

Análise dos fatores que afetam o rendimento da adição de ligas de manganês durante o vazamento utilizando técnicas de projetos de experimentos (DOE)

Hiuller C. Araujo

Resumo

As ligas de manganês são adicionadas ao aço durante o vazamento do convertedor e/ou nos processos subsequentes de refino secundário. Neste trabalho, foi investigado o efeito do teor de oxigênio no final de sopro, do índice de passagem de escória e do teor visado de manganês sobre o rendimento em manganês obtido durante o vazamento. O rendimento foi calculado com base no peso da carga metálica utilizando um rendimento metálico fixo de 91%. A técnica empregada para análise dos dados foi a de Projetos de Experimentos (DOE), adaptada para utilização de dados que já estavam disponíveis. A análise de variância mostrou que as incertezas oriundas da utilização de estimativas para o cálculo do rendimento em manganês resultou numa variação superior à do efeito das variáveis sob estudo. Para que seja viável estudar alternativas para controlar o rendimento de manganês no futuro será preciso desenvolver uma metodologia mais precisa para medir o rendimento de incorporação.

1. Introdução

O teor de manganês é uma característica química de grande importância para os produtos de aços planos. A incorporação deste elemento ao aço é obtida pela adição de ligas de manganês durante o vazamento do convertedor e/ou nos processos posteriores de metalurgia de panela.

Uma parte do manganês adicionado não é incorporada devido, principalmente, à reação com o oxigênio presente no aço e na escória. O rendimento de incorporação do manganês é uma variável importante para o controle do custo de produção pois o desembolso com ligas de manganês foi de R\$ 593 milhões nos últimos cinco anos representando 2,6%^[1] do custo da placa bruta produzida em 2013.

Neste trabalho, é feita uma análise de dados de processo utilizando as técnicas de Projetos de Experimentos para determinar a contribuição relativa dos seguintes fatores no rendimento de incorporação do manganês adicionado durante o vazamento do convertedor:

- nível de oxidação da corrida no final de sopro;
- passagem de escória no vazamento; e
- teor de manganês objetivado e

O Rendimento calculado apresentou grande variação devido à incerteza introduzida no cálculo pela falta de dados, principalmente do peso de aço na panela de modo que o efeito dos fatores estudados não resolu evidente.

2. Visão geral da utilização das ligas de manganês

O desembolso total por fonte de manganês nos últimos cinco anos é apresentado na Figura (1). Nos últimos cinco anos, o gasto com ligas de manganês totalizou R\$593 milhões.

A partir do ano 2010, o desembolso total foi reduzido, principalmente, devido à redução de gastos com FeMn baixo fósforo, resultado de uma combinação entre menor consumo específico e menor custo de aquisição. A redução no consumo específico do FeMn BP deveu-se à substituição deste por FeMn AC na Aciaria 2.

A utilização do FeMn AC, a liga de manganês de menor custo, era restrita à Aciaria 1 até outubro de 2010 quando houve o *start up* de três novos silos no sistema de ferroligas dos convertedores 4 e 5 cujo objetivo foi o de permitir substituir o FeMn BP pelo FeMn AC nos aços menos exigentes.

A Figura (3) apresenta a evolução do custo das diferentes ligas de manganês. É observada a redução do custo de aquisição do FeMn BP e do manganês eletrolítico. A tendência de preço do FeMn BP pode, no curto prazo, inviabilizar a utilização do FeMn MC que pode ser substituída pelo FeMn BP com benefício adicional da redução do *input* de fósforo.

Em julho de 2010 foi alterado o procedimento para refino de aços BH para aproveitar o FeMn MC para incorporação de traços de carbono ao aço para reduzir a recusa por carbono baixo^[2]. Esta mudança resultou no menor consumo de Mn eletrolítico que foi substituído por FeMn MC, com benefícios para a qualidade do aço e redução de custo.

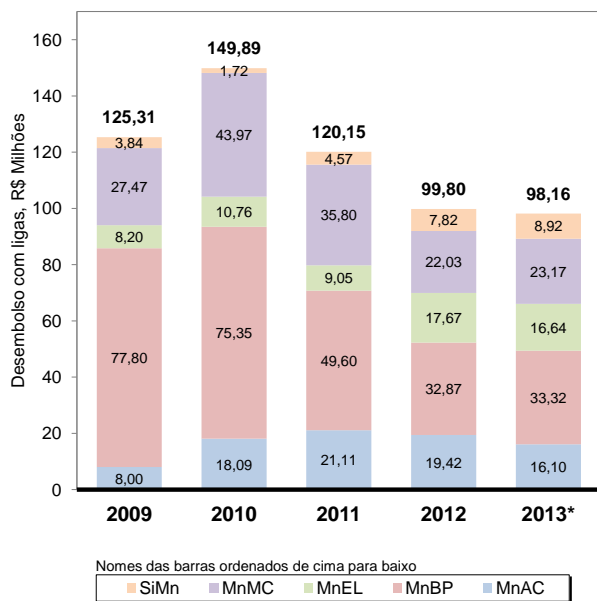


Figura 1: Gasto total com ligas de manganês em R\$ milhões. Fonte: sistema R3, transação CKM3.

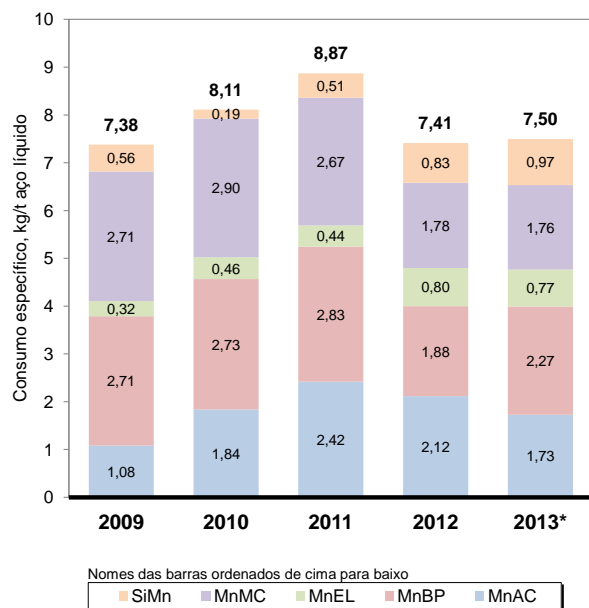


Figura 2: Consumo específico das ligas de manganês. Fonte: sistema R3, transação CKM3.

3. Metodologia

O principal fenômeno relacionado ao rendimento do manganês adicionado durante o vazamento do convertedor é a oxidação do manganês. Concorre para maior oxidação uma série de fatores como: o nível de oxidação do aço onde a liga será dissolvida; o peso de escória que passa para a panela pois na escória encontram-se

óxidos instáveis que são fonte de oxigênio; a adição concomitante com outras ligas com poder desoxidante e o instante do início da descarga da liga em relação ao início do vazamento. Outros fatores aparecem como confundidores pois são obstáculos à correta avaliação do rendimento. Dentre os principais confundidores pode-se citar o teor de manganês real de cada liga e o peso de aço na panela.

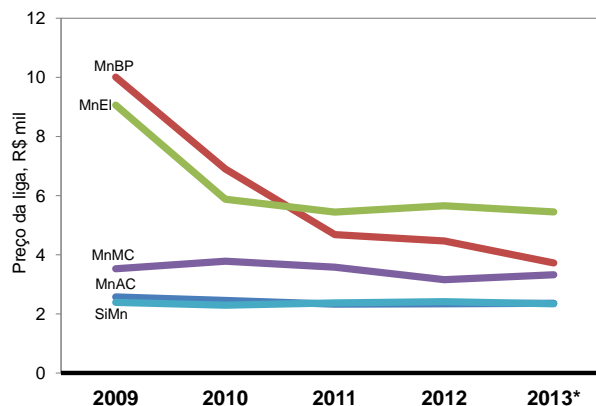


Figura 3: Evolução do preço médio do estoque das ligas de manganês. Fonte: sistema R3, transação CKM3.

O efeito dos fatores sobre o rendimento do manganês foi estudado utilizando a técnica de Projeto de Experimentos (DOE, do inglês, *Design of Experiments*) utilizando uma planilha eletrônica no Excel. Normalmente, os experimentos são planejados antes de serem conduzidos mas neste trabalho a técnica foi adaptada para utilizar dados de processo.

Foi escolhido um experimento fatorial para estudar o efeito de 3 fatores sobre o rendimento do manganês. A Tabela (1) apresenta um resumo do experimento. Normalmente, os experimentos com três fatores em dois níveis consistem de 8 observações (2^3), contudo foi escolhido um fator adicional, o grau de desoxidação do aço (AA/AS), para ser bloqueado.

Tabela 1: Fatores juntamente com os valores que foram utilizados na definição dos níveis baixo e alto.

Fator/Nível	(-1)	(+1)
[O], ppm	400 a 600	1100 a 1500
Escória	0 a 100	1000 a 1500
Visado, pontos	50 a 70	100 a 120

A oxidação do aço ao final de sopro é medido utilizando um sensor de sub-lança específico. As corridas com medição de teor de oxigênio livre entre 400 e 600 ppm foram escolhidas para representar o nível baixo deste fator (-1) enquanto que o nível alto (+1) é representado pelas corridas com oxigênio livre entre 1100 e 1500

ppm.

O índice de passagem de escória é determinado pela diferença de emissividade entre o aço e a escória na faixa do infra-vermelho. O sistema responsável por esta medição foi instalado em setembro de 2010 pelo fabricante AMEPA. As corridas com índice de escória entre 1000 e 1500 representam as corridas com passagem de escória e valores inferiores a 100 representam as corridas sem passagem de escória.

Para o teor de manganês visado, os níveis foram selecionados de forma a atender dois requisitos: diferença sensível entre os níveis e representatividade nas corridas pois é preciso que se encontre no banco de dados corridas que combinem os 8 diferentes níveis dos fatores para cada tratamento. Estes critérios foram atendidos para corridas com manganês visado entre 50 e 70 pontos para o nível baixo e entre 100 e 120 pontos para o nível alto.

Neste estudo, foram utilizados dados históricos como variável resposta do experimento projetado. O levantamento de dados resultou numa quantidade heterogênea de corridas distribuídas entre os diferentes tratamentos. Foram utilizadas corridas de 2013 que totalizaram 111 observações. Para adaptar a metodologia, foram aventadas três possibilidades: a seleção aleatória das corridas, a utilização do *bootstapping*^[3] como forma de reamostragem e a utilização do valor médio do rendimento para cada tratamento. Optou-se pela utilização do rendimento médio do tratamento por ser a alternativa mais simples que não requereria a utilização de nenhuma programação no Excel.

3.0.1. Cálculo do rendimento do manganês

O rendimento da adição do manganês foi calculado para as corridas que possuem análise química do aço antes e após o vazamento utilizando a Equação (1):

$$\eta = \frac{([Mn]_p - [Mn]_b) \times W_{cm} \times \eta_m}{10 \times W_{Mn}}, \quad (1)$$

onde $[Mn]_p$ e $[Mn]_b$ representam os teores de manganês da amostra de panela e de fim de sopro, em pontos¹, respectivamente; W_{cm} é o peso total da carga metálica em kg; η_m é o rendimento metálico do convertedor, fixado em 91%, e W_{Mn} é o peso de manganês elementar adicionado calculado como $\sum(w_i x_i)$ em que w_i é o peso da i -ésima liga de manganês, em kg e x_i é o teor percentual de manganês da i -ésima liga.

A aplicação da Equação (1) apresenta as seguintes desvantagens: o peso de aço na panela não é medido pois não há balança. Mesmo que houvesse haveria ainda a

influência do peso de escória e do revestimento da panela para dificultar a determinação do peso de aço. Além disso, a amostra de panela nem sempre é representativa pois a amostragem pode ser feita sem homogeneização suficiente. Por último, o peso de manganês elementar é calculado com base no teor médio da análise dos ferroligas e, portanto, não é conhecido.

Tabela 2: Experimento fatorial completo para o rendimento de manganês adicionado durante o vazamento do convertedor.

Trat.	O [ppm]	Escória	Visado	Grau	Rendimento	N
1	-1	-1	-1	AA	0,846	11
2	-1	-1	-1	AS	0,827	15
3	-1	-1	+1	AA	0,884	2
4	-1	-1	+1	AS	0,834	25
5	-1	+1	-1	AA	0,842	8
6	-1	+1	-1	AS	0,831	5
7	-1	+1	+1	AA	0,781	6
8	-1	+1	+1	AS	0,850	9
9	+1	-1	-1	AA	0,998	1
10	+1	-1	-1	AS	0,826	2
11	+1	-1	+1	AA	0,886	3
12	+1	-1	+1	AS	0,946	15
13	+1	+1	-1	AA	0,794	3
14	+1	+1	-1	AS	0,801	1
15	+1	+1	+1	AA	0,808	3
16	+1	+1	+1	AS	0,987	2

4. Resultados

O rendimento obtido do banco de dados para cada tratamento é apresentado na Tabela (2). Com estes dados é construído o gráfico com os efeitos principais, mostrado na Figura (5). Para determinação do efeito de cada fator, o rendimento médio é calculado no nível alto e baixo do fator estudado, independentemente do nível dos demais fatores.

A análise da Figura (5) mostra que as corridas com maior teor de oxigênio fim de sopro apresentaram rendimento superior. A explicação pode estar relacionada a outras variáveis acopladas ao teor de oxigênio, como a temperatura fim de sopro. A partição do manganês entre o aço e a escória é influenciada pela temperatura do banho e como a reação de oxidação é exotérmica, a aplicação do princípio de *Le Châtelier* leva à conclusão de que temperaturas mais elevadas são favoráveis à obtenção de maiores teores de manganês no metal líquido^[4].

O efeito da passagem de escória mostrou-se deletério. As corridas com maior peso de escória apresentaram rendimento menor. Sendo a escória uma grande fonte de oxigênio este resultado concorda com o esperado.

Por último, o rendimento foi diretamente proporcional ao teor de manganês visado. Se considerarmos um peso fixo de manganês a ser oxidado, essa parcela será

¹1% em peso de manganês equivale a 100 pontos.

menos significativa quanto maior for a adição. Portanto, nas corridas com maior adição existe a *tendência* de maior rendimento percentual.

O estudo para determinar a significância dos fatores e suas interações foi conduzido utilizando a Análise de Variância (ANOVA)^[5] numa planilha do Excel.

Para aplicação da Análise de Variância é preciso construir um modelo linear com os dados da Tabela (2). O primeiro passo   determinar os níveis das interações. As interações e os respectivos níveis são apresentados na Tabela (3).

Tabela 3: Níveis determinados para as interações dos fatores. A: [O] ppm, B: Escória e C: Mn visado.

Trat.	A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

O modelo linear tem a forma geral:

$$\begin{aligned} \hat{\eta} = & \bar{\eta} + \alpha_a A + \alpha_b B + \alpha_c C + \\ & + \alpha_{ab} AB + \alpha_{ac} AC + \alpha_{bc} BC + \\ & + \alpha_{abc} ABC + \epsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

onde, $\hat{\eta}$ é o rendimento estimado pelo modelo linear; $\bar{\eta}$ é o rendimento médio obtido em todos os tratamentos, ϵ é o efeito aleatório de tudo que não foi modelado tal que $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ e os coeficientes α_a até α_{abc} são calculados pela Equação (3):

$$\alpha_i = \frac{\hat{\eta}_i^{(+1)} - \hat{\eta}_i^{(-1)}}{2}, \quad (3)$$

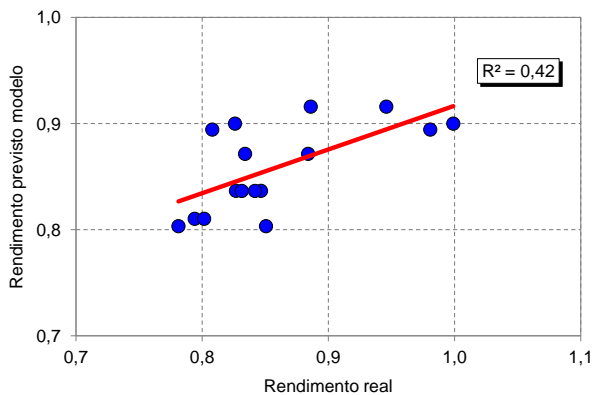


Figura 4: Rendimento real e previsto pelo modelo.

onde $\hat{\eta}_i^{(+1)}$   o valor médio do rendimento avaliado apenas para o nível alto do i -ésimo fator ou interação e $\hat{\eta}_i^{(-1)}$   o análogo do anterior para o nível baixo do i -ésimo fator ou interação.

A Figura (4) apresenta a relação entre o rendimento previsto pelo modelo formulado na Equação (2) com os parâmetros obtidos com a aplicação da Equação (3) sob os dados da Tabela(2). Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela (4).

O valor médio dos resíduos foi igual a zero e o teste de normalidade de Anderson-Darling^[6] foi conduzido para testar a hipótese de normalidade. A estatística do teste AD foi 0,3845 que corresponde a um p-valor de 0,3512 que não permite rejeitar a hipótese de que os resíduos são normalmente distribuídos.

Tabela 4: Coeficientes do modelo linear para o rendimento da adição de manganês. A: [O] ppm, B: Escória e C: Mn visado.

Termo	Coef.	SE Coef.	T
Intercepto	0,8585	0,0126	68,0974
A	0,0216	0,0126	1,71061
B	-0,0224	0,0126	-1,77963
C	0,0127	0,0126	1,00739
A*B	-0,0116	0,0126	-0,92326
A*C	0,0123	0,0126	0,97603
B*C	0,0063	0,0126	0,49699
A*B*C	0,0170	0,0126	1,34955

Na Tabela (4), além dos valores estimados para os coeficientes do modelo linear, são apresentados os valores do Erro Padrão (SE, *Standard Error*) e da estatística-T calculada com o Erro Padrão. O Erro Padrão, S_e , é utilizado para testar a significância do coeficiente. Um coeficiente é considerado significativo se o intervalo de confiança construído ao nível de significância, α , com o erro padrão não contiver o zero. Caso o valor nulo esteja contido no intervalo de confiança então não há evidência para rejeitar a hipótese de que o coeficiente tem valor zero. Coeficientes com valor nulo não são relevantes como variáveis explicativas de fen menos modelados com modelos lineares.

O Erro Padrão foi determinado com base na raiz quadrada do erro quadrático médio, o RMSE (*Root Mean Squared Error*) com graus de liberdade igual a $(n - 2)$, onde n é o número de observações, conforme Equação (4).

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} \sum_{i=0}^n (\eta_i - \hat{\eta}_i)^2}, \quad (4)$$

onde η_i   o rendimento do i -ésimo experimento; $\hat{\eta}_i$   o rendimento previsto pelo modelo para o i -ésimo experimento e n é o número de observações.

A estatística-T é obtida pela divisão do valor estimado para coeficiente pelo Erro Padrão e também chamada de Efeito Padronizado. O efeito de um fator ou interação é considerado significativo se o seu Efeito Padronizado for superior a um valor limiar. O valor limiar de significância foi calculado o nível de 5% usando a distribuição *t* de Student com 8 graus de liberdade. No Excel, o valor inverso da distribuição *t* com 8 graus de liberdade pode ser obtido com a fórmula =INVT(5%;8) que retorna o valor de 2,306.

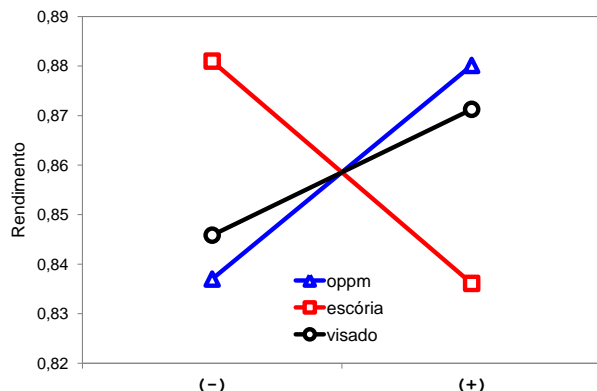


Figura 5: Efeitos principais sobre o rendimento da adição de manganês no vazamento.

O gráfico de Pareto com o efeito padronizado dos fatores e interações mostra que nenhum fator ou interação exerceu efeito significativo sobre o rendimento da adição.

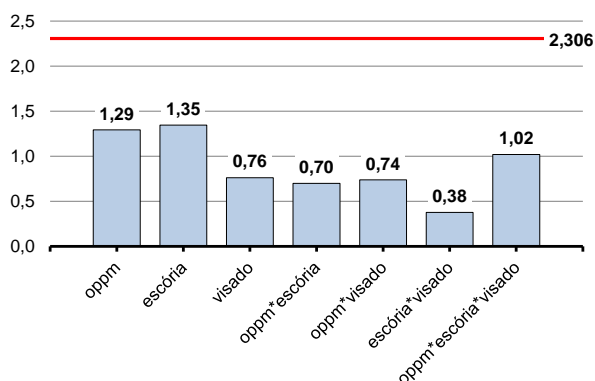


Figura 6: Efeito padronizado dos fatores e interações. Ao nível de significância de 5% a estatística-T limiar é 2,306.

O rendimento é melhor explicado pela média global do que pelo efeito de qualquer dos fatores. Este resultado não significa que os fatores estudados não são

relevantes. Significa que o rendimento não pode ser calculado com precisão suficiente para detectar a diferença entre os tratamentos.

5. Conclusões

Foram utilizados dados históricos para compor os tratamentos de um Projeto de Experimento fatorial completo para investigar o efeito da oxidação do aço, da passagem de escória e do manganês visado sobre o rendimento das ligas de manganês usadas no vazamento do convertedor. O rendimento foi calculado com o peso de aço estimado por um rendimento metálico fixo de 91%.

Nenhum dos fatores apresentou efeito significativo sobre o rendimento. A conclusão foi que as estimativas usadas para calcular o rendimento introduziram mais incerteza do que o efeito das variáveis estudadas.

Para permitir a melhoria sobre o rendimento das adições de manganês torna-se necessário desenvolver uma metodologia mais precisa para sua determinação.

6. Referências

- [1] USIMINAS. *Relatório de variação de custo dos produtos acumulado de 2013 - R2*. 2013. Gerência de Custos de Ipatinga.
- [2] SILVA, M. J. dos A. *Recorde de aprovação de placas para os aços BH*. 2010. Informe Técnico USIMINAS nº 20/2010.
- [3] WIKIPEDIA. *Bootstrapping (statistics)* — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2013. [Acessado 20-Novembro-2013]. Disponível em: <en.wikipedia.org/Bootstrapping_(statistics)>.
- [4] BARÃO, C. D. *Comportamento do manganês durante o sopro de oxigênio em convertedor*. Dissertação (Mestrado) — Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDE-MAT, 2007.
- [5] WIKIPEDIA. *Analysis of variance* — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2013. [Acessado 18-Novembro-2013]. Disponível em: <en.wikipedia.org/Analysis_of_variance>.
- [6] WIKIPEDIA. *Anderson-Darling test* — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2013. [Acessado 18-Novembro-2013]. Disponível em: <en.wikipedia.org/Anderson-Darling_test>.