carbono, porém estes refratários podem causar inclusões se não for tomado o devido cuidado durante a produção do aço. Outros materiais utilizados são os básicos, à base de MgO, os quais são utilizados na maioria das aciarias atualmente (YOUNG *et al.*, 1999, *apud*, ANDRADE, 2009).

Os materiais utilizados para o fundo da panela e a zona de impacto na grande maioria das vezes são os mesmos, e normalmente a única diferença é a alteração de uma das dimensões do tijolo refratário, sendo o impacto o maior problema desta região. Os materiais que são utilizados nestas regiões são os tijolos de alta alumina (ANDRADE, 2009), os de alumina-magnésia-carbono e alumina-carbono.

4.2 Mecanismos de Desgaste dos Refratários

Os materiais refratários trabalham em ambientes muito agressivos, onde existem diferentes tipos de desgaste que estes materiais podem sofrer, estes desgastes podem ser divididos em químico, térmico e mecânico, sendo eles a corrosão, a termoclase, choque térmico, temperaturas elevadas, erosão, abrasão e impactos. Os mecanismos de desgaste químico, térmico e mecânico atuam de uma maneira sinérgica, fazendo com que os refratários sofram desgastes diferentes ao mesmo tempo (LEE e ZHANG, 2004, *apud*, FERREIRA, 2010).

4.2.1 Corrosão Química

Para Ferreira (2010), corrosão se refere ao ataque químico que ocorre ao refratário em serviço, na metalurgia as reações ocorrem normalmente entre o refratário, a escória fundida e os fluxantes.

Como na natureza tudo tende ao estado de menor energia. Alegre (2008) fala que as reações químicas entre o refratário e a escória, ou o metal, tem como força-motriz reduzir a energia livre do sistema ao custo da integridade do material refratário, tendendo assim ao equilíbrio entre as fases presentes.

Segundo Pötschke e Routschka (2004), na maioria dos casos, a região com maior desgaste ocorre na região trifásica, escória/aço/refratário, e este desgaste segue a convecção Marangoni, que pode ser vista na Figura 4.2, onde a molhabilidade, a gravidade e o fluxo dos fluídos, fazem com que a escória se desloque entre o revestimento refratário e o aço líquido.

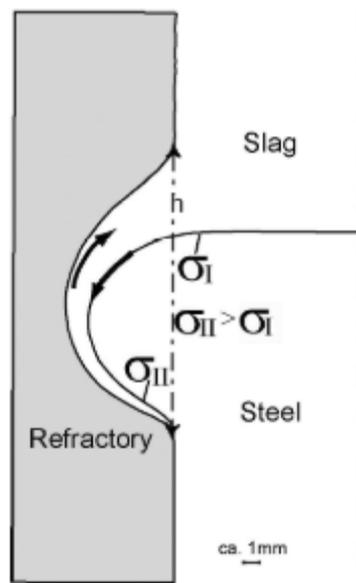


Figura 4.2: Corrosão da linha de escória causada de acordo com a convecção de Marangoni (PÖTSCHKE e ROUTSCHKA, 2004).

4.2.2 Termoclase

Para Andrade (2009) a termoclase é a degradação do material refratário por perda de fragmentos através de um processo de formação de trincas em sua estrutura, quando submetido a um gradiente térmico elevado, tendo valores entre 800 e 1000°C

Gradiente térmico em um material é a variação de temperatura ao longo de sua extensão. Sendo assim os refratários com espessuras mais finas possuem um gradiente térmico menor do que os mais espessos (OLIVEIRA, 1997 *apud* ANDRADE, 2009).

4.2.3 Choque Térmico

Segundo Quintela *et al.*, (2001), o dano por choque térmico acontece quando as tensões térmicas, causadas pelos ciclos e gradientes térmicos, provocam a nucleação de trincas e a propagação destas.

4.2.4 Temperaturas Elevadas

Para Ferreira (2010) quando o refratário é submetido a temperaturas muito elevadas ele irá sofrer um desgaste mais rápido, onde geralmente são formadas trincas que levam ao lascamento, expondo a nova face ao efeito das temperaturas elevadas e da corrosão da escória, recomeçando o ciclo.

Já para Alegre (2008), o carbono existente na matriz do refratário sofre oxidação por conta das temperaturas elevadas e atmosfera oxidante, o que resulta em um aumento da porosidade do material, favorecendo a infiltração da escória no tijolo, possibilitando o ataque químico.

E para Luz *et al.*, (2008), com o aumento expressivo da temperatura, a viscosidade da escória irá diminuir, proporcionando um aumento na velocidade de espalhamento sobre o revestimento (molhabilidade).

4.2.5 Erosão e Abrasão

Para Duarte (2000, apud, FERREIRA, 2010) o termo erosão é utilizado quando fluidos estão em movimento em relação ao refratário. E Ferreira (2010) diz que a erosão é definida de acordo com a velocidade de movimentação destes fluídos.

Segundo Andrade (2009) a erosão ocorre quando fluídos com partículas possuem uma movimentação em relação ao refratário, já a abrasão ocorre quando sólidos se atritam contra o revestimento, sendo estes sólidos metálicos ou não-metálicos.

Já Pötschke e Routschka (2004) dizem que tanto a erosão quanto a abrasão ocorrem em conjunto com a corrosão química.

4.2.6 Impacto

Andrade (2009) diz que quando um corpo se choca contra uma superfície a energia cinética é transformada em deformação, acontecendo o fenômeno de desgaste por impacto. Isso normalmente ocorre no fundo da panela quando ocorre o vazamento de metal líquido, por esse motivo, o fundo possui maior espessura para resistir a esse

desgaste, ou existe uma zona, chamada de zona de impacto, para a proteção da panela (balanceamento dimensional e/ou qualitativo).

4.3 Inclusões

No texto INFOMET, (1998) diz que as inclusões são geralmente geradas durante a fase líquida do metal no seu processo de produção, e podem ser divididas em endógenas e exógenas.

4.3.1 Inclusões Endógenas

Em INFOMET, (1998) as inclusões endógenas são as formadas a partir do processo de desoxidação do aço, um exemplo é a alumina em aços carbono acalmada ao alumínio, que é formada a partir da oxidação do alumínio presente no aço.

4.3.2 Inclusões Exógenas

Já as inclusões exógenas são descritas em INFOMET, (1998) são formadas a partir de reações químicas incidentais e de ações mecânicas que o aço implica sobre o que está em volta dele. O revestimento refratário causa esse tipo de inclusão.

No texto de INFOMET, (1998) é apresentada as seguintes características comuns entre as inclusões exógenas:

“1 – Tamanho grande: inclusões resultantes da erosão do refratário em geral são maiores do que as que resultam do aprisionamento da escória.

2 – Composição química variada/multifásica, causada pelos seguintes fenômenos: devido à reação entre o aço líquido e a sílica (SiO_2), FeO , MnO presentes na escória e o revestimento refratário, as inclusões de alumina (Al_2O_3) geradas podem permanecer na superfície. Inclusões exógenas atuam como sítios para a nucleação heterogênea de novas inclusões que se precipitam durante o seu movimento no aço líquido. As inclusões provenientes da escória ou da desoxidação podem reagir com o revestimento refratário do forno ou com outros materiais estranhos deslocados para dentro do aço líquido.

3 – Formato irregular, caso não sejam esféricas resultantes do aprisionamento da escória ou da sílica resultante da desoxidação. As inclusões exógenas esféricas são normalmente grandes (acima de 50 micrometros) e a maioria é multifásica, mas as inclusões esféricas resultantes da desoxidação são normalmente pequenas e monofásicas.

4 – Estão presentes em menor número, quando comparadas com as inclusões pequenas.

5 – Distribuição esporádica no aço e não dispersas como as inclusões pequenas. Devido ao fato de que são geralmente aprisionadas no aço líquido durante o vazamento para o molde e a solidificação, sua incidência é acidental ou esporádica. Por outro lado, facilmente flutuam e sobem, então se concentram em regiões do aço que se solidificam mais rapidamente ou em zonas em que de algum modo a remoção por flotação foi prejudicada. Consequentemente são frequentemente encontradas próximas à superfície.

6 – São mais nocivas às propriedades do aço devido ao seu maior tamanho.”

4.3.3 Efeito das Inclusões

Em INFOMET, (1998) é dito que as inclusões, tanto endógenas quanto exógenas, prejudicam a qualidade do aço.

Uma das maneiras que isso ocorre é a redução da resistência à fadiga, como as inclusões possuem maior dureza que o aço, isso faz com que existam tensões nas interfaces metal/inclusão, trincas serão facilmente nucleadas nestas interfaces, provocando assim as fraturas (INFOMET, 1998).

Outra maneira é a facilitação de fraturas dúcteis, que são causadas pela nucleação, crescimento e coalescimento de vazios que são nucleados em partículas duras, como as inclusões (INFOMET, 1998).

E também a facilitação da corrosão, sendo que apenas a existência das inclusões não-metálicas no aço o torna mais suscetível à ação corrosiva de qualquer meio, até mesmo o ar (INFOMET, 1998).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Revestimento Refratário

O revestimento refratário de trabalho, na linha de metal, foi alterado de um material AMC, alumina-magnésia-carbono, para um tijolo básico, de magnésia-carbono, com 9% de carbono fixo.

Já para o revestimento permanente das paredes foi verificado que os tijolos desta região ainda estavam em condições de operação. Estes tijolos são da classe silico-aluminoso, contendo em torno de 45% de Al_2O_3 . A Figura 5.1 mostra um projeto simplificado das paredes e as classes dos materiais aplicados em cada região.

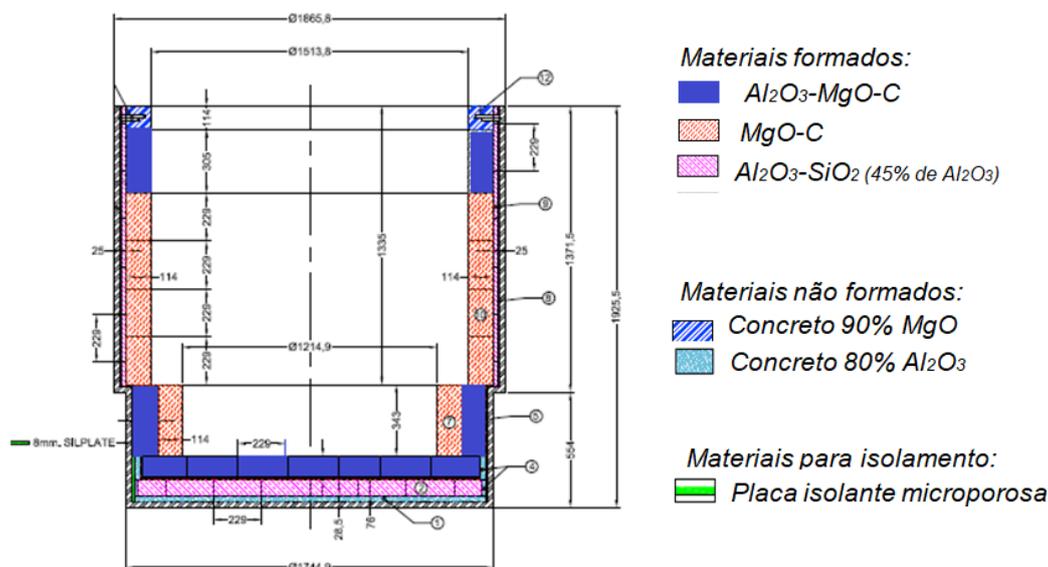


Figura 5.1: Projeto das paredes de aço e classes dos materiais utilizados (autoria própria).

Os materiais AMC mostraram uma boa resistência contra o ataque da escória, por esse motivo eles foram mantidos nas regiões da escória e fundo da parede, onde é mantida uma pequena quantidade de escória depois do vazamento da parede até seu novo enchimento. Estes materiais ainda são empregados.

O concreto refratário regular de 80% de Al_2O_3 é utilizado para a regularização do fundo, cobrindo as deformações da carcaça da parede. E o concreto de 90% de MgO é utilizado para proteção da borda da parede contra a possibilidade da escória passar do nível de operação. O isolamento é feito com uma placa de 8mm rígida microporosa.

5.2 Ensaio Laboratoriais

Foram realizados alguns ensaios, físicos e químicos, em laboratório para definir as características dos materiais a serem utilizados nas painelas, e receberem a aprovação do cliente para o seu uso.

5.2.1 Ensaio Físicos

Os ensaios físicos realizados foram de resistência à compressão e à flexão, a porosidade aparente, a densidade aparente e a variação linear dimensional, todos estes testes são padronizados e foram realizados respeitando as normas da ABNT.

Os corpos de prova para o teste de resistência à flexão são feitos com 160mmx40mmx40mm, como pode ser visto na Figura 5.2, e os para o teste de resistência à compressão são feitos com diâmetro de 50mm e altura de 50mm, como na Figura 5.3.



Figura 5.2: Corpo de prova para o ensaio de resistência à flexão (autoria própria).



Figura 5.3: Corpo de prova para o ensaio de resistência à compressão (autoria própria).

Nas Figuras 5.4 e 5.5 podem ser vistas as máquinas para a realização dos testes de resistência à flexão e à compressão respectivamente.



Figura 5.4: Máquina de ensaio de resistência à flexão (autoria própria).



Figura 5.5: Máquina de ensaio de resistência à compressão (autoria própria).

Para os concretos o teste de resistência à compressão é realizado em três ocasiões, após secagem a 110°C, após a queima a 800°C e após a queima a 1450°C.

Já para os ensaios de densidade aparente e porosidade aparente o equipamento principal é a balança de precisão, que pode ser vista na Figura 5.6.



Figura 5.6: Balança de precisão utilizada para obtenção da densidade aparente e porosidade aparente (autoria própria).

A densidade aparente é obtida a partir da razão entre a massa, obtida na balança de precisão, e do volume, obtido a partir da medida feita do corpo de prova com um paquímetro. E para os concretos o teste é realizado após a secagem a 110°C.

O teste de porosidade aparente consiste em, após realizar a pesagem a seco do corpo de prova (m_a), deixar o mesmo submerso em água quente durante 6 horas até que esteja totalmente molhado, em seguida fazer a sua pesagem enquanto submerso (m_i) e após seca-lo levemente com um pano fazer a pesagem dele úmido (m_u). Com estas três massas é possível calcular a sua porosidade aparente (PA) a partir da Equação 5.1.

$$PA = \frac{m_u - m_a}{m_u - m_i} \times 100 \quad (5.1)$$

- PA: Porosidade Aparente (%);
- m_a : Massa do corpo de prova seco (kg);
- m_i : Massa do corpo de prova submerso (kg);
- m_u : Massa do corpo de prova úmido (kg).

Para estes testes não existe um formato de corpo de prova padrão, é preciso apenas que eles caibam na bandeja da balança, mas para facilitar os cálculos eles normalmente são feitos no mesmo formato do corpo de prova da Figura 5.7. E é realizado apenas para materiais formados, já que os concretos iriam se desfazer na água quente.



Figura 5.7: Corpo de prova sem medidas definidas para testes de densidade aparente e porosidade aparente (autoria própria).

E por fim é realizado o teste de variação linear dimensional nos concretos, onde é utilizado um corpo de prova igual ao da Figura 5.2. A variação é medida na direção dos 160mm, e é realizada depois de três ocasiões, sendo uma secagem a 110°C, uma queima a 800°C e uma queima a 1450°C.

5.2.2 Ensaio Químico

As composições químicas dos materiais são obtidas a partir de espectrometria por fluorescência de raios x. O equipamento utilizado pode ser vista na Figura 5.8. Este teste consiste em fazer lentes translúcidas, chamadas de pérolas, como pode ser visto na Figura 5.9, utilizando fundentes e o material para que o equipamento seja capaz de fazer a análise.



Figura 5.8: Equipamento de espectrometria por fluorescência de raios x (autoria própria).



Figura 5.9: Lâmina translúcida, denominada de Pérola (autoria própria).

5.2.3 Fluxograma dos Processos

Os processos de produção dos materiais assim como as etapas as quais são retiradas as amostras para os ensaios podem ser vistos nos fluxogramas das Figuras 5.10 e 5.11.

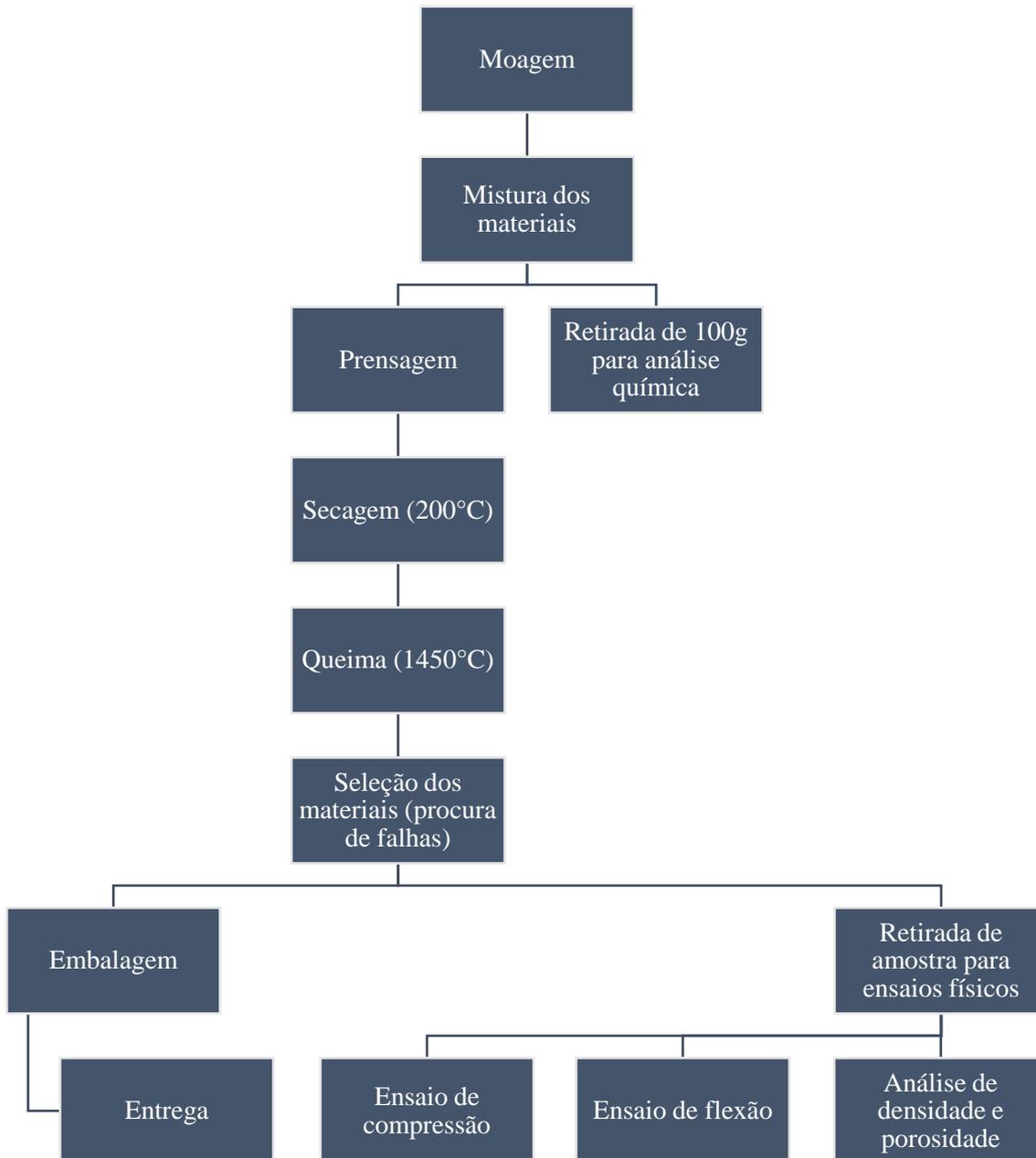


Figura 5.10: Fluxograma da produção dos materiais conformados (autoria própria).

No fluxograma é demonstrado quando são retiradas as amostras para a realização dos ensaios. Para a análise química são retiradas 100g aproximadamente após a mistura, já homogeneizado, onde apenas 2g são utilizados para a análise, e o restante é guardado para a possibilidade de repetir o teste, se necessário. Para os ensaios físicos são retirados corpos de prova dos tijolos já prontos, após serem queimados, o corpo de prova para o ensaio de compressão é retirado com uma serra copo diamantada com diâmetro de 50mm, até uma profundidade onde será possível retificar o corpo de prova

para ter a altura de 50mm. O corpo de prova para o ensaio de flexão é cortado com uma serra circular diamantada para obter as dimensões de 160mmx40mmx40mm. E por fim o corpo de prova para a análise da densidade e da porosidade, que também é cortado com a serra circular diamantada, deve ter as dimensões aproximadas de 100mmx100mmx50mm.

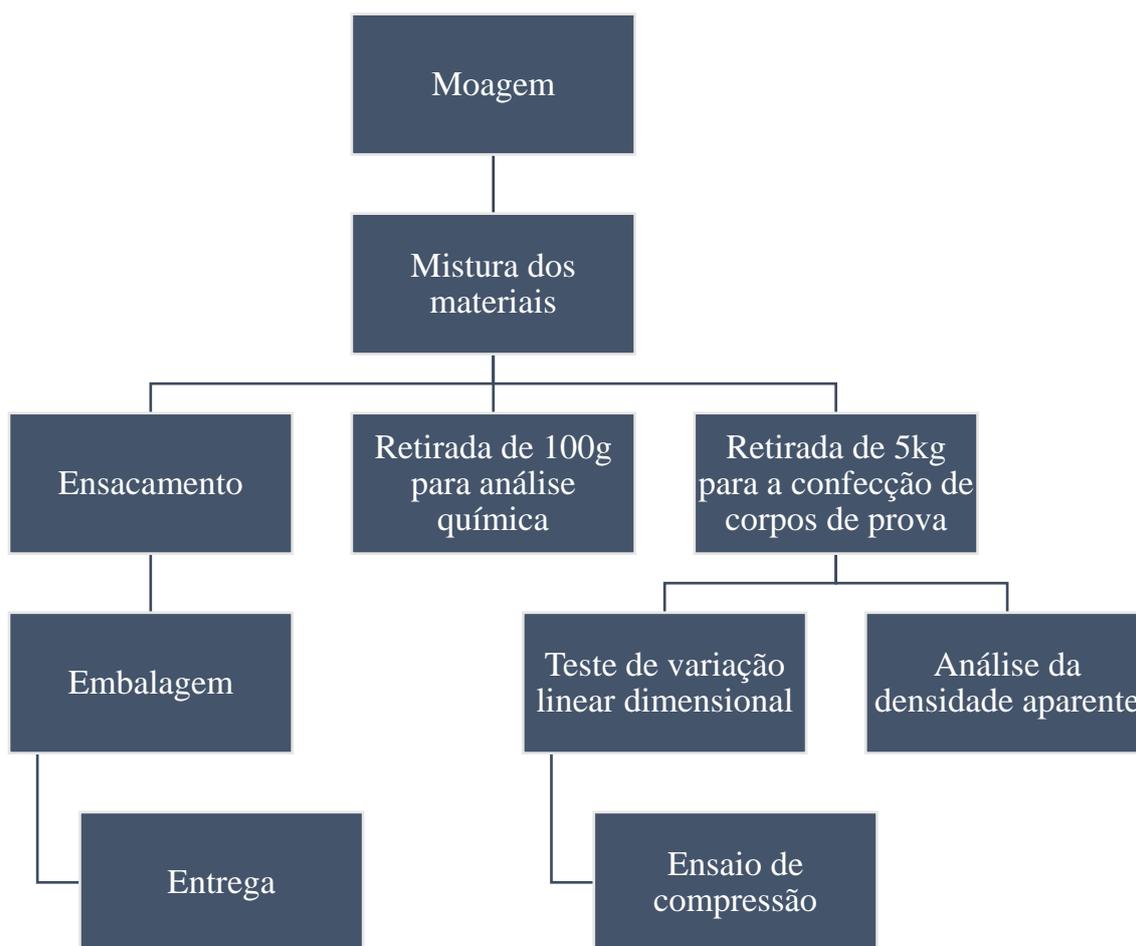


Figura 5.11: Fluxograma da produção de materiais não conformados (autoria própria).

Como não é necessária a realização da queima no processo de produção dos concretos, o seu tempo de produção é muito reduzido. A quantidade necessária para a realização da análise química é a mesma dos materiais formados, 2g. Para os ensaios de variação linear dimensional e densidade aparente existem moldes que contem as dimensões 160mmx40mmx40mm, a densidade é retirada a partir dos corpos de prova após a secagem a 110°C. Após a medição da variação linear dimensional dos corpos de prova, 1 secado a 110°C e 2 queimados, a 800°C e 1450°C, é realizado o ensaio de

compressão dos mesmos para a obtenção destes valores para cada temperatura em que os materiais são submetidos.

5.3 Painelas

O teste foi realizado em 2 painelas da empresa e em cada uma foram conduzidas 2 campanhas, totalizando 4 revestimentos, e o tempo de cada campanha é de uma semana.

5.3.1 Montagem

Após a demolição do revestimento refratário antigo, foi realizada a inspeção do revestimento permanente para, se necessário, realizar reparos. As painelas utilizadas neste trabalho não necessitaram de reparos em seus revestimentos permanentes, como pode ser visto na Figura 5.12.



Figura 5.12: Revestimento permanente da painela de aço (autoria própria).

Em seguida é feita a regularização da sola da painela, para compensar as deformações da carcaça causadas durante o processo de transporte do aço, e prover uma superfície plana para o início do assentamento dos tijolos. O concreto regular da classe de 80 % de Al_2O_3 foi utilizado para esta função, como pode ser visto na Figura 5.13.



Figura 5.13: Regularização da sola da panela com concreto regular de 80 % de Al_2O_3 (autoria própria).

Os tijolos utilizados na sola das panelas foram de AMC e em seguida foi realizado um arremate entre estes tijolos e o permanente da panela com o concreto regular de 80 % de Al_2O_3 , ambos podem ser vistos na Figura 5.14 e 5.15 respectivamente.



Figura 5.14: Assentamento dos tijolos da sola da panela (autoria própria).



Figura 5.15: Arremate de concreto regular de 80 % de Al_2O_3 feito entre os tijolos AMC e o revestimento permanente (autoria própria).

Para o início do assentamento dos tijolos do fundo da panela, também chamado de “pé de banho”, é necessária a colocação de um papel cerâmico de 6mm de espessura, visto na Figura 5.16, e em seguida é colocado uma fiada do tijolo de AMC, mostrado na Figura 5.17.



Figura 5.16: Papel cerâmico de 6mm de espessura do "pé de banho" (autoria própria).



Figura 5.17: Tijolos AMC aplicados no "pé de banho" (autoria própria).

Em seguida foi montado mais 4 fiadas com o tijolo de magnésia-carbono, mostrado na Figura 5.18.



Figura 5.18: Tijolos do "pé de banho" até a 4ª fiada (autoria própria).

Foi montado um anel em frente à fiada do “pé de banho”, utilizando o tijolo de magnésia-carbono, visto na Figura 5.19, e os tijolos de AMC vão estar em contato com o aço apenas em uma porção da sua face superior, demarcada na Figura 5.20.



Figura 5.19: Tijolos MC aplicados na frente dos AMC no “pé de banho” (autoria própria).

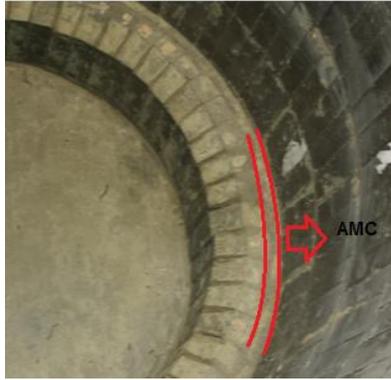


Figura 5.20: Demarcação onde o tijolo AMC estará em contato com o aço (autoria própria).

Na última fiada, a 5ª, da panela é utilizado novamente o material AMC, e entre esta fiada e a carcaça da panela é aplicado um concreto a base de MgO, como pode ser visto na Figura 5.21, e na bica da panela é aplicado o concreto regular de 80% de Al_2O_3 , mostrado na Figura 5.22.



Figura 5.21: Última fiada e preenchimento com concreto a base de MgO (autoria própria).



Figura 5.22: Concreto regular de 80% de Al_2O_3 aplicado na bica da panela (autoria própria).

Na Figura 5.23 pode ser visto uma das panelas após algumas corridas e aquecida, com os tipos de tijolos demarcados.

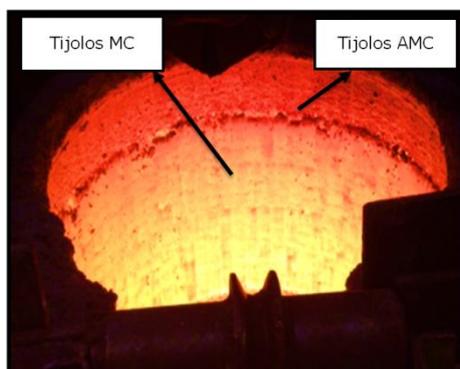


Figura 5.23: Panela aquecida e demarcações dos tijolos de cada região (figura fornecida pelo cliente).

5.3.2 Escória

Foi feita uma análise química de 8 amostras de escórias, retiradas durante a campanha do revestimento 1 na Panela 22, para determinar a sua basicidade e poder ter um referencial se os tijolos na linha de escória devem suportar uma escória básica ou ácida. E com isso apresentar a possibilidade de alteração dos materiais AMC para o MC.

Nos revestimentos 3 e 4 foram utilizados alguns tijolos MC na montagem da linha de escória como um teste, para determinar o perfil de desgaste deste material nesta região.

6 RESULTADOS

6.1 Trabalhos das Painelas

Após a montagem as painelas foram colocadas na linha de produção, mesmo o tempo planejado de trabalho das painelas sendo uma semana.

Durante o trabalho das painelas foi coletado alguns dados de cada revestimento, os quatro revestimentos foram separados em duas painelas, sendo elas de número 22 e 23, sendo o primeiro e o terceiro para a 22 e o segundo e quarto para a 23. Os dados coletados podem ser vistos nas Tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.

Tabela 6.1: Dados coletados da painela 22, Revestimento 1 (autoria própria).

Data	Vida Painela	t. aquecedor (min)	T. revest. Após aquecimento (°C)	T. carcaça vazia (°C)	T. carcaça cheia (°C)	T. aço na painela (°C)	t. residência do aço (min)
06/04	46 ^a	26	958	360–413	-	1644	61
06/04	47 ^a	29	983	378–399	-	1643	54
06/04	48 ^a	57	942	378–408	-	1640	59
06/04	49 ^a	16	962	376–386	-	1646	54
06/04	50 ^a	17	966	364–413	-	1632	-
07/04	59 ^a	-	971	375–386	-	1622	60
07/04	60 ^a	8	970	370–413	-	1648	64
07/04	61 ^a	25	952	378–392	-	1649	-

Tabela 6.2: Dados coletados da panela 23, Revestimento 2 (autoria própria).

Data	Vida Panela	t. aquecedor (min)	T. revest. Após aquecimento (°C)	T. carcaça vazia (°C)	T. carcaça cheia (°C)	T. aço na panela (°C)	t. residênci a do aço (min)
10/04	7 ^a	13	1062	338–396	-	1620	46
10/04	8 ^a	42	860	333–399	316–387	1655	-
11/04	17 ^a	43	971	358–396	342–390	1641	50
11/04	18 ^a	47	960	359–441	346–407	1649	56
11/04	19 ^a	8	943	379–405	-	1632	55
11/04	20 ^a	162	1064	344–385	336–386	1641	54
11/04	21 ^a	20	930	360–404	365–404	1637	-
12/04	34 ^a	34	961	357–407	-	1640	-
12/04	43 ^a	59	943	353–372	330–366	1642	51

Tabela 6.3: Dados coletados da panela 22, Revestimento 3 (autoria própria).

Data	Vida Panela	t. aquecedor (min)	T. revest. Após aquecimento (°C)	T. carcaça vazia (°C)	T. carcaça cheia (°C)	T. aço na panela (°C)	t. residência do aço (min)
17/04	4	58	920	342–414	333–402	1645	52
17/04	5	51	899	336–400	324–383	1638	-
17/04	7	59	903	349–369	348–354	1650	59
18/04	16 ^a	32	952	348–385	340–372	1640	60
18/04	17 ^a	17	957	352–389	352–388	1643	52
18/04	18 ^a	39	1001	341–387	345–382	1636	-
18/04	20 ^a	37	997	350–389	331–369	1644	53

Tabela 6.4: Dados coletados da panela 23, Revestimento 4 (autoria própria).

Data	Vida Panela	t. aquecedor (min)	T. revest. Após aquecimento (°C)	T. carcaça vazia (°C)	T. carcaça cheia (°C)	T. aço na panela (°C)	t. residência do aço (min)
24/04	4 ^a	-	1002	357-383	330-359	1676	71
24/04	5 ^a	41	932	348-393	335-372	1625	-
24/04	7 ^a	40	909	336-385	334-375	1629	-

6.2 Resultados dos Ensaio Laboratoriais

Os valores dos resultados dos testes dos materiais refratários a serem utilizados nas panelas, o material de magnésia-carbono, o material de alumina-magnésia-carbono e o concreto refratário regular de 80% de Al₂O₃, podem ser vistos nas Tabelas 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10.

Tabela 6.5: Análise química do material de MC (autoria própria).

Análise Química (%)				
MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
98,5	1,0	0,3	0,1	0,1

Tabela 6.6: Ensaio físicos do material de MC (autoria própria).

Ensaio Físicos				
DA (g/cm ³)	PA (%)	RCTA (MPa)	RFTA (MPa)	CF (%)
2,85	4	50	16	9

Tabela 6.7: Análise química do material AMC (autoria própria).

Análise Química (%)			
Al₂O₃	SiO₂	MgO	C
80,4	8,6	7,3	6,5

Tabela 6.8: Ensaio físicos do material de AMC (autoria própria).

Ensaio Físicos			
DA (g/cm³)	PA (%)	RCTA (MPa)	RFTA (MPa)
2,85	5,0	55	13

Tabela 6.9: Análise química do concreto refratário (autoria própria).

Análise Química (%)				
Al₂O₃	CaO	SiO₂	TiO₂	Fe₂O₃
83,5	6,6	6,0	2,5	0,9

Tabela 6.10: Ensaio físicos do concreto refratário (autoria própria).

Ensaio Físicos	
DA após secagem a 110°C (g/cm³)	2,55
RCTA após secagem a 110°C (MPa)	10,00
RCTA após queima a 800°C (MPa)	12,00
RCTA após queima a 1450°C (MPa)	30,00
VLD após secagem a 110°C (%)	0,00
VLD após queima a 800°C (%)	-0,40
VLD após queima a 1450°C (%)	-1,20

6.3 Perfil de Desgaste dos Revestimentos

Após a campanha de uma semana das painelas foram realizadas a demolição e a medição dos materiais remanescentes. A Tabela 6.9 mostra quais foram as medidas finais dos tijolos de cada fiada nos revestimentos 1, 2, 3 e 4, todos os valores estão em milímetros.

Tabela 6.11: Perfil de desgaste dos tijolos (autoria própria).

Região	Medida Inicial	Revestimento 1 – Painela 22	Revestimento 2 – Painela 23	Revestimento 3 – Painela 22	Revestimento 4 – Painela 23
5ª fiada	114	83	85	87 – 104*	70 – 93*
4ª fiada	114	105	101	104	100
3ª fiada	114	104	103	104	100
2ª fiada	114	106	102	103	101
1ª fiada	114	105	102	104	102
“Pé de banho”	114	105	103	103	100

Na Tabela 6.9 os valores demarcados com o (*) na 5ª fiada dos revestimentos 3 e 4, representam os tijolos MC montados entre os AMC para um teste de desgaste na região da escória.

Nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 é possível ver os revestimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, no final da campanha de uma semana.



Figura 6.1: Revestimento 1, Painela 22 (autoria própria).



Figura 6.2: Revestimento 2, Panela 23 (autoria própria).

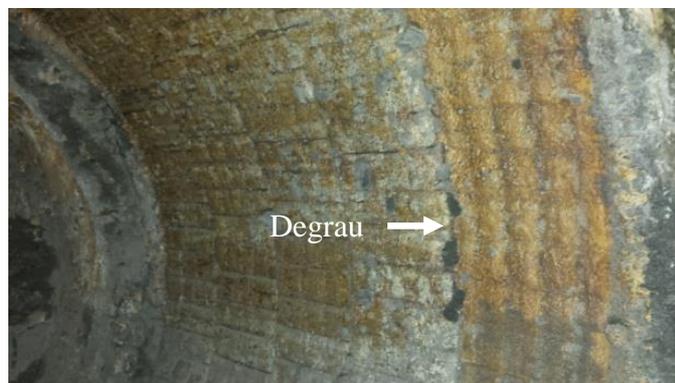


Figura 6.3: Revestimento 3, Panela 22 (autoria própria).



Figura 6.4: Revestimento 4, Panela 23 (autoria própria).

Após uma semana de operação as painéis são retiradas do processo para realizar a inspeção do desgaste e a demolição do revestimento de trabalho para a montagem do novo revestimento, na inspeção é analisada a espessura dos tijolos para determinar o comportamento dos mesmos durante o trabalho, e verificado se existe alguma irregularidade nos tijolos, trincas, lascamento, fissuras, entre outras, o que não foi o

caso. Com os valores apresentados na Tabela 6.9 é possível determinar se os materiais apresentaram um comportamento adequado para a função na qual foram submetidos.

Nas Figuras pode ser visto a existência de degraus que explicitam a diferença do desgaste entre os tijolos AMC, os mais desgastados, presentes na linha de escória, e os tijolos MC, presentes na linha de metal. Como foi mostrado em forma de medidas na Tabela 6.9.

6.4 Escórias

É mostrado na Tabela 6.10 as análises químicas das amostras das escórias disponibilizadas para estudo das basicidades. Foram retiradas duas amostras de escória para cada revestimento, sendo numeradas em ordem, ou seja, para o revestimento 1 as escórias retiradas foram enumeradas 1 e 2, para o revestimento 2 são a 3 e 4, assim por diante.

Tabela 6.12: Análise química das escórias e suas basicidades (autoria própria).

	1	2	3	4	5	6	7	8
Al₂O₃	4,56	6,37	7,78	6,79	3,78	3,91	5,94	3,79
SiO₂	32,9	25,2	44,3	23,9	31,8	19,6	30,1	22,3
TiO₂	0,2	0,4	0,23	0,44	0,19	0,28	0,32	0,26
Fe₂O₃	5,63	5,75	3,4	10,2	5,87	11,5	4,13	17,6
CaO	42,3	40,6	25,6	38,9	42,3	52,1	35,1	34,3
MgO	7,83	13	10,9	9,94	6,19	3,98	14,8	11,9
Na₂O	0,09	0,13	0,13	0,17	0,11	0,08	0,14	0,11
K₂O	0,42	0,02	0,53	0,09	0,45	0	0,19	0,06
F	0,5	0,97	0,67	0,84	0,87	1,02	1,14	0,76
P₂O₅	0,07	0,05	0,04	0,14	0,06	0,28	0,04	0,18
SO₃	0,15	0,23	0,14	0,2	0,13	0,3	0,22	0,24
Cr₂O₃	0,11	0,18	0,09	0,35	0,16	0,3	0,1	0,48
MnO	5,17	6,91	6,08	7,81	8,12	6,39	7,1	7,8
ZrO₂	0,04	0,05	0	0,07	0	0	0,04	0
Nb₂O₅	0	0,2	0	0,13	0	0,25	0,09	0,12
MoO₃	0	0	0	0	0	0	0,6	0
BaO	0	0	0	0	0	0	0	0
Basicidade	1,63	2,10	0,88	2,18	1,76	3,15	1,70	2,74

A partir dos resultados é possível ver que, os valores das basicidades não são constantes, a maioria das escórias tem caráter básico e que em alguns ciclos do processo existe a possibilidade da ocorrência de uma escória ácida, visto pela amostra de número 3.

Com a presença da alumina, um óxido anfótero, nos tijolos AMC, estes tem uma maior resistência a corrosão contra escórias ácidas comparado ao tijolo MC, isso porque em um meio ácido o óxido anfótero irá se comportar como um óxido básico, mas como a escória é pouco ácida a alumina também terá um comportamento pouco básico, próximo de um caráter neutro, o que é melhor do que o comportamento muito básico dos tijolos MC.

6.5 Inclusões nas Rodas

A Figura 6.5 é um gráfico disponibilizado pela empresa produtora das rodas ferroviárias, que mostra a quantidade média de inclusões presentes nas rodas durante a inspeção das mesmas.

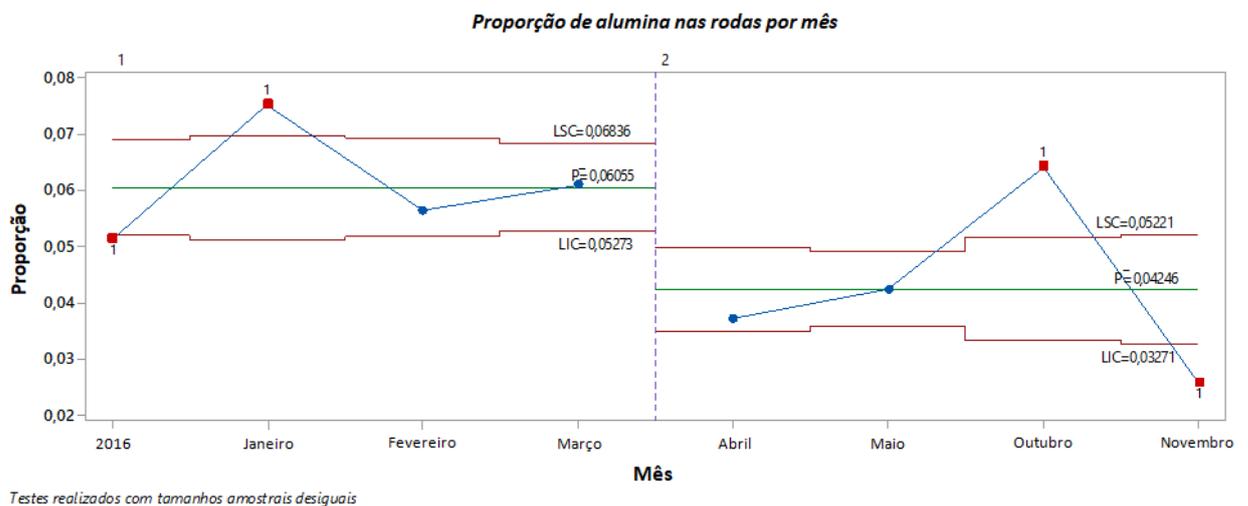


Figura 6.5: Gráfico da proporção de inclusões de alumina nas rodas por mês (figura fornecida pelo cliente).

No gráfico pode ser notada a redução na proporção de inclusões de 0,06% em março com o revestimento antigo de AMC para 0,04% em abril, quando foi realizada a alteração dos materiais dos revestimentos para tijolos MC, isso porque os tijolos MC na

linha de metal, que sofreram desgaste e corrosão, não possuem alumina na sua composição, assim reduzindo a possibilidade da aparição das inclusões deste elemento nas rodas.

Visto a melhoria da concentração das inclusões durante a utilização do novo balanceamento qualitativo a empresa reduziu os valores de controle. E mesmo existindo picos nos valores das proporções em outubro, o mesmo foi dentro dos valores antigos de controle da empresa.

Para Ekberg e Kabo (2005, *apud* OLIVEIRA, 2013) as trincas subsuperficiais se iniciam abaixo da superfície de rolamento da roda e tem a sua origem em vazios ou em inclusões, que funcionam como concentradores de tensão, sendo assim com a redução da quantidade de inclusões nas rodas se reduz também o número de concentradores de tensão dentro da roda.

7 CONCLUSÃO

Conclui-se que a alteração do revestimento acarretou em uma redução do número de inclusões, diminuindo a média de 0,06% para 0,04%, aproximadamente, por mês.

Após a medição do remanescente do revestimento foi concluído que os materiais empregados tem uma grande eficiência para esta função, tendo uma redução de no máximo 21mm (de 114mm para 93mm no teste na linha de escória) no tempo de uma semana, podendo ser prolongado o seu uso em caso de uma emergência, e mostrando que a quantidade de inclusões está diretamente relacionada ao desgaste do revestimento.

Na linha de escória o material MC apresentou menor desgaste, tendo assim um melhor rendimento comparado aos AMC, porém o custo-benefício do tijolo AMC foi aceitável para o cliente e continuará a ser utilizado na região.

Recomenda-se que a empresa altere apenas os tijolos da linha de metal, sendo eles do “pé de banho” até a 4ª fiada da panela, e manter o restante dos tijolos já utilizados. Resultando em um revestimento de trabalho composto de AMC no fundo da panela e linha de escória e de MC do “pé de banho” até a 4ª fiada (linha de metal).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

ALEGRE, P. **Identificação e avaliação dos mecanismos de ataque da escória SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO em tijolos refratários de MgO-C.** *Matéria*, v. 13, n. 1, p. 56–64, 2008.

ANDRADE, F. **Comparativo entre tijolos MgO-C e dolomítico para aplicação no revestimento refratário da panela para a fabricação de aços de construção mecânica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

DUARTE, A.K. **Mecanismos gerais de desgaste em refratários.** Seminário ABM Refratários para siderurgia, Belo Horizonte, p. 77-96, mar. 2000.

EKBERG, A.; KABO, E. **Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview.** *Wear*, v. 258, n. 7-8, p. 1288–1300, 2005.

FERREIRA, J. P. **Estudo dos desgastes de refratários dolomíticos aplicados em painéis de aço na produção de aços ao carbono.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

GUAGLIANO, M.; PAU, M. **Analysis of internal cracks in railway wheels under experimentally determined pressure distributions.** *Tribology International*, v. 40, n. 7, p. 1147–1160, 2007.

HANDA, K.; MORIMOTO, F. **Influence of wheel/rail tangential traction force on thermal cracking of railway wheels.** *Wear*, v. 289, p. 112–118, 2012.

IISI - International Iron and Steel Institute Visto em: <www.iisi.com> em 15 de junho de 2009 por ARNDRADE, 2009.

INFOMET. **Inclusões não metálicas em aços.** Infomet. 1998. Visto em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo.php?codAssunto=121>> em julho de 2019.

LEE, W.E, ZHANG, S. **Direct and Indirect slag corrosion of oxide and oxide-carbon refractories.** VII International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

LEITE, F. C.; LUZ, A. P.; PANDOLFELLI, V. C. **Características e mecanismos de desgaste dos refratários MgO-C usados na linha de escória de painéis de aço.** *Cerâmica*, v. 60, p. 348–365, 2014.

LIU, Y.; STRATMAN, B.; MAHADEVAN, S. **Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels.** *International Journal of Fatigue*, v. 28, n. 7, p. 747–756, 2006.

LUZ, A.P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. **Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários.** *Cerâmica*, v. 54, p. 174–183, 2008.

OLIVEIRA, S. P., **Escórias e Mecanismos de Desgaste de Refratários para Forno Panela**. Em: Curso sobre Fundamentos, Operación y Refractories Para Horno Cucharas, ALAFAR, San Nicolas, Argentina, 1997.

QUINTELA, M. A.; MELO, T. M. F.; LAGE, I. J.; PANDONFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. **Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono**. Cerâmica, v. 47, n. 304, p. 174–179, 2001.

RIBEIRO, D. B. e SAMPAIO, R.S., **Refino Secundário dos Aços**. São Paulo, ABM, 1996.

OLIVEIRA, L. G. D. E. **Influência do processo de fabricação no comportamento mecânico de rodas ferroviárias**. Universidade Estadual Paulista, 2013.

PÖTSCHKE, J.; ROUTSCHKA, G. **Properties and corrosion of alumina-magnesia-carbon refractories**. Millennium Steel, p. 128–132, 2004.

YOUNG, J., CAMERON, S. SCHADE, H., **Clean Steel Systems for Ladle and Tundish Operation**. USA: Iron and Steel Society, 1999.

ZERBST, U.; MADLER, K.; HINTZE, H. **Fracture Mechanics in railway application—an overview**. Engineering Fracture Mechanics, v.72, issue 2, p.163-194, Jan. 2005.