

## AValiação DO DEsgaste REFRatário DO RH UTILIZANDO GEOESTATÍSTICA \*

*Haysler Apolinário Amoroso Lima<sup>1</sup>  
Vladnilson Peter de Souza Ramos<sup>2</sup>  
Douglas Fernando Galesi<sup>3</sup>*

### Resumo

A busca de novos produtos de maior valor agregado, tem incentivado a produção via sistemas de desgaseificação. Estes equipamentos em especial o RH, propicia altas taxas de descarburização e deshidrogenação, agregando valor ao aço produzido. A engenharia por trás destes equipamentos é de vital importância para o bom desempenho operacional, garantindo produtividade e segurança. Compreender os mecanismos de desgaste do equipamento nos auxilia na tomada de decisão, reforçando regiões de maior desgaste. Para isso medir com precisão o perfil de desgaste, é uma tarefa de vital importância para o sucesso do projeto. Neste trabalho elaborou-se um modelo espacial para estimação do desgaste do RH usando ferramentas da Geoestatística. Através de coletas de alguns pontos foi possível criar um mapa do desgaste estimando valores para as demais regiões. Também foi foco neste estudo analisar a influência do entupimento dos bicos na taxa de circulação do aço e influencia na erosão da parede refratária.

**Palavras-chave:** Desgaseificador RH; Desgaste refratário e Geoestatística.

### REFRACTORY WEAR EVALUATION IN RH DEGASSER USING GEOSTATISTICS

#### Abstract

The search for new higher added value products has encouraged the production via degassing systems. This equipment, RH Degasser in particular, provides high rates of decarburization and dehydrogenation, adding value to the steel produced. The engineering behind this equipment is very important for optimum operational performance, ensuring productivity and safety. Understanding the wear mechanisms of the equipment helps us the decision-making, reinforcing regions of big wear. Accurate measurement of the wear profile is vital for the success of the project. In this work, a spatial model was developed to estimate the wear of RH using Geostatistics tools. Through collection of some points, a map of the wear was created, which allows us to estimate values for other regions. The focus of this study was also to analyze the influence of nozzle clogging on the rate of steel circulation and on the erosion of the refractory wall.

**Keywords:** RH Degasser, Refractory Wear and Geostatistics.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Engenharia de Aplicação, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Químico, Gerente Técnico, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro de Materiais, Gerente de Aplicação e Desenvolvimento, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos processos de refino secundário, destaca-se o Desgaseificador RH. O RH tem a função de promover a eliminação de elementos indesejáveis ao aço, tais como carbono, hidrogênio e nitrogênio. O processo consiste em circular o aço dentro de um recipiente (vaso do RH) através de um vácuo e posterior injeção de argônio na perna de subida. O RH é um equipamento constituído por uma carcaça metálica, revestido internamente de refratários a base de MgO-C e MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A parte inferior que entra em contato com o aço, apresenta duas pernas refratárias por onde o aço circula. A perna de subida, contém em seu interior bicos para a injeção de argônio. Na descida o aço passa pelo efeito da gravidade.

O processo RH consiste na circulação contínua do aço através de um recipiente revestido com refratários, o qual ocorre um vácuo interno. Esta circulação é feita através de duas pernas (snorkel) que são imersas no aço líquido dentro da panela de aço. Ao reduzir a pressão interna (vácuo) a própria pressão atmosférica irá empurrar o aço para dentro do vaso, subindo mais ou menos 1,5 metros. A figura 1 abaixo mostra como é feito este processo de enchimento do RH.

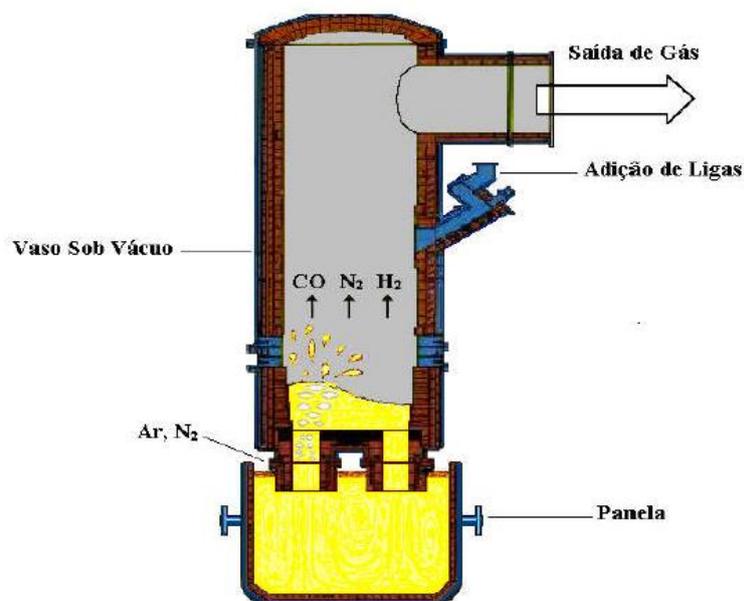


Figura 1 – Esquema do RH funcionando (Almeida et al 2005)

Durante a operação do RH, ocorre o desgaste do refratário, que se dá por vários motivos. Compreender tais mecanismos, é de vital importância para prever e aumentar o desempenho do equipamento, garantindo segurança operacional e produtividade.

Atualmente é feito a medição do desgaste após sua operação, via método manual. Através da sondagem de alguns pontos críticos, traça-se o perfil de desgaste aproximado. Devido à dificuldade de coletar em mais pontos, tem-se um perfil não representativo do desgaste.

## 1.1 Mecanismos de Desgaste

A Figura 2 mostra as reações internas no Degaseificador RH.

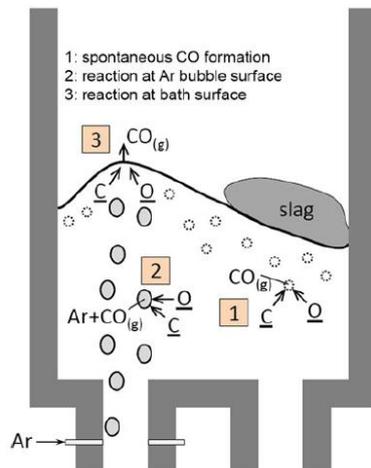


Figura 2 - Principais reações no Degaseificador RH (Ende et al, 2011)

A temperatura da superfície aço líquido aumenta devido à reação exotérmica de oxidação do alumínio (aluminotermia). Outros mecanismos agem concomitantemente, e principalmente a oxidação do banho, gerando  $\text{FeO}$  ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Esses óxidos de caráter ácidos contribuem significativamente para a corrosão do refratário.

A parte inferior do vaso, que fica em contato com a escória sofre o desgaste mais severo. A região da parede do vaso inferior lado perna de descida tem o agravante de acumular mais escória, assim como ser atingida por maior turbulência.

Para operações com injeção de  $\text{O}_2$  o desgaste das paredes tende a ter um perfil de desgaste localizado e aumenta conforme o aumento do uso de oxigênio. A Figura 3 ilustra os diferentes perfis de desgaste.

Original	RH	RH-OTB		
	without $\text{O}_2$ blow	Low Oxygen	High Oxygen	Metal adhesion
-	Smooth damage	Smooth damage	Local damage at meniscus	Damage at lower part of metal

Figura 3 - Perfil de desgaste típico de vaso inferior (Adaptado Shinagawa report, 2018)

Outro fator importante para a deterioração do revestimento refratário é a ciclagem térmica. Vasos de RH possuem baixa variação térmica quando comparado a outros equipamentos, porém o dano ao refratário é bastante significativo nos materiais convencionais empregados para RH.

## 1.2 Geoestatística – Modelagem Espacial

A Geoestatística ou estatística espacial é a área da ciência que procura correlacionar variáveis no espaço a fim de estimar novos pontos através de pontos observados. Parte do princípio de que observações coletadas nas proximidades devem ser mais semelhantes do que aquelas coletadas em pontos mais distantes e leva em consideração o comportamento estrutural das variáveis observadas.

A Geoestatística teve início na área da mineração, com o objetivo de estimar com precisão os teores minerais de uma jazida a partir de alguns pontos de coleta. Foram desenvolvidos a parte teórica por Georges Matheron na França no início dos anos 60. A Geoestatística está fundamentada na Teoria das Variáveis Regionalizadas, proposta por Matheron que baseou nos estudos empíricos de Daniel G. Krige, que era o engenheiro de minas responsável pela exploração de Ouro na África do Sul.

Devido ao seu potencial de aplicação, a Geoestatística tomou novos rumos além da lavra e prospecção, tais como: agricultura de precisão, cartografia, climatologia, geotecnia, hidrogeologia, análise espacial de crimes, epidemiologia, etc.

A Geoestatística consegue gerar mapas de dados a partir de uma pequena amostra de medições, o qual este mapa seja uma representação confiável da realidade. A figura 4 mostra um sistema de medições (amostras) e o resulta interpolado.

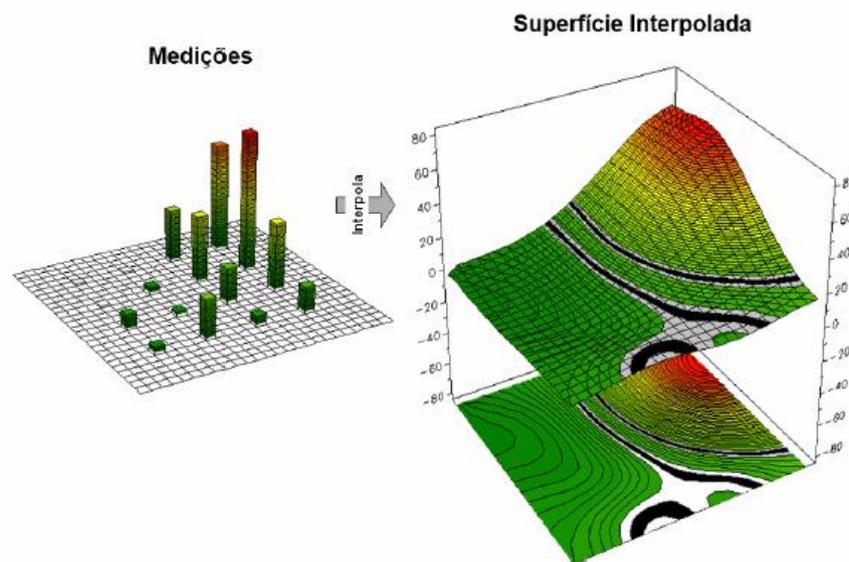


Figura 4 – Modelos de previsão por Geoestatística (Berry, 2007)

### 1.3 Influencia do Entupimento dos Bicos – Desgaste localizado

O aumento do número de bicos favorece a taxa de circulação até certo valor, pois com o aumento ocorre interferência dos bicos nos demais. Silva et al (2004) estudando um modelo físico na escala 1:5, avaliaram a influência do entupimento dos bicos na taxa de circulação.

Através de estudo de bloqueio simétrico e outro assimétrico, obtiveram diferenças na taxa de circulação. No equipamento utilizado, tem 2 níveis de bicos, totalizando 16 bicos de injeção.

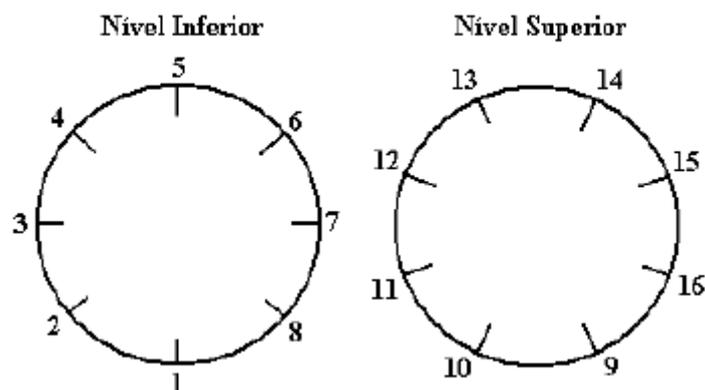


Figura 5 – Bloqueio simétrico (2, 4, 6, 8, 9, 11, 13 e 15) e Bloqueio Assimétrico (1, 6, 7, 8, 9, 14, 15 e 16)

Para o bloqueio simétrico foi observada uma pequena redução da taxa de circulação a partir de 200NI/min. Já no caso assimétrico houve uma redução de 50% da taxa de circulação.

Neste trabalho foi formulada a hipótese de que se houver uma modificação do fluxo do aço pela perna de subida. Devido ao entupimento dos bicos, dependendo do perfil (simétrico ou assimétrico), teremos um direcionamento irregular do fluxo do aço na parede. A princípio se houver um fluxo uniforme (simétrico) o jato tende bater no centro da parede (ponto 0). Se houver uma mudança do fluxo, poderemos ter uma assimetria do desgaste da parede.

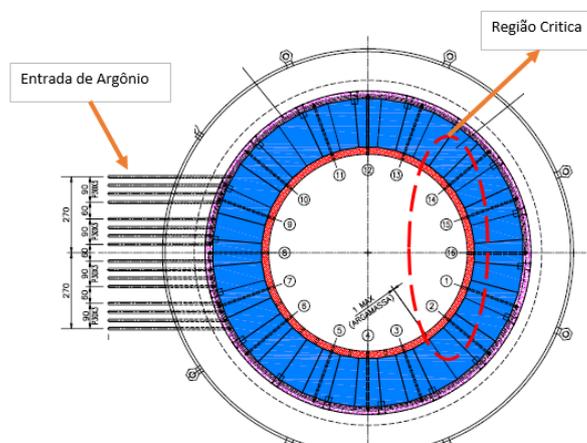


Figura 6 – Sistema de tubos de injeção de argônio na perna de subida (Saint-Gobain, 2018).

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

Para avaliar o perfil de desgaste da parede do vaso do RH, iniciou-se com a coleta de dados locais após encerramento do equipamento. Para isso, mediu com auxílio de uma fita metálica de 1 mm de espessura através das juntas abertas dos tijolos. Como não é possível medir uma malha regular, registrou-se a espessura e a posição no eixo xy, marcando com etiquetas no local para visualização.



Figura 7 – Medição das espessuras dentro do vaso RH

#### 2.1.1 Modelo espacial para o desgaste do RH

O foco deste trabalho foi a modelagem espacial do desgaste para a região da parede do vaso interno do RH. O conjunto de dados amostrados, foram os usados na medição do perfil de desgaste da parede.

O modelo geoestatístico é feito com o software Geovisual da empresa Geokrigagem.

A Krigagem é um procedimento para estimar pontos da variável de interesse, a partir de amostras coletadas no espaço observado. Este processo além de estimar valores “incógnitas”, também fornece o erro da estimativa. A partir da análise do semivariograma, obtêm-se os pesos de cada amostra coletada, sendo que estas variam de acordo com a posição geográfica distância e localização (Landin, 2006).

Segundo Yamamoto e Landim (2015) o uso das ferramentas de Geoestatísticas (krigagem) garante um maior acerto em relação a outros processos de interpolação, já que faz uso de semivariogramas dos dados. O semivariograma leva em consideração a distância entre pontos, efeito pepita, amplitude dos dados e a presença de anisotropia.

Os modelos de semivariograma são construídos através dos dados experimentais (dados observados), através da expressão abaixo:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i)^2$$

Onde:  $\gamma(h)$  é função semivariância e  $n$  é número de pares de pontos separados pelo vetor  $h$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Perfil de Desgaste do RH

Após 124 corridas, fez-se o perfil de desgaste real da parede. Pela foto abaixo (figura 8) percebe o desgaste irregular da parede, tendendo mais para o lado direito.



Figura 8 – Perfil de Desgaste do vaso RH

Durante a campanha deste vaso, ocorreu o entupimento dos bicos. O entupimento foi mais no lado oposto a entrada dos bicos, ou seja, comprovando a hipótese de que os tubos mais longos, tendem a ter uma maior perda de carga. Foi nítido que o fluxo mudou, incidindo mais no lado direito do painel. Este tipo de desgaste localizado, mostra que temos perfil anisotrópico de desgaste, o que pode ser avaliado por ferramentas geoestatísticas para inferir o mapa de desgaste com um menor erro possível.

A análise comparativa entre regiões para a mesma altura, considerando o ponto central do mapa, como o ponto simétrico teórico de incidência do jato durante a circulação. Separando em dois quadrantes (Quadrante esquerdo e direito), tem-se a velocidade de desgaste por região.

O quadrante direito, obteve um residual mínimo de 160 e velocidade de desgaste 1,53 mm/corrída, contra 230 mm de residual com velocidade de desgaste de 0,97 mm/corrída para o quadrante esquerdo. Uma diferença de 57%.

### 3.2. Resultado do Modelo Geoestatístico

Através dos dados coletados de desgaste, correlacionados com a posição no eixo xy, fez-se o tratamento dos dados pelo software Geovisual.

#### 3.2.1 Modelo Variográfico

A figura 9 mostra o modelo do semivariograma espacial do desgaste do RH. O melhor modelo de ajuste foi o esférico. O efeito pepita considerado foi de 150, o modelo apresentou duas direções, sendo direção N-S (azimute 0°) e L-O (azimute 90°). Percebe-se que a direção N-S apresentou maior variância em relação a L-O, o que mostra um fenômeno de anisotropia associado.

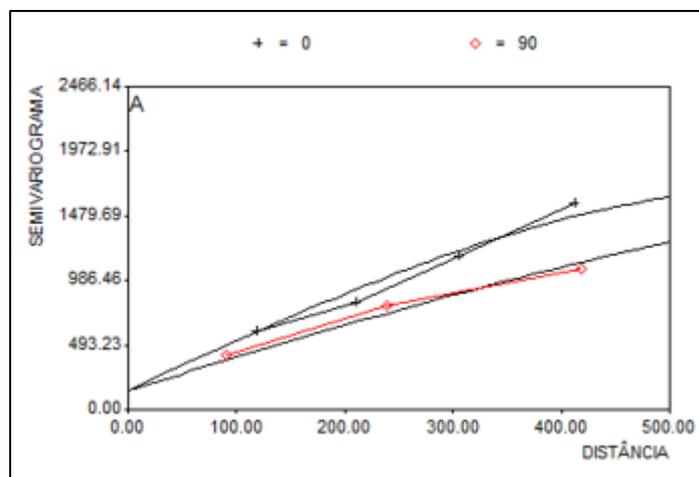


Figura 9 – Modelo ajustado do semivariograma experimental do desgaste do RH.

#### 3.2.2 Resultado do Mapa de Interpolação

Após modelagem pelo semivariograma, usou a krigagem ordinária para variável desgaste. A aplicação desta técnica permitiu a estimação do desgaste em pontos não amostrados. Obtendo um mapa completo do desgaste. Conforme se observa na figura 10, uma região de maior desgaste (região em vermelho) na parte superior a direita do vaso. O que confere com os resultados observados em campo. Este tipo de resultado nos auxilia na tomada de decisão para modificação de projeto. Sendo necessário reforço na região em vermelho (mudança de material ou espessura) e otimização das regiões de maior espessura (região em azul e verde) que pode ser redução de espessura contrabalanceada com o aumento das regiões mais críticas.

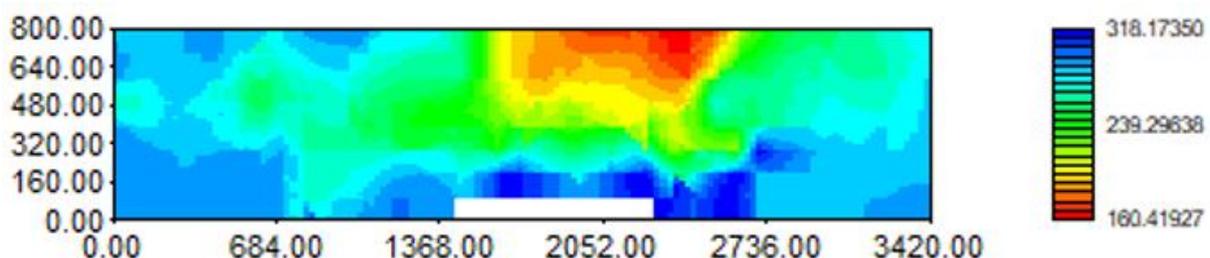


Figura 10 – Mapa de interpolação do Desgaste

Outra forma de avaliar o modelo geoestatístico é o mapa de desvios-padrão da krigagem. Na figura 11, temos o mapa de desvios, ou seja, quais regiões que apresentam melhor margem de acerto em relação aos dados reais. Os pontos em azul e verde, são as partes de menor margem de confiança. De forma geral a coleta dos pontos foi bem representativa.

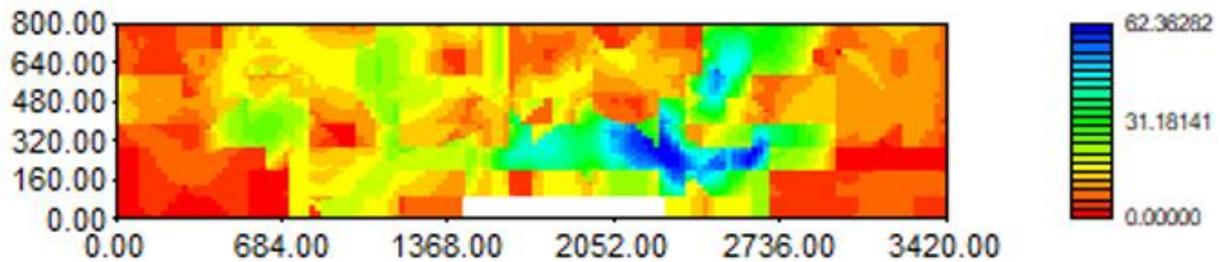


Figura 11 – Mapa de desvios da krigagem

Outro recurso do software Geovisual é filtrar as regiões de destaque, neste caso a figura 12 mostra qual a probabilidade de termos pontos menores que 250 mm (região em azul). A região em vermelho, mostra pontos de maior espessura (menor risco de acidente).

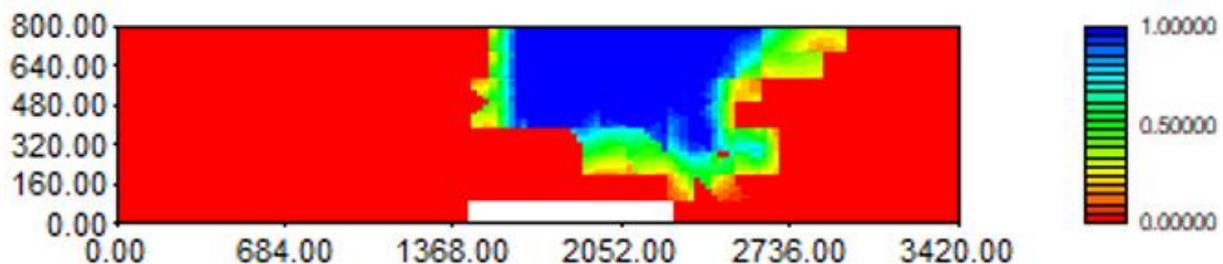


Figura 12 – Mapa de probabilidade por referência (<250 mm).

Em resumo do modelo geoestatístico, tivemos 10960 nós. O valor médio de espessura residual foi de 259,88 mm, cuja Variância Global foi de 1443,76. O Desvio-padrão foi de 37,99 com 0,1462 de coeficiente de variação. A validação cruzada é um método através da krigagem, usa os próprios dados coletados para prever um ponto já observado. O resultado é visto na figura 13, cujo coeficiente de correlação linear comparando o Real e o Previsto foi de 0,87 (alto).

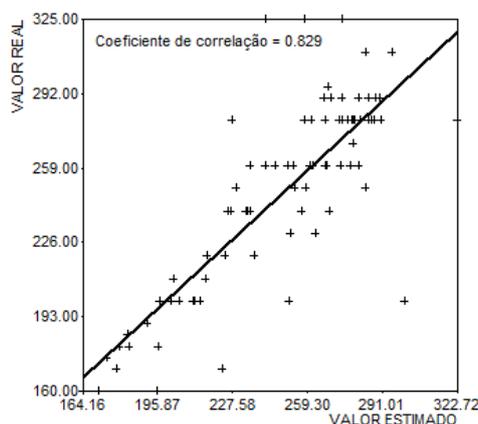


Figura 13 – Validação Cruzada (real vs estimado)

## 4 CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são:

- O modelo espacial utilizando a Geoestatística mostrou-se bastante eficiente para estudo espacial do fenômeno do desgaste. O mapa foi bastante claro em quais regiões serão necessários ajustes. Mostrando a idéia de Anisotropia, que é regiões que apresentam uma característica pontual do fenômeno.
- O uso da Geoestatística para mapear desgaste de refratário é algo novo, que pode ser explorado para outros equipamentos tais como LD e Panela de Aço.
- O perfil de desgaste, mostrou uma tendência para a direção assimétrica do vaso. O que não é comum em equipamentos refratários. Este fato foi justificado pelo fenômeno do entupimento dos bicos. O fato de entupir bicos de forma aleatória, modificou o fluxo do aço, direcionando o jato para a parte direita da parede, conforme observado nos mapas de desgaste.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Saint-Gobain pelo incentivo do estudo e a empresa Geokrigagem que disponibilizou o software Geovisual para análise dos dados.

## REFERÊNCIAS

- 1 ALMEIDA, A. T. P. Estudo da Cinética de Descarburização no Modelo Físico do Desgaseificador à Vácuo RH, Trabalho Final de Curso, UFMG, 2005.
- 2 BERRY, J. K. Topic 7: Linking Data Space and Beware the Slippery Surfaces of GIS Modeling. In: Beyond Mapping III. GeoTec Media Publishers, 2007.
- 3 YAMAMOTO, J. K., LANDIM, P. M. B., Geoestatística Conceitos e Aplicações, Oficina de Textos, 2015.
- 4 LANDIM, P. M. B., Sobre Geoestatística e Mapas. Terrae Didatica, 2006.
- 5 ENDE, M. A., KIM, Y., CHO, M., CHOI, J., JUNG, I., A Kinetic Model for the Ruhrstahl Heraeus (RH) Degassing Process, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2011.
- 6 SILVA, C. A., SILVA, I. A., MARTINS, E. M. C., SESHADRI, V., PERIM, C. A., FILHO, G. A. V., Fluxo do Fluido e Características de Mistura no Desgaseificador RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão, e a Influência da Injeção de Gás no Fundo e Plugue Poroso pelo Modelo Físico, Ironmaking Steel Making, 2004.
- 7 Shinagawa Technical Report, 2018