



**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**



**“INFLUÊNCIA DO REFRÁTÁRIO NA DISPONIBILIDADE DO  
DESGASEIFICADOR RH”**

**Gustavo Fernando Ribeiro Rodrigues**

**Ouro Preto, 26 de outubro de 2022**

**Gustavo Fernando Ribeiro Rodrigues**

**“Influência do refratário na disponibilidade do desgaseificador RH”**

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. Johne Jesus Mol Peixoto**

**Ouro Preto, 26 de outubro de 2022.**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE  
MATERIAIS



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Gustavo Fernando Ribeiro Rodrigues**

**Influência do refratário na disponibilidade do desgaseificador RH**

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

Aprovada em 26 de outubro de 2022

Membros da banca

DSc. - Johne Jesus do Mol Peixoto - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)

PhD. - Carlos Antônio da Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

MSc. - Antônio Marlon Barros Silva - (Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais/Campus Ouro Branco)

Johne Jesus Mol Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/10/2022, às 14:27, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0419927** e o código CRC **11636BAD**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.014819/2022-65

SEI nº 0419927

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163  
Telefone: 3135591561 - www.ufop.br

## RESUMO

O equipamento de refino secundário desgaseificador RH produz aços de elevada qualidade. Em função da demanda diária de uma aciaria, é fundamental aumentar a disponibilidade do equipamento a fim de alcançar uma maior produtividade da planta. Diante disso, com o estudo das variáveis que afetam o refratário do equipamento, pode-se definir as consequências operacionais que cada variável isoladamente provoca no revestimento refratário. Esse estudo teve por objetivo adquirir conhecimento sobre os fatores que resultam em um desgaste prematuro do material refratário do desgaseificador RH. O desgaste prematuro impacta na produção e na segurança da aciaria. Ademais, através da revisão da literatura sobre modelos de previsibilidade obteve-se os principais parâmetros que podem auxiliar na proposição de um modelo de controle e monitoramento do refratário do desgaseificador a fim de auxiliar em tomadas de decisão, que aumentem a segurança operacional e a vida do refratário, impactando positivamente nos resultados. Sugere-se utilizar modelos de controle e previsibilidade baseados na técnica do modelo estatístico de previsibilidade, aliado a um estudo *in loco* do efeito das variáveis de processo para ajuste dos pesos utilizados para cada variável do modelo.

**Palavras-chave:** Desgaseificador RH. Refratários. Mecanismos de desgaste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de um desgaseificador RH. ....	9
Figura 3.1. Regiões do reator RH.....	13
Figura 3.2. Divisão das partes integrantes do desgaseificador RH. ....	14
Figura 3.3. Corrosão acentuada devido escória no vaso inferior. ....	16
Figura 3.4. Perfil de desgaste típico de vaso inferior. ....	16
Figura 3.5. Variação da composição da escória de RH ao longo do tempo de tratamento. ....	17
Figura 3. 6. Estrutura de um desgaseificador RH . ....	19
Figura 3.7. Comparação entre real e previsto da duração em minutos do refratário de um distribuidor. ....	22
Figura 3.8. Resultados do Controle Manual e Automático de troca do vaso. ....	24
Figura 3.9. Perfil de desgaste do vaso de um desgaseificador RH.....	25
Figura 3.10. Mapa de interpolação do desgaste do refratário. ....	25
Figura 3.11. Distribuição de temperatura ao longo da carcaça do desgaseificador RH.....	26
Figura 3.12. Comparação do desgaste dos tijolos refratários medido e previsto por MLP e LP. ....	27

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Resumo dos mecanismos de desgaste do refratário do desgaseificador RH.....	28
Tabela 2. Resumo dos modelos de previsibilidade da vida útil do refratário. ....	29

## LISTA DE SÍMBOLOS

$z$  - profundidade de penetração da escória (m)

$r$  - raio do capilar (m)

$\theta$  - ângulo de contato ( $^{\circ}$ )

$\gamma_{LV}$  - tensão superficial da escória (N/m)

$\eta_L$  - viscosidade da escória (Pa.s)

$t$  - tempo (s)

## **LISTA DE SIGLAS**

RH – Ruhrstahl Heraeus

## SUMÁRIO

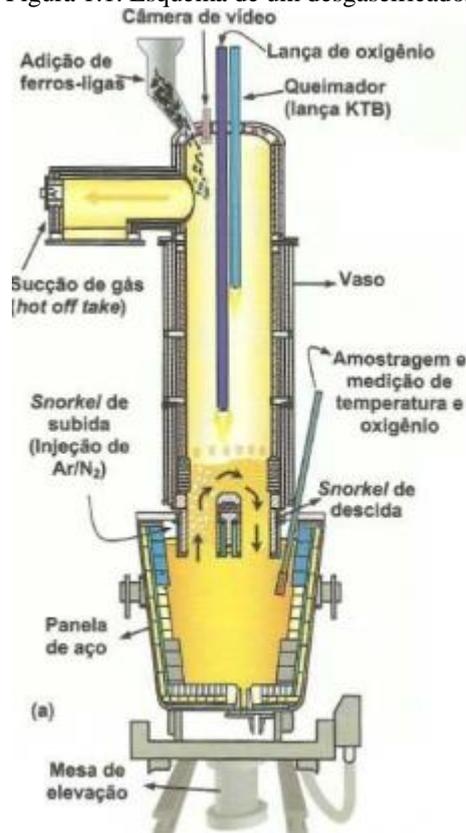
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
2.1    Objetivo Geral .....	11
2.2    Objetivos Específicos .....	11
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
3.1    Refratários do desgaseificador RH .....	12
3.2    Mecanismos de desgaste do refratário .....	14
3.2.1    Corrosão e erosão dos tijolos refratários .....	15
3.2.2    Trincamento térmico, trincamento mecânico e outras variáveis.....	19
3.3    Modelos de previsibilidade da vida útil do refratário do desgaseificador RH .....	21
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>28</b>
<b>5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>31</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de desgaseificação a vácuo com recirculação de aço, processo RH, é uma técnica recente se comparada aos outros processos siderúrgicos. Em 1957, um modelo de desgaseificador foi desenvolvido por Lorenz. O nome RH vem das iniciais dos nomes da Usina Ruhrstahl Heinrichshutte em Hattingem e da Companhia Heraeus onde foram realizados testes em modelos físicos na patente de A. Lorenz. O equipamento piloto foi lançado após pesquisas das empresas Heraeus e Thyssen em 1958, entrando em operação em 1959 (NEVES, 2008).

Da década de 1950 até atualmente, o processo de desgaseificação a vácuo RH foi se alterando conforme as exigências de produção mundial. Nos dias atuais, o mercado mundial de aço exige cada vez mais aços com menores teores de hidrogênio e nitrogênio, maior limpidez dos aços, isto é, uma maior remoção de inclusões, e menor dispersão química. Nesse contexto, o equipamento de refino secundário dos aços, desgaseificador RH, tem papel fundamental, visto que devido às condições de pressão de vácuo e taxa de circulação, o equipamento favorece o processo de retirada de gases dos aços. Além disso, devido ao processo eficiente de recirculação do aço nesse equipamento, a limpeza dos aços e a homogeneização da composição química é muito bem realizada. O desgaseificador RH, Figura 1.1, também proporciona descarburização, desoxidação e aquecimento dos aços. Com o aumento da produção de aço mundial, e com as necessidades de faixa de composição química mais estreita e maior limpidez dos aços, a disponibilidade do desgaseificador RH deve ser aumentada, permitindo alcançar essas exigências. Essa disponibilidade está inteiramente ligada ao aumento da vida útil do refratário do RH, pois uma troca precoce do refratário proporciona um tempo de parada da produção e conseqüentemente uma perda financeira, decorrente da elevação de custos de produção, pelo fato do refratário ter uma vida estimada e caso ocorra uma retirada precoce, haverá aumento do custo com aquisição de materiais. A vida útil do refratário se torna extremamente importante em usinas siderúrgicas que possuem somente uma unidade de desgaseificador RH, pois uma troca do vaso do RH demanda muitas horas de parada e conseqüentemente perda de produção. Um modelo estatístico de previsibilidade da condição do refratário por meio de fatores que influenciam o desgaste refratário pode auxiliar em manutenções planejadas resultando em um aumento da produção e melhoria do processo (VIERTAUER, *et al.*, 2019).

Figura 1.1. Esquema de um desgaseificador.



Fonte: RIZZO, 2006 *apud* MORALES, 2008.

Além de um modelo estatístico que possa prever condições do refratário, é de grande importância controlar as variáveis no tratamento do aço que possam desgastar prematuramente os tijolos refratários do equipamento. Conforme Maranhão (2011), existem algumas questões que precisam ser avaliadas para otimizar a vida do material refratário, que financeiramente possui um custo elevado. Essas variáveis são tempo de circulação do aço líquido no interior do vaso, volume do oxigênio soprado tanto para aquecimento químico, quanto para aquecimento do vaso refratado, quantidade de adições de alumínio, ferro silício e outras ligas, volume de escória inicial e taxa de circulação do aço.

O número de corridas por dia tratadas no RH também influencia à durabilidade de seus revestimentos refratários, assim como a sequência de corridas aquecidas e o tempo de tratamento do aço caso seja elevado, 35min. - 45min. Além disso, em caso de produtividade pequena na rota RH, o refratário pode sofrer choque térmico quando utilizado (BUHR, 1999).

Com o controle dessas variáveis e com um modelo estatístico de previsibilidade é possível estudar e verificar ações para um possível aumento da disponibilidade do desgaseificador RH. Diante disso, visa-se um estudo da literatura sobre o refratário do equipamento buscando referências bibliográficas que possam contribuir para identificação de parâmetros que mais afetam o desgaste de refratário além de possibilidades de monitoramento de controle destas variáveis, de modo a alcançar um aumento da disponibilidade do equipamento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Através de revisão da literatura, foram analisadas as possibilidades de aumentar a disponibilidade do desgaseificador RH com foco no estudo do refratário do equipamento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Comparar modelos probabilísticos de previsibilidade do refratário do equipamento;
- Estudar como algumas variáveis podem influenciar no desgaste prematuro do refratário do RH;
- Descrever os mecanismos de desgaste dos tijolos refratários;
- Sintetizar a influência das variáveis e dos modelos probabilísticos no aumento da disponibilidade do equipamento.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo da revisão bibliográfica é compreender e analisar através do estudo da literatura a influência das variáveis nos mecanismos de desgaste do refratário. Ademais, a revisão bibliográfica introduz conceitos importante sobre o processo de tratamento a vácuo no desgaseificador RH, auxiliando no entendimento do aumento da disponibilidade do equipamento. Por fim, é fundamental verificar na literatura quais os parâmetros fundamentais que integram modelos de previsibilidade da vida do refratário.

#### 3.1 Refratários do desgaseificador RH

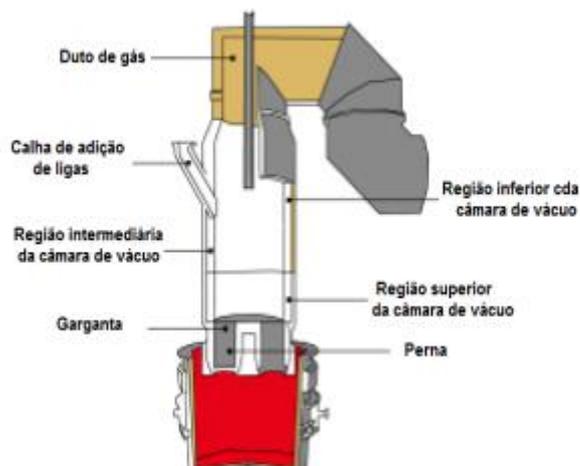
Os materiais refratários são muito importantes na indústria do aço. São utilizados para proteger estruturas e equipamentos além de servir como isolamento térmico. O material ideal para cada aplicação depende da segurança, eficiência energética, impacto ambiental, qualidade do produto e custos (OLIVEIRA, RODRIGUES e PEREIRA, 2018).

Os materiais refratários aplicados nas diferentes regiões do RH são os seguintes:

- Duto de gás e calha de adição de ligas: Tijolo de magnésia-cromita ligado diretamente, tijolo de magnésia-carbono com baixo teor de carbono e refratários moldáveis com altos teores de alumina;
- Região superior e intermediária da câmara de vácuo: Tijolo de magnésia-cromita semiligado e tijolo de magnésia-carbono com baixo teor de carbono;
- Região inferior da câmara de vácuo: tijolo de magnésia-cromita religado e tijolo de magnésia-carbono com baixo teor de carbono;
- Pernas (*snorkel*): Tijolo de magnésia-cromita religado, tijolo de magnésia-carbono com baixo teor de carbono e refratário moldável de espinélio-alumina fundida;
- Garganta (região imediatamente superior ao *snorkel*): Tijolo de magnésia-cromita religado e tijolo de magnésia-carbono com baixo teor de carbono.

Essas classificações fazem parte de um modelo em que cada parte integrante do equipamento, Figura 3.1, possui tijolos refratários específicos (YANMU, 2018 *apud* MELO, 2019).

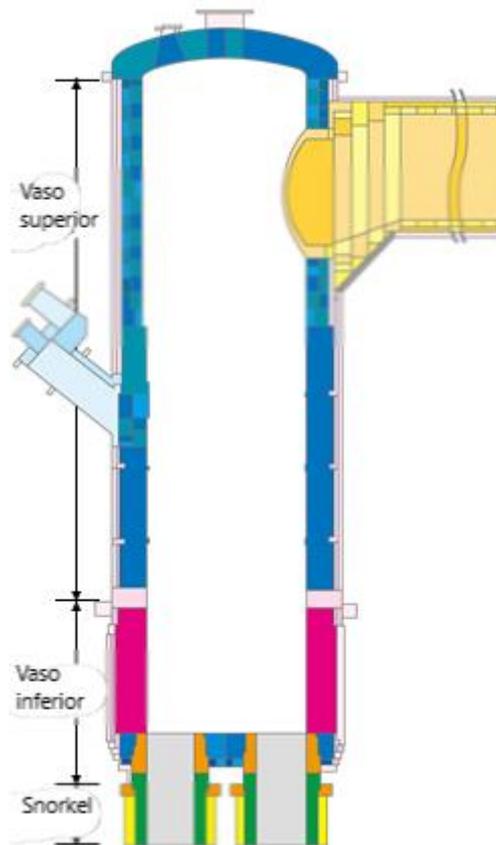
Figura 3.1. Regiões do reator RH



Fonte: YANMU, 2018 *apud* MELO, 2019.

De modo geral, os tijolos refratários do desgaseificador RH, compostos geralmente de magnésia-cromita e magnésia-carbono, devem ser resistentes termicamente, resistentes a elevada erosão ocasionada pela circulação do aço líquido e precisam suportar o ataque químico de escórias ácidas que contém um alto teor de óxido de ferro. Afetada pelas situações acima, a vida média do revestimento refratário do RH se divide em partes, Figura 3.2, na qual o *snorkel* possui uma vida média de 150 corridas, o vaso inferior possui uma vida média de 450 corridas e o vaso superior possui uma vida média de 3500 corridas (BUHR, 1999). Já Andersen, Schimidt e Van der Laan (2003) citam que a vida média do vaso superior, vaso inferior e *snorkel* são respectivamente 2000 corridas, 650 corridas e 150 corridas.

Figura 3.2. Divisão das partes integrantes do desgaseificador RH.



Fonte: Adaptado de Almeida (2012).

Há divergências quanto a vida média do refratário das partes integrantes do equipamento. Mas, em comparação ao vaso inferior e ao vaso superior, segundo a literatura, a vida média dos tijolos refratários do *snorkel* é a menor. Isso representa um impacto maior na disponibilidade do equipamento de tratamento a vácuo RH, visto que o revestimento refratário dessa parte é trocado com um número de tratamentos inferior ao das outras partes. Porém, é fundamental estudar os mecanismos de desgaste do refratário e suas variáveis em todas as partes do equipamento com o objetivo de evitar a troca prematura do refratário.

### 3.2 Mecanismos de desgaste do refratário

Kumayasu (2016) menciona várias classificações dos mecanismos de desgaste do refratário magnésia-cromita do desgaseificador RH:

- Corrosão: Ocorrem reações químicas de alguns óxidos ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ , etc.) com o revestimento refratário, resultando em dissolução e eluição de parte dos tijolos;

- Erosão: Ocasionalada pelo fluxo de aço e escória. Os danos são ocasionados pela abrasão da superfície quente (superfície interna do refratário);
- Trincamento estrutural: Ocorre infiltração de escória nos tijolos, deterioração e densificação do lado da superfície quente. Ocorre também início de trincas onde ocorreu a infiltração e/ou na face traseira. Além disso, esfoliação;
- Trincamento térmico: Os mecanismos são choque térmico, ampliação da tensão térmica, trincas e esfoliação;
- Trincamento mecânico: Expansão, deformação do revestimento do aço, ampliação da tensão mecânica, trincas e esfoliação.

Em casos de tijolos magnésia-carbono, é acrescentado a essas classificações o desgaste da oxidação do carbono. O aumento de teor de cromita no revestimento minimiza os efeitos de corrosão, mas diminui a resistência térmica do refratário. No geral, esse aumento não otimiza a durabilidade do refratário.

Já Andersen, Schimidt e Van der Laan (2003) dividem os mecanismos de desgaste do refratário por parte integrante do equipamento. Para eles, o vaso superior sofre corrosão e erosão acima do duto de exaustão, devido a fusão do “cascão”, material solidificado resultante da corrida anterior que se acumula no vaso inferior. No vaso inferior, há a erosão sobre a garganta devido à circulação do aço. E as pernas sofrem ataque corrosivo de escórias além da erosão ocasionada pela circulação do aço. Em seu trabalho, há também alguns fatores que influenciam no desgaste do refratário como condições de processo, tipo de material dos refratários e microestrutura dos tijolos.

### **3.2.1 Corrosão e erosão dos tijolos refratários**

A corrosão dos tijolos refratários é o desgaste contínuo devido a interação química do aço ou escória com o revestimento protetor. Já a erosão é a interação física desses fluidos com os tijolos refratários promovendo também um desgaste contínuo.

De acordo com Lima, Ramos e Galesi (2019), a parte inferior do vaso sofre maior desgaste por estar em contato com a escória. O lado direito dessa parte, vide Figura 3.3, possui maior contato com escória e sofre maior turbulência pois é localizada acima da perna de descida do aço líquido, podendo assim acentuar o desgaste por erosão e corrosão. Um outro fator de desgaste localizado do refratário no vaso inferior, é a utilização do oxigênio para aquecer a corrida através da reação exotérmica de aluminotermia, Equação

3.1. O oxigênio aumenta o desgaste na parede proporcionalmente ao seu consumo, Figura 3.4. Esta figura também mostra que com a adesão de metal no refratário, o desgaste ocorre de forma mais extensa a partir do metal aderido.

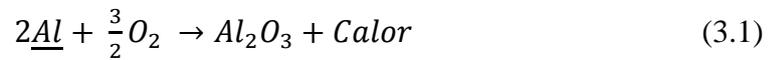
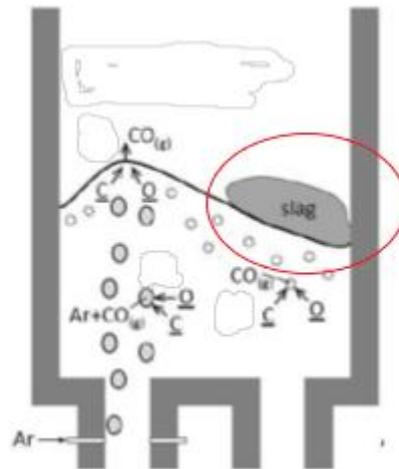


Figura 3. 3. Corrosão acentuada devido escória no vaso inferior.



Fonte: Adaptado de Lima, Ramos e Galesi (2019).

Figura 3. 4 Perfil de desgaste típico de vaso inferior.

Original	RH	RH-OTB		
	Sem sopro de O <sub>2</sub>	Pouco Oxigênio	Muito Oxigênio	Adesão de metal
-	Desgaste suave	Desgaste suave	Desgaste local no merisco	Desgaste abaixo da adesão

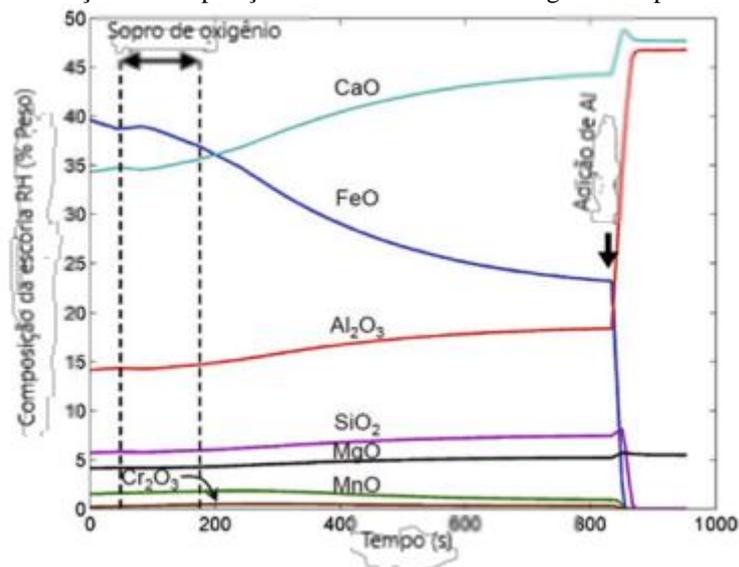
Fonte: Adaptado de Lima, Ramos e Galesi (2019).

Kumayasu (2016) cita também que a parte inferior do vaso é a mais desgastada. Mas para ele, esse maior desgaste é ocasionado pela circulação do aço e pela oxidação devido ao sopro de oxigênio. Acima do nível de aço ocorre a oxidação de elementos como Fe, Al, Si e Mn. Esses óxidos devido ao sopro, respingam na parede do refratário, infiltrando-se

e promovendo um composto de baixo ponto de fusão, resultando na corrosão do revestimento e desgaste estrutural. Essa situação pode explicar o porquê de o desgaste da parede aumentar proporcionalmente com o consumo de oxigênio pelo sopro. Esses respingos podem ocorrer também devido a adição de material em pó. Uma outra situação ocorrida pela aluminotermia, é a elevação da temperatura local do refratário, ocasionando em furos. Kumuyasu (2016) cita também que a taxa de operação (sequencial de corridas) do equipamento é muito importante para evitar choque térmico porque uma produção mais contínua evita o resfriamento do refratário e mudanças bruscas na temperatura do revestimento.

Lima, Ramos e Galesi (2019) também explicam que esse processo de sopro de oxigênio para promover a aluminotermia resulta na oxidação de alguns elementos como o Fe, formando FeO. Segundo ele, esse óxido, assim como outros óxidos, influencia significativamente na corrosão do refratário. Esse FeO da escória também é proveniente da fusão do “cascão”. O FeO na presença de CaO e SiO<sub>2</sub>, se liga aos tijolos de magnésia cromita formando um composto de baixo ponto de fusão sendo um mecanismo para desgaste do revestimento. Durante os primeiros 15 minutos de tratamento, o teor de FeO na escória é alto, o que propicia o maior desgaste do refratário. Após a adição de alumínio, o teor de FeO cai consideravelmente, Figura 3.5, devido a redução do ferro e oxidação do alumínio. Esse elevado desgaste no início pode ser explicado pela alta fluidez da escória devido a quantidade significativa de FeO. Com isso, o potencial de penetração da escória nos poros dos tijolos é aumentado.

Figura 3. 5 Variação da composição da escória de RH ao longo do tempo de tratamento.



Fonte: Adaptado de Biswas e Sarkar (2020).

Uma redução desses poros pode evitar a penetração da escória minimizando o processo de corrosão pela escória. Entretanto, essa redução dos poros pode afetar no mecanismo de desgaste de choque térmico, aumentando o stress térmico. Ou seja, essa redução não é aconselhada. Outra variável que afeta na infiltração da escória nos poros do refratário é a temperatura (BRAGANÇA, 2012).

Segundo Silva e Silva (2022), a equação da profundidade, dada pela Equação 3.2, é uma equação que resulta de um balanço de forças macroscópicas (peso, força capilar e resistência viscosa) que atuam sobre a coluna de escória na qual têm-se  $z$  a profundidade de penetração da escória,  $r$  o raio do capilar,  $\theta$  o ângulo de contato,  $\gamma_{LV}$  a tensão superficial da escória,  $\eta_L$  a viscosidade da escória e  $t$  o tempo, e espera-se que a diminuição da temperatura afete muito mais a viscosidade (aumento da viscosidade) do que a tensão superficial. A escória penetra no poro através das forças peso e gravidade. O obstáculo à penetração é o atrito viscoso.

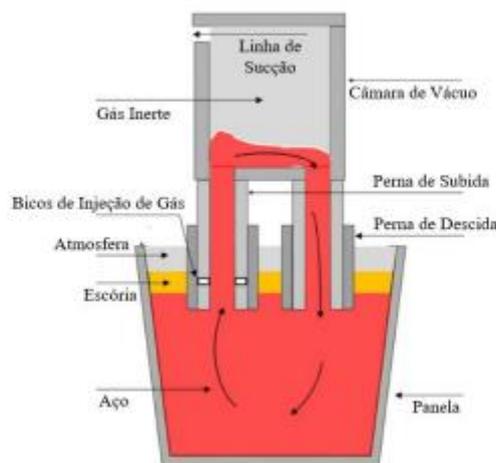
$$z^2 = (2 r \cos \theta) \left( \frac{\gamma_{LV}}{\eta_L} \right) t \quad (3.2)$$

Com a diminuição da temperatura, há a diminuição da penetração da escória e por consequência a redução da intensidade da corrosão. Já o aumento da temperatura facilita a penetração da escória devido a sua maior fluidez. Com essa fluidez, a dissolução do refratário na escória é favorecida. Mas, se essa dissolução promover uma maior viscosidade da escória, haverá uma maior dificuldade de transporte de massa da escória. Caso a dissolução, promova uma maior fluidez da escória, a tendência é intensificar o processo de corrosão e erosão. Portanto, a alteração da temperatura de acordo com a composição do soluto pode afetar significativamente a corrosão. Já a presença de carbono na composição do refratário é outra variável significativa porque o aumento do teor desse elemento minimiza o processo de corrosão, pois o carbono diminui a molhabilidade da escória através do aumento do ângulo de contato  $\theta$  (BRAGANÇA, 2012).

O mecanismo de desgaste do refratário por erosão é o principal causador da diminuição da vida do vaso inferior. Esse mecanismo está ligado a taxa de circulação do aço. O degaseificador RH possui uma perna de subida com bicos de injeção de gás divididos igualmente que propiciam o arraste do aço líquido para a câmara de vácuo. A Figura 3.6

mostra esses bicos de injeção de gás. Através de modelo físico e matemático conclui-se que o maior desgaste ocorrido por erosão é na parte da perna de subida (maiores tensões de cisalhamento). Acima da perna de descida o desgaste por erosão não é acentuado. Além disso, quanto maior a vazão de gás injetado maior é o desgaste por erosão devido ao aumento da taxa de circulação (MELO, 2019).

Figura 3. 6. Estrutura de um degaseificador RH.



Fonte: CHEN e HE, 2018 *apud* MELO, 2019.

Andersen, Schimidt e Van der Laan (2003) citam que a taxa de circulação propicia a erosão e influencia no processo de corrosão. Com a movimentação do aço, o metal líquido incorpora os grãos de refratários soltos pelo processo de corrosão. Com isso, uma nova parte do refratário estará exposta aos mecanismos de desgaste.

### 3.2.2 Trincamento térmico, trincamento mecânico e outras variáveis

A nucleação de trincas na estrutura dos tijolos refratários pode ser resultante de processos mecânicos ou térmicos. Com relação ao trincamento térmico, vários mecanismos podem existir resultando em um maior desgaste do refratário. A face quente é a exposta ao banho metálico. Como o revestimento possui uma espessura, à medida que se afasta da face quente a temperatura diminui. Essa situação promove um gradiente térmico. Esse gradiente é responsável por muitas situações de trincamento térmico. Tanto no aquecimento para a utilização do equipamento, quanto no aquecimento devido a temperatura do aço ou escória, somente a parte da face quente é exposta a maior temperatura. Esse aquecimento brusco pode promover o surgimento de trincas ou

simplesmente lascrar a face quente, expondo novas superfícies ao desgaste. Ou seja, a tendência é a espessura do refratário diminuir podendo levar o equipamento ao avermelhamento da carcaça. Mas por outro lado, quanto menor a espessura dos tijolos, menor é o gradiente térmico e menor o desgaste do revestimento refratário por nucleação de trincas térmicas. Em produção com pequenos sequenciais de corridas, o aquecimento e resfriamento recorrente do equipamento podem levar a nucleação de trincas no refratário devido à expansão no aquecimento e contração no resfriamento. Devido à baixa tenacidade, uma simples trinca no refratário pode levar o mesmo à fratura. Um outro papel importante que os tijolos devem possuir para evitar a nucleação de trincas é a resistência mecânica. Os tijolos devem suportar o peso dos tijolos acima além do peso do aço líquido e da escória. Ademais, é importante uma boa colocação dos tijolos no momento da construção do refratário além da instalação de juntas de dilatação evitando assim tensões que possam trincar os tijolos refratários levando-os à fratura (FERREIRA, 2010).

Bharati *et al.* (2019) discutem como o tratamento de aço elétrico no desgaseificador RH pode afetar a vida útil do refratário. Segundo eles, durante a fusão de “cascão” ocorre a volatilização da cromita em refratários de magnésia-cromita. O resultado disso é a nucleação de trincas nos tijolos. Ademais, devido a ser um aço com um teor maior de Al e Si, esses elementos reduzem a cromita para Cr metálico, removendo a ligação magnésia-cromita, nucleando trincas. Através de melhorias de manutenção e da operação de fusão do “cascão” podem ser evitados esses problemas.

Por fim, existem algumas variáveis externas ao tratamento do aço no desgaseificador RH que podem contribuir para o desgaste prematuro da vida do vaso como painéis de ciclo vencidas e/ou de aquecedor, alto tempo entre o vazamento no refino primário ao início do tratamento no RH, excesso de escória passante no vazamento no refino primário e por último a logística do lingotamento contínuo de pedir temperaturas mais altas para fazer “pulmão” e evitar quebras de sequência de lingotamento (MARANHÃO, 2011).

Com o conhecimento dos impactos gerados de algumas variáveis de processo no refratário do desgaseificador RH, é possível criar modelos de previsibilidade a partir dessas variáveis.

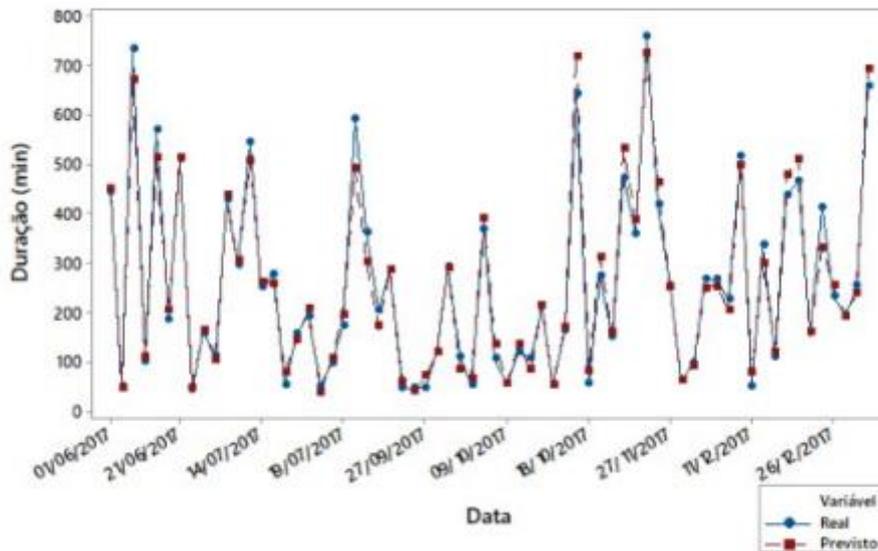
### 3.3 Modelos de previsibilidade da vida útil do refratário do desgaseificador RH

Nos dias atuais, as indústrias siderúrgicas buscam uma maior produção em um curto intervalo de tempo possibilitando assim a confiança dos clientes e um maior mercado. Diante disso, para potencializar os lucros, um dos critérios que uma siderúrgica necessita atender é o da disponibilidade do equipamento. Portanto, a excelência da manutenção é algo primordial para manter essa disponibilidade. A manutenção é classificada em preventiva (reduz ou evita a falha), preditiva (é realizada conforme o estado do equipamento) e corretiva (ocorre após a falha). A programação da manutenção através da análise de dados dos equipamentos é importante para que a manutenção ocorra de forma organizada. Sendo assim, através desses dados e outros métodos, é possível estabelecer modelos de previsibilidade da vida útil do refratário com o objetivo de prever o estado do refratário do equipamento, podendo efetuar planejamento de manutenção no refratário. No caso da ação corretiva, caso não exista planejamento, a equipe não estará preparada para efetuar o serviço de manutenção. Quando isso ocorre, o resultado é um alto custo pela perda de produção devido a parada do equipamento e pelos custos de manutenção inesperada (GUIMARÃES e DONADELI, 2019).

O planejamento da vida do refratário do desgaseificador RH é importantíssimo para que não haja essa perda de produção devido à parada inesperada do equipamento. Baesso (2018), em seu trabalho sobre prever a vida útil dos refratários de um distribuidor de lingotamento contínuo, definiu algumas variáveis de entrada em um modelo de regressão. De modo geral, esse modelo é o desenvolvimento de uma função matemática que correlaciona as variáveis existentes no processo com a durabilidade do refratário, a fim de que seja possível tomar decisões. As variáveis estudadas foram velocidade de lingotamento, temperatura do aço líquido, composição química do aço e produtividade de lingotamento. De forma análoga, no desgaseificador RH, as variáveis velocidade de lingotamento e produtividade de lingotamento poderiam ser taxa de circulação e número de corridas por dia, respectivamente. Essa analogia pode ser feita porque segundo o autor, a velocidade de lingotamento afeta a erosão e a produtividade de lingotamento impacta na duração dos tijolos refratários. Após a definição das variáveis, definiu-se os métodos para ajuste e definição da função preditiva: *stepwise* e *backward elimination*. Esses métodos são métodos iterativos. Já o método de validação do modelo foi realizado com a inserção dos dados de processo na equação estimada pelo modelo com o objetivo de se encontrar os valores estipulados. Com a comparação do real e previsto, Figura 3.7, pôde-

se observar que essas variáveis de entrada são significativas para prever a vida do refratário e que o modelo é assertivo.

Figura 3. 7 Comparação entre real e previsto da duração em minutos do refratário de um distribuidor.



Fonte: Baesso (2018).

Uma alternativa para se verificar a espessura residual do refratário é através de um ensaio não destrutivo. Em um Alto-Forno, assim como no desgaseificador RH, a elevada produção ocasiona um desgaste excessivo do revestimento refratário. Sadri *et al.* (2016) estudaram como monitorar o desgaste do refratário na sola do Alto-forno através de um ensaio não destrutivo a fim de se obter ações de manutenção para criar proteção refratária, ou retardar o desgaste dos revestimentos. Essas ações têm por objetivo garantir a disponibilidade do equipamento e a segurança operacional. Assim como no desgaseificador RH, o desgaste químico e térmico também está presente nos Altos-Fornos. O método utilizado de ensaio não destrutivo é o *Acoustic Ultrasonic Echo* (AU-E). Essa tecnologia propaga ondas de choque com o objetivo de se obter a espessura dos tijolos refratários. Além disso, com essa técnica, consegue-se obter informações a respeito de trincas e poros preenchidos por metal. O funcionamento da técnica é baseado em uma onda mecânica que choca com a superfície do refratário gerando um pulso de tensão. A onda reflete, mas também se propaga nas camadas refratárias tijolo/tijolo, tijolo/gás,

tijolo/metal líquido. As ondas de compressão são absorvidas pelo refletor para obter-se uma análise da espessura e características do refratário. No desgaseificador RH essa técnica poderia ser utilizada possibilitando realizar inspeções contínuas e periódicas a fim de auxiliar em decisões operacionais.

De forma também estatística, Maranhão (2011) previu o desgaste do refratário na linha da escória do desgaseificador RH. Seu trabalho focou na linha de escória porque o equipamento estudado sofria com o avermelhamento da carcaça metálica devido principalmente pelo alto tempo de processo, elevada utilização de aquecimento químico e pelas adições de Alumínio e FeSi. Com isso, o vaso inferior era trocado precocemente. Inicialmente, a troca do vaso acontecia quando o equipamento atingia o tempo acumulado de 3500min. de tratamento. Com a implementação do algoritmo de previsibilidade do perfil de desgaste do refratário baseado no volume de oxigênio, tempo de processo, adição de alumínio e adição de silício definiu-se que o tempo de corrida não fosse superior a 60min. porque um tempo de tratamento maior diminuiria a campanha do vaso inferior. Os resultados da implementação do algoritmo foram:

1. Aumento de 87 corridas/vaso para 110 corridas/vaso;
2. Aumento da disponibilidade do desgaseificador RH estudado passando de 179 corridas/mês para 390 corridas/mês, possibilitando assim dois recordes de corridas mensal na empresa.

Esse trabalho foi importante para reduzir ocorrências de afastamento de vaso por furo, o que proporcionou à empresa uma maior segurança operacional, Figura 3.8. Além disso, ficou mais fácil de se programar rotas devido ao conhecimento da previsibilidade de quando o desgaseificador RH ficaria indisponível. Um resultado fundamental do algoritmo, Figura 3.8, foi evitar trocas precoce do vaso por decisão operacional, reduzindo, assim, gastos (MARANHÃO, 2011).

Figura 3. 8 Resultados do Controle Manual e Automático de troca do vaso.

<b>Resultados pelo Controle Manual</b>			
Período de operação	Número do Vaso	Vida Snorkel	Motivo do Afastamento
26/01/2009 à 25/02/2009	05/B	89 cor/2917 min	Decisão operacional, potencial para maior nº cor
09/02/2009 à 26/02/2009	02/A	89 cor/2822 min	Furou na altura da 1ª cinta inferior lado Sul
28/02/2009 a 09/03/2009	01/A	80 cor/2616 min	Avermelhou carcaça lado leste e oeste altura da 18ª fiada de trabalho
26/02/2009 a 15/04/2009	06/B	70 cor/ 2.879min	Furo altura 9ª fiada lado sul
01/05/2009 a 11/05/2009	04/B	88cor/3.043min	Decisão operacional, potencial para maior nº cor
05/05/2009 a 28/05/2009	01/A	96cor/3439min	Vida útil
14/05/2009 a 21/07/2009	02/B	96 cor/3109min	Vida útil
01/06/2009 a 06/07/2009	06/A	98cor/3493 min	Decisão operacional, potencial para maior nº cor
<b>Resultados pelo Controle Automático</b>			
05/08/2009 a 13/08/2009	04/B	114 cor/3922min	Final de vida útil
24/08/2009 a 05/09/2009	01/A	116 cor/3138min	Final de vida útil
13/08/2009 a 23/08/2009	06/B	121 cor/3720min	Final de vida útil
27/08/2009 a 12/09/2009	03/B	103cor/3425min	Final de vida útil
08/09/2009 a 23/09/2009	02/A	104cor/3690min	Final de vida útil
27/09/2009 A 13/10/2009	01/A	112 cor/3178 min	Final de vida útil.
18/10/2009 A 27/10/2009	02/A	101 corr/3407 min	Decisão operacional - final de vida útil

Fonte: Maranhão (2011).

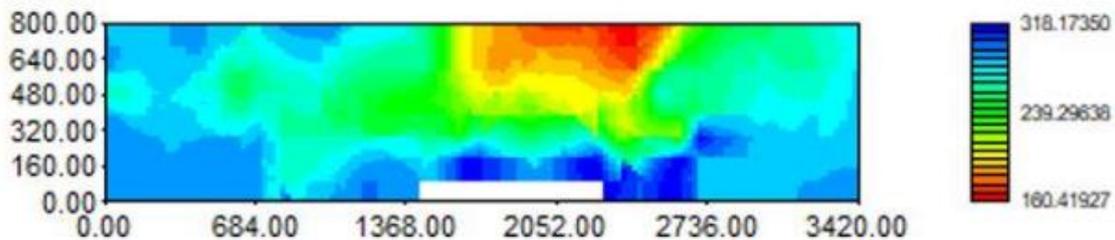
Lima, Ramos e Galesi (2019) citam que é necessário verificar as regiões de maior desgaste do refratário para que se consiga tomar decisões. Para isso, ele utiliza Geoestatística para estimar um modelo espacial do perfil de desgaste. A Geoestatística, por meio de um software, gera um mapa através da interpolação de um número razoável de amostras feitas em campo. Essas amostras são medições da espessura do refratário após o fim de vida útil dos tijolos refratários. Essas medições foram efetuadas nas juntas dos tijolos com o auxílio de uma fita metálica após 124 corridas. Os autores verificaram que o maior desgaste ocorria na parte direita, Figura 3.9. Segundo eles, esse resultado pode ter ocorrido devido ao entupimento de bicos durante a campanha do equipamento, incidindo o fluxo de aço líquido para o lado direito, promovendo um maior desgaste nessa região. Após a amostragem, fez-se a coleta de dados e a interpolação gerando um mapa completo do desgaste. A validação do modelo foi feita através de correlação linear comparando-se o previsto e o real obtendo-se um coeficiente de 0,87. O mapa gerado, Figura 3.10, na qual, o eixo das abscissas indica a localização, e o eixo das ordenadas a espessura, foi importante para tomar-se decisões a fim de planejar-se melhorias para se manter um fluxo mais simétrico dentro do reator.

Figura 3. 9. Perfil de desgaste do vaso de um Desgaseificador RH



Fonte: por Lima, Ramos e Galesi (2019).

Figura 3. 10. Mapa de interpolação do desgaste do refratário.

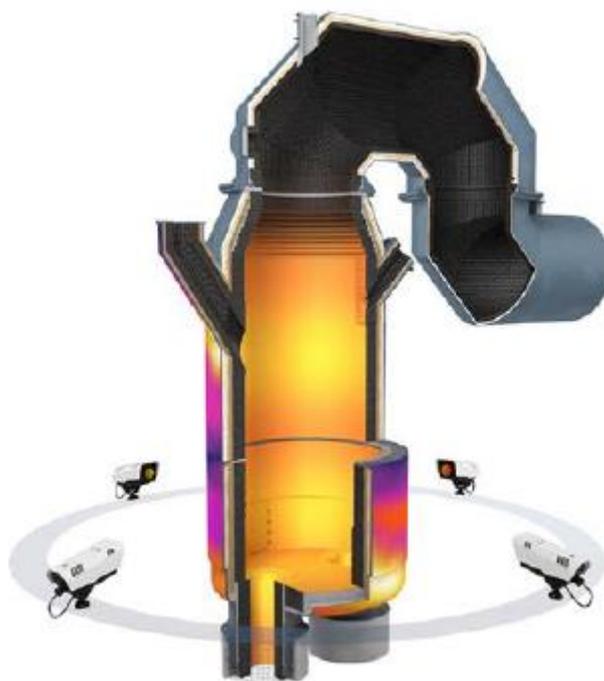


Fonte: Lima, Ramos e Galesi (2019).

Viertauer *et al.* (2018) citam que o controle de previsibilidade da vida do refratário pode ser determinado através do monitoramento de parâmetros de processo com base em análise de imagens e algoritmos. Esses mecanismos auxiliam na decisão de trocar ou não o refratário do vaso. Desde a década de 1980, 1990, termopares e laser são utilizados para obter dados de temperatura e espessura dos tijolos refratários, respectivamente. No caso do laser, as medições de espessura ocorrem como uma espécie de varredura ao longo dos revestimentos resultando em análises instantânea da situação da espessura dos refratários. As medições de temperaturas servem para o operador verificar pontos quentes no revestimento, além de servirem de combinação com dados de processo para serem variáveis de entrada em um algoritmo de previsibilidade. Logo, o controle da temperatura

serve como fonte de decisão imediata, no caso do operador, e como fonte de decisão de médio e ou longo prazo para os engenheiros de processo. As medições de temperatura podem ser feitas através de câmeras IR, na qual se obtém um perfil de temperatura da parte externa do desgaseificador RH, vide Figura 3.11.

Figura 3. 11. Distribuição de temperatura ao longo da carcaça do desgaseificador RH feita por câmeras IR



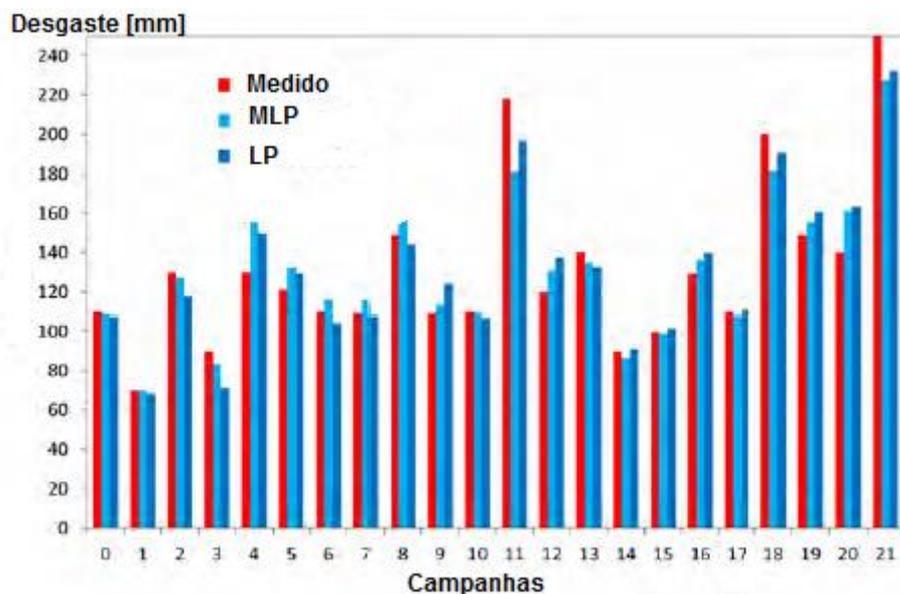
Fonte: VIERTAUER, *et al.*, 2018.

Segundo os autores, os pontos quentes podem ser resultado de fusão de “cascão” pela lança de oxigênio e também por menores espessuras do refratário, o que resultaria no aumento do aporte calorífico na carcaça do equipamento. As medições de temperatura, dados de processo (tempo de corrida, consumo de oxigênio...) e de *post mortem* são variáveis de entrada para o algoritmo gerar um relatório de previsibilidade a fim de se definir situação atual do revestimento, cronograma de manutenção, ações corretivas, tempos de operação...

Um modelo estatístico de previsibilidade do refratário do desgaseificador RH também pode proporcionar um cronograma de manutenção e ações corretivas através de 110 parâmetros de processo armazenados no sistema nível 2, para cada campanha do refratário. O início da campanha ocorre com a montagem dos refratários e o fim da campanha ocorre com a retirada dos refratários. O fim da campanha é marcado também

pela realização do *post mortem*. Os dados obtidos de espessura residual dos tijolos no *post mortem* são fundamentais para o modelo estatístico, além dos 110 parâmetros de processo (consumos, adições, temperaturas, tempos...). É importante ressaltar que houve um método específico para a medição da espessura: foram divididos em 8 setores a parte inferior do vaso do equipamento para se realizar a medição. Para cada setor, mediu-se a espessura mínima. Após isso, houve o tratamento de dados, removendo-se os *outliers*. Com essas medições pôde-se ver pontos quentes na qual o refratário estava mais desgastado. O tratamento de dados também foi feito para os parâmetros de processo. Seguindo da limpeza de dados discrepantes desenvolveu-se um modelo estatístico que resultou na variável resposta “desgaste máximo” em função dos parâmetros de processo. Esse modelo de previsibilidade foi desenvolvido através de uma regressão linear (LP) e de redes neurais (MLP) que são funções geralmente não lineares e que combinam diversos pesos aos parâmetros a fim de se alcançar um melhor ajuste da variável resposta. Ambas previsões foram validadas em 21 campanhas obtendo-se um bom resultado em relação ao desgaste medido com um erro de 10mm, Figura 3.12 (VIERTAUER, *et al.*, 2019).

Figura 3. 12. Comparação do desgaste dos tijolos refratário medido e previsto por MLP e LP.



Fonte: Adaptado de Viertauer, *et al.* (2019).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o estudo aprofundado das variáveis que afetam os principais mecanismos de desgastes dos tijolos refratários do desgaseificador RH foi possível realizar uma análise de algumas variáveis operacionais que impactam no desgaste prematuro do refratário, conforme Tabela 1. Essas variáveis foram analisadas de forma isolada. Para reduzir a ocorrência de certos mecanismos de desgaste, alterações de processo podem auxiliar em reduzir o desgaste prematuro do revestimento. Com o estudo dessas variáveis e com o auxílio de algum dos modelos de previsibilidade, vide Tabela 2, pode-se alcançar um melhor conhecimento das condições do revestimento refratário do equipamento, realizar o planejamento adequado para a manutenção do equipamento, evitando-se uma troca prematura. Além disso, por meio da Tabela 2, é possível verificar que parâmetros como temperatura, composição química do aço e da escória, medição da espessura residual dos tijolos, adições realizadas e volume de oxigênio soprado são fundamentais para a proposição de um modelo de controle e previsibilidade da vida do refratário do desgaseificador RH. A partir de um modelo de controle e alterações no processo, é possível aumentar a disponibilidade do equipamento, reduzindo os custos em manutenção do refratário e aumentando a produtividade da empresa na rota RH. Ademais, é possível obter-se também uma maior segurança na operação do reator evitando catástrofes como o furo na carcaça do equipamento.

Tabela 1. Resumo dos mecanismos de desgaste do refratário do desgaseificador RH.

Mecanismos de desgaste do refratário	Ocorrências	Fonte
<b>Corrosão e Erosão</b>	Interface escória/refratário acima da perna de descida	Lima, Ramos e Galesi (2019).
	Sopro de oxigênio gerando respingos que penetram nos poros dos refratários	Lima, Ramos e Galesi (2019).
	Turbulência acima da perna de descida	Lima, Ramos e Galesi (2019).
	Adição de material em pó gerando respingos que penetram nos poros dos refratários	Kumayasu (2016).
	Teor de FeO da escória aumentando a fluidez e a capacidade de penetração nos poros	Kumayasu (2016).
	Aumento de temperatura facilitando a penetração de escória nos poros devido à diminuição da viscosidade.	Bragança (2012).
	O soluto (material refratário) dissolvido na escória, dependendo da composição química, pode aumentar ou reduzir a viscosidade da escória e consequentemente alterar a sua capacidade de penetração	Bragança (2012).

	Baixo teor de C do material refratário aumentando a molhabilidade da escória	Bragança (2012).
	Variação da taxa de circulação	Melo (2019).
<b>Trincamento térmico</b>	Aluminotermia promovendo aquecimento excessivo localizado	Lima, Ramos e Galesi (2019).
	Variação da taxa de operação	Kumayasu (2016).
	Volatilização da cromita durante aquecimento localizado nos refratários magnésia-cromita	Bharati <i>et al.</i> (2019).
	Elevada espessura dos tijolos resultando em elevado gradiente térmico	Ferreira (2010).
<b>Trincamento mecânico</b>	Má colocação dos tijolos refratários	Ferreira (2010).
	Baixa resistência mecânica dos tijolos refratários	Ferreira (2010).
	Redução da cromita por Al ou Si nucleando trincas nos refratários magnésia-cromita	Bharati <i>et al.</i> (2019).
<b>Logística</b>	Paneles de ciclo vencidas e/ou de aquecedor alterando condições de transferência de calor	Maranhão (2011).
	Alto tempo entre vazamento no refino primário e início de tratamento no refino secundário	Maranhão (2011).
	Excesso de escória passante no vazamento do refino primário	Maranhão (2011).
	Necessidade de aquecimento no RH para evitar quebra de sequência de lingotamento ("pulmão")	Maranhão (2011).

Fonte: Autor.

Tabela 2. Resumo dos Modelos de previsibilidade da vida útil do refratário.

<b>Modelos de previsibilidade da vida útil do refratário</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Observação</b>	<b>Fonte</b>
<b>Modelo de regressão multivariada</b>	Taxa de circulação, Temperatura do aço líquido, composição química do aço e número de tratamentos por dia	É uma função matemática que correlaciona os parâmetros com a durabilidade do refratário. Foi validado através de comparação entre o previsto e o real.	Baesso (2018)
<b>Algoritmo de previsibilidade do perfil de desgaste do refratário</b>	Volume de oxigênio, tempo de processo, adição de alumínio e adição de silício	O trabalho resultou na imposição de que o tempo de corrida não ultrapassasse de 60min. Obteve bons resultados como recordes de número de corridas por vaso na empresa.	Maranhão (2011)
<b>Modelo espacial do perfil de desgaste</b>	Medição da espessura residual dos tijolos refratários	A medição espacial é através de Geoestatística. Pôde-se observar assimetria do fluxo resultando em um desgaste mais acentuado no lado direito do vaso.	Lima, Ramos e Galesi (2019)

<p><b>Modelo estatístico de previsibilidade</b></p>	<p>110 parâmetros de processo (consumos, adições, temperaturas, tempos...) e espessura residual dos tijolos realizada no <i>post mortem</i></p>	<p>O modelo foi criado com base em dois métodos: regressão linear e redes neurais. Ambos obtiveram bons resultados. Foram validados em 21 campanhas com comparação com desgaste medido.</p>	<p>Viertauer <i>et al.</i> (2019)</p>
<p><b>Ensaio não destrutivo</b> <i>Acoustic Ultrasonic Echo</i></p>	<p>Medição da espessura residual dos tijolos refratários</p>	<p>Com a aplicação da técnica, consegue-se obter informações a respeito da espessura, trincas e aderência de material nos tijolos refratários.</p>	<p>Sadri <i>et al.</i> (2016)</p>

Fonte: Autor.

O modelo espacial do perfil de desgaste, e o ensaio não destrutivo *Acoustic Ultrasonic Echo* são técnicas de medição da espessura. Tem a vantagem de detectar a espessura real do revestimento e, portanto, do grau de desgaste. Porém, destacam-se como desvantagens paradas para realizar medição de espessura do revestimento, custos dos equipamentos e softwares envolvidos na técnica. A menos que os dados determinados por estas técnicas sejam incorporados num modelo envolvendo dados de processo, não é possível controlar o desgaste com base nos mecanismos de desgaste citados anteriormente. Essa desvantagem é prejudicial em tomadas de decisão pois não é possível controlar o desgaste através de alterações das variáveis de processo.

O modelo de regressão multivariada apresentado por Baesso (2018) possui falhas, como a não inserção da variável de processo volume de oxigênio soprado. Como visto anteriormente, essa variável é significativa nos mecanismos de desgaste como corrosão e erosão. Desta forma antevê-se que a proposta de Baesso (2018) pode ser melhorada.

O algoritmo de previsibilidade do perfil de desgaste do refratário e o modelo estatístico de previsibilidade, apresentados por Maranhão (2011) e Viertauer *et al.* (2019), respectivamente, foram testados na indústria alcançando bons resultados. Entretanto, apesar sua aplicação ter levado a conquista de recordes na empresa, o trabalho apresentado por Maranhão (2011), pode ser considerado limitado, por não incluir dados *post mortem* da distribuição do desgaste dos refratários. Essa análise é imprescindível para que sejam verificadas áreas do reator em que o desgaste foi acentuado, o que deve incluir as alterações físicas e químicas nos tijolos.

Sugere-se utilizar modelos de controle e previsibilidade baseados em técnicas estatísticas. Modelos estatísticos (redes neurais, por exemplo), baseado em funções não lineares, levam em conta a inserção de pesos a cada variável e dados *post mortem* como o apresentado por Viertauer *et al.* (2019). Sendo assim, sugere-se realizar um estudo mais aprofundado nas variáveis de processo para se determinar as variáveis mais significativas no desgaste prematuro do refratário, com o intuito de inserir o peso correto às principais variáveis de processo.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. Desgaseificadores à vácuo – RH. **Aciaria News**. 2012. Disponível em: <http://aciarianews.blogspot.com/2012/12/desgaseificadores-vacu-rh.html>. Acesso em: 23 abr. 2022.

ANDERSEN, F.; SCHMIDT, A.; VAN DER LAAN, S. **RH Degassers; Evaluation and Ranking of Eco-Refractories**. Corus Research Development & Technology, IJmuiden: 2003, 4p.

BAESSO, D. R. **A utilização de modelos de regressão multivariada para a predição da duração da campanha dos refratários de uma empresa siderúrgica do estado de Minas Gerais**. 2018. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia de Produção – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG, Brasil, 2018.

BHARATI, S.; JOSHI, H.; PRAKASH, P.; HITTALAMANI, B. K.; VISHWANATH, S. Enhancement of RH Refractory Performance for Electrical Steel Processing. In: ASSOCIATION FOR IRON & STEEL TECHNOLOGY, 2019, Pittsburgh, Pensilvânia, Estados Unidos da América. **Proceedings of Iron & Steel Technology Conference**, 2019, p.2835-2841.

BISWAS, S.; SARKAR, D. **Introduction to Refractories for Iron – and Steelmaking**. Cham: Springer, 2020. 469p.

BRAGANÇA, S. R. Corrosão de refratários utilizados na siderurgia. Parte II: propriedades físicas dos refratários e fatores operacionais. **Cerâmica**, v.58, n.348, p.459-464, 2012.

BUHR, A. Refractories for Steel Secondary Metallurgy. **CN-Refractories**. Frankfurt: 1999, p.19-30.

CHEN, G.; HE, S. Circulation flow rate and decarburization in the RH degasser under low atmospheric pressure. **Vacuum**. Elsevier, 2018, p.132-138.

FERREIRA, J. P. **Estudo dos desgastes de refratários dolomíticos aplicados em painéis de aço na produção de aços ao carbono**. 2010. 85f. Dissertação. Mestrado em

Engenharia Metalúrgica e de Minas – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010.

GUIMARÃES, I. F. G.; DONADELI, A. L. Princípios básicos da gestão manutenção aplicados em uma usina siderúrgica. In: XXXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2019, Santos, Brasil. **Anais [...]** 2019, p.1-18.

KUMAYASU, T. Damage of Refractories in Secondary Steel-Refining. **Journal of the Technical Association of Refractories**. Okayama: 2016, p.158-164.

LIMA, H. A. A.; RAMOS, V. P. S.; GALES, D. F. Avaliação do desgaste refratário do RH utilizando Geoestatística. In: ABM WEEK 2019, 5ª edição, São Paulo, Brasil. **Anais do 50º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos**. São Paulo: 2019, p.1-10.

MARANHÃO, E. A. Sistema de controle automático da vida do vaso do RH de Cubatão. **EAM Assessoria e Treinamento no Processo Industrial e Segurança do Trabalho**. 2011. Disponível em: <https://eam2016freelancer.wixsite.com/edilsonalvesmaranhao/artigo-vida-do-vaso-inferior-em-um->. Acesso em: 23 abr. 2022.

MELO, P. H. R. V. **A influência da assimetria de fluxo no desgaste de refratário na câmara de vácuo de um reator RH**. 2019. 77f. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2019.

MORALES, B. B. **Simulação numérica do escoamento em modelo físico da estação de refino secundário RH**. 2008. 97f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2008.

NEVES, L. **Avaliação dos efeitos da injeção de gás na câmara de vácuo do modelo físico de um desgaseificador RH**. 2008. 119f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2008.

OLIVEIRA, R. L. G.; RODRIGUES, J. P. C.; PEREIRA, J. M. Aplicações industriais de cerâmicas refratárias: estado da arte. In: 6AS JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS URBANOS – 1AS JORNADAS DE PROTEÇÃO CIVIL, 2018, Coimbra, Portugal. **Anais [...]**, 2018, p.93-100.

RIZZO, E. M. S. **Introdução ao refino secundário dos aços**. São Paulo: Blucher, 2006. 102p.

SADRI, A.; FILATOV, S.; KURUNOV, I.; GORDON, Y.; YING, W. L.; ERSKINE, J. Monitoramento e controle de desgaste do refratário para operações contínuas de alto-forno. In: ABM WEEK 2016, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais do 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro**. Rio de Janeiro: 2016, p.78-89.

SILVA, C. A.; SILVA, I. A. Introdução aos diagramas de fases de sistemas metalúrgicos. **Osculante**, versão 1.6, p.55-60, 2022.

VIERTAUER, A.; LAMMER, G.; BLOEMER, P.; GANTNER, A.; VIERTAUER, M. G. Refractory Condition Monitoring and Lifetime Prognosis. In: ASSOCIATION FOR IRON & STEEL TECHNOLOGY, 2018, Pittsburgh, Pensilvânia, Estados Unidos da América. **Proceedings of Iron & Steel Technology Conference**, 2018.

VIERTAUER, A.; MUTSAM, N.; PERNKOPF, F.; GANTNER, A.; GRIMM, G.; WINKLER, W.; LAMMER, G.; RATZ, A. Refractory Condition Monitoring and Lifetime Prognosis for RH Degasser. In: ASSOCIATION FOR IRON & STEEL TECHNOLOGY, 2019, Pittsburgh, Pensilvânia, Estados Unidos da América. **Proceedings of Iron & Steel Technology Conference**, 2019, p.1081-1089.

YANMU. RH/DH Vacuum Degasser. **Yanmu Refractories For You**. Disponível em: [http://yanmu.de/PRODUCT/liangangyongnaihuyuanliao/RH\\_DH\\_Vacuum\\_De/](http://yanmu.de/PRODUCT/liangangyongnaihuyuanliao/RH_DH_Vacuum_De/).