

ANÁLISE CRÍTICA DO SETOR DE RESFRIAMENTO DE CHAPAS LAMINADAS A QUENTE DO AÇO GRAU LN28 – PARTE I: ANÁLISE DO SETOR DE CHUVEIROS ¹

Vanessa Pala Vieira Branco ²
Ronald Lesley Plaut ³

Resumo

Baseado em dados industriais e empregando o Método de Diferenças Finitas (MDF), analisa-se o coeficiente de transferência de calor (h) e a velocidade de resfriamento no setor de resfriamento situado na saída do Laminador de Tiras a Quente (LTQ). O aço usado para o atendimento do grau LN28 da norma NBR 6655 na forma de chapa laminada a quente é analisado com o objetivo de estudar, para as condições industriais disponíveis, os efeitos das três diferentes estratégias de resfriamento (cedo, normal e tarde) sobre as propriedades mecânicas e microestruturais desse aço.

Palavras-chave: Setor de resfriamento; Modelo matemático; Diferenças finitas; Microestrutura.

CRITICAL ANALYSIS OF THE COOLING SECTOR OF HOT ROLLED LN28 GRADE LOW CARBON STEEL STRIPS – PART I: ANALYSIS OF THE COOLING SECTOR

Abstract

Based upon industrial data and using the Finite Difference Method (FDM), the heat transfer coefficient (h) and the related cooling rate at the cooling sector of the hot strip mill are analyzed. The material used in this study complies with the LN28 grade of NBR 6655 specification hot rolled low carbon strip, produced under industrial conditions, where the effect of three different cooling strategies (early, normal and late) on the mechanical properties and microstructures have been evaluated.

Key words: Cooling sector; Mathematical model; Finite difference method; Microstructure.

⁽¹⁾ Contribuição Técnica a ser apresentada no 44^o Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM; 16 à 19 de outubro de 2007 em Campos do Jordão – SP – Brasil.

⁽²⁾ *Engenheira de Materiais, M.Sc., Analista de Produto da Gerência de Controle Integrado de Produto, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão - SP - Brasil. e-mail: vanessapala@cosipa.com.br.*

⁽³⁾ *Professor Associado, Ph.D. – EPUSP – São Paulo – SP - Brasil. e-mail: rlplaut@usp.br.*

1 INTRODUÇÃO

O material estudado é o aço usado para o atendimento do grau LN28 da norma NBR 6655, de espessuras 4,3mm e 6,5mm, cuja aplicação é a fabricação de longarinas, com adição de 0,020% de Nb.

Após ser laminado a quente, o aço é resfriado no setor de resfriamento, particularmente no setor de chuveiros.

O resfriamento com água é a maneira mais econômica de alcançar microestruturas mais refinadas. Este refinamento poderia ser conseguido com o aumento da adição de elementos de liga, mas elevaria o custo da produção.^(1, 2)

O setor de chuveiros estudado é composto por nove bancos (sendo o último banco, chamado de *vernier*, para ajuste fino) com 396 bocais superiores e 396 bocais inferiores cada. Esses bocais são de aço inoxidável e possuem diâmetros, superior e inferior, 18,5 mm e 11,4 mm, respectivamente. A capacidade de vazão de água de cada bocal é 16L/min, resultando em um sistema de fluxo laminar, conforme mostra a Figura 1. Os bocais superiores estão à 1.740 mm acima da mesa de resfriamento e os inferiores estão à 130mm abaixo da mesa de resfriamento. A distância longitudinal (ao longo da mesa de resfriamento) entre bocais é 458 +/- 3 mm e a transversal é 50 mm (essas distâncias são conhecidas como P_L e P_C , respectivamente). Um esquema é mostrado na Figura 2. O comprimento total da mesa de resfriamento (última cadeira do laminador até bobinadeira) é 124,3 m, sendo 60,3 m destes o comprimento da zona de resfriamento com água (setor de chuveiros). O pirômetro de medição da temperatura de bobinamento (TB) fica à 16 m do banco *vernier*. Um esquema da mesa de resfriamento é apresentado na Figura 3.

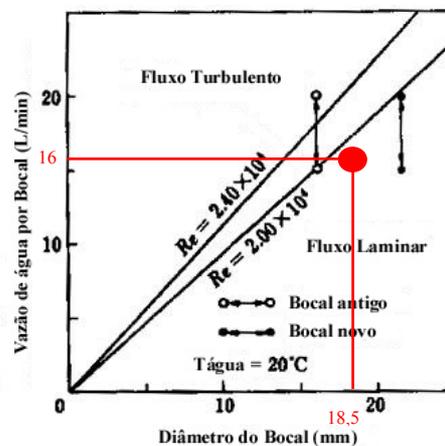


Figura 1 – Forma do fluxo de água⁽³⁾

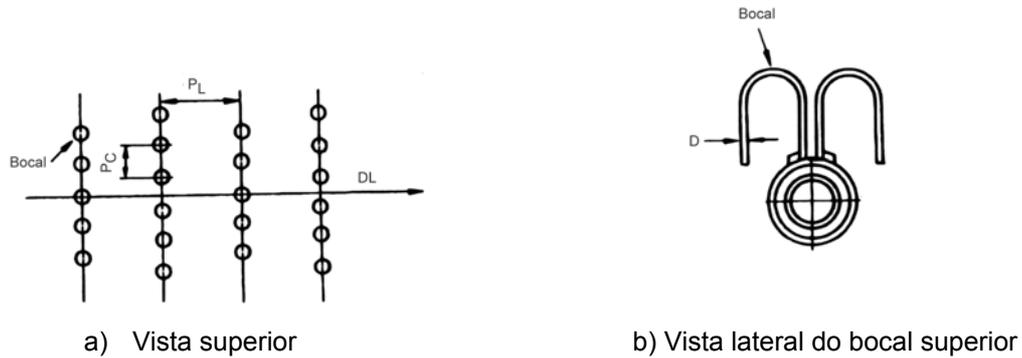


Figura 2 – Esquema dos chuveiros

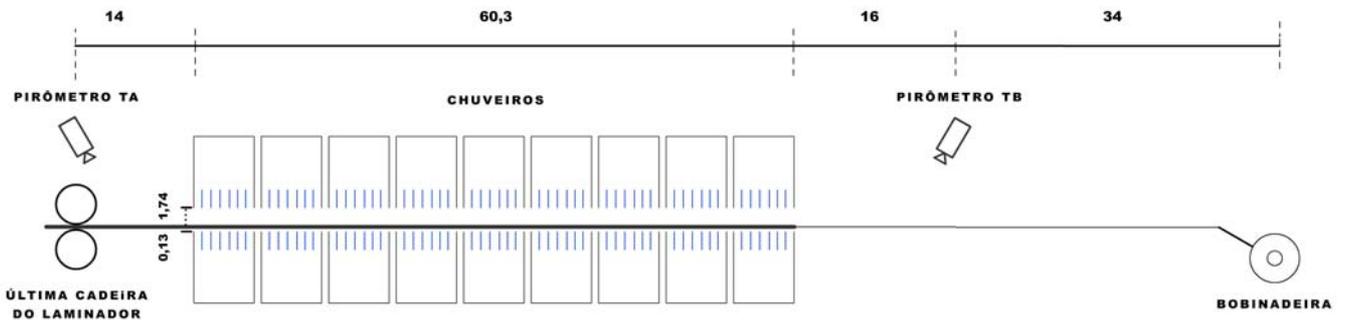


Figura 3 – Esquema da mesa de resfriamento (escala = m)

Este setor de chuveiros é automatizado, ou seja, calcula a quantidade necessária de bocais a serem abertos para alcançar a temperatura de bobinamento (TB) (que são os padrões de abertura) considerando os dados reais (principalmente a temperatura de acabamento (TA), a espessura da chapa e a velocidade de laminação). Esses padrões são recalculados para cada ponto de controle ao longo do comprimento da chapa e feita as devidas correções. Um esquema é apresentado na Figura 4.

O controle de resfriamento é bastante flexível, permitindo o controle não só da velocidade de resfriamento do material, mas também da forma como tal resfriamento ocorrerá, dependendo das propriedades objetivadas. Um esquema é apresentado na Figura 5:

- cedo: são utilizados os primeiros chuveiros;
- normal: os chuveiros são selecionados alternadamente (ou utilizados todos);
- tarde: são utilizados os últimos chuveiros.

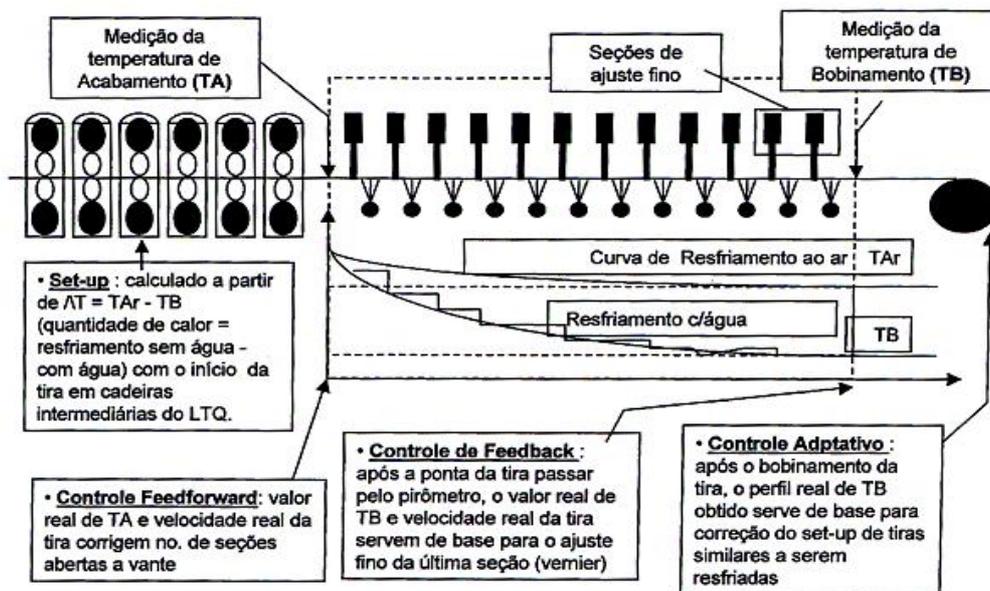


Figura 4 – Esquema do sistema de controles do “setor de chuveiros”: *feedforward*, *feedback* e *adaptativo*

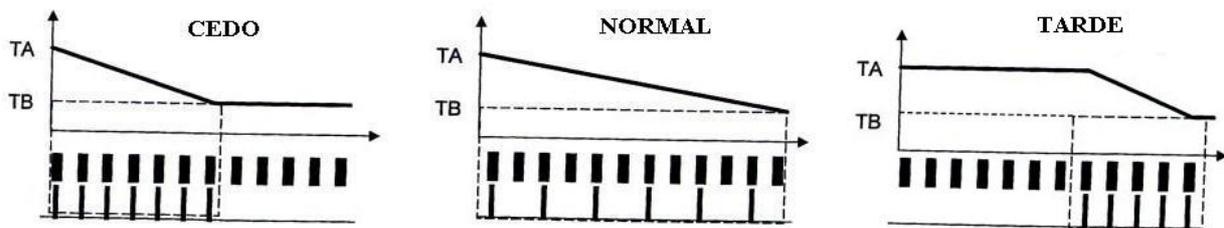


Figura 5 – Estratégias de resfriamento

Além das diversas estratégias de resfriamento, pode-se obter um perfil de temperatura diferenciado para as extremidades do material (conhecido como resfriamento com perfil em “U”). Isto muitas vezes é desejável para alguns tipos de aço pelo fato das primeiras e últimas espiras da bobina perderem calor mais rapidamente que as demais após o bobinamento, sendo necessária uma compensação térmica para evitar variações de propriedades mecânicas e metalúrgicas.⁽⁴⁾ Além do resfriamento ocorrer na zona com água (setor de chuveiros), onde há perda de calor principalmente por condução e convecção, pode-se dizer que também ocorre resfriamento em outras duas zonas: distância entre a última cadeira do laminador e os chuveiros (14m) e distância entre o final dos chuveiros (banco *vernier*) e a bobinadeira (50m), onde há perda de calor principalmente por radiação.^(4,5) Porém, estas outras duas zonas são de menor importância, pois possuem baixas taxas de resfriamento, devido ao baixo coeficiente de transferência de calor do ar.

Visando analisar a eficiência do setor de chuveiros e o efeito das diferentes estratégias de resfriamento no aço estudado, determinou-se o coeficiente de

transferência de calor (h) e a velocidade de resfriamento, empregando um modelo matemático de diferenças finitas.

2 MODELO MATEMÁTICO

Os mecanismos de transmissão de calor envolvidos no processo de resfriamento da chapa na mesa de saída do laminador a quente são complexos, o que torna difícil o tratamento matemático do problema. Dificulta ainda mais seu equacionamento o fato de o resfriamento se processar num regime transiente, já que a temperatura da tira varia ao longo da mesa e se agrava bastante quando se passa a trabalhar com fases diferentes de resfriamento: ar e água. Particularmente no resfriamento com água, as dificuldades se tornam maiores ainda, envolvendo transferência de calor por convecção com mudança de fase, com conseqüente formação de camada de vapor na superfície metálica quando a água de resfriamento atinge sua temperatura de ebulição. Esta camada de vapor é isolante e impede a água de atingir a superfície da chapa, o que resulta em uma diminuição da taxa de transferência de calor (conhecido como *Fenômeno de Leidenforst*^(6,7)). Por isso, a importância de se ter um sistema com fluxo laminar (capaz de manter uniforme o fluxo da água) para ultrapassar essa “barreira” formada pela camada de vapor e aumentar a taxa de transferência de calor. Além disso, é importante também ter um espaçamento entre bocais pequeno para ocorrer sucessivas rupturas da camada de vapor quase que instantaneamente à sua formação. Conforme descrito no item anterior, o sistema de resfriamento estudado possui estas duas características.⁽⁸⁾

Para a determinação do coeficiente de transferência de calor (h) do sistema de resfriamento e, conseqüentemente, sua taxa de resfriamento, utilizou-se um modelo matemático pelo Método Inverso⁽⁷⁾ por Diferenças Finitas - Explícito, cujas equações principais para o cálculo das temperaturas na superfície, no interior e na linha de centro são, respectivamente.^(9,10)

$$T_0^{i+1} = \{1 / \{1 + [(h * \Delta x) / K]\}\} * \{T_1^{i+1} + \{T_{amb} * [(h * \Delta x) / K]\}\} \quad (1)$$

$$T_j^{i+1} = (s * T_{j-1}^i) + [(1 - 2s) * T_j^i] + (s * T_{j+1}^i) \quad (2)$$

onde, para estabilidade do método, $s \leq 1/2$

$$T_{i+1}^{N/2} = 1/3 * [T_i^{N/2} + (2 * T_{i+1}^{N/2-1})] \quad (3)$$

O modelo matemático proposto (MDF) contorna a dificuldade imposta por lidar com um regime transiente de transferência de calor, ao supor que o mesmo seja equivalente a uma série de pequenos regimes permanentes, conforme esquematizado na Figura 6. Pode-se prever como estará a temperatura em qualquer um dos nós em um determinado tempo. Por exemplo: a T_3^2 indica a temperatura da tira na posição 3 (que equivale à x milímetros da espessura) no tempo 2 (que equivale à x minutos de resfriamento). Assim, pode-se calcular, passo a passo, a temperatura da tira ao longo da mesa de saída através de um método iterativo.⁽⁵⁾

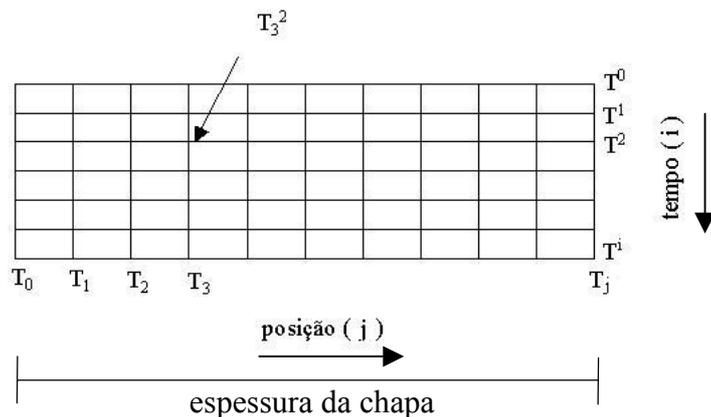


Figura 6 – Esquema do Método de Diferenças Finitas (MDF)

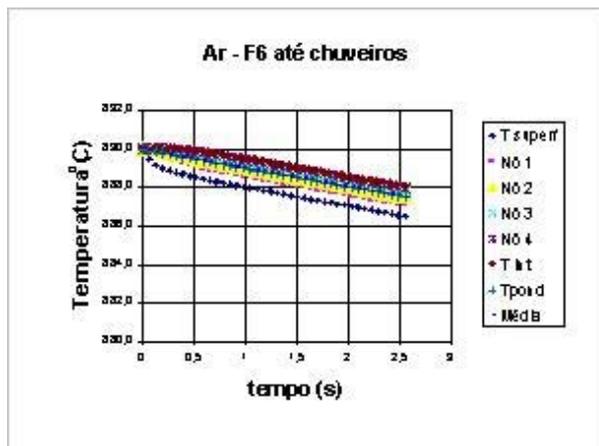
Simulações⁽⁸⁾ mostraram que o modelo pelo Método Inverso por Diferenças Finitas - Explícito reproduziu as situações de diversas literaturas, portanto sua aplicação é válida.

2.1 Modelo Matemático Aplicado

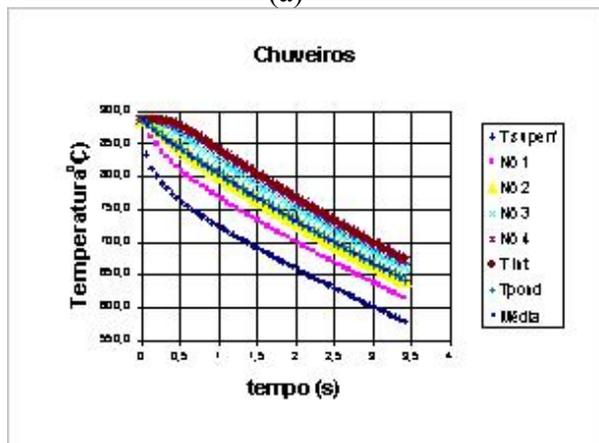
Utilizando o MDF e as temperaturas de entrada (TA) e de saída (TB) obtidas na mesa de resfriamento do aço estudado,⁽⁸⁾ foram calculados o coeficiente de transferência de calor (h) e a sua respectiva taxa de resfriamento, pelo Método Inverso. Um exemplo da evolução da temperatura com o tempo, é apresentado nas Figuras 7 e 8 para as duas espessuras estudadas. O resultado das condições de estratégia de resfriamento estudadas está resumido na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente de transferência de calor (h) e taxa de resfriamento, no setor de chuveiros para as diferentes estratégias⁽⁸⁾

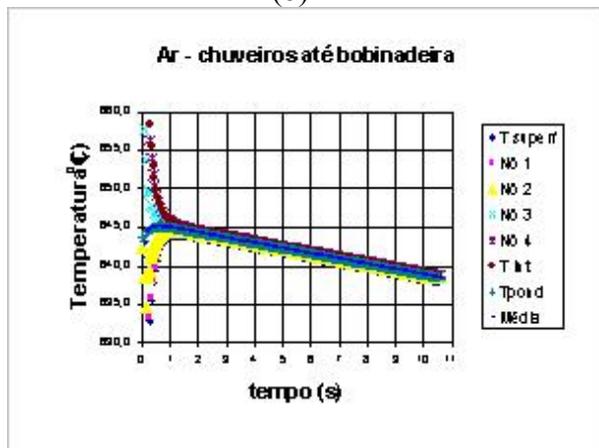
ESPESSURA (mm)	ESTRATÉGIA	h (W/m ² C)	TAXA (°C/s)
4,3	cedo	1400	53
“	tarde	1150	44
“	normal	1950	72
6,5	cedo	1600	36
“	tarde	1250	28
“	normal	-	-



(a)

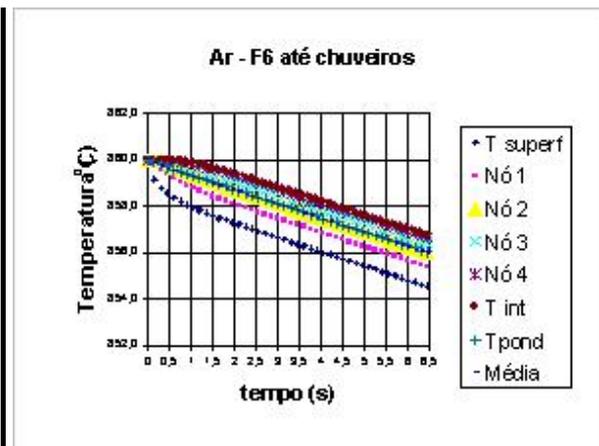


(b)

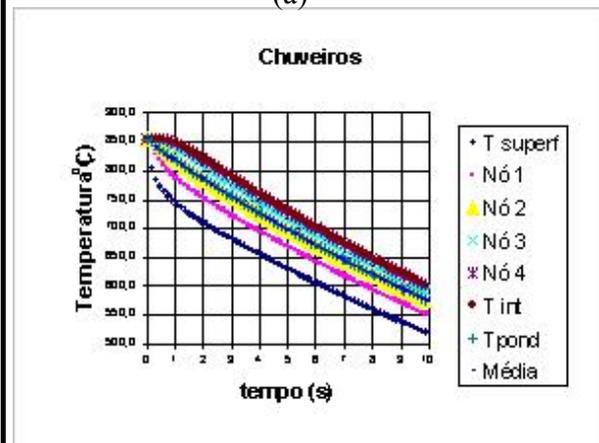


(c)

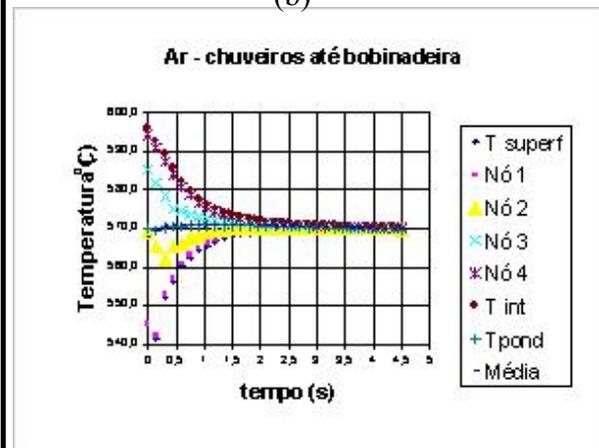
Figura 7 – Evolução da temperatura com o tempo, determinado por MDF para: espessura = 4,3mm, $T_A = 890^\circ\text{C}$ e $T_B = 640^\circ\text{C}$ na região: (a) entre a última cadeira do laminador (F6) e os chuveiros ($h = 20 \text{ W/m}^2\text{C}$ e taxa de resfriamento = 1°C/s); (b) dos chuveiros com estratégia de resfriamento normal ($h = 1950 \text{ W/m}^2\text{C}$ e taxa de resfriamento = 72°C/s); (c) entre os chuveiros e a bobinadeira ($h = 20 \text{ W/m}^2\text{C}$ e taxa de resfriamento = 1°C/s)



(a)



(b)



(c)

Figura 8 – Evolução da temperatura com o tempo, determinado por MDF para: espessura = 6,5mm, $T_A = 860^\circ\text{C}$ e $T_B = 570^\circ\text{C}$ na região: (a) entre a última cadeira do laminador (F6) e os chuveiros ($h = 20 \text{ W/m}^2\text{C}$ e taxa de resfriamento = 1°C/s); (b) dos chuveiros com estratégia de resfriamento tarde ($h = 1250 \text{ W/m}^2\text{C}$ e taxa de resfriamento = 28°C/s); (c) entre os chuveiros e a bobinadeira ($h = 20 \text{ W/m}^2\text{C}$ e taxa de resfriamento = $0,5^\circ\text{C/s}$)

O coeficiente de transferência de calor (h), obtido pelo método de Diferenças Finitas, para o sistema de resfriamento estudado é coerente com os apresentados na literatura: $1000 - 2200 \text{ W/m}^2\text{C}$,⁽¹¹⁾ $2400 \text{ W/m}^2\text{C}$,⁽¹²⁾ $2780 - 3700 \text{ W/m}^2\text{C}$,⁽³⁾ 2500

– $4500 \text{ W/m}^2\text{C}$,⁽¹³⁾ embora tenham sido determinados por diferentes autores para diversas situações: diâmetro de bocal, distâncias longitudinal e transversal entre bocais, comprimento do setor de chuveiros, velocidade da chapa, espessura da chapa, temperaturas de acabamento e bobinamento (TA e TB), temperatura da água, entre outras. Sabendo que, o coeficiente de transferência de calor (h) é dependente de variáveis do sistema, esses valores são dados aqui somente como referência, pois foram utilizados sistemas com características diferentes. A taxa de resfriamento também é coerente com as apresentadas na literatura: $30 -80^\circ\text{C/s}$.^(2,11)

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Análise Microestrutural

A análise metalográfica foi feita segundo norma *ASTM E 3*. As amostras foram cortadas no sentido de laminação para análise da seção ao longo da espessura, embutidas à quente, lixadas com lixas número: 120, 220, 320, 400, 600 e 800 e polidas com pasta de diamante de granulometria $6 \mu\text{m}$ e $3 \mu\text{m}$. O acabamento final foi feito com pasta de alumina de granulometria $0,3 \mu\text{m}$.

Para revelação da microestrutura, foi utilizado o ataque com nital 2% aplicado com um chumaço de algodão (“boneca”), segundo norma *ASTM E 407*. A Figura 9 mostra a microestrutura obtida ao longo da espessura para a amostra de espessura 6,5 mm, estratégia de resfriamento tarde. Para todas as condições de resfriamento estudadas, foram observadas microestruturas semelhantes.



a) superfície superior



c) $\frac{1}{4}$ da espessura a partir da superfície



b) $\frac{1}{4}$ da espessura a partir da superfície



d) superfície inferior

Figura 9 – Microestrutura ferrítica ao longo da espessura para espessura 6,5mm e estratégia de resfriamento tarde (Aumento: 350X)

O tamanho de grão ferrítico (TGF) foi medido pelo método dos interceptos de um círculo *Hilliard*, segundo item 14.2 da norma *ASTM E 112*. O resultado obtido foi $\text{TGF} \cong 5,4\mu\text{m}$. Resultados semelhantes foram obtidos para todas as condições de resfriamento estudadas.

Foi observado, em todas as amostras, que o tamanho de grão ferrítico estava uniforme na espessura.

3.2 Propriedades Mecânicas

Os ensaios mecânicos foram feitos segundo norma *ASTM A 370* nas direções longitudinal e transversal à laminação, complementada pelas normas *ASTM E 8M* (específica para o ensaio de tração), *ASTM E 18* (específica para o ensaio de dureza Rockwell), *ASTM E 92* (específico para o ensaio de dureza Vickers) e *ASTM E 290* (específica para o ensaio de dobramento). As propriedades mecânicas obtidas para o aço e as condições estudadas são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Para todas as condições de resfriamento estudadas, foram observadas propriedades mecânicas semelhantes.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas para espessura 4,3mm ⁽⁸⁾

ESTRATÉGIA	CEDO						NORMAL						TARDE					
	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4
LE (MPa) - DL	406	-	409	404	-	399	363	-	382	403	-	382	398	-	401	394	-	390
LE (MPa) - DT	422	414	414	412	422	426	405	429	415	393	412	395	378	434	404	412	428	412
LR (MPa) - DL	480	-	487	474	-	466	480	-	474	491	-	466	486	-	479	488	-	474
LR (MPa) - DT	497	496	483	476	482	464	478	495	478	474	482	474	482	509	477	481	498	478
A (%) - DL	33	-	32	31	-	34	31	-	32	30	-	33	30	-	32	33	-	32
A (%) - DT	29	30	31	35	32	30	32	28	32	33	28	28	28	30	30	30	30	33
HRB	82	79	81	81	82	81	80	79	81	80	80	79	81	80	81	80	78	81
HV _{20g} - DL	131	121	152	133	130	129	129	133	127	140	142	134	128	132	139	139	125	133
HV _{20g} - DT	138	141	133	123	131	130	140	131	129	134	138	144	131	128	132	135	127	131
Dobramento 180°	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

Tabela 3 – Propriedades mecânicas para espessura 6,5mm ⁽⁸⁾

ESTRATÉGIA	CEDO						TARDE					
	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4
LE (MPa) - DL	381	-	387	357	-	346	401	-	411	381	-	387
LE (MPa) - DT	382	389	396	359	364	350	397	438	419	380	397	390
LR (MPa) - DL	472	-	471	444	-	428	481	-	484	471	-	472
LR (MPa) - DT	475	466	478	446	450	435	473	505	483	459	485	471
A (%) - DL	38	-	32	32	-	34	34	-	33	36	-	35
A (%) - DT	34	28	32	34	28	33	33	34	31	32	33	31
HRB	78	77	79	78	78	78	82	82	81	78	79	79
HV _{20g} - DL	135	126	129	134	129	133	128	123	130	126	125	127
HV _{20g} - DT	136	135	133	135	132	135	131	130	134	130	130	131
Dobramento 180°	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B

4 CONCLUSÕES

Com base nos dados apresentados para o resfriamento do aço usado para o atendimento do grau *LN28* da norma *NBR 6655*, de espessuras 4,3mm e 6,5mm, conclui-se que:

1) As faixas de coeficiente de transferência de calor e as respectivas taxas de resfriamento no setor de chuveiros são:

1.1) $h = 1150 - 1950 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e taxa = 44 – 72 °C/s para espessura = 4,3mm

1.2) $h = 1250 - 1600 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e taxa = 28 – 36 °C/s para espessura = 6,5mm

2) As diferentes estratégias de resfriamento (cedo, normal e tarde) não introduzem variações significativas no coeficiente de transferência de calor, na microestrutura e nas propriedades mecânicas, para este aço nas condições do presente estudado.

Agradecimentos

Ao Francisco Acácio Peres, M.Sc e Ricardo Augusto Carvalho da Silva (do Controle Integrado de Produto da Cosipa); Dr. Antonio Augusto Gorni, Roberto Gomes Colella, M.Sc., Marcos Roberto Soares da Silva (do Suporte Técnico da Laminação à Quente da Cosipa); Benedito Dias Chivites (do Centro de Testes da Cosipa); Carlos Augusto Saraiva de Maria (do Laboratório de Materiais da Cosipa).

REFERÊNCIAS

- 1 HUTCHINSON, B. Microstructure development during cooling of hot rolled steels. *Ironmaking and Steelmaking*, London, v.28, n.2, p.145-151, 2001.
- 2 LUCAS, A. et al. Metallurgical aspects of ultra fast cooling in front of down-coiler. *Steel Research*, Dusseldorf, v.75, n.2, p.139-146, 2004.
- 3 MIYAKE, Y.; NISHIDE, T.; MORIYA, S. Device and system for controlled cooling for hot strip mill. *Transactions ISIJ*, Tokyo, v.20, n.7, p.496-503, 1980.
- 4 DEVADAS, C.; SAMARASEKERA, I.V. Heat transfer during hot rolling of steel strip. *Ironmaking and Steelmaking*, London, v.13, n.6, p.311-321, 1986.
- 5 BROCHADO, A.D.; LIGUORI, P. Modelo matemático para dimensionamento do resfriamento de tiras por fluxo laminar de água na mesa de saída do laminador a quente. *Metalurgia – ABM*, São Paulo, v.38, n.293, p. 215-220, abr. 1982.
- 6 OLDEN, V. et al. Water spray cooling of stainless and C-Mn steel. *Steel Research*, Dusseldorf, v.69, n.6, p.240-246, 1998.
- 7 TELEJKO, T.; MALINOWSKI, Z. Application of an inverse solution to the thermal conductivity identification using the finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, Lausanne, v.146, n.2, p.145-155, 2004.
- 8 BRANCO, V.P.V.; **Análise crítica do setor de resfriamento de chapas laminadas a quente do aço LN28**. 128p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- 9 POIRIGER, D.R.; GEIGER, G.H. **Transport phenomena in materials processing**. Warrendale, Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 1994. Cap.16, p.571-598: Numerical Methods and Models.
- 10 OZISIK, M.N. **Heat conduction**. New York: John Wiley & Sons, 1993. Cap. 12-10, p. 472-480: One-dimensional time-dependent heat conduction.
- 11 TACKE, G.; LITZKE, H.; RAQUET, E. Investigations into the efficiency of cooling systems for wide-strip hot rolling mills and computer-aided control of strip cooling. In: CONFERENCE ACCELERATED COOLING OF STEEL, Pittsburgh-Pennsylvania, Aug. 19-21, 1985. Warrendale: AIME,1986. p.35-54.
- 12 PRICE, R.F.; FLETCHER, A.J. Determination of surface heat-transfer coefficients during quenching of steel plates. *Metals Technology*, New York, v.7, p.203-211, May 1980.
- 13 PRASAD, A.; JHA, S.; MISHRA, S. Modelling of microstructural evolution during accelerated cooling of hot strip on the runout table. *Steel Research*, Dusseldorf, v.66, n.10, p.416-423, 1995.

Lista de símbolos

A = alongamento

DL = direção de laminação

HRB = dureza Rockwell B

i = incremento de tempo

j = posição ao longo da espessura

LE = limite de escoamento

LR = limite de resistência

N = número de segmentos

T = temperatura

T_{amb} = temperatura ambiente

Δx = segmentos de espessura (= e/N)

B = resultado bom (não apresentou problemas)

DT = direção transversal à direção de laminação

HV = microdureza Vickers

h = coeficiente de transferência de calor

K = condutividade térmica

LTQ = Laminador de Chapas Finas à Quente

MDF = Método de Diferenças Finitas

P_C = distância transversal entre bocais dos chuveiros

P_L = distância longitudinal entre bocais dos chuveiros

TA = temperatura de acabamento

TB = temperatura de bobinamento