



# CARACTERIZAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE HIDROGÊNIO NA ACIARIA DA ARCELORMITTAL TUBARÃO<sup>1</sup>

Bruno Rodrigues Henriques<sup>2</sup>  
Fernando Gabriel da Silva Araújo<sup>3</sup>  
Cristovam Paes de Oliveira<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho identificou e quantificou as principais fontes de incorporação de hidrogênio no aço líquido, atuantes no processo de produção da aciaria da ArcelorMittal Tubarão. Para tanto, foram implementados um total de 69 experimentos, realizados na panela de aço, durante e após o vazamento do aço líquido proveniente do convertedor, utilizando-se as próprias corridas de rotina do fluxo operacional da aciaria. A variável resposta de cada experimento foi o teor de hidrogênio presente no aço líquido. A quantificação da importância de cada fonte de incorporação de hidrogênio foi feita através de análise de regressão linear múltipla. Os resultados obtidos se mostraram coerentes com os dados de literatura e indicaram que as principais fontes de incorporação de hidrogênio são os materiais recarburantes, os produtos à base de cal e os ferro-ligas.

**Palavras-chave:** Hidrogênio; Hydris; Pick-up de hidrogênio.

## CHARACTERIZATION OF HYDROGEN PICKUP AT ARCELORMITTAL TUBARÃO STEELMAKING PLANT

### Abstract

This paper has identified and quantified the main hydrogen pickup sources into liquid steel, that are part of the production process at ArcelorMittal Tubarão steelmaking plant. For that, it was carried out 69 experiments, performed at the steel ladle, during and after the tapping of the liquid steel from the converter, using heats from the regular steelmaking production flow. The response variable of each of these experiments was the hydrogen content in the liquid steel. The importance quantification of each hydrogen pickup source was done by the use of multi linear regression analysis. The results obtained were in accordance to the technical literature and indicated that the main hydrogen pickup sources are the recarburizer materials, lime based products and ferro alloys.

**Key words:** Hydrogen; Hydris; Hydrogen pickup

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Departamento de Aciaria da ArcelorMittal Tubarão

<sup>3</sup> Físico, Professor Doutor da REDEMAT (UFOP – CETEC – UEMG)

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Presidente da Fundação Gorceix



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Apresentação

Com o aperfeiçoamento das práticas de metalurgia de panela, hoje é possível produzir aços que apresentem extrema limpidez e controle apurado do teor da maioria dos elementos químicos. Contudo, a remoção e o controle, em baixos níveis, dos gases dissolvidos no aço ainda possui um grau significativo de dificuldade. O controle do teor de hidrogênio, em níveis modestos, sem a etapa de desgaseificação ou então a redução do teor de hidrogênio para valores abaixo de 1,5ppm ainda são grandes desafios para a maioria das aciarias do mundo.

Segundo Warren,<sup>(1)</sup> o hidrogênio pode entrar e sair do aço sem que sua presença tenha sido notada, ou pode provocar danos severos que, dependendo das circunstâncias, podem ser descritos como: bolhas, flocos ou escamas, fragilização, fissuras, trincas internas etc. Fuji,<sup>(2)</sup> por sua vez, afirma que o hidrogênio talvez seja, dentre todos os elementos residuais na fabricação do aço, o único considerado sempre prejudicial às propriedades físicas e mecânicas do produto final.

Os efeitos deletérios do hidrogênio no aço e os mecanismos que os explicam, apesar de estudados e discutidos há décadas, ainda permanecem como temas de grande relevância, haja vista a grande quantidade de trabalhos técnicos que atualmente ainda abordam esse assunto.

A maior parte da incorporação de hidrogênio no aço ocorre quando o mesmo se encontra no estado líquido. Em termos de incorporação, a etapa mais relevante do fluxo de produção de uma aciaria compreende o intervalo entre o fim de sopro no convertedor e o início de tratamento na estação de metalurgia secundária. Portanto, em função do que foi exposto, fica claro que as principais fontes de incorporação precisam ser identificadas e seu impacto na composição química do aço líquido, na forma de “pick-up” de hidrogênio, tem que ser dimensionado.

### 1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é realizar uma caracterização, em escala industrial, da incorporação de hidrogênio no aço líquido, na aciaria da ArcelorMittal Tubarão, considerando a rota de produção do convertedor até o desgaseificador a vácuo.

Para tanto, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- identificar as principais fontes de incorporação de hidrogênio no aço líquido; e
- quantificar a influência dessas fontes de incorporação no teor final de hidrogênio.

### 1.3 Revisão da Literatura

#### 1.3.1 Solubilidade do hidrogênio no aço

A solubilidade do hidrogênio em metais é uma função da forma física do metal (sólido x líquido), do reticulado cristalino, do teor de elementos de liga, da temperatura e da pressão parcial de hidrogênio do meio ambiente.

- **Influência da pressão parcial de hidrogênio**

O hidrogênio, na forma atômica, se dissolve nas ligas de ferro líquido de acordo com a equação 1.1, mostrada a seguir:



$$\frac{1}{2} H_{2(g)} \Rightarrow \underline{H} \quad (1.1)$$

A concentração de hidrogênio presente no banho metálico é relacionada com a pressão parcial de gás, através da seguinte relação (equação 1.2):

$$[\%H] = \frac{K_H}{f_H} \sqrt{P_{H_2}} \quad (1.2)$$

Onde:

[%H]: Concentração de hidrogênio (em % peso);

$K_H$ : Constante de equilíbrio a uma dada temperatura;

$f_H$ : Coeficiente de atividade henriana do hidrogênio; e

$P_{H_2}$ : Pressão parcial de hidrogênio no aço (em atm).

Segundo Fuwa,<sup>(3)</sup> que realizou uma grande compilação de dados de literatura, o valor da constante de equilíbrio ( $K_H$ ) é obtido pela seguinte expressão (equação 1.3):

$$\log K_H = -\frac{1900}{T} - 1,577 \quad (1.3)$$

Onde T é a temperatura em graus Kelvin

O coeficiente de atividade do hidrogênio dissolvido em ligas de ferro líquido é dado pela seguinte somatória (equação 1.4):

$$\log f_H = \sum e_H^j [\% j] \quad (1.4)$$

Onde  $e_H^j$  é o coeficiente de interação henriana de "j" sobre o elemento hidrogênio.

### • Influência da temperatura

A Figura 1 mostra o efeito da temperatura sobre a solubilidade do hidrogênio no ferro, na pressão de 1atm.<sup>(4)</sup>

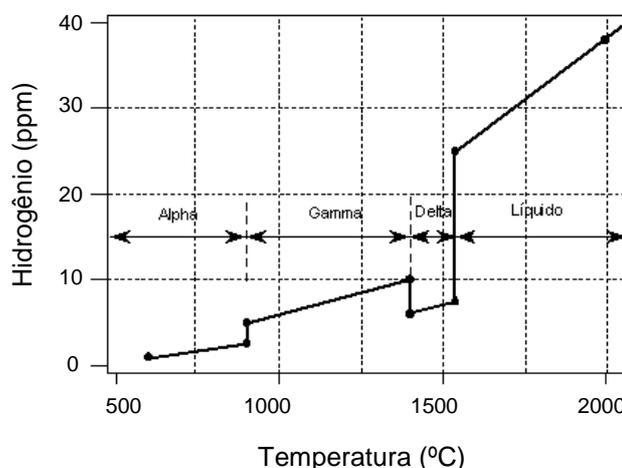
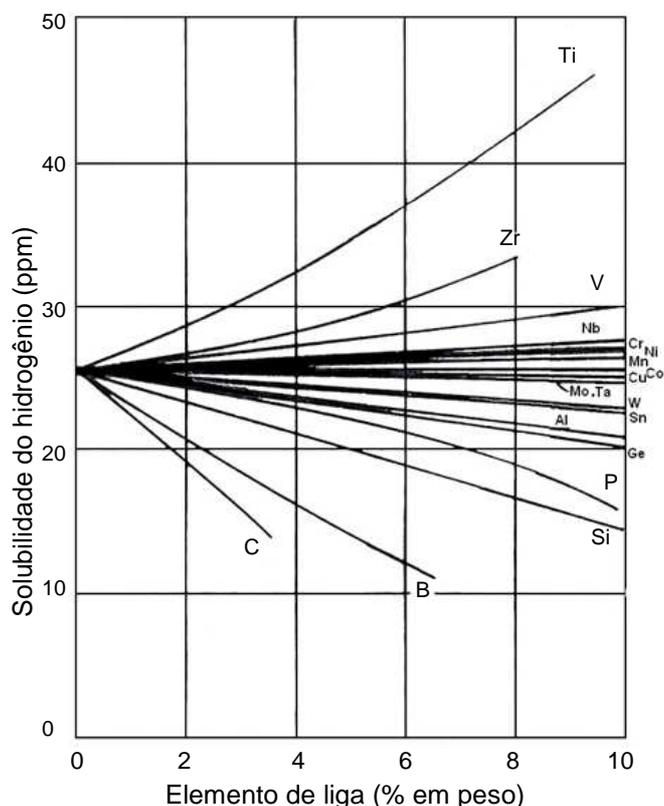


Figura 1 – Solubilidade do hidrogênio no ferro, em função da temperatura, na pressão de 1atm.<sup>(4)</sup>



## • Influência do teor de elemento de liga

Quando um elemento de liga é adicionado ao ferro, a solubilidade do hidrogênio pode aumentar ou diminuir, sendo esse efeito proporcional à concentração do elemento de liga. Fuwa,<sup>(3)</sup> através da Figura 2, apresenta a solubilidade do hidrogênio em função dos elementos de liga presentes no ferro, a uma temperatura de 1.600°C.



**Figura 2** – Solubilidade do hidrogênio em função dos elementos de liga presentes no ferro, na temperatura de 1.600°C.<sup>(3)</sup>

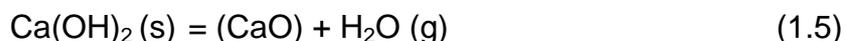
### 1.3.2 Fontes de incorporação de hidrogênio no aço líquido

A principal fonte de incorporação de hidrogênio em uma aciaria é a água, seja na forma de vapor d'água presente no ar atmosférico, seja na forma de impureza presente nos ferro-ligas e materiais recarburantes ou então associada com materiais formadores de escória, como a cal. Além das diversas fontes de incorporação, existem práticas e condições operacionais do processo de fabricação do aço líquido que favorecem, em maior ou menor grau, os mecanismos de incorporação de hidrogênio. Ao longo do tempo, diversos pesquisadores procuraram investigar a influência das principais fontes de incorporação de hidrogênio no aço líquido. Dentre todas as fontes de incorporação investigadas, destacam-se as seguintes:<sup>(5-7)</sup>

- adição de cal, ou de produtos à base de cal;
- adição de materiais recarburantes;
- adição de ferro-ligas; e
- umidade da atmosfera.



A cal possui uma característica especial, pois, em função das condições atmosféricas, a mesma pode se tornar hidratada, formando o hidróxido de cálcio, antes mesmo de ser adicionada ao aço líquido. Essa cal hidratada, quando adicionada ao aço líquido, se decompõe de acordo com a equação 1.5 apresentada a seguir:



O vapor d'água formado se dissocia na superfície do aço líquido, causando a incorporação de hidrogênio através da seguinte reação (equação 1.6):



## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A intensa evolução de bolhas de CO no interior do metal líquido, durante o sopro no convertedor, promove uma remoção de hidrogênio altamente eficaz, reduzindo o teor de hidrogênio para níveis de 1 ppm no fim de sopro.<sup>(5)</sup> Dessa etapa do processo em diante, ocorrem sucessivas elevações do teor de hidrogênio, dependendo da fase operacional e do tipo de material adicionado na panela.

Em vista disso, optou-se por estudar o processo de incorporação de hidrogênio que ocorre entre o fim de sopro no convertedor e o início de tratamento da panela de aço no desgaseificador a vácuo, pois é nesse período que ocorre a maior parte da incorporação de hidrogênio em uma aciaria.

Basicamente, a parte experimental deste estudo foi composta por duas etapas:

- realização de uma série de experimentos em escala industrial; e
- implementação de uma análise de regressão linear múltipla.

Para se estudar o processo de incorporação de hidrogênio que ocorre entre o fim de sopro no convertedor e o início de tratamento da panela de aço no desgaseificador a vácuo, decidiu-se pela implementação de uma série de experimentos, realizados na panela de aço de 315 t, durante e após o vazamento do aço líquido proveniente do convertedor. Portanto, todos os experimentos foram realizados com a panela posicionada ainda na ala dos convertedores, antes da mesma ser enviada para o tratamento na estação de desgaseificação a vácuo.

### 2.1 Metodologia para a Realização dos Experimentos

A metodologia desenvolvida para a realização dos experimentos teve como inspiração os trabalhos de diversos pesquisadores, que procuraram, cada um à sua maneira, identificar e quantificar as principais fontes de incorporação de hidrogênio no aço líquido. Outra premissa básica adotada é a de que os experimentos seriam executados em escala industrial, utilizando as corridas de rotina do fluxo de produção da aciaria da ArcelorMittal Tubarão.

### 2.2 Variáveis Utilizadas Nos Experimentos

As variáveis escolhidas para serem utilizadas nos experimentos apresentam, segundo dados de literatura, influência relevante na incorporação de hidrogênio no aço líquido. Além disso, todas as variáveis utilizadas são passíveis de controle, de modo que os valores das mesmas possam estar de acordo com o que estabelece



cada plano de experimento. Variáveis importantes, como o teor de umidade da atmosfera, não foram incluídas nos experimentos justamente por não serem controláveis. As variáveis que foram utilizadas nos experimentos são as seguintes:

- peso de cal adicionada durante o vazamento do aço líquido;
- peso de FeSiMn e de ligas de Fe-Mn adicionado durante o vazamento do aço;
- peso de materiais recarburantes adicionado durante o vazamento do aço; e
- condição de vazamento do aço líquido (acalmado ou efervescente).

## 2.3 Plano de Experimentos

O plano de experimentos contemplava a realização de uma série de experiências, que foram conduzidas de acordo com o que está descrito na Tabela 2, apresentada a seguir. O plano previa a realização de um total de nove grupos de experimentos, com um número mínimo de seis experiências conduzidas em cada grupo. Cada experiência foi executada em apenas uma corrida, com peso de aço líquido de 315 t. Os grupos de experimentos apresentam diretrizes diferentes entre si. Porém, todas as experiências de um mesmo grupo de experimentos foram processadas da mesma maneira. A Tabela 2 apresenta as cinco variáveis escolhidas e incluídas no plano de experimentos, sendo que cada uma delas foi dividida em dois níveis de valores (N1 e N2). Para cada grupo de experimentos, pode-se verificar se determinada variável foi utilizada e, em caso afirmativo, qual foi o nível de valor adotado para essa variável.

**Tabela 2** – Plano de experimentos para o estudo da incorporação de hidrogênio

Grupo	Vazamento		Cal		FeSiMn		FeMn		Recarb.	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2
1º	X									
2º	X		X							
3º		X								
4º		X	X							
5º		X	X				X			
6º		X				X				
7º		X			X				X	
8º		X		X		X		X		
9º		X		X	X					X

Onde:

Vazamento: condição de vazamento do aço líquido

Recarb.: material recarburante / FeMn: Ligas de FeMn

A Tabela 3 mostra os dois níveis de valores (N1 e N2) que foram utilizados para cada variável investigada durante a realização dos experimentos.

**Tabela 3** – Níveis de valores para as variáveis investigadas nos grupos de experimentos

Variável	Nível 1 (N1)	Nível 2 (N2)
Condição de vazamento	Vazamento efervescente	Vazamento acalmado
Cal	Cal = 600kg	Cal > 2.000kg
FeSiMn	FeSiMn ≤ 3.500kg	FeSiMn > 3.500kg
FeMn	FeMn ≤ 1.200kg	FeMn > 1.200kg
Material Recarburante	Coque = 1.500kg	Grafite = 1.500kg



## 2.4 Variável Resposta dos Experimentos

A variável resposta de cada experiência foi o teor de hidrogênio presente no aço líquido. O teor de hidrogênio foi medido no desgaseificador a vácuo, utilizando-se o sistema Hydris de medição.<sup>(8)</sup> Atualmente, o sistema Hydris é o padrão mundial da indústria para controle do teor de hidrogênio no aço líquido, com mais de 350 sistemas em operação. A medição foi feita antes do início de tratamento e os resultados obtidos foram correlacionados com as variáveis utilizadas nos experimentos.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Resultados dos Experimentos

No total, foram realizadas 69 experiências, divididas em nove grupos de experimentos. A Tabela 4 mostra, de forma global, os resultados desses nove grupos de experimentos. Para cada grupo de experimento, são apresentados os valores médios de cada variável utilizada e o resultado final do experimento, na forma do teor médio de hidrogênio presente no aço líquido, medido com o sistema Hydris. Os campos tracejados indicam que aquela variável não foi utilizada no grupo de experimentos.

Tabela 4 – Resultados gerais de todos os grupos de experimentos

Grupo	Vaz.	Cal (kg)	Ferro-Ligas (kg)		Recarburantes (kg)		H (ppm)
			FeSiMn	FeMn	Coque	Grafite	
1º	EF	----	----	----	----	----	1,7
2º	EF	654	----	----	----	----	1,9
3º	AC	----	----	----	----	----	2,0
4º	AC	599	----	----	----	----	2,2
5º	AC	571	----	793	----	----	2,9
6º	AC	----	5.727	----	----	----	4,0
7º	AC	----	3.132	----	1.521	----	5,2
8º	AC	2.842	4.337	1.630	----	----	5,3
9º	AC	2.014	2.337	----	----	1.475	5,4

Onde:

Vaz.: Condição de vazamento do aço líquido

EF: Vazamento efervescente (sem adição de alumínio)

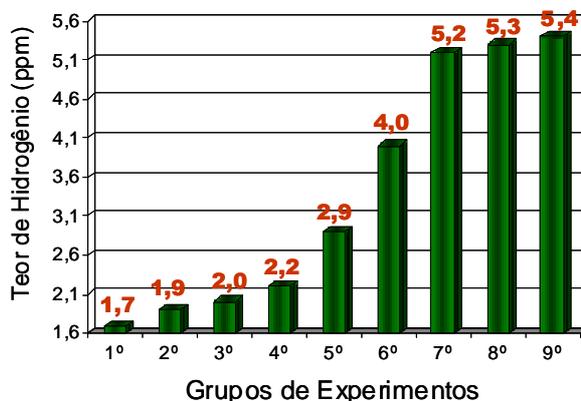
AC: Vazamento acalmado (com adição de alumínio)

A primeira informação que se extrai da Tabela 4 é a de que ocorre um gradativo aumento no teor médio de hidrogênio, à medida que se avança de um grupo de experimentos para outro. O aumento no teor médio de hidrogênio, do 1º para o 9º grupo de experimentos, foi de 3,7 ppm. Trata-se de valor extremamente significativo. Na verdade, como os experimentos foram planejados com base em dados de literatura, já se esperava essa gradação de valores que foi observada. Verifica-se que os maiores valores de hidrogênio foram obtidos nos experimentos que utilizaram grandes adições de materiais, seja de cal, ferro-ligas ou materiais recarburantes.

A Figura 3 mostra, de uma forma mais didática, como houve um constante e gradativo aumento no teor médio de hidrogênio presente no aço líquido, ao se avançar de um grupo de experimentos para outro. Se em determinado momento o



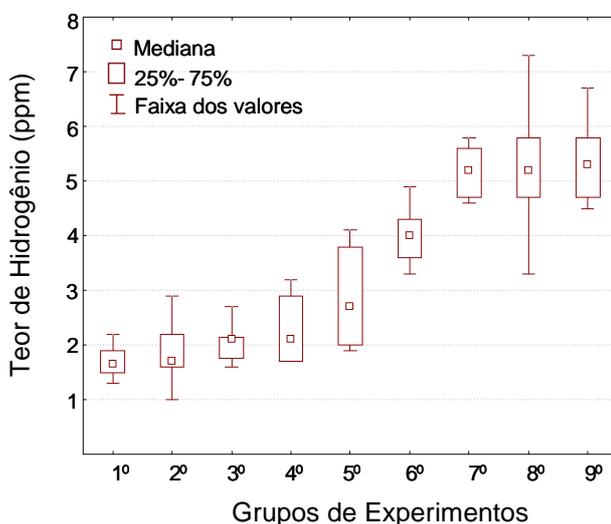
aumento foi de apenas 0,1 ppm, em outras ocasiões verificou-se elevações significativas de 1,1 ppm e 1,2 ppm.



**Figura 3** – Evolução do teor de hidrogênio em função do grupo de experimentos.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 3, e considerando as ferramentas de análise utilizadas até esse momento, verifica-se que todas as variáveis, em maior ou menor grau, parecem influir no processo de incorporação de hidrogênio no aço líquido.

A Figura 4 mostra uma disposição gráfica do tipo *Box-Plot*, para a mediana, onde se pode avaliar a simetria e a dispersão dos resultados do teor médio de hidrogênio presente no aço líquido, para cada grupo de experimentos. A mediana divide um conjunto ordenado de dados em dois grupos de quantidades iguais. Uma metade do grupo estará abaixo e, a outra metade, acima da mediana.



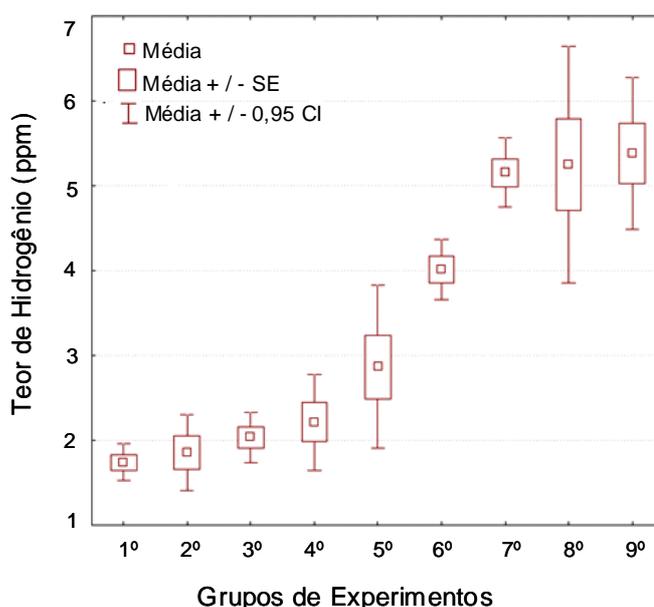
**Figura 4** – *Box-Plot* (da mediana) mostrando a distribuição dos resultados de hidrogênio por grupo de experimentos.

Verifica-se que alguns grupos de experimentos apresentaram uma pequena dispersão de resultados, enquanto outros grupos apresentaram uma grande variação. Os grupos com maior dispersão de resultados são justamente aqueles com adição de cal durante o vazamento do aço líquido. Como foi informado



anteriormente, a cal pode se tornar hidratada e provocar a incorporação de hidrogênio no aço líquido. Contudo, o rendimento de incorporação de hidrogênio é bastante instável. Diversos pesquisadores, entre eles Fruehan e Misra<sup>(6)</sup> concluíram que a quantidade real de hidrogênio introduzida no aço líquido, em função da adição de determinada fonte de incorporação, é muito menor do que o valor teórico possível. A explicação estaria nas limitações cinéticas do processo de incorporação de hidrogênio. Portanto, uma maior adição de cal pode levar a uma maior incorporação de hidrogênio, mas também a uma maior dispersão de resultados.

A Figura 5, mostrada a seguir, apresenta uma disposição gráfica do tipo *Box-Plot*, para a média, onde se podem fazer inferências sobre as médias de cada um dos grupos de experimentos realizados nesse estudo. Na Figura 5, o termo “SE” representa o erro padrão e o termo “CI” refere-se ao intervalo de confiança de 95%.



**Figura 5** – *Box-Plot* (da média) mostrando a distribuição dos resultados de hidrogênio por grupo de experimentos.

Inicialmente, verifica-se que os *Box-Plots* de alguns grupos de experimentos apresentam uma grande sobreposição de intervalos de confiança, indicando que as médias desses grupos de experimentos não são, em termos estatísticos, diferentes entre si.

A sobreposição ou não de intervalos de confiança poderia dispensar a realização de testes estatísticos formais. Mesmo assim, optou-se pela realização do *teste t de Student*. A análise inicial dos resultados, conforme mostrado na Tabela 4 e Figura 3, indicava que os valores médios de hidrogênio eram diferentes entre os grupos de experimentos e sempre aumentavam à medida que novas fontes de incorporação de hidrogênio passavam a fazer parte dos experimentos. Contudo, os *testes t* mostraram uma nova perspectiva, desta vez sob a ótica da significância estatística. Na verdade, verificou-se que vários grupos de experimentos apresentavam médias estatisticamente iguais, ou seja, para esses grupos a participação de novas fontes de incorporação não foi capaz de alterar o resultado médio do teor de hidrogênio.

A Tabela 5 mostra, na forma de uma matriz, os resultados da comparação de médias entre os grupos de experimentos, obtidos através do *teste t de Student*. A primeira coluna a partir da esquerda e a primeira linha a partir do alto mostram os diversos grupos de experimentos. O cruzamento de cada grupo posicionado na



vertical com cada grupo disposto na horizontal simboliza a execução do teste *t de Student*. A palavra “Sim”, escrita no cruzamento de dois grupos, indica que os mesmos apresentam médias estatisticamente iguais. A palavra “Não” indica que as médias são diferentes.

Nesse momento da análise dos resultados, foi possível concluir que praticamente todas as variáveis incluídas no plano de experimentos tinham influência na incorporação de hidrogênio no aço líquido. A análise da importância relativa de cada variável em relação às demais e o efeito de cada uma delas no teor final de hidrogênio só se tornou possível através da análise de regressão linear múltipla.

**Tabela 5** – Matriz de resultados da comparação das médias entre os experimentos

Grupos	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º
1º	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
2º	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
3º	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
4º	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
5º	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
6º	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
7º	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
8º	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
9º	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim

### 3.2 Resultados da Análise de Regressão Linear Múltipla

Conforme informado anteriormente, os experimentos foram realizados em escala industrial, utilizando-se corridas de rotina da aciaria da ArcelorMittal Tubarão. Diversas variáveis atuaram sobre essas corridas e nem todas estavam contempladas no plano de experimentos, uma vez que as mesmas não eram passíveis de controle. Portanto, para quantificar/ ratificar a importância das variáveis já identificadas, e para avaliar a influência de variáveis não incluídas nos experimentos, decidiu-se pela realização de uma análise de regressão linear múltipla, que é uma ferramenta estatística que permite ver o efeito conjunto de várias variáveis preditoras sobre uma variável resposta (teor de hidrogênio no aço).

Para tanto, além das variáveis incluídas nos planos de experimentos, foram considerados também os seguintes parâmetros (não controláveis previamente): índice de resopro; adição de cal e dolomita crua no convertedor; adição de dolomita na panela; adição de FeSi na panela e teor de umidade relativa do ar. No total, para a análise de regressão linear múltipla, foram consideradas 15 variáveis preditoras.

O modelo de regressão obtido pode ser descrito através da equação 3.1 abaixo:

$$H = 1,738136 + (0,0003 \times \text{SiMn}) + (0,000631 \times \text{Cal}_p) + (0,001637 \times \text{Coque}) + (0,000576 \times \text{Cal}_d) + (0,000905 \times \text{Grafite}) + (0,000651 \times \text{Mn}_{\text{tot}}) \quad (3.1)$$

As variáveis preditoras que foram incluídas no modelo são as seguintes: adição de FeSiMn na panela (SiMn); adição de cal na panela (Cal<sub>p</sub>); adição de coque na panela (Coque); adição de cal no convertedor (Cal<sub>d</sub>); adição de grafite na panela (Grafite) e somatório da adição de todas as ligas à base de ferro-manganês (Mn<sub>tot</sub>). A unidade da variável resposta (teor de H) é ppm e das variáveis preditoras é kg. Verifica-se que, das seis variáveis preditoras do modelo de regressão, cinco delas já haviam sido identificadas na fase de experimentos realizados na panela de aço.



A avaliação do modelo de regressão apresentou os seguintes resultados: um valor de R de 0,9423; um valor de  $R^2$  de 0,8879 e um valor de  $R^2_{ajustado}$  de 0,8777. O valor elevado para o  $R^2_{ajustado}$ , indica que o modelo de regressão obtido conseguiu explicar a maior parte da variabilidade dos dados. A diferença entre o  $R^2$  e  $R^2_{ajustado}$  é pequena, mostrando que todas as variáveis incluídas no modelo são significativas.

#### 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho identificou e quantificou as principais fontes de incorporação de hidrogênio atuantes no processo de produção de aço líquido da aciaria da ArcelorMittal Tubarão. Os resultados obtidos se mostraram coerentes com diversos estudos e dados de literatura. As principais fontes de incorporação identificadas foram as adições de materiais recarburantes (coque e grafite); as adições de cal no convertedor (após o fim de sopro) e na panela; e as adições de ferro-ligas (FeSiMn e somatório de diversas ligas de ferro-mangânês).

Ao se analisar os resultados dos experimentos, verifica-se que as variáveis mencionadas anteriormente foram capazes de elevar o teor médio de hidrogênio de 1,7 ppm para 5,5 ppm, mostrando o quão influentes são as mesmas no processo de incorporação de hidrogênio no aço líquido. Por sua vez, a análise de regressão linear múltipla conseguiu estabelecer um modelo capaz de explicar a maior parte da variabilidade do teor de hidrogênio contido no aço líquido.

O conhecimento gerado por este trabalho é de fundamental importância para o desenvolvimento do processo de produção de aços com teores máximos de hidrogênio de 1,5 ppm. Uma vez que não se pode evitar o uso das fontes de incorporação de hidrogênio identificadas, deve-se, pelo menos, escolher o momento mais apropriado para que as mesmas sejam adicionadas na panela de aço líquido.

#### REFERÊNCIAS

- 1 WARREN, D., Hydrogen Effects on Steel, National Association of Corrosion Engineers, Materials Performance, 1987, Vol. 26, No 1, p. 38-48
- 2 FUJI, T., Estudo da Incorporação e Controle do Hidrogênio e Nitrogênio na Aciaria, Belo Horizonte, UFMG, 2003, 160pp, Dissertação de mestrado ao curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG.
- 3 FUWA, T., Hydrogen and Nitrogen in Liquid Iron Alloys, International Conference on the Physical Chemistry of Iron and Steelmaking, 1978, p. 186-193
- 4 WINKLER, O.; BAKISH, R., Vacuum Metallurgy, 1971, 1ª edição, Amsterdam: Elsevier, 890p
- 5 SILVEIRA, R. C.; ALMEIDA, A.M.M.; FERNANDES, A.A.G., A Presença do Hidrogênio nos Processos de Produção do Aço, Ferroaleações, ILAFA, 1988, p. 11-16
- 6 FRUEHAN, R. J; MISRA, S., Hydrogen and Nitrogen Control in Ladle and Casting Operations, United States Department of Energy (DOE), AISI-DOE Technology Roadmap Program, TRP 0006, Technical Report DE-FC36-97ID13554, 2005, 62 p.
- 7 FITZGERALD, F., Hydrogen in Steelmaking and Casting, Hydrogen in Steel, Spring Residential Conference Nº 19, Institution of Metallurgists, 1982, p. 1-10
- 8 FRIGM, G.; STONE, R., P.; PLESSERS, J.; BOGAN, R., S.; TURKDOGAN, E., T., Experimental Determination of the Accuracy of Hydrogen Measurement in Liquid Steel with HYDRIS System, Electric Furnace Conference Proceedings, 1990, Vol. 48, p. 83-93.