



## MODELO MATEMÁTICO DE PREVISÃO DA EVOLUÇÃO DO TEOR DE HIDROGÊNIO EM PILHAS DE CHAPAS GROSSAS DE AÇO<sup>1</sup>

Kleiner Marques Marra<sup>2</sup>  
 Cristovão Neri Giacomini<sup>3</sup>

### Resumo

Os aços C-Mn microligados fabricados na condição de “chapas grossas” são potencialmente fragilizáveis pelo hidrogênio. Nas linhas convencionais de produção desses materiais, após a laminação a quente, especialmente os aços de alta resistência mecânica para tubulações (aços API) são colocados em pilhas de chapas justapostas de modo a experimentarem um resfriamento mais lento em relação às chapas isoladas, facilitando, assim, a evolução do hidrogênio de seu interior. Quanto menor for a quantidade de hidrogênio retida nas chapas, mais baixa é a chance de haver fragilização por esse elemento. Portanto, é importante se ter uma “ferramenta” de previsão da retenção de hidrogênio em chapas grossas de aços de alta resistência mecânica. Com base nessa premissa, foi desenvolvido um modelo matemático, baseado numa rotina de cálculos, que se presta a prever, sob condições realísticas, a evolução do hidrogênio em chapas grossas empilhadas numa linha de produção siderúrgica.

**Palavras-chave:** Hidrogênio; Chapas grossas empilhadas; Aços de alta resistência mecânica.

### MATHEMATICAL MODEL FOR PREDITION OF HYDROGEN EVOLUTION IN PILED UP STEEL PLATES

#### Abstract

Microalloyed C-Mn steels produced as plates can be potentially damaged by hydrogen. After their mechanical processing in conventional hot rolling lines, high strength steels for pipelines as API steels, are put in piles to promote a slow cooling, making easy, so, the evolution of hydrogen from the plate interior. Reduzing the hydrogen amount, decreases the chance of embrittlement. So, it is important to have a “prediction’s tool” to estimate the residual hydrogen in piled plates. On this premise, it was developed a mathematical model based on a routine of calculations able to predict, under real conditions, the evolution of the hydrogen from high strength steels piled up plates.

**Key words:** Hydrogen; Piled up steel plates; High strength steels.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Diretoria de Pesquisa e Inovação da Usiminas, Belo Horizonte, MG. [kleiner.marra@usiminas.com](mailto:kleiner.marra@usiminas.com)

<sup>3</sup> Membro da ABM, Analista da Tecnologia da Informação, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG. [crstovao.giacomin@usiminas.com](mailto:crstovao.giacomin@usiminas.com)



## 1 INTRODUÇÃO

O hidrogênio é uma impureza inevitável nos aços e ferros fundidos. Esse elemento pode ser muito danoso em certas aplicações e/ou tipos de aços e por isto sua concentração deve ser controlada e minimizada.<sup>(1-3)</sup>

A incorporação de hidrogênio aos aços ocorre de diversas maneiras, principalmente durante sua elaboração na Aciaria, no estado líquido.<sup>(2-5)</sup> A contaminação pode ocorrer pela água contida em matérias primas (sucata, pó fluxante e ferros ligas), pela umidade/compostos orgânicos de refratários, ou mesmo por gases presentes nos fornos da Aciaria. Desta maneira, a água em contato com o metal líquido, e em elevadas temperaturas, dissocia-se gerando o hidrogênio que entra no aço fundido na forma atômica, por um processo de adsorção seguido de absorção.<sup>(2,3)</sup> O nível de hidrogênio depende também da basicidade da escória de aciaria, assim como do tipo de convertedor.

Os aços, na condição de placas, após solidificação, mostram concentrações típicas de hidrogênio na faixa de 4 ppm a 6 ppm. É sabido, entretanto, que em dias de umidade relativa mais alta, essa faixa pode ser deslocada para maiores valores.<sup>(1-3)</sup>

Menos comum, no estado sólido também pode haver incorporação de hidrogênio. Isto pode se dar em processos de tratamento de chapas onde há reações eletroquímicas na sua superfície. Esse tipo de contaminação pode ocorrer na decapagem de laminados a quente, eletrodeposição de revestimentos metálicos ou orgânicos e processos corrosivos. A entrada de hidrogênio é também possível quando há o contato de aços com eletrólitos contendo sais a base de sulfetos, arsenetos ou fosfetos.

Alguns elementos de liga nos aços podem aumentar a solubilidade do hidrogênio, como é o caso do carbono, níquel, cromo (até um certo teor), manganês e zircônio. Contrariamente, existem outros elementos que reduzem a solubilidade, é o caso do alumínio e do silício.<sup>(5-7)</sup>

Por ser um elemento químico de diâmetro atômico muito pequeno, o hidrogênio pode mover-se por difusão no estado sólido com relativa facilidade na rede cristalina dos metais. Para se ter idéia, em ferro puro recozido e na temperatura ambiente enquanto a difusividade do hidrogênio é da ordem de  $10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ , outros elementos intersticiais, como o carbono e o nitrogênio, apresentam esse parâmetro na casa de  $10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ .<sup>(2)</sup>

Alguns fatores como composição química, estrutura cristalina, microestrutura, subestrutura, estado de deformação, presença de óxidos na superfície e a própria temperatura contribuem para aumentar ou diminuir a facilidade com que o hidrogênio difunde-se nos aços. Para peças de aço em temperaturas abaixo de  $100^\circ\text{C}$ , a mobilidade do hidrogênio é drasticamente reduzida, uma vez que o fenômeno de difusão é termicamente ativado.

A difusividade do hidrogênio é também afetada pela atração e “aprisionamento” deste elemento por campos de tensões em torno defeitos cristalinos (discordâncias, contornos de grão e maclas) ou descontinuidades (inclusões, precipitados, elementos segregados ou bandeamento).<sup>(5)</sup> Por isto, os aços com adição de microligantes, deformados a frio ou com segregação/bandeamento são mais susceptíveis à fragilização pelo hidrogênio.

O acúmulo do hidrogênio em torno dos campos de tensões de defeitos/descontinuidades, principalmente a baixas temperaturas (inferiores a  $200^\circ\text{C}$ ), pode enfraquecer as ligações metálicas nos aços e nuclear trincas, que

podem propagar e causar fraturas em peças metálicas. O resultado disto é a falha catastrófica e prematura de componentes em ambiente de serviço, a níveis de tensões aplicadas inferiores às de projeto.

Segundo Lachmund, Schwinn e Jungblut,<sup>(1)</sup> o hidrogênio pode ter dois caminhos de difusão: (i) para a superfície, provocado por um gradiente de concentração tombante em direção à superfície, ou (ii) para o centro das chapas, atraído por campos de tensões das descontinuidades/defeitos. No primeiro caso pode haver a produção de *blisters* (empolamento) da superfície das chapas. No segundo caso pode haver a geração de trincas internas pelo acúmulo do hidrogênio atômico nas interfaces entre matriz e descontinuidade/defeitos. Em ambas as situações, as fissuras resultam do aumento localizado da pressão interna devido à formação de hidrogênio molecular (H<sub>2</sub>), sendo atingidos valores superiores à resistência do aço.

Os aços C-Mn, microligados, como os “aços API” (regulamentados pela American Petroleum Institute), são potencialmente fragilizáveis pelo hidrogênio pois são submetidos, durante sua fabricação na Aciaria, a tratamento em Forno Panela, para a adição de microligantes (por exemplo: Ti, V e Nb) e adição de agentes globulizantes de inclusões. Estes tratamentos, por si só, podem constituir-se em fator de contaminação, seja pela água presente nos materiais de adição ou pela própria umidade da atmosfera dos fornos. Outra causa da maior susceptibilidade à fragilização desses aços é a possibilidade de apresentarem bandeamento e segregação no centro da espessura das chapas, bem como maior dispersão de partículas finas na sua matriz metálica relativamente aos aços C-Mn comuns, e, sobretudo, devido a sua mais alta resistência mecânica.

Com isto, os aços para tubulações de condução na indústria petrolífera, de maior resistência mecânica e em espessuras acima de 9,5mm, produzidos como chapas grossas, são submetidos a tratamento de evolução de hidrogênio residual após sua laminação a quente. Este tratamento, já mencionado anteriormente, consiste no empilhamento das chapas por várias horas.

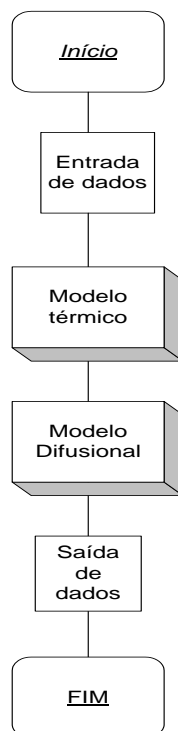
Na Linha de Chapas Grossas da Usiminas, após laminação a quente, as chapas de aço passam por uma Desempenadeira, atravessam o leito de resfriamento, para depois seguirem para o pátio de empilhamento. O número de chapas empilhadas depende da chance de laminação, podendo variar de umas poucas para dezenas.

Visando a otimização do tempo de tratamento das chapas grossas empilhadas na Usiminas foi construída uma rotina de cálculos visando prever, sob condições realísticas, a evolução do hidrogênio nas chapas. Para isto, foi desenvolvida uma formulação matemática, suportada por um programa computacional, sendo adotado o método das diferenças finitas para a resolução das equações diferenciais tanto no modelo térmico, que descreve a variação de temperatura das chapas durante e após seu empilhamento, como a evolução do hidrogênio nas mesmas chapas (modelo difusional).

Para o estabelecimento e validação do modelo térmico, foram realizadas algumas medições de temperatura nas chapas. Isto se deu com o objetivo da obtenção de coeficientes de transmissão de calor mais condizentes com a realidade e para permitir um ajuste fino no modelo térmico.

## 2 METODOLOGIA

O modelo matemático de previsão da evolução de hidrogênio em chapas de aço empilhadas foi alicerçado sobre dois sub-modelos, ambos baseados em rotinas de cálculo com o emprego do método numérico das diferenças finitas. A Figura 1 mostra, esquematicamente, o funcionamento do “Modelo-mor”.



**Figura 1** – Representação esquemática da seqüência de processamentos do modelo de previsão da evolução de hidrogênio.

### 2.1 Construção do Modelo Térmico

O modelo térmico foi concebido considerando-se que a primeira chapa chega para formar a pilha e fica em contato com a superfície do chão do pátio de empilhamento. Com isso, até a chegada da segunda chapa, há perda térmica por condução para o chão e por convecção natural para a atmosfera. As perdas laterais foram desprezadas face a reduzida dimensão das bordas em relação às superfícies das chapas.

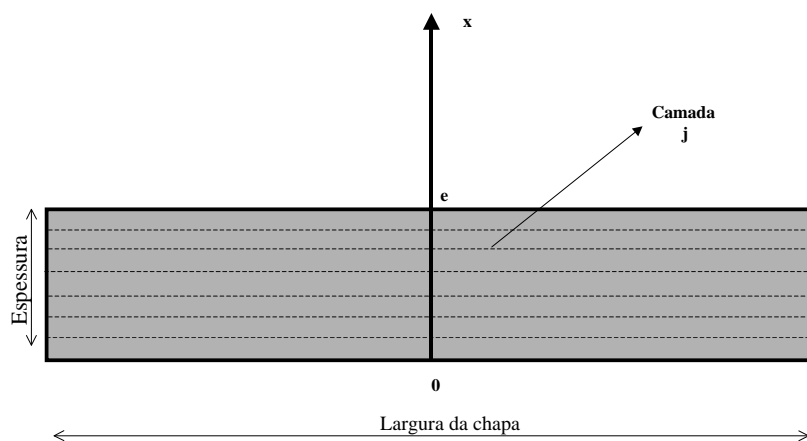
Com a chegada da próxima chapa, tem-se, na primeira peça a perda convectiva cessada, o que passa a ocorrer com a segunda, sendo estabelecida uma troca térmica por uma “pseudo-condução” entre as duas componentes da pilha. Deve ser observado que o contato entre chapas ocorre em alguns pontos e não na totalidade das faces em contato. Há, em escala microscópica, pequenos bolsões de ar entre as chapas, para onde o hidrogênio tende a “migrar”, ao sair das chapas e por onde o fluxo térmico é muito discreto comparativamente aos pontos de contato. Com isso, pode-se modelar a transmissão de calor entre chapas por uma pseudo-condução, com a resistência térmica na interface entre chapas bem maior que a do material metálico, mesmo porque na superfície das chapas há materiais isolantes como carepa e contaminações diversas (poeira, resíduos de óleo etc), o que causa uma restrição nos pontos de contato.

O processo de empilhamento de chapas é contínuo. No entanto, a última chapa fica, a todo tempo, submetida a trocas térmicas com a atmosfera e com a penúltima peça. Já as chapas intermediárias trocam calor entre si.

Na versão inicial do modelo térmico não foi considerada a transmissão de calor por radiação, uma vez que as chapas ficam submetidas a baixa temperatura na pilha (normalmente abaixo de 300°C).

Para efeito de se determinar a circulação de calor no interior das chapas, foi realizada a solução numérica unidimensional (na direção da espessura das chapas) da lei geral da transmissão de calor, que é uma equação diferencial parcial linear do 2<sup>a</sup> ordem, com cada chapa da pilha dividida em um número de camadas horizontais paralelas à superfície de laminação, sendo as mesmas localizada por um contador  $j$  (que variou de 1 à 5). Com isso, se “ $e$ ” for a magnitude da espessura da chapa, o espaçamento entre os centros de duas camadas contíguas pode ser igualada à  $\frac{e}{5}$ .

A Figura 2 mostra a “geometria” das camadas.



**Figura 2** – Corte transversal a uma chapa. Representação das camadas ao longo da espessura da chapa.

A lei geral da condução unidimensional de calor é descrita pela seguinte relação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{eq. (1)}$$

Na equação (1)  $x$  é a posição ao longo da espessura de uma chapa,  $T$  é a temperatura em cada camada e  $t$  é tempo de resfriamento (característico de cada chapa). Já  $\alpha$  é a difusividade térmica e foi inicialmente considerada constante uma vez que varia pouco abaixo de 300°C, que é a faixa de temperaturas que as chapas empilhadas experimentam nas pilhas. O parâmetro  $\alpha$  é definido pela relação condutividade/(densidade.calor específico), sendo aproximadamente  $18,8 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  para os aços baixo carbono e baixa liga nas condições consideradas.<sup>(8)</sup>

Para a solução numérica da equação (1) utilizou-se dois índices. Um deles foi empregado para marcar as posições nodais (camadas) e o outro índice foi estabelecido para “contar” o tempo.

O método das diferenças finitas explícito foi aplicado à solução da equação diferencial (1). Com isto, as camadas internas da chapa (camadas  $j$ ) tiveram a



temperatura avaliada pela equação (2), em que a temperatura no tempo posterior ( $T_j^{i+1}$ ) é função da temperatura atual na camada considerada ( $T_j^i$ ) e da temperatura atual das camadas vizinhas ( $T_{j+1}^i$  e  $T_{j-1}^i$ ).

$$T_j^{i+1} = F_0 \cdot (T_{j+1}^i + T_{j-1}^i) + (1 - 2F_0) \cdot T_j^i \quad (\text{eq. 2})$$

Na equação (2)  $F_0$  é o número de Fourier e vale  $\alpha \cdot \Delta t / (\Delta x)^2$ . Para haver convergência na solução desta equação, necessariamente  $F_0 \leq 0,5$ . Portanto, os valores de  $\Delta x$  e  $\Delta t$  foram estabelecidos levando-se em consideração o número de Fourier.

Para as superfícies livres das chapas na pilha, que ficam em contato com a atmosfera, e que experimentam convecção, vale a equação (3).

$$T_j^{i+1} = 2 \cdot F_0 \cdot (T_{j+1}^i + B_i T_\infty) + (1 - 2F_0 - 2 \cdot B_i \cdot F_0) \cdot T_j^i \quad (\text{eq. 3})$$

Na equação (3),  $B_i$  é chamado de número de Biot, sendo igual à  $h \cdot \Delta x / K$ .<sup>(8)</sup> Para os aços baixo carbono e baixa liga e para a faixa de temperaturas das chapas nos empilhamentos ( $T < 300^\circ\text{C}$ ), a condutividade térmica  $K$  foi tomada inicialmente como  $53 \text{ W/m K}$ .<sup>(9)</sup> Já o coeficiente de transmissão de calor convectivo,  $h$ , foi assumido nos primeiros cálculos como  $11,65 \text{ W/m}^2/\text{°C}$  (por experiência de estudos anteriores). Na equação acima,  $T_\infty$  é a temperatura da atmosfera.

Chama-se a atenção, para a sobreposição entre as chapas e a consideração de uma resistência térmica  $R_k$  entre elas.<sup>(8)</sup> O parâmetro  $R_k$  foi tomado inicialmente como  $0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ .<sup>(8,9)</sup>

Assim, após a sobreposição, a chapa inferior sempre teve o cálculo da sua camada mais externa (camada "m") modificado, da seguinte forma (eq. 4):

$$T_m^{i+1} = 2 \cdot F_0 \cdot (T_{m-1}^i - T_m^i) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot \Delta t}{k \cdot R_k \cdot \Delta x} (T_1^i - T_m^i) + T_m^i \quad (\text{eq. 4})$$

Na equação (4), o termo  $T_1^i$  refere-se à temperatura na primeira camada (superfície inferior) da chapa que foi sobreposta.

Da mesma forma, a camada inferior ( $j=1$ ) da chapa superior, a partir da sobreposição de chapas, teve sua temperatura calculada pela equação (5), dada a seguir.

$$T_1^{i+1} = 2 \cdot F_0 \cdot (T_2^i - T_1^i) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot \Delta t}{k \cdot R_k \cdot \Delta x} (T_m^i - T_1^i) + T_1^i \quad (\text{eq. 5})$$

Na equação (5) o termo  $T_m^i$  refere-se à temperatura da última camada (superfície superior) da chapa inferior (que ficou por baixo).

Para validar esse modelo, foram feitas algumas medições experimentais. Com isso, coeficientes de transmissão de calor foram ajustados e a capacidade de previsão do modelo foi aprimorada.

## 2.2 Construção do Modelo Difusional

O modelo térmico, descrito anteriormente, serviu para a construção do modelo difusional, que, por sua vez foi criado para calcular a quantidade de hidrogênio emanada, por difusão, para fora das chapas empilhadas. Isto, por conseguinte, permitiu prever a quantidade de hidrogênio retida nas mesmas. O modelo difusional descrito nesse item tem as seguintes características:

- a rotina de cálculo construída teve como base a solução numérica da equação diferencial parcial de difusão de hidrogênio no aço dada pela 2<sup>a</sup> Lei de Fick;
- a equação diferencial foi solucionada através do método das Diferenças Finitas, como feito anteriormente para o modelo térmico. A solução foi obtida para o tempo futuro  $t_{i+1}$ , sendo empregado o método explícito, que, via de regra, é simples de ser implementado;<sup>(10)</sup>
- o teor de hidrogênio (H) dentro de uma chapa de aço foi considerado ser função da posição e do tempo uma vez que a chapa tem sua temperatura variada, em razão de estar resfriando, após sua laminação e sofrer a influência térmica das chapas vizinhas na pilha. Foi considerado haver difusão somente ao longo da espessura. Diferentemente do modelo térmico, o modelo difusional foi tratado supondo-se a existência de simetria em relação ao centro da espessura uma vez que a difusão de hidrogênio ocorre, igualmente, na direção das duas superfícies das chapas.

A 2<sup>a</sup> Lei de Fick postula a seguinte equação diferencial parcial linear do 2<sup>a</sup> ordem:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad \text{eq. (6)}$$

Na equação (6) D, ou a difusividade, foi considerada constante ao longo da espessura, uma vez que foi levado em conta uma temperatura média em cada chapa da pilha e foi desprezada a influência da própria concentração do elemento H na difusividade. A relação que envolve D com a temperatura T (em graus Kelvin) é

do tipo exponencial, definida por:  $D = D_0 \cdot e^{\frac{Q}{RT}}$ .

Onde:  $D_0$  = fator de freqüência (0,1mm<sup>2</sup>/s).

$Q$  = 3200cal/mol

$R$  = constante universal dos gases (1,9872cal/mol/k).

$T$  = temperatura em Kelvin (K).

As seguintes condições gerais foram assumidas para solução da equação (6):

- O teor de hidrogênio na superfície das chapas foi considerado nulo. Assume-se que uma vez chegando a superfície, o hidrogênio imediatamente migra para a atmosfera. A atmosfera entre as chapas (nos "bolsões") foi considerada ter baixíssima pressão de vapor de H<sub>2</sub>, sendo tomada como zero
- Conforme já mencionado, foi suposto um perfil uniforme de temperatura ao longo da espessura das chapas. Isto é, obviamente, uma aproximação.
- Como também já comentado, foi suposta uma simetria da distribuição de hidrogênio com relação ao centro da espessura da placa. Com isto, a equação (6) foi resolvida tomando-se uma "meia-espessura".
- Nas camadas internas (excluídas a superfície e o meio da espessura da chapa), a equação (6) foi solucionada pelo método das diferenças finitas,

considerando-se ordem 2 no espaço (diferenças centrais) e de ordem 1 no tempo (diferenças progressivas).<sup>(10)</sup>

- O domínio de integração é bidimensional.

Portanto, numa chapa de espessura “e”, a equação (6) deve ser resolvida para  $t > 0$  e  $0 < x < 1$ , sendo  $x$  a meia espessura normalizada. As condições inicial e de contorno assumidas foram as seguintes:

- $H(0,x) = H_0$ , onde  $H_0$  é o teor inicial de hidrogênio da chapa, antes do empilhamento.

$$\frac{\partial H(t,0)}{\partial x} = 0$$

- para  $t > 0$ .

A solução numérica da equação (6) seguiu as premissas listadas a seguir.<sup>(10)</sup>

- Nas camadas ao longo da meia-espessura, excluindo-se a superfície e o centro da espessura, aplicou-se a relação:

$$\frac{C_{i+1,j} - C_{i,j}}{\Delta t} = D \frac{C_{i,j-1} - 2C_{i,j} + C_{i,j+1}}{(\Delta x)^2}$$

ou seja:

$$C_{i+1,j} = C_{i,j}(1 - 2.D.\rho) + D.\rho(C_{i,j+1} + C_{i,j-1}) \quad \text{eq. (7)}$$

Onde:

$$\rho = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (\rho \text{ deve ser menor que } 0,5/D \text{ para garantir a convergência da solução}).$$

- Na superfície da chapa, onde  $x=1$ , fez-se  $C_{i+1,j} = 0$ .
- No centro da chapa, onde  $x=0$ , o teor de hidrogênio foi calculado pela relação abaixo.

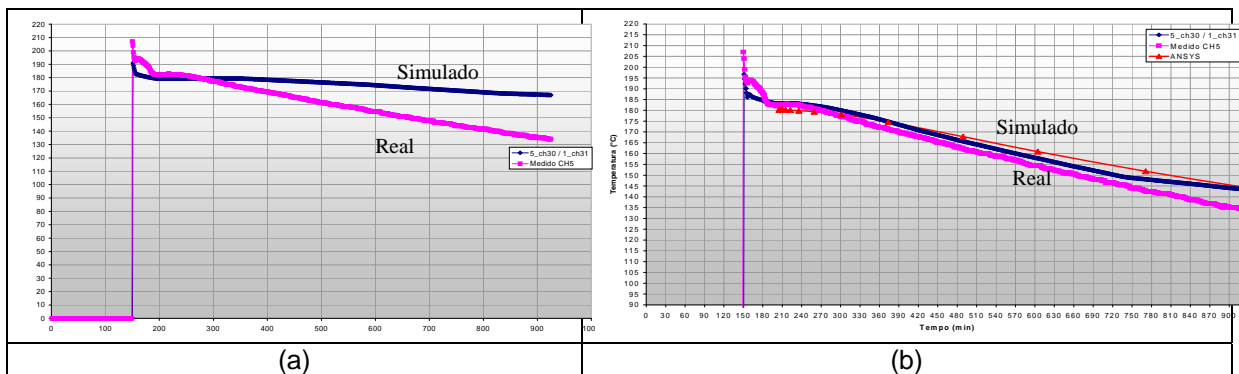
$$C_{i+1;0} = C_{i;0}(1 - 2.D.\rho) + 2.D.\rho.C_{i;1} \quad \text{eq. (8)}$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista os resultados insatisfatórios alcançados nas primeiras simulações com o modelo térmico formulado inicialmente, adotando-se propriedades físicas (difusividade térmica e coeficiente convectivo) constantes, foram, a posteriori, consideradas essas grandezas variando em função da temperatura.<sup>(11)</sup> Além disso, foi adicionado ao modelo térmico o modo de perda de calor da chapa por radiação, além de ter sido ajustado, durante sua validação, os valores das resistências térmicas. A Figura 3 mostra como ficou melhor aproximado o perfil térmico previsto comparativamente ao real com a modificações realizadas tomando-se como exemplo uma chapa de aço de dimensões: 40.000x2.174x15,6mm, posicionada como trigésima peça (de baixo para cima), numa pilha de 41 chapas idênticas, e com temperatura de chegada na pilha de 210°C.

De modo geral, após o ajuste do modelo, foi observada uma boa aproximação entre valores previstos e medidos, com o erro sempre inferior à 10%.





**Figura 3** – (a) Perfil previsto pela modelo inicial. (b) Perfil previsto pela modelo modificado posteriormente.

Toda a formulação dos modelo térmico e difusional foi desenvolvida com o aplicativo *Visual Basic*, e a Figura 4 mostra os valores das “constantes” de entrada desses modelos. Uma vez, se necessária alguma modificação, os mesmos são facilmente alterados.

**Figura 4** - Interface de entrada de constantes e de parâmetros dos modelos térmico e difusional.

Já a Figura 5 apresenta a interface de entrada de dados, criada em ambiente *Visual Basic*, onde pode-se variar, para efeito de exercício de simulação, o teor inicial em hidrogênio das chapas (considera-se único para todas as peças de uma pilha), tempo de tratamento da pilha formada e as características de cada chapa da pilha (espessura, temperatura de chegada na pilha e intervalo de tempo na para colocação de chapas consecutivas). Com isso, ao “rodar” o programa obtêm-se como saída o perfil térmico e a evolução de hidrogênio de cada chapa sob as condições de simulação. A título de exemplo, a Figura 6 apresenta o resultado de uma simulação na qual foram empilhadas 15 chapas de aço de mesma espessura (25 mm), com temperatura de chegada também única e igual á 300°C, numa condição descrita pelos dados de entrada da Figura 5.

Entrada de dados para simulação

Principal Simular

**Opções da simulação**

1) Teor de hidrogênio máximo permitido  ppm

2) Tempo de empilhamento desejado após colocação da última chapa  min

3) Teor inicial de hidrogênio da pilha  ppm

4)  Considerar última chapa como de sacrifício.

**Composição da pilha**

Qualidade: SAE1006    Esp. chapa (mm): 25,00    Temperatura (°C): 300    Posição na pilha: 1    Tempo empilh. (min): 15

Qualidade	Espessura chapa	Temperatura da chapa	Ordem de empilh.	Intervalo empilh.
SAE1006	25	300	1	15
SAE1006	25	300	2	15
SAE1006	25	300	3	15
SAE1006	25	300	4	15
SAE1006	25	300	5	15
SAE1006	25	300	6	15
SAE1006	25	300	7	15
SAE1006	25	300	8	15
SAE1006	25	300	9	15
SAE1006	25	300	10	15
SAE1006	25	300	11	15
SAE1006	25	300	12	15
SAE1006	25	300	13	15
SAE1006	25	300	14	15
SAE1006	25	300	15	15

Carregar lista

Limpa lista

**Simular**

Incluir Alterar

Gravar Imprimir

Excluir Sair

Figura 5 – Interface de entrada de dados.

**Dados de entrada**

Teor inicial de hidrogênio da chapas: 5 ppm

Última chapas de sacrifício: SIM

Teor residual de HIROGÊNIO máximo permitido: 2 ppm

Tempo de empilhamento desejado após última: 600 min

Qualidade	Espessura chapas	Temperatura da chapas	Ordem empilh.	Intervalo empilh.
SAEI 006	25	300	1	15
SAEI 006	25	300	2	15
SAEI 006	25	300	3	15
SAEI 006	25	300	4	15

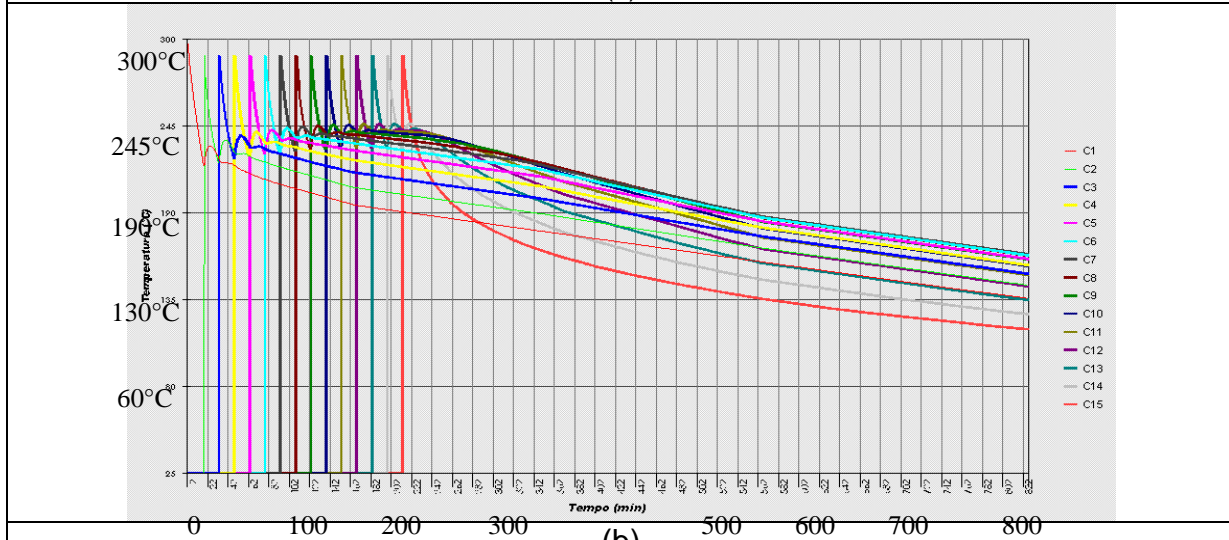
**Valores Calculados**

Tempo gasto para empilhar: 225 min | Tempo necessário empilhamento após última chapas: 211 min | Tempo total empilhamento: 825 min

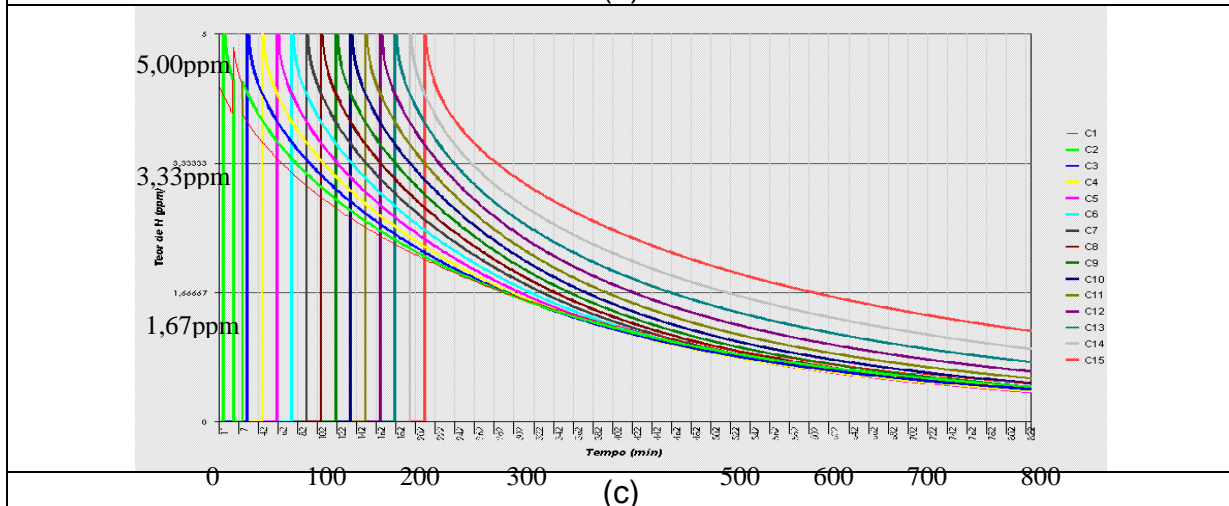
Altura da pilha: 0,375 m | Número de chapas da pilha: 15

Valores médios calculados de temperatura das chapas								Valores médios calculados de teor de hidrogênio das chapas							
tempo	Chapas 1	Chapas 2	Chapas 3	Chapas 4	Chapas 5	Chapas 6	Chapas 7	tempo	Chapas 1	Chapas 2	Chapas 3	Chapas 4	Chapas 5	Chapas 6	Chapas 7
1	296,9	0	0	0	0	0	0	2	4,73	0	0	0	0	0	0
2	286	0	0	0	0	0	0	3	4,66	0	0	0	0	0	0
3	280,4	0	0	0	0	0	0	4	4,59	0	0	0	0	0	0
4	274,9	0	0	0	0	0	0	5	4,54	0	0	0	0	0	0
5	269,6	0	0	0	0	0	0	6	4,49	0	0	0	0	0	0
6	264,4	0	0	0	0	0	0	7	4,45	0	0	0	0	0	0
7	259,4	0	0	0	0	0	0	8	4,41	0	0	0	0	0	0
8	254,5	0	0	0	0	0	0	9	4,37	0	0	0	0	0	0
9	249,8	0	0	0	0	0	0	10	4,33	0	0	0	0	0	0
10	245,2	0	0	0	0	0	0	11	4,3	0	0	0	0	0	0
11	240,7	0	0	0	0	0	0	12	4,27	0	0	0	0	0	0
12	236,3	0	0	0	0	0	0	13	4,24	0	0	0	0	0	0
13	232	0	0	0	0	0	0	14	4,21	0	0	0	0	0	0
14	227,9	0	0	0	0	0	0	15	4,19	5	0	0	0	0	0
15	223,8	0	0	0	0	0	0	16	4,17	4,99	0	0	0	0	0
16	219,9	0	0	0	0	0	0	17	4,14	4,84	0	0	0	0	0
17	220,6	289,6	0	0	0	0	0	18	4,12	4,74	0	0	0	0	0
18	224,7	280,3	0	0	0	0	0	19	4,09	4,67	0	0	0	0	0

(a)



(b)



(c)

**Figura 6** – Resultado de uma simulação. (a) Dados gerais de saída. (b) Gráfico dos perfis térmicos. (c) Gráfico da evolução de hidrogênio das chapas.



### 3 CONCLUSÕES

O modelo construído se mostrou bastante flexível no que tange às condições de formação das pilhas de chapas grossas de aço (qualidade e espessura das chapas, temperatura de chegada, intervalo de tempo entre duas chapas consecutivas, número de peças na pilha, teor inicial de hidrogênio de cada peça e tempo de empilhamento).

O modelo térmico foi validado e verificado ter boa precisão. Já o modelo difusional não foi validado por ser imprecisa e de difícil realização a análise química para determinação do perfil de concentração de hidrogênio durante o resfriamento das chapas na pilha. De qualquer forma, os resultados do modelo podem ser tomados como referência e normalizados em relação à concentração inicial. Com isso, pode-se ter uma boa indicação da efetividade da desidrogenização das chapas, sendo possível acompanhar cada chapa da pilha e saber, por exemplo, em qual das peças o teor de hidrogênio é mais elevado.

Portanto, trata-se de uma ferramenta de controle de qualidade para chapas grossas de aços de alta resistência mecânica, especialmente para aços destinados a tubos de condução de gás e óleo, que exigem, via de regra, uma elevada sanidade interna do material de base.

### REFERÊNCIAS

- 1 LACHMUND, H.; SCHWINN, V.; JUNGBLUT, H. A. - Heavy Plate Production: Demand on Hydrogen Control, Ironmaking and Steelmaking, N. 5, 2000, p.:381-386.
- 2 GRABKE, H. J; GEHRMANN, F.; RIECHE, E. – Hydrogen in Microalloyed Steels, Steel Research, 72, N. 5-6, 2001, p.:225-235.
- 3 NAGUMO, M. – Function of Hydrogen in Embrittlement of High-strength Steels, ISIJ International, V.41, N. 6, 2001, p.: 590-598.
- 4 BORRUTO, A.; BORRUTO, T. M. R.; SPADA, A. – Hydrogen-Steel Interaction: Hydrogen Embrittlement in Pipes for Power Former Plant Effluents, International Journal of Hydrogen Energy, N. 24, 1999, p.: 651-659.
- 5 EASTERLING, K. – Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths & Co, 1985, 2<sup>a</sup> Ed., Sweden, 231p.
- 6 POUND, B. G. – Hydrogen Trapping in High-Strength Steels, Acta Mater., V. 46, N. 16, 1998, pp.:5733-5743.
- 7 MAIER, H. J.; POPP, W. ; KAESCHE, H. – Effects of Hydrogen on Ductile Fracture of a Spheroidized Low Alloy Steel, Material Science Eng., V. A191, 1975, p.:17-26.
- 8 INCOPROPERA, F. I. ; DEWITT, D. P. – Transferência de Calor e de Massa, LTC, 5<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, 2003, 633p.
- 9 KREITH, F.; BOHN, M. S. – Princípios de Transferência de Calor, Thomson, São Paulo, 2002, 623p.
- 10 SPERANDIO, D.; MENDES, J. T.; SILVA, L. H. M. – Cálculo Numérico, Pearson/Prentice Hall, São Paulo, 2003, 351p.
- 11 Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures - The BISRA, Butterworths Scientific Publications, London, 1953.