



PERDA DE PESO DEVIDO À FORMAÇÃO DE CAREPA NO PROCESSO DE REAQUECIMENTO DOS AÇOS¹

Antônio Adel dos Santos²
Marcos Henrique Teixeira³
Darcy Sergio Passos⁴

Resumo

Baseando-se na teoria da cinética de oxidação dos aços em temperaturas e tempos elevados e de uma expressão empírica para a constante isotérmica de oxidação, foi desenvolvido um modelo de cálculo do crescimento da carepa primária formada em aços durante o processo de reaquecimento. O modelo foi implantado no Sistema de Otimização Operacional dos fornos de reaquecimento de placas da Linha de Tiras a Quente da Usiminas, em Ipatinga. Mostrou-se neste trabalho que a capacidade preditiva do modelo foi satisfatória em termos de valores médios de espessura e de perda de peso da placa. Dados levantados no processamento de aços foram confrontados com valores calculados, permitindo confirmar o efeito preponderante da temperatura, seguido do tempo de permanência, na espessura da carepa. Os resultados do modelo implantado forneceram subsídios importantes para auferir e otimizar o rendimento de laminação.

Palavras-chave: Aços; Formação de carepa; Fornos de reaquecimento; Modelo de previsão.

WEIGHT LOSS DUE TO SCALE FORMATION DURING THE REHEATING OF STEELS

Abstract

Based on the theoretical kinetics of oxidation of steels at elevated temperatures together with a semi-empirical equation of the constant for isothermal oxidation, a predictive model for scale thickness growth during the reheating of steels was developed. The model was implemented in the Optimization System of the Reheating Furnaces of Usiminas' Plant at Ipatinga. In this paper it is shown that the predictive power of the model was satisfactory regarding the scale thickness and the weight loss of slabs due to scale formation. By comparing data gathered in the plant with calculated values the preponderant effect of temperature on scale thickness was confirmed, followed by the effect of residence time. Results of the implemented model have supplied important subsidies to check and optimize rolling yields in the plant.

Key words: Steels; Scale formation; Reheating furnaces; Predictive model.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M.Sc. Dr. CQE/ASQ, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM; Engenheiro Eletricista, M.Sc., Gerência de Automação da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM; Técnico Metalurgista, Superintendência de Laminação a Quente da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

A camada superficial de óxidos formada durante o reaquecimento dos aços, chamada carepa primária, é muito relevante no processo de laminação a quente, por duas razões principais. A primeira é que a carepa precisa ser totalmente removida antes do primeiro passe de laminação para evitar a geração de defeitos nos produtos laminados; a segunda é que sua presença implica em perda metálica, o que reduz o rendimento do produto laminado. Adicionalmente, parte desta carepa se desprende nos fornos causando problemas operacionais.

A remoção da carepa nas estações de descarepação depende fundamentalmente de suas características morfológicas, além da configuração geométrica e potência dos bicos aspersores. A morfologia da carepa, por sua vez, é influenciada por diversos fatores, tais como: composição química do aço, rota de produção, temperaturas e tempos do processo de reaquecimento, composição da atmosfera do forno e condição prévia da superfície do material. Por rota de produção, diferenciam-se os processos de reaquecimento em linhas de laminação convencional e em fornos túneis em linhas compactas. Os mecanismos de formação da carepa nos aços já foram extensamente estudados,⁽¹⁻⁴⁾ e levaram ao entendimento de características observadas tais como: a seqüência de formação dos óxidos e a presença de vazios e trincas. Atualmente, vários estudos ainda continuam a ser realizados, mas percebe-se o foco no efeito de elementos residuais no aço ou de baixa liga, tais como Cu e Ni, nas características e aderência da carepa ao substrato, tendo em vista sua remoção nas estações de descarepação.^(5,6) Ressalta-se que os estudos fundamentais sobre a oxidação a altas temperaturas utilizaram ferro puro ou aços comuns contendo somente elementos tradicionais como C, Si e Mn. Atualmente, com a diversificação crescente das composições químicas dos aços e com a reutilização da sucata, vários elementos químicos no passado pouco utilizados, agora têm presença mais freqüente nos aços.

O outro aspecto tecnológico relevante é a magnitude da formação da carepa. Quanto maior a espessura da camada de carepa, maior será a perda de peso do produto e, portanto, menor o rendimento metálico. Nos fornos de reaquecimento convencionais, esta espessura varia entre 1 mm e 3 mm, acarretando perdas metálicas entre 0,7% e 1,5%. Nota-se ausência de estudos de literatura voltados para prever o crescimento e a espessura desta carepa no processo industrial, embora haja significativa informação e esteja bem estabelecida a cinética de oxidação dos aços a altas temperaturas. A questão é que a cinética de oxidação tem sido estudada em ensaios laboratoriais nos quais uma amostra é submetida à ação oxidante, sob uma atmosfera controlada e constante, a uma determinada temperatura, variando-se normalmente o tempo, o que resulta numa equação válida para condições isotérmicas. Portanto, sua aplicação à formação de carepa em fornos de reaquecimento apresenta muitas limitações, uma vez que a maioria dos fatores que influem na carepa não é considerada na equação isotérmica. Na literatura consultada, somente um trabalho cita a aplicação de um modelo de cálculo da espessura da carepa durante o processo industrial de reaquecimento de placas⁷, porém sem detalhamento de formulações matemáticas.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma contribuição ao cálculo da espessura da carepa formada, e da perda de peso de placas de aço, quando submetidas ao reaquecimento em fornos de viga móvel. A formulação para o cálculo foi implantada em computador de processo da Linha de Tiras a Quente da Usiminas, em Ipatinga,

e em um simulador *off line* para os Fornos da Linha de Chapas Grossas. Discute-se a aplicação da formulação e suas limitações.

2 MODELO DE CRESCIMENTO DA CAREPA

Do conhecimento acumulado sobre a formação da camada de óxidos a altas temperaturas no ferro e nos aços, três constatações de interesse para o presente trabalho podem ser extraídas.⁽¹⁻⁹⁾ A primeira é que a camada de óxido em crescimento mantém-se em contato com o substrato quando existe vapor d'água na atmosfera oxidante. Na ausência desta espécie gasosa, ocorre destacamento da camada, formando um vazio entre substrato e óxido. A combustão em fornos industriais de reaquecimento resulta, para qualquer combustível usado, na presença de teores da ordem de 15% de H₂O na fumaça, de forma que a carepa tende a manter-se aderida ao metal. A segunda constatação é que a cinética de oxidação em tempos muito curtos é, normalmente, controlada pela adsorção e ionização do oxigênio vindo da atmosfera, sendo uma reação de primeira ordem e a cinética linear. Decorrido algum tempo, com o espessamento da camada de óxido, a difusão de íons Fe na camada passa a ser o mecanismo controlador, tornando a reação de segunda ordem, ou seja, a cinética torna-se parabólica. O momento de transição depende de vários fatores, tais como a composição do substrato e da atmosfera. Por exemplo, Sheasby et al.⁽³⁾ encontraram 10 min para o momento de transição. De qualquer forma, em fornos industriais, onde o tempo de permanência é de cerca de algumas horas, pode-se desprezar o período inicial de reação linear e considerar todo o crescimento como parabólico. Finalmente, a terceira constatação de interesse aqui é que a oxidação de aços de baixa liga em atmosferas típicas de fornos industriais promove a formação da carepa clássica em três camadas, uma interna, constituída de wustita, uma intermediária, com menor nível de oxidação, constituída de magnetita e uma externa, de maior nível de oxidação, constituída de hematita (Figura 1). Além disso, a proporção entre estas camadas é 95:4:1, respectivamente.

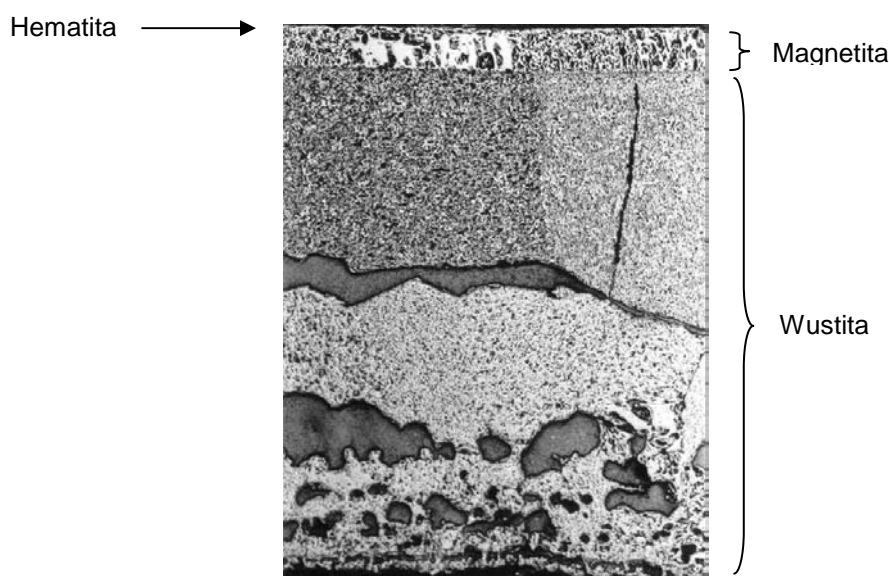


Figura 1. Seção metalográfica transversal de uma amostra de carepa formada em forno de reaquecimento, mostrando as três camadas clássicas.



Partindo-se das duas primeiras premissas descritas no parágrafo anterior,^(3,10,11) a cinética de formação isotérmica da carepa em fornos de reaquecimento é dada pela equação (1).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{k}{M} \quad (1)$$

M: medida da formação da carepa, espessura ou ganho de massa;
k: constante de reação.

Integrando-se a diferencial no tempo e sabendo-se que no instante inicial a espessura da carepa é nula, tem-se a equação de crescimento parabólico, da forma (2). Nesta equação k_p representa a constante de crescimento parabólico, e sua unidade depende de qual variável é medida experimentalmente, ou que se queira calcular. Comumente, são usados experimentos laboratoriais utilizando-se termo-balança, onde é medido o ganho de massa da amostra. Como este ganho corresponde ao oxigênio incorporado na carepa, M é dado em $g(O) / cm^2$, pois é um ganho relativo por área, e k_p fica definido como $g(O)^2 / (cm^2 \cdot s)$. Alternativamente, k_p poderia ser dado em função do Fe consumido, sendo que sua conversão depende da composição da carepa.

$$M^2 = k_p t \quad (2)$$

Pode-se ainda tratar M como a espessura da carepa em função do tempo. Neste caso, a equação (2) pode ser reescrita da seguinte forma, onde s é dado em cm, λ em cm^2/s , e o tempo t em s.

$$s^2 = \lambda t \quad (3)$$

Assumindo-se que a estrutura da carepa obedeça à clássica formação em três camadas, mantendo-se a proporção 95:4:1, e conhecendo-se as densidades de cada um dos óxidos, pode-se converter k_p em λ , chegando-se à relação (4).

$$\lambda = k_p / 1,877 \quad (4)$$

Sheasby et al.⁽³⁾ fizeram uma compilação de dados de k_p determinados para o crescimento da carepa em aços baixa liga submetidos a ensaios isotérmicos em diferentes atmosferas, realizados entre 700°C e 1.200°C. Os valores de λ ficaram alinhados com pequena dispersão quando colocados num gráfico de $\log(k_p)$ versus inverso da temperatura. Com isso foi obtida a equação (5). Aplicando-se a transformação (4) em (5) obtém-se o valor de λ , neste caso já transformado na unidade de (mm^2/s) . Outra equação para o cálculo de λ foi apresentada por Samarasekera et al.,⁽¹²⁾ sendo que os resultados das duas equações diferem em menos que 10%.

$$\lambda = 53,2765.10^{\left(\frac{-8868}{T} + 0,977\right)} \quad (5)$$

λ : constante de oxidação isotérmica (mm²/s);
T: temperatura (K).

Aplicando-se as equações (3) e (5) pode-se calcular a espessura da carepa formada em condições isotérmicas, em função da temperatura e do tempo. A temperatura influi de forma exponencial no crescimento, sendo a variável mais significativa. O tempo é a segunda variável em importância no crescimento da carepa, tendo influência conforme o modelo adotado. Para aplicação deste modelo parabólico ao processo industrial de reaquecimento, é necessário adaptar a equação (5) para a condição anisotérmica pertinente ao processo. Para isso, foi aplicado neste trabalho um procedimento antigo, apresentado por Sachs e Tuck,⁽¹³⁾ que mostrou consistência nos cálculos.

Espera-se, então, que o procedimento de cálculo da espessura da carepa conforme apresentado seja capaz de prever a sua espessura com razoável precisão.

A perda de peso, no caso de reaquecimento de placas, é calculada em função da espessura da carepa e das suas dimensões através da equação (6), a qual é deduzida considerando-se a formação clássica em três camadas na proporção 95:4:1.

$$\text{Perda}(\%) = 1,096.s \cdot \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{L} + \frac{1}{C} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

s: espessura da carepa (mm);
E, L, C: espessura, largura e comprimento da placa (mm).

Rotinas para cálculo da espessura da carepa e da perda de peso foram implementadas no Sistema de Otimização dos fornos de reaquecimento de placas da Linha de Tiras a Quente da Usiminas (LTQ), em Ipatinga. A cada intervalo determinado de tempo, atualmente 2 minutos, o modelo matemático de aquecimento existente neste sistema é executado para cada placa dentro do forno. Este modelo possui uma malha cuja solução por diferenças finitas gera o perfil de temperatura da placa na espessura. Os valores de temperatura calculados na superfície da placa são alimentados no cálculo da carepa a cada execução do modelo. No desenformamento, a espessura final calculada da carepa é disponibilizada no banco de dados, e o cálculo da perda de peso da placa é realizado.

Para os fornos da Linha de Chapas Grossas da Usina de Ipatinga (LCG), cujo Sistema de Otimização ainda está sendo instalado, foi desenvolvido um simulador matemático *off line* que calcula a evolução térmica da placa em uma malha resolvida pelo método de volumes finitos.⁽¹⁴⁾ O mesmo procedimento para cálculo da espessura da carepa e da perda de peso foi introduzido neste simulador. Os resultados de aplicação deste procedimento estão ainda sendo validados e não serão apresentados neste trabalho.

3 APLICAÇÃO INDUSTRIAL DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

A metodologia de cálculo foi ajustada preliminarmente comparando-se valores calculados e medidos da espessura de carepa formada em placas reaquecidas nos fornos da LTQ. Posteriormente, resultados de cálculos foram analisados em condições específicas e não usuais de operação, que permitiram mostrar o efeito da temperatura de placa e do tempo de permanência na espessura da carepa e na perda de peso da placa.

3.1 Procedimento Experimental

Foram retiradas amostras de carepa da superfície superior de placas na saída do desenformamento, medindo cerca de 20 cm², as quais foram resfriadas naturalmente. Para determinação da espessura média a frio, foram tomadas dez medidas de sua espessura utilizando-se um micrômetro digital. Sabe-se que o resfriamento natural causa mudança na morfologia e composição da carepa, principalmente pela decomposição de parte da wustita em magnetita e ferro, porém não altera significativamente sua espessura. As placas laminadas geram bobinas a quente, cujo peso é a diferença entre o peso da placa e das perdas. As perdas são dadas pela carepa e pelas aparas. Ressalta-se, no entanto, que a perda por carepa inclui a carepa primária, formada no forno, e a carepa secundária, formada durante o processo de laminação. Então, foram levantados os pesos de placas antes do enformamento, das aparas cortadas e das bobinas produzidas, em placas que tiveram amostras de carepa. A Figura 2 mostra o fluxo de produção do LTQ e a posição das amostragens.

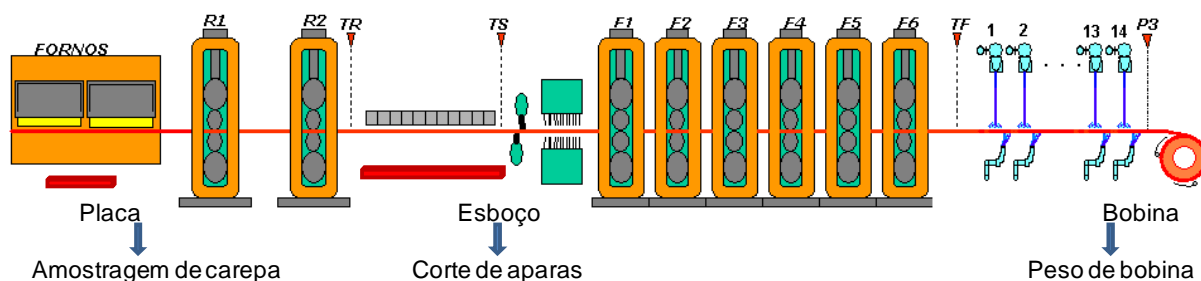


Figura 2. Esquema da Linha de Laminação de Tiras a Quente e posições de amostragem usadas. Legenda: R1 e R2: laminadores desbastadores; TR: pirômetro; TS: tesoura de pontas; F1 a F6: cadeiras do laminador acabador; TF: pirômetro de acabamento de laminação; P3: pirômetro de medição de temperatura de bobinamento; 1, 2...14: bancos do sistema de resfriamento da tira.

Foram considerados dois levantamentos de dados: no primeiro a temperatura de desenformamento da placa foi da ordem de 1.230°C, típica para um forno do LTQ, porém o tempo de permanência no forno foi excessivo, da ordem de 290 min. No segundo, o tempo de permanência foi de cerca de 220 min, mas a temperatura foi muito elevada, em torno de 1.265°C.

3.2 Resultados

A Tabela 1 mostra os principais dados do primeiro levantamento. Percebem-se discrepâncias consideráveis entre espessura medida e calculada, mas o valor medido, 2,86 mm, é suficientemente próximo (considerando-se o objetivo de cálculo de rendimento metálico), da espessura média calculada pelo modelo, no

computador de processo, que foi de 2,78 mm. Com isso, a perda média de peso das placas, devido à carepa primária, foi de 1,48%.

Tabela 1. Dados básicos do primeiro levantamento de dados

tp: tempo de permanência; E, L, C e PP: espessura, largura, comprimento e peso de placa; s_calc e s_med.: espessuras calculada e medida da carepa; Perda: perda de peso calculada pelo modelo; Td: temperatura de desenformamento.

Observe que o tempo de permanência médio das placas nos fornos foi de 290 min. A temperatura de desenformamento de placa, calculada pelo modelo do Sistema de Otimização, somente foi armazenada para a primeira placa e o valor foi 1.236°C.

Os dados principais relativos ao segundo levantamento são mostrados na Tabela 2. Igualmente à situação anterior, existe considerável variação entre valores de espessura de carepa medidos e calculados. Porém, a espessura média calculada, 2,99 mm, foi bastante próxima da medida, 2,89 mm. A perda de peso média calculada pelo modelo para essas placas foi de 1,62%. Deve-se destacar que o tempo de permanência médio foi de 221 min, valor bastante inferior ao obtido no levantamento anterior. Apesar disso, a espessura de carepa e a perda de peso foram maiores, o que será justificado com base na temperatura da placa mais elevada.

Por restrição experimental, somente foi obtido o peso total das aparas de 30 esboços sendo 28 deles originados das placas do segundo levantamento. A tabela 3 mostra os valores de peso total das placas, das aparas e das bobinas. A perda por aparas foi de 0,64% e a perda por carepa primária calculada, baseando-se na espessura média medida de carepa foi de 1,60%. Excluindo-se as perdas por aparas e pela carepa primária, o restante da perda de material no processo deve-se à carepa secundária, que ficou avaliada em 0,47%.



Tabela 2. Dados básicos do segundo levantamento de dados

Placa	tp (min)	E (mm)	L (mm)	C (mm)	PP (t)	s_calc. (mm)	Perda (%)	s_med. (mm)	Td (°C)
1	206	252	1242	6001	14,509	2,96	1,60	2,80	1262
3	210	252	1225	6048	14,503	2,57	1,39	2,85	1255
4	212	252	1212	6048	14,503	3,00	1,63	2,70	1264
5	213	252	1215	6048	14,503	3,02	1,64	2,93	1264
6	214	252	1226	6048	14,503	2,59	1,40	2,87	1254
7	218	252	1200	6050	14,508	2,64	1,44	3,13	1257
8	221	252	1261	6051	14,867	3,07	1,66	3,30	1265
9	218	252	1224	6050	14,508	3,09	1,68	3,15	1264
10	220	252	1224	6048	14,503	2,67	1,45	2,74	1257
11	222	252	1224	6048	14,503	2,72	1,48	3,04	1261
12	221	252	1219	6048	14,503	3,10	1,68	2,43	1260
13	221	252	1239	6001	14,509	3,19	1,73	3,16	1264
14	223	252	1227	6001	14,509	2,80	1,52	2,41	1265
15	224	252	1237	6050	14,508	2,90	1,57	3,11	1267
16	223	252	1231	6050	14,508	3,29	1,79	2,91	1266
17	224	252	1226	6050	14,508	3,14	1,70	3,48	1265
18	222	252	1313	6050	15,578	2,78	1,49	2,79	1265
19	222	252	1215	6050	14,508	2,94	1,60	3,20	1269
20	223	252	1223	6050	14,508	3,27	1,77	2,58	1265
21	229	252	1231	6001	14,509	3,23	1,75	2,84	1264
22	225	252	1237	6050	14,508	2,98	1,61	2,41	1268
23	226	252	1234	6050	14,508	2,99	1,62	3,35	1268
24	226	252	1229	6050	14,508	3,29	1,78	2,47	1266
25	227	252	1231	6050	14,508	3,22	1,75	3,26	1263
26	227	252	1208	6050	14,508	2,83	1,54	2,85	1265
27	229	252	1226	6050	14,508	3,00	1,63	2,75	1269
28	228	252	1227	6050	14,508	3,40	1,84	2,65	1271
Médias	221	252	1230	6042	14,560	2,99	1,62	2,89	1264

Tabela 3. Parcelas de perdas metálicas durante o processo de laminação a quente na condição do segundo levantamento

Peso das placas (kg)	Peso das bobinas (kg)	Peso das aparas (kg)	Perda por aparas (%)	Perdas por carepa primária (%)	Perdas por carepa secundária (%)
434260	422480	2780	0,64	1,60	0,47

3.3 Discussão dos Resultados

Teoricamente, o principal fator que influencia no crescimento da carepa é a temperatura, uma vez que o coeficiente de difusão dos elementos varia exponencialmente com a temperatura e a formação da carepa primária é controlada por mecanismos de difusão. A dependência do crescimento da carepa com o tempo é na forma de raiz quadrada, portanto, menos expressiva. O modelo de cálculo da carepa aqui aplicado leva em conta estes dois fatores. A condição superficial da placa (escarfada, esmerilhada etc), o potencial de O₂ da atmosfera do forno e a composição química do aço são fatores adicionais que influem no crescimento da

carepa. Por considerar apenas os dois principais fatores, a precisão do modelo de crescimento aqui utilizado deve ser limitada.

Além disso, deve-se ressaltar que as medidas de espessura de carepa são realizadas em uma amostra, muitas vezes bem pequena, retirada próximo a um canto da placa. Supõe-se que a espessura medida nesta amostra seja a mesma em toda a superfície da placa, o que certamente é apenas uma aproximação, tendo em vista os gradientes de temperatura e ao fato de que parte da carepa formada se desprende dentro do forno, o que afeta o crescimento da carepa adicional.

A figura 3 mostra uma comparação gráfica entre os valores calculados e medidos de espessura de carepa do segundo levantamento. Observa-se que os valores calculados estão, de uma forma geral, compreendidos entre os medidos, evidenciando que os dados medidos têm maior dispersão, mas o seu valor médio é próximo do médio calculado. Percebe-se ainda um padrão de comportamento dos valores calculados, numa seqüência de dois valores mais baixos, seguidos de dois mais altos. Os dois valores mais baixos correspondem ao Forno 5 de Reaquecimento, e os mais altos ao Forno 4. A explicação para isto é que as do Forno 4 opera normalmente com temperaturas mais elevadas que Forno 5, estando os dois no mesmo ritmo operacional.

É desejável a previsão pelo modelo matemático da perda de peso das placas individualmente para otimização do rendimento metálico na laminação. A seguir é verificada esta possibilidade. Por análise estatística dos resultados do segundo levantamento obteve-se o erro médio quadrático da estimativa de perda de peso das placas em 0,076%. Com a probabilidade de acerto de 95%, a faixa de previsão será de $\pm 0,15\%$ para cada placa individualmente. Relativamente ao valor médio usual de perda de peso da placa, entre 1% e 1,4%, o valor de 0,15% é excessivo para atender ao objetivo de previsão individual das placas.

Conclui-se que o modelo aqui apresentado mostrou-se satisfatório para o cálculo da espessura média de carepa e da perda de peso de placa, considerando-se um conjunto de dados, por exemplo, para certo período de operação, ou um determinado Forno. Se a espessura da carepa é calculada com precisão, o cálculo da perda de peso da placa também será preciso, uma vez que a única consideração do cálculo, que pode ser violada, é a suposição de que a carepa seja uniforme em toda a superfície da placa. Todavia, a aplicação do modelo para cada placa individual não apresenta precisão suficiente para otimização do rendimento de laminação.

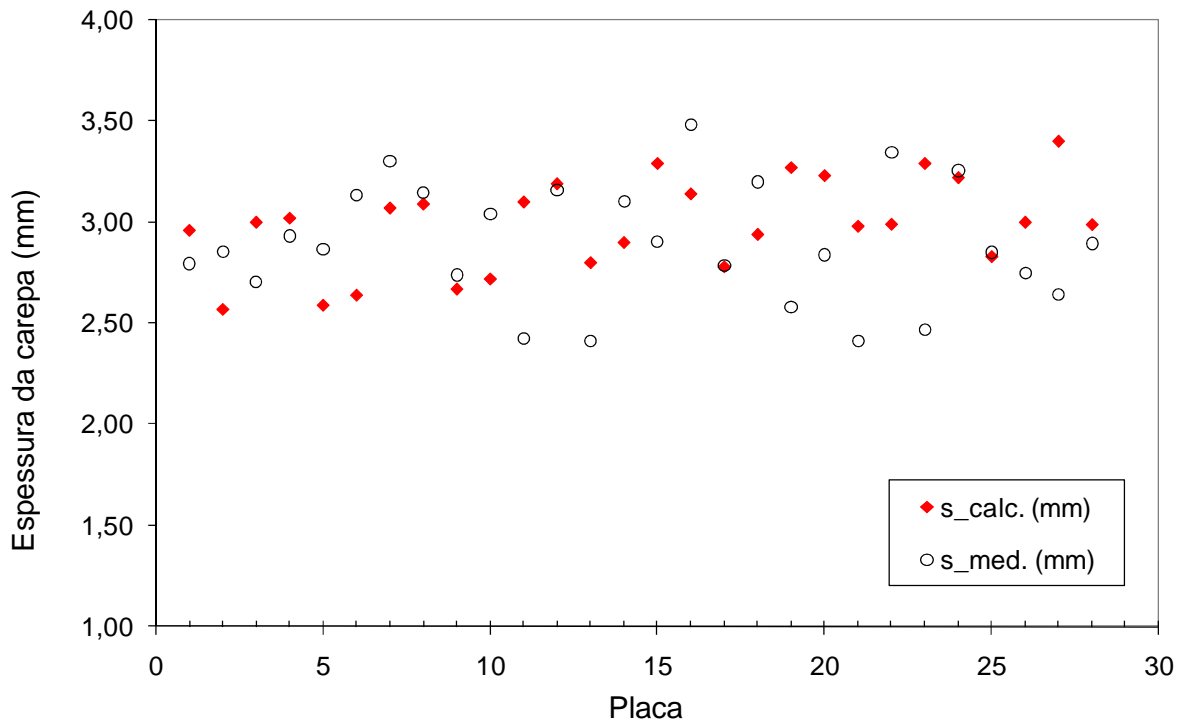


Figura 3. Comparação entre espessura medida e calculada para o segundo levantamento.

O tempo de permanência usual nos Fornos da LTQ é em torno de 180 min e a temperatura da placa no desenformamento em torno de 1230°C. Foi realizado um levantamento adicional de dados em 70 placas, coletando-se a espessura de carepa e a perda de peso calculados pelo Sistema de Otimização, restringindo-se o tempo de permanência obtido entre 175 min e 185 min. As dimensões de placa e a família de aços foram as mesmas do segundo levantamento. Neste caso, o tempo médio de permanência foi de 181 min e a espessura média de carepa calculada de 2,14 mm, com conseqüente perda de peso de placa de 1,19%. O valor observado atualmente na LTQ para a perda total de carepa é 1,4%, o que leva a uma perda por carepa secundária de 0,21%.

Estes dados servem como referência para a análise dos efeitos do tempo e da temperatura. No primeiro levantamento, a temperatura de desenformamento foi próxima da de referência, o tempo de permanência foi 60% acima do normal enquanto que a espessura e a perda por carepa foram 34% acima da referência. Por outro lado, no segundo levantamento, a temperatura de desenformamento foi apenas 11% acima da referência, ao passo que a espessura e a perda por carepa foram 36% acima. Mesmo descontando o fato que o tempo de permanência tenha sido 22% acima da referência, pode-se ainda concluir que os dados medidos confirmam o efeito preponderante da temperatura da placa sobre a espessura da carepa.

Visando-se maior esclarecimento sobre o efeito da temperatura, mostra-se na Figura 4 a curva de aquecimento calculada pelo Sistema de Otimização para a placa 25 da Tabela 2. A linha suave (cor laranja) é a curva de aquecimento objetivada, e a linha em cor verde é a curva da temperatura média calculada pelo Sistema. Nota-se que houve pequena parada da Linha, quando a posição da placa estava em torno de 14 m. A partir daí, a temperatura calculada da placa ficou sempre bem acima da temperatura objetivada. No desenformamento, a temperatura média foi de 1.263°C. Até cerca de 900°C, a formação de carepa não é significativa, mas a elevada



temperatura da placa (acima de 1.000°C) no percurso da segunda metade do forno foi responsável pela excessiva espessura de carepa e perda de peso da placa.

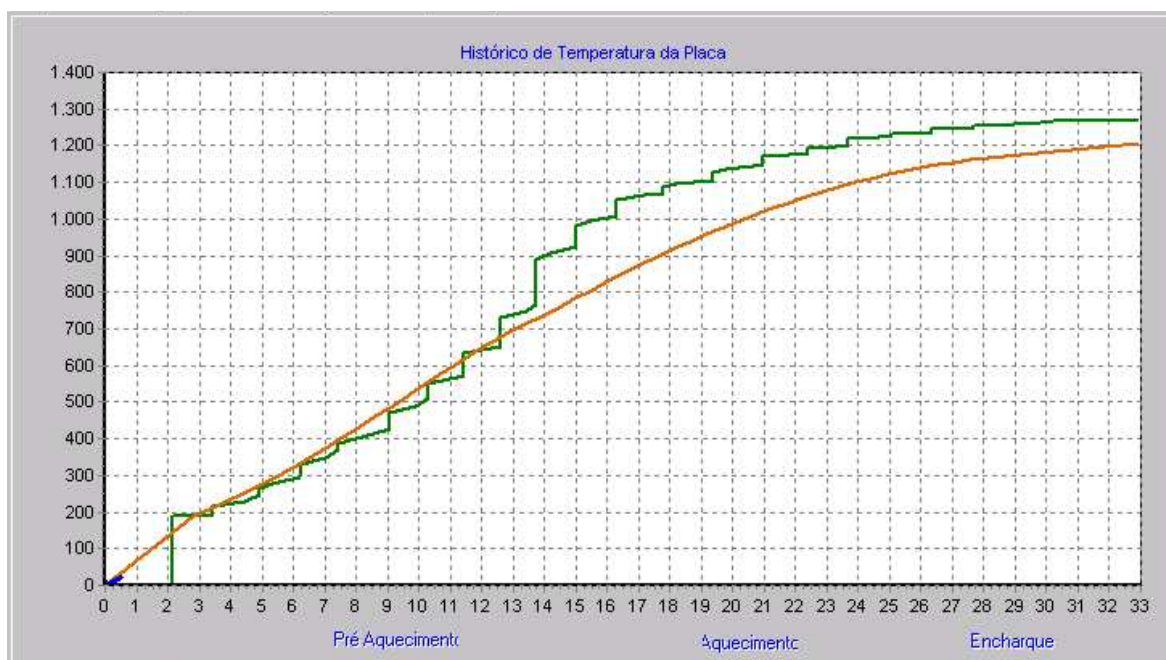


Figura 4. Curvas de aquecimento calculadas da placa 25 do segundo levantamento.

4 CONCLUSÕES

Através de dados experimentais industriais, mostrou-se que o tempo de permanência da placa no forno é menos relevante que a temperatura para o crescimento da carepa primária, ficando estas observações de acordo com o esperado pela teoria cinética de oxidação dos aços. A observação prática muitas vezes induz que aumento do tempo de permanência leva a crescimento significativo da carepa, mas isto deve ser analisado criteriosamente, pois pode ser um efeito indireto do aumento da temperatura da placa.

O modelo desenvolvido e implementado mostrado neste trabalho fornece uma estimativa muito boa, em média, da espessura da carepa e da perda de peso da placa. Além disso, ele mostrou-se muito útil para análises tais como a realizada no presente trabalho, por exemplo, da influência de parâmetros tempo e temperatura do forno na perda de peso da placa.

Entretanto, o modelo não pode ser usado para estimar, com a precisão elevada (da ordem de $\pm 0,10\%$) a perda de peso individual por placa. Isto pode ser justificado por: (a) o modelo não considera alguns fatores que influenciam na formação da carepa, tais como atmosfera do forno, composição química do aço e condição inicial da superfície da placa; (b) incertezas inerentes à amostragem, como representatividade, e à avaliação da espessura na amostra após resfriamento; (c) variações térmicas inerentes ao processo de reaquecimento.

REFERÊNCIAS

- 1 SACHS, K.; TUCK, C. W., Surface Oxidation of Steel in Industrial Furnaces - In: Reheating for Hot Working, The Iron and Steel Institute, London, p. 1-17, 1968.
- 2 TUCK, C. W.; BARLOW, J. The effect of Reheating Furnace Atmosphere on the Adhesion of Scale to Steel, Iron and Steel, p. 31-38, February/1972.

- 3 SHEASBBY, J. S.; BOGGS, W. E.; TURKDOGAN. E. Scale Growth on Steels at 1200°C: Rationale of Rate and Morphology, *Metal. Science*, v. 18, p.127-136, March/1984.
- 4 BASABE, V. V.; SZPUNAR, J. A. Phase Composition of Oxide Scales during Reheating in Hot Rolling of Low Carbon Steel, *Steel Res. Int.* v. 77. n. 11, p. 818-824, 2006.
- 5 ASAI, T.; SOSHIRODA, T.; MIYAHARA, M. Influence of Ni Impurity on the Removability of Primary Scale in Hydraulic Descaling, *ISIJ*, v. 37, n. 3, p. 272-277, 1997.
- 6 FUKAGAWA, T. OKADA, H.; MAEHARA, Y. Mechanism of Red Scale Defect Formation in Si-added Hot-rolled Steel Sheets, *ISIJ*, v. 34, n. 11, p. 906-911, 1994.
- 7 MEISTER, F.; OERTEL, H. Zunderreduzierung in Wärmöfen durch verbesserte Ofenführung. *Stahl und Eisen*, v. 126. n. 9, p. 65-70, 2006.
- 8 SANTOS, A. A.; BARRETO, G. R.; CARMO, R. A. Estrutura e Morfologia da Carepa Formada em Aços Processados na Laminação de Tiras a Quente. 39^o SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, *ABM*, v. 39, 2002, Ouro Preto/MG, p. 175-184.
- 9 BASABE, V. V.; SZPUNAR, J. A. Growth Rate and Phase Composition of Oxide Scales during Hot Rolling of Low Carbon Steel, *ISIJ Int.*, v. 44, n. 9, p.1554-1559, 2004.
- 10 WIKSTRÖM, P.; WEIHONG, Y.; BLASIAK, W. The Influence of Oxide Scale on Heat Transfer during Reheating of Steel, *Steel Res. Int.* v. 79. n. 10, p. 765-775, 2008.
- 11 BOLT, P. H. Understanding the Properties of Oxide Scales on Hot Rolled Steel Strip, *Steel Res. Int.* v. 75. n. 6, p. 399-404, 2004.
- 12 SMARASEKERA. I. V. Mathematical Modelling of Heat Transfer During Hot Rolling, Palestra proferida na UFF, Volta Redonda, junho/1994.
- 13 SACHS, K.; TUCK, C. W. Scale Growth during Re-heating Cycles, *Werkstoffe und Korrosion*, p. 945-954, November/1970.
- 14 SANTOS, A. A.; SCHIAVO, C. P.; GIACOMIN, C. N. Simulação Computacional do Processo de Reaquecimento de Placas em Fornos de Viga Móvel, *Tecnol. Metalurgia e Materiais*, v. 5, n.1, p. 35-39, jul-set/2008.