

## MODELAMENTO DA TEMPERATURA NAS ETAPAS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE<sup>1</sup>

*Allysson Bruno Barbosa<sup>2</sup>*

*Andrés Vigliocco<sup>3</sup>*

*Efraín Ubici<sup>4</sup>*

*Rubén Antonio Solé<sup>5</sup>*

*Ricardo Pinheiro Domingues<sup>6</sup>*

### Resumo

O mercado mundial de chapas laminadas está cada vez mais competitivo e, para manter seus clientes, toda empresa deve oferecer produtos com elevado nível de qualidade, a custos compatíveis. Nessa direção, a automação do processo de laminação de tiras a quente entra como um fator decisivo para manter a competitividade da usina, reduzindo custos e aumentando a qualidade. Na empresa Ternium Siderar, planta General Sávio, em San Nicolás, Argentina, quase 430 toneladas de bobinas laminadas a quente são reprocessadas anualmente devido a problemas relacionados à temperatura do material. Buscando conhecer as causas desse problema, fizeram-se, neste trabalho, uma revisão bibliográfica acerca do método de modelamento de temperatura, num laminador de tiras a quente, e um levantamento da evolução da temperatura do material ao longo de todo o laminador. Tal evolução foi investigada desde os cinco fornos de aquecimento, passando pelas cinco cadeiras do trem desbastador e pelas seis do trem acabador, terminando na bobinadeira. Este estudo, cujo objetivo foi diminuir a necessidade de reprocessamento, tornará possível estabelecer um modelo da temperatura a partir de um programa baseado no Método de Elementos Finitos, MEF, para atualização de coeficientes de transferência de calor e ajuste do setup do laminador.

**Palavras-chave:** Laminação de tiras a quente; Modelamento de temperatura; Método de elementos finitos.

### TEMPERATURE MODELING IN HOT STRIP ROLLING PROCESS

#### Abstract

The world market of flat rolled products is increasingly more competitive, and in keeping their customers fidelity, every company has to offer high quality products at compatible costs. In this direction, the hot strip rolling process automation is a decisive factor to keep the competitiveness of a plant, reducing costs and increasing final product quality. At General Sávio Plant of Ternium Siderar Company, in San Nicolás, Argentina, almost 430 tons of hot rolled coils are annually reprocessed due to problems related to material temperature. The need of knowing these problems' causes makes necessary an extensive review in the literature on the method of temperature modeling of hot strip rolling process, as well as a survey of the evolution of material's temperature throughout the rolling mill. The temperature evolution was investigated beginning at the five slab reheating furnaces, passing through the five stands of the roughing train and then throughout the six finishing train stands, and finally coming into the coiler machine. This study, that aimed to decrease the reprocessing, will allow establishing a temperature modeling, using software based on finite element method, FEM, to make an updating on heat transfer coefficients and, so, on the rolling mill setup adjustment.

**Keywords:** Hot strip rolling; Temperature modeling; Finite element method.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, Graduando em Engenharia Metalúrgica na Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG*

<sup>3</sup> *Engenheiro de Automação, Setor de Laminação a Quente, Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina*

<sup>4</sup> *Engenheiro Metalurgista, Chefe do Setor de Laminação a Quente, Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina*

<sup>5</sup> *Membro da ABM, Engenheiro Químico, M.Sc., D.Sc., Transferência de Tecnologia, Fundação Gorceix /*

*DEPEC, Ouro Preto, MG*

<sup>6</sup> *Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., D.Sc., Professor Adjunto IV na Escola de Minas da UFOP – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ouro Preto, MG.*

*rpdemet@em.ufop.br*

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado mundial de chapas laminadas está cada vez mais competitivo e, para que uma empresa mantenha seus clientes, é necessário que ela ofereça produtos com alto nível de qualidade assim como custos compatíveis. A automação dos processos de laminação justifica-se porque permite a fabricação de produtos com alta precisão dimensional e propriedades mecânicas consistentes, além da redução nos custos operacionais e também dos custos provenientes do sucateamento e da falta de qualidade dos produtos.<sup>(1)</sup>

*“Esse quadro de crescente sofisticação tecnológica representa mais uma pesada necessidade a ser atendida pelas equipes de suporte técnico das usinas, já bastante enxutas após a racionalização em busca da competitividade. Uma das possíveis soluções para esse impasse estaria numa interação mais produtiva com a comunidade acadêmica metalúrgica.”<sup>(2)</sup>*

Os sistemas de automação dos laminadores de chapas a quente também trabalham com o sistema de controle dinâmico. Isso significa dizer que enquanto a cabeça da chapa está sendo laminada, suas temperaturas e espessuras finais são registradas. Caso haja a ocorrência de valores fora da faixa de variação objetivada, o sistema exige ações corretivas para que o restante do material se mantenha dentro das especificações dimensionais.

Esses erros são causados por fatores que não são levados em consideração pelos modelos, como diferenças entre valores reais e valores informados ao modelo com respeito a dimensões, condições interfaciais entre chapa e cilindros, coeficientes de transferência de calor, entre outros.

A temperatura da chapa é um dado importante para o cálculo de diversos parâmetros operacionais, como sua resistência à deformação a quente e evolução da microestrutura. Por essa razão, sua evolução ao longo do processo deve ser determinada de maneira precisa, contando com fenômenos que afetam a temperatura da chapa: resfriamento por radiação ao ar, jatos de água da descarepadora e refrigeração dos cilindros. Existe também o aquecimento adiabático devido à deformação e atrito com os cilindros.<sup>(2)</sup>

Os problemas com chapa fora de espessura são variados. Entre eles têm-se problemas com temperatura, erro de *preset* do computador Vax, demora no trem desbastador, erro de *preset* nas trocas de dimensões e aços, demora na mesa de transferência. Entre esses motivos foram analisados dois problemas que supostamente serão solucionados com o modelamento da temperatura na laminação a quente nos dois âmbitos, desbastador e acabador: demora na mesa de transferência e problemas com temperatura.

Somadas as contribuições desses dois tipos de problemas, no ano base 2010/2011 tem-se um total de 427,61 toneladas de aço entre derivados e degradados, cerca de 0,02% da produção anual de bobinas laminadas a quente. São 25% de degradados, ou seja, produtos que não foram reclassificados para outros graus de aços e 75% de produtos derivados, ou seja, foram reclassificados. A reclassificação significa utilizar um determinado tipo de aço para uma finalidade diferente daquele que ele foi projetado. Esse valor pode ser maior ao se analisar os outros tipos de problemas com maior nível de detalhe.

Diante dessa situação este trabalho tem como objetivo diminuir tanto a quantidade de chapas com a espessura fora de especificação, quanto a conseqüente queda da qualidade, através da atualização do *setup* do trem acabador. Essa atualização pode

ser feita através de um software que utiliza como base o Método dos Elementos Finitos.

Segundo Gorni,<sup>(2)</sup> o Método de Elementos Finitos é a ferramenta matemática mais poderosa disponível para o modelamento de eventos mecânicos, térmicos e microestruturais, fato que torna o mesmo, em particular, adequado sua utilização na laminação a quente. A resolução do problema utilizando métodos numéricos vem sendo muito utilizada atualmente, em especial o Método de Elementos Finitos (MEF), que permite levar em consideração as não linearidades das propriedades térmicas e físicas do material (condutividade térmica, calor específico e densidade), além da possibilidade de modelar estruturas de geometria complexas.<sup>(3)</sup>

Entre os inúmeros pacotes comerciais disponíveis, se destacam o programa Ansys e o Cosmos, que são softwares de uso geral e o programa Abaqus, para análise de tipo não linear e dinâmico. Para fazer um modelamento através desse tipo de software é necessária formação, conhecimento específico e tempo para aproveitar todos os recursos do método de elementos finitos. No caso específico do modelo da evolução de temperatura na laminação a quente, o principal desafio é determinar precisamente, os coeficientes de transferência de calor que surgem nas várias etapas do processo, sejam eles decorrentes do resfriamento (remoção do óxido, resfriamento devido ao ar, refrigeração dos cilindros, contato com os cilindros), ou do aquecimento (atrito e pela deformação). Além disso, é necessário saber exatamente em que instante ao longo do tempo de execução do processo em que eles ocorrem.

## 2 METODOLOGIA

Para fazer a aquisição das temperaturas, utilizou-se um pirômetro portátil que utiliza raios infravermelhos. O equipamento utilizado foi um pirômetro Raytek, modelo Raynger, com uma faixa de temperatura entre 200°C e 1.800°C com um laser simples. Para a medição das temperaturas foi necessário conhecer a emissividade dos pirômetros utilizados em linha a título de comparação e para validar as medições. A emissividade escolhida foi de 0,75, sendo que essa medida é a capacidade do objeto absorver, transmitir e emitir energia infravermelha.

As medições foram feitas sempre cinco segundos após a saída da chapa dos cilindros, para que a mesma tenha tempo para recuperar sua temperatura real. Quando o tempo de saída de uma cadeira e a entrada da seguinte foi inferior aos cinco segundos, a medição foi feita com o tempo máximo possível, ou seja, três ou quatro segundos.

As medições foram feitas na mesma posição em que se encontram os pirômetros fixos da linha, como é o caso da saída do trem desbastador e também do acabador. Foram feitas 168 medições corretas, sendo doze para cada cadeira, ou seja, em cada cadeira foi feita a aquisição, em duplicata, da temperatura de cada chapa, referente aos seis diferentes fornos de reaquecimento. As temperaturas sempre foram medidas na saída de cada cadeira.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Trem Desbastador

Depois de coletados os dados de temperatura ao longo do trem desbastador, as temperaturas foram organizadas, seu desvio estatístico foi calculado através do Microsoft Excel e estão dispostos nas tabelas abaixo.

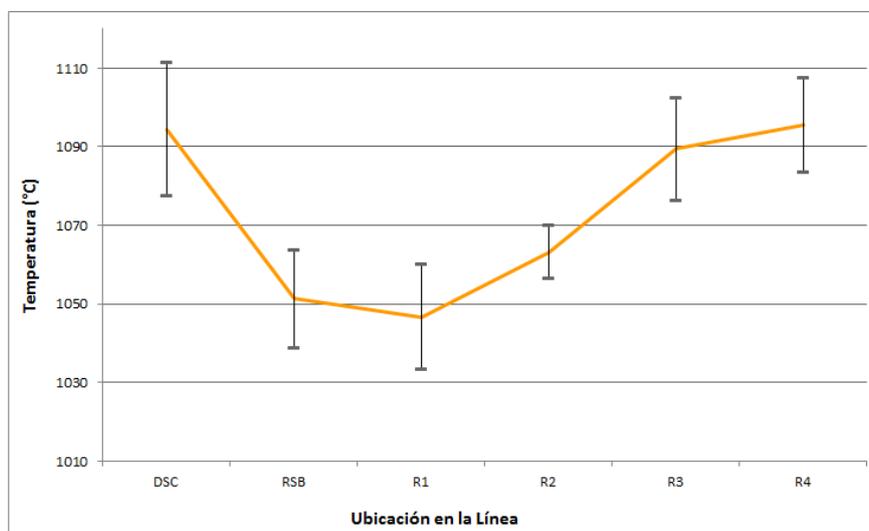
A temperatura média foi calculada através da média aritmética simples e o desvio padrão dos dados foram calculados para cada amostra, de acordo com a variância estatística dos dados.

A Tabela 1 mostra os dados e os cálculos das temperaturas.

**Tabela 1:** Temperatura médias nas saídas das cadeiras – Trem Desbastador

	<b>DSC</b>	<b>RSB</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>
	1093	1056	1040	1052	1085	1099
	1097	1070	1064	1061	1088	1104
	1099	1062	1050	1064	1091	1108
	1111	1054	1044	1068	1095	1102
	1065	1034	1020	1054	1063	1072
	1056	1040	1030	1061	1065	1074
	1104	1036	1049	1057	1095	1098
	1110	1033	1060	1074	1106	1108
	1107	1061	1054	1069	1100	1090
	1102	1051	1052	1068	1095	1104
	1095	1063	1036	1061	1089	1089
	1094	1055	1061	1069	1100	1098
<b>Promedio</b>	<b>1094,42</b>	<b>1051,25</b>	<b>1046,67</b>	<b>1063,17</b>	<b>1089,33</b>	<b>1095,5</b>
<b>Desvío</b>	<b>17,05</b>	<b>12,56</b>	<b>13,27</b>	<b>6,70</b>	<b>13,18</b>	<b>12,10</b>

Através das medições acima foi possível lançar num gráfico o perfil térmico ao longo do trem desbastador. Os valores utilizados correspondem às médias apresentadas.



**Figura 1:** Perfil de temperatura no trem desbastador.

É possível perceber que a chapa tem um perfil bem definido de temperatura no trem desbastador, uma vez que foram analisados 12 perfis diferentes. Mas um dado que se pode observar é que o perfil de temperatura superficial não é linear e tampouco decrescente, ou seja, um perfil variável. É possível explicar esse fato pelas perdas e também pelos aportes de calor que existem durante a laminação.

Depois de sair do forno, com aproximadamente 1.200°C, a chapa sofre uma perda de calor por radiação para o meio e também uma perda de calor por condução através dos cilindros da mesa de transferência, chegando à descarepadora. Ao passar pela descarepadora, a chapa sofre a maior perda de calor, devido aos jatos de água usados para remover a camada de óxido presente na chapa, ou seja, uma

perda de calor por convecção. A chapa sai dessa cadeira com uma temperatura média de 1094°C, ou seja, uma perda de 106°C, aproximadamente 9%.

A chapa permanece aproximadamente 12 segundos esperando até que entre na cadeira RSB, que é a primeira cadeira do trem desbastador. Essa cadeira é usada para fazer uma pequena redução no material e ajudar na retirada da camada de óxido presente. Ao passar por essa caixa, a chapa sofre uma perda de calor, principalmente por condução, devido ao contato com os cilindros laminadores, saindo com uma temperatura de 1050°C, o que representa uma perda de 4%.

A etapa seguinte é a cadeira R1 onde se inicia a deformação da placa. Nesta etapa há perda por condução, devida ao contato com os cilindros e um aporte de calor devido à deformação, além de perdas por convecção devido aos jatos de água presentes. Logo após sair, a chapa tem uma temperatura de 1.047°C, ou seja, sofreu uma perda de 0,3%.

A partir da cadeira R2, a quantidade de aporte térmico devido à deformação é maior que a perda de temperatura por condução e radiação. Isso explica o fato de que em R2 ocorre uma ascendência no gráfico, ou seja, à saída dessa cadeira, que concede uma deformação de 46%, a chapa apresenta uma temperatura de 1063°C, ou seja, um acréscimo de 15%.

É possível observar que as perdas de calor por condução, radiação e convecção existem e são muito importantes para entender o modelo de temperatura no trem desbastador. Além disso, um fato que explica o perfil de temperatura neste trem é que em cada passe de laminação o núcleo da chapa é revelado, ou seja, indicando assim uma temperatura maior a cada passe.

É importante dizer que, no trem acabador a laminação de aços comuns, ou seja, que não sejam aços do tipo *Intersticial Free* (IF), por exemplo, a temperatura de laminação não varia, uma vez que no trem acabador ocorrerá esse controle, O que se tem que observar é que devem sair do forno com 1.200°C, em média, e sair do R4 com cerca de 1.100°C, como foi estudado. Por outro lado, é de grande importância conhecer o perfil térmico ao longo desse trem para evitar problemas como cambagem, ponta para cima ou para baixo, além de fazer o controle dos outros parâmetros de laminação como carga de laminação, potência, redução e outros, conforme estudado por Ladeira.<sup>(4)</sup>

Também é possível analisar o perfil térmico devido a cada forno de aquecimento de placas. As medições foram feitas em duplicata e chamadas A e B. A Tabela 2 mostra o valor das temperaturas adquiridas e a Tabela 3 mostra os valores de média simples.

**Tabela 2:** Temperatura nas saídas das caixas para cada forno

Horno	DSC		RSB		R1		R2		R3		R4	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
<b>H1</b>	1093	1104	1056	1036	1040	1049	1052	1057	1085	1095	1099	1098
<b>H2</b>	1097	1110	1070	1033	1064	1060	1061	1074	1088	1106	1104	1108
<b>H3</b>	1099	1107	1062	1061	1050	1054	1064	1069	1091	1100	1108	1090
<b>H4</b>	1111	1102	1054	1051	1044	1052	1068	1068	1095	1095	1102	1104
<b>H52</b>	1065	1095	1034	1063	1020	1036	1054	1061	1063	1089	1072	1089
<b>H51</b>	1056	1094	1040	1055	1030	1061	1061	1069	1065	1100	1074	1098

**Tabela 3:** Temperatura média nas saídas das caixas para cada forno

Horno	DSC	RSB	R1	R2	R3	R4
H1	1098,5	1046	1044,5	1054,5	1090	1098,5
H2	1103,5	1051,5	1062	1067,5	1097	1106
H3	1103	1061,5	1052	1066,5	1095,5	1099
H4	1106,5	1052,5	1048	1068	1095	1103
H52	1080	1048,5	1028	1057,5	1076	1080,5
H51	1075	1047,5	1045,5	1065	1082,5	1086

De acordo com essa tabela as placas dos fornos H52 e H51 apresentam temperaturas inferiores às placas dos outros fornos em aproximadamente 20°C depois da descarepadora. Esse fato pode ser explicado pela distância que existe entre esses fornos e a caixa correspondente, ou seja, a perda de calor por fenômenos de condução e radiação são maximizados, fazendo com que a placa perca muito calor.

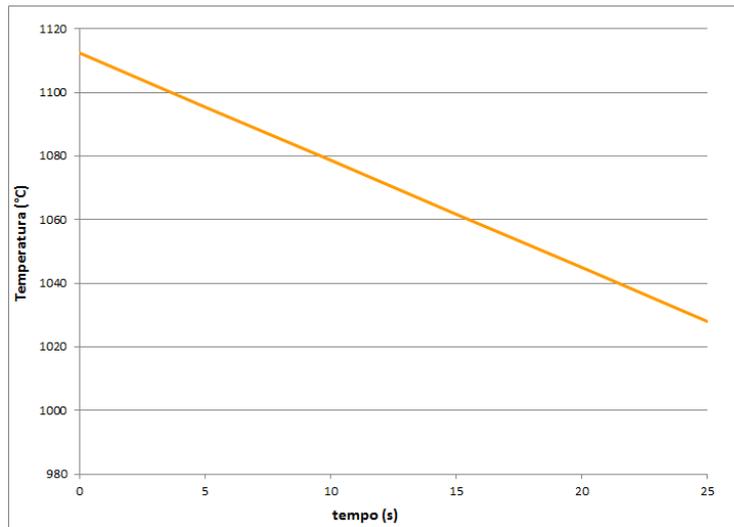
### 3.2 Trem Acabador

Depois de coletados os dados de temperatura ao longo da mesa de transferência e do trem desbastador, as temperaturas foram organizadas, seu desvio estatístico foi calculado e os resultados estão dispostos na Tabela 4.

**Tabela 4:** Temperatura média nas saídas das cadeiras – Trem Acabador

	R4	MT	F5	F6	F7	F8	F9	F10
	1099	1039	903	903,7	909,7	912	901	865,9
	1104	1041	911	909	914,9	906,8	895	888,8
	1108	1014	908,5	914,6	920	920	890	876,1
	1102	1030	910,6	880,6	905,6	875,6	874	844,2
	1072	1025	890	897,2	894,9	905	880	861,9
	1074	1029	887	895,1	895,7	900	870	852,1
	1098	1029	886,9	874,9	890,9	855,1	879	857
	1108	1034	894	885,5	896,4	878,7	882	861,8
	1090	1033	897,1	887	890	880	876	851
	1104	1016	890	885,9	877	878	859	858,5
	1089	1032	880	876	855,6	873,4	862	854
	1098	1014	882	876,6	880,2	878,8	859	857,3
<b>Média</b>	<b>1095,50</b>	<b>1028,00</b>	<b>895,01</b>	<b>890,51</b>	<b>894,24</b>	<b>888,62</b>	<b>877,25</b>	<b>860,72</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>12,10</b>	<b>9,14</b>	<b>10,97</b>	<b>13,37</b>	<b>17,79</b>	<b>19,46</b>	<b>13,61</b>	<b>11,95</b>

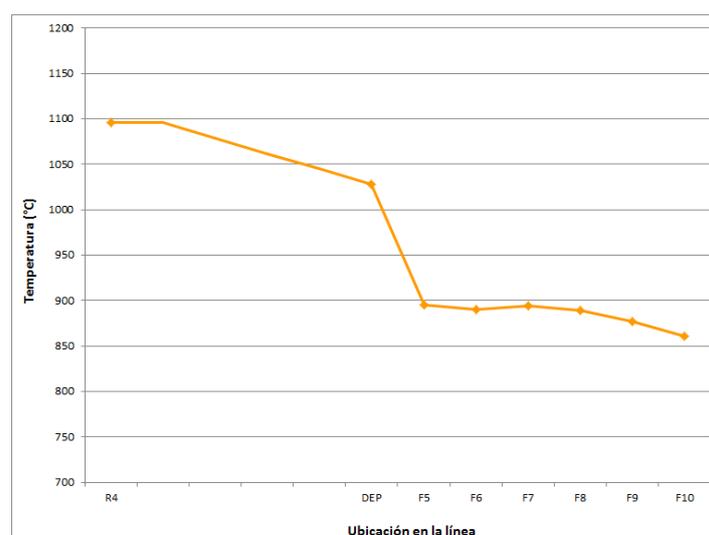
De acordo com a Tabela 4, foi possível fazer o gráfico de evolução da temperatura ao longo da mesa de transferência.



**Figura 2:** Evolução de temperatura na mesa de transferência R4 - F5

A Figura 2 mostra a evolução da temperatura na mesa de transferência entre a última cadeira desbastadora (R4) e a primeira cadeira acabadora (F5). O comprimento da mesa de transferência é de 48,31 metros. Como a velocidade média com que a chapa deixa R4 é de aproximadamente 120 m/min, a chapa leva cerca de 25 segundos para ingressar no trem acabador. Logo depois de sair de R4 sua temperatura é da ordem de 1095°C e na entrada da tesoura, anterior à F5, sua temperatura é de 1028°C, ou seja, ela sofreu uma perda de 6%. Esta perda é devida à transferência de calor por radiação, à transferência de calor por condução através dos cilindros da mesa, além da perda por convecção gerada pelo jato de água na tesoura despontadora (*crop shear*). Comparando-se o resultado apresentado com o modelo estudado por Vigliocco<sup>5</sup>, em que a temperatura depois de 20 segundos é cerca de 1.015°C, verificam-se tendências semelhantes, o que indica que o modelo aqui apresentado, embora correto, ainda requer ajustes.

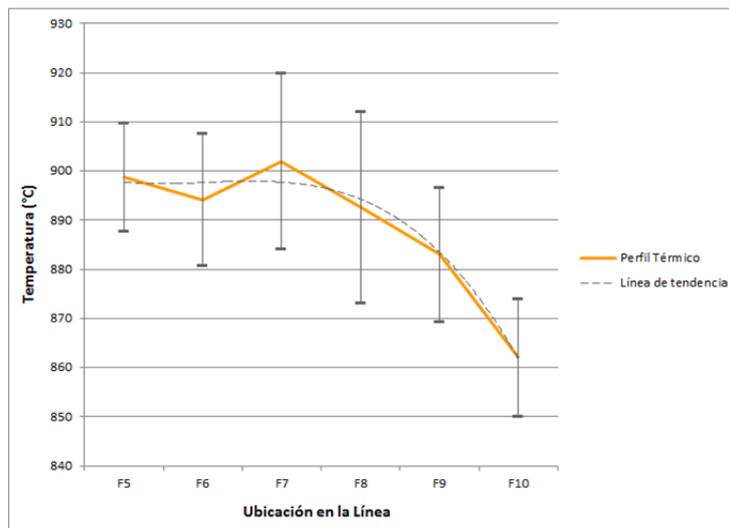
Também é possível estudar o perfil térmico desde a cadeira desbastadora R4 até a saída do trem acabador na cadeira F10. Esse perfil está apresentado na Figura 3.



**Figura 3:** Evolução da temperatura R4 – TFL.

De acordo com o modelo estudado por Vigliocco,<sup>(5)</sup> o perfil apresentado na Figura 3 se aproxima do anterior, porém com algumas variações, principalmente na faixa de

temperaturas apresentada. A Figura 4 apresenta o perfil térmico da chapa dentro do trem acabador, de acordo com a Tabela 4.



**Figura 4:** Evolução da temperatura no trem acabador nas saídas das cadeiras.

A chapa entra no trem acabador com cerca de 900°C e sai do mesmo com 860°C, ou seja, uma perda de 4%. Essa perda é devido à troca de calor com os cilindros de laminação. Também há a perda por convecção devido aos jatos de água responsáveis por limpar a chapa. A perda por radiação também existe, porém é em menor quantidade.

Um importante dado a se observar é a temperatura final de laminação (TFL). Essa temperatura sempre deve estar acima dos 850°C, para garantir a estrutura austenítica, e este valor pode ser observado na figura acima, onde o mesmo varia de 850°C a 875°C e, teoricamente para esse tipo de aço, deve variar de 850°C a 910°C.

Cada tipo de aço necessita uma Temperatura de Final de Laminação (TFL) e também uma Temperatura de Bobinamento (TB) adequada e diferente entre os diferentes tipos de aço. Para esse estudo o aço usado como referência foi o aço de grau 7026 Ternium Siderar.

## 4 CONCLUSÕES

A implantação da automação em processos como a laminação a quente vem se tornando um fator decisivo para manter-se a competitividade de uma usina através da redução de custos de produção e aumento da qualidade do produto final, além de uma operação mais confiável, com um mínimo de retrabalhos e desperdício de insumos. Neste trabalho foram traçados os perfis térmicos no trem desbastador desde a descarepadora até a saída da cadeira desbastadora R4. Também se estudou a evolução de temperatura na mesa de transferência entre R4 e F5 e também os perfis térmicos no trem acabador.

De acordo com os dados e os estudos feitos, é de extrema importância fazer o modelamento da temperatura nos trens de laminação, desbastador e acabador. Com esse trabalho foi possível traçar os perfis térmicos ao longo do laminador para cada cadeira e, também, para cada forno de aquecimento.

A partir desse estudo é possível fazer o modelamento da temperatura através de um *software* que utiliza como base o Método de Elementos Finitos, para que se faça a atualização do modelo de evolução de temperatura. Um *software* promissor e

interessante é o ANSYS® que, com conhecimento específico e formação prévia, pode conduzir a ótimos resultados.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Ternium Siderar, unidade de San Nicolás, Argentina, na pessoa do seu Gerente Geral da Laminação, Sr. Jorge Von Bergen, pela disponibilização de suas instalações e equipamentos e pela concessão e tutoria do estágio ao Graduando Allysson Bruno Barbosa, encarregado da coleta de dados que deu origem a esta contribuição. Esta tutoria foi conduzida pelo Eng. Andrés Vigliocco, com a participação, do Eng. Efraim Ubici. Agradecem, também, ao Departamento de Pesquisa e Educação Continuada da Fundação Gorceix, Ouro Preto, MG, Brasil, por possibilitar a efetiva orientação do Graduando, realizada pelos demais autores deste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 GORNI, A. A., REIS, J. S. S., STUART, M. A., SUGAHARA, N. T., FORMICA, V. B. & SILVEIRA, J. H. D. *O Papel do Modelamento Matemático na Automação da Laminação de Chapas Grossas*. Metalurgia e Materiais, Abril de 1994, 376-379.
- 2 GORNI, A.A. *Modelamento Matemático da Laminação: De Ficção Científica a Ferramenta para a Capacitação Industrial; Keynote Paper* apresentado no 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Julho de 2005.
- 3 BEZERRA, A.C. & RADE, A.A. *Análise Térmica do processo de soldagem TIG via Elementos Finitos*. 14º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- 4 LADEIRA, M. O. *Análise dos atributos dos produtos planos laminados a quente*. Informe de Pasantía, Ternium Siderar – Março 2011.
- 5 VIGLIOCCO, A. *Sistema computarizado de calibrado automático del tren continuo de chapas en caliente (Sigma-RHO)*. Ternium Siderar, 2011.