



EFEITO DO RESFRIAMENTO CONTROLADO APÓS LAMINAÇÃO A QUENTE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DE UM FIO-MÁQUINA DE AÇO ALTO CARBONO COM CROMO¹

Fábio Adriano da Silva²
 Paulo Roberto Cetlin³

Resumo

Aços hipereutetóides destinados à trefilação exigem propriedades mecânicas e características microestruturais bem definidas devido às suas aplicações finais. Para se obter estas características microestruturais e propriedades mecânicas, exige-se um controle rígido dos parâmetros do resfriamento controlado após a laminação a quente. A estrutura desejável deve ser constituída de perlita fina, com o menor espaçamento interlamelar possível. Outros constituintes, como a ferrita proeutetóide, rede de cementita, bainita e martensita devem ser evitadas tanto quanto possível. O cromo é utilizado como elemento refinador da estrutura, mas aumenta a probabilidade da formação de martensita. Além de ser necessário evitar constituintes indesejáveis, as propriedades mecânicas devem ser atendidas, com a menor variação possível. Neste estudo, alguns parâmetros do processo de resfriamento controlado foram estudados de forma a obter estrutura e propriedades mecânicas desejadas em fio-máquina de aços hipereutetóides ao cromo.

Palavras-chave: Fio-máquina; Alto carbono; Resfriamento controlado; hipereutetóides.

EFFECT OF CONTROLLED COOLING AFTER HOT ROLLING IN THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF A HIGH CARBON WIRE ROD WITH CHROMIUM

Abstract

Hypereutectoid steels destined to drawing demand a minimum variation of mechanical properties and a well defined microstructure due to its final applications. To obtain these characteristics, a good control of the parameters of cooling after hot rolling is demanded. The desirable structure is constituted of fine pearlite, with the interlamellar spacing as fine as possible. Other metallographic constituents, as proeutectoid ferrite, cementite network, bainite and martensite should be avoided as much as possible. Chromium is used to reduce the interlamellar spacing of the pearlite but, it increases the probability to form martensite. Besides being necessary to obtain this structure without undesirable metallographic constituents, the mechanical properties should be reached. In this study, some parameters of the process of controlled cooling were studied to obtain structure and mechanical properties desired in wire rod of hypereutectoid steels with chromium.

Key words: Wire Rod; High carbon; Controlled cooling; Hypereutectoid.

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

² Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Superintendência de Marketing da Usiminas, Belo Horizonte, MG.

³ Engenheiro Mecânico, Ph.D, Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG.

1 INTRODUÇÃO

Através do controle das variáveis do resfriamento do fio-máquina após laminação a quente, é possível obter as características de microestrutura e propriedades mecânicas adequadas ao processo de trefilação.⁽¹⁻⁴⁾ Além disso, a espessura da carepa pode ser reduzida consideravelmente.⁽⁵⁾

A matéria prima, que no caso é o tarugo de lingotamento contínuo, é parte fundamental para que se obtenha um bom resultado com o resfriamento controlado. A qualidade de superfície do tarugo, variação de composição química e qualidade interna são variáveis imprescindíveis na obtenção de um fio-máquina de qualidade.

A aciaria deve sempre buscar um aço com pouca variação de composição química, baixo nível de inclusões não deformáveis, e excelente qualidade de superfície. As trefilarias devem buscar métodos eficientes de decapagem, lubrificação e adequar as condições de trefilação ao fio-máquina utilizado.

A laminação de fio-máquina deve ter como objetivo a obtenção de propriedades mecânicas e microestrutura adequada ao processo posterior de trefilação, diminuindo quebras durante o processo e até mesmo propiciando redução de etapas e custo. O limite de resistência do fio-máquina como laminado é o ponto de início que define o ganho de limite de resistência durante o processo de trefilação.

Todas as áreas que fazem parte do processo devem sempre trabalhar em conjunto para que no final da cadeia produtiva se tenha um produto de qualidade a um baixo custo.

Neste trabalho, buscou-se determinar as condições adequadas para o resfriamento controlado de um aço de alto carbono hipereutetóide com cromo. Estas condições devem evitar a formação de estruturas indesejáveis como martensita e rede de cementita, obtendo-se uma estrutura de perlita fina. Além da perlita fina, as propriedades mecânicas especificadas devem ser atingidas.

Um modelo proposto por McIvor et al. e citado por Ramalho⁽⁶⁾ é representado pela equação abaixo, e não depende do equipamento utilizado para o resfriamento.

$$LR (MPa) = [267 \times (\log TR) - 293] + 1029 \times (\% C) + 152 \times (\% Si) + 210 \times (\% Mn) + 442 \times (\% P)^{0,5} + 5244 \times (\% N_s)$$

Onde, TR é a taxa de resfriamento (°C/s); %C é o teor de carbono; %Si é o teor de silício; %Mn é o teor de manganês; %P é o teor de fósforo; %N_s é o teor de nitrogênio solúvel.

O principal mecanismo de aumento de resistência mecânica devido à adição de cromo seria o de diminuir a temperatura de transformação da austenita pelo aumento da temperabilidade do aço. Quando o teor de cromo fica superior a 0.30%, há uma redução do acréscimo de resistência, devido à mudança de estrutura da perlita. As lamelas passam de contínuas para descontínuas, causando o esborramento da perlita.⁽⁷⁾

As propriedades de um aço laminado a quente são influenciadas por: (1) temperatura de reaquecimento do tarugo (tamanho de grão austenítico prévio), (2) taxa de deformação, (3) temperatura de deformação, e (4) da taxa de resfriamento.⁽⁸⁾

Para se obter uma estrutura uniforme de grãos finos e isento de constituintes indesejáveis como martensita e rede de cementita, um resfriamento controlado logo após a deformação a quente deve ser utilizado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matéria Prima

Utilizou-se o aço SAE1082 com adição de cromo (Tabela 1), laminado na bitola de 11 mm. Trata-se de um aço comercial utilizado na fabricação de arames para concreto protendido.

Tabela 1: Composição química da corrida utilizada (% em peso)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0,84	0,71	0,19	0,013	0,003	0,22	0,02	0,01	0,003

O estudo foi concentrado no resfriamento controlado do fio-máquina. Variáveis do lingotamento contínuo e laminação de fio máquina foram mantidas constantes.

2.2 Resfriamento Controlado

Três das variáveis do processo foram consideradas: temperatura de formação da espira, percentual de abertura dos ventiladores e número de ventiladores para cada percentual de abertura conforme Tabela 2.

Tabela 2: Condições de resfriamento controlado avaliadas

Condição	Temperatura no formador de espiras ¹ (°C)	Ventiladores	Abertura dos ventiladores (%)	Nº de tarugos laminados	Segundo ponto de medição de temperatura ²	Temperatura obtida no segundo ponto de medição (°C)
A	940 ± 10	01 a 14	50	04	Após o ventilador 14	415 - 440
B	870 ± 10	01 a 07	100	04	Após o ventilador 07	611 - 625
		08 a 14	30			
C	940 ± 10	01 a 12	50	04	Após o ventilador 12	486 - 511
		13 e 14	30			
D	940 ± 10	01 a 10	100	04	Após o ventilador 10	526 - 550
		11 a 14	30			
E	940 ± 10	01 a 08	100	04	Após o ventilador 08	611 - 618
		09 a 14	30			
F	870 ± 10	01 a 09	100	04	Após o ventilador 09	536 - 550
		10 a 14	30			
G	870 ± 10	01 a 14	50	04	Após o ventilador 14	407 - 415
H	870 ± 10	01 a 12	50	04	Após o ventilador 12	464 - 489
		13 e 14	30			
Total de tarugos laminados				32		
Velocidade do leito de resfriamento (m/s)				0,90		

1 Temperatura no início da mesa de resfriamento; 2 Temperatura após o último ventilador com a maior abertura

As condições acima foram definidas aplicando-se a metodologia de projeto de experimentos através do método fatorial.

Para cada uma das situações da Tabela 2 a temperatura da superfície do fio-máquina foi medida em um segundo ponto do leito de resfriamento com a utilização de um pirômetro óptico focalizando a região de maior densidade de espiras.

2.3 Amostragem

Em cada uma das oito condições de resfriamento foram laminadas quatro bobinas. Quatro espiras em cada bobina laminada foram amostradas, duas no início (cabeça) e duas no final de cada bobina (cauda). Antes da retirada das amostras 5 espiras no início e no final de cada bobina foram descartadas.

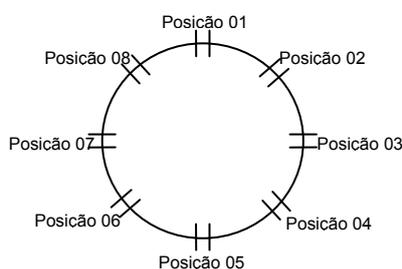


Figura 1: Posição de retirada amostras em cada espira.

2.4 Propriedades Mecânicas

O limite de resistência e redução de área foram determinados nas amostras 1, 3, 5 e 7 de cada espira (norma ASTM E 8M – 2009⁽⁹⁾).

2.5 Formação de Martensita

A avaliação da presença de martensita foi realizada na seção longitudinal, ataque com Nital 3% e observação no microscópio óptico (200X). Mede-se a espessura do alinhamento de martensita em 4 diferentes pontos distantes 50 μ m um dos outros. Determina-se a espessura máxima e a média dos 4 pontos. Classificação conforme atabela 3.

Tabela 3: Classificação da martensita¹

Nível	Critério
0	Isento
1	Espessura máxima $\leq 10\mu\text{m}$
2	Espessura máxima de: 11 a 20 μm ou Espessura máxima de: 21 a 35 μm e média de 4 pontos menor do que 15 μm
3	Espessura máxima $> 21\mu\text{m}$ e média de 4 pontos maior ou igual a 15 μm ou Espessura máxima $> 35\mu\text{m}$.

¹ Classificação empírica utilizada pelos autores

2.6 Rede de Cementita

A avaliação da presença de rede de cementita foi realizada na seção longitudinal, ataque com Picrato Alcalino Sódico e observação no microscópio óptico (500X). Classificação da rede de cementita conforme Figura 2.

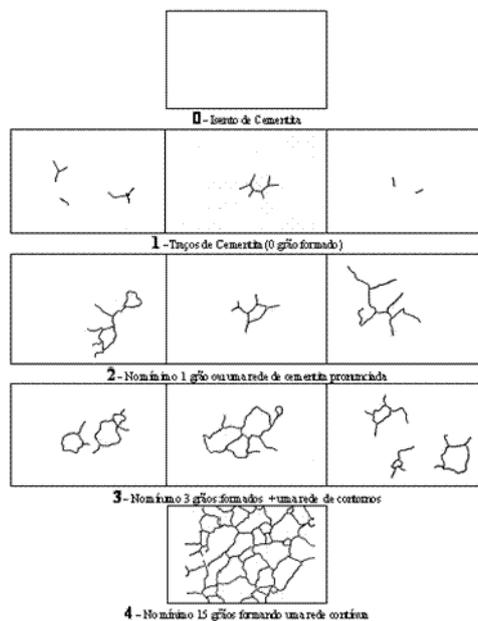


Figura 2: Critérios para a classificação da rede cementita (classificação empírica utilizada pelos autores).

2.7 Espaçamento Interlamelar

A determinação do espaçamento interlamelar foi realizada na seção transversal, ataque com Nital 3% e utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Determinou-se o espaçamento interlamelar no centro, meio raio e superfície do fio-máquina. Consideraram-se campos onde a perlita estava transversal ao plano de corte (menor distância entre as lamelas de ferrita). Uma linha com comprimento conhecido foi traçada e o comprimento desta linha foi dividido pelo número de lamelas de cementita cortadas pela linha. O comprimento interlamelar considerado foi o resultado desta divisão.

2.8 Carepa Azul

O filme de magnetita eventualmente formado no fio possui um aspecto azulado. Assim, neste trabalho o mesmo foi denominado carepa azul. A formação de carepa azul foi avaliada visualmente e classificada em três diferentes níveis: Nível 0 – Isento; Nível 1 – Leve; Nível 2 – Grande quantidade.

3 RESULTADOS

3.1 Taxa de Resfriamento

A Figura 3a mostra o resultado obtido para a temperatura do fio-máquina no formador de espiras e a temperatura medida após o último ventilador com a maior abertura e a Figura 3b mostra a taxa de resfriamento da superfície do fio-máquina para cada uma das condições de resfriamento.

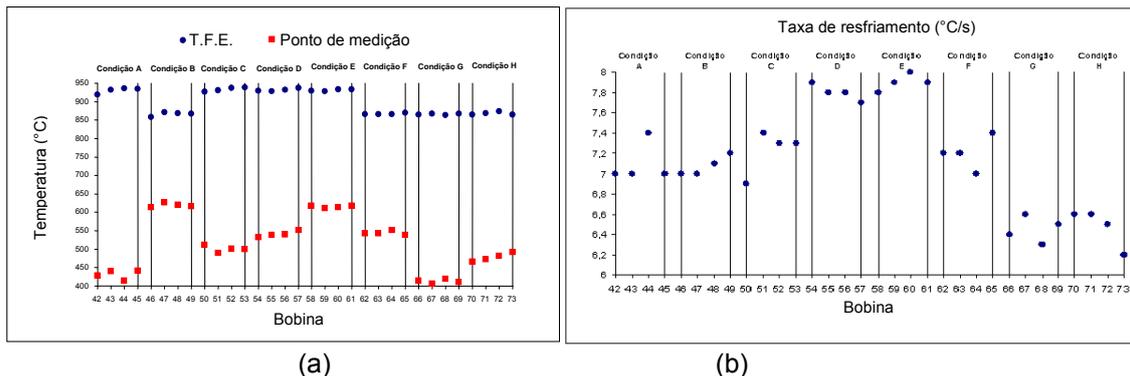


Figura 3: (a) Temperatura do fio-máquina no formador de espiras - T.F.E. (início da mesa de resfriamento) e após o último ventilador com a maior abertura (segundo ponto de medição) (b) taxa de resfriamento

3.2 Propriedades Mecânicas

3.2.1 Variação do limite de resistência ao longo da espira e ao longo da bobina

A variação obtida no limite de resistência dentro de uma mesma espira para todas as condições de resfriamento pode ser vista na Figura 4.

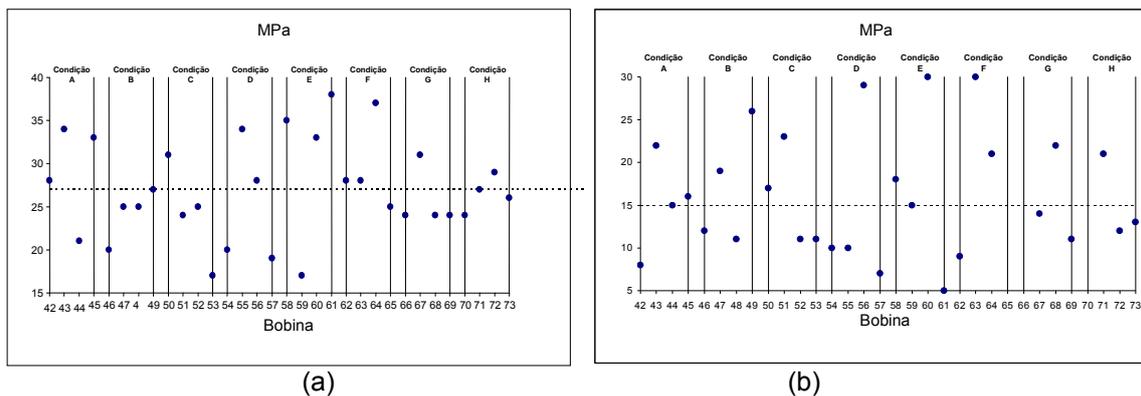


Figura 4: Variação do limite de resistência dentro de uma mesma espira nas condições de resfriamento estudadas amostra de cabeça (a) e cauda (b)

Não foi possível verificar o efeito das condições de resfriamento na variação de limite de resistência dentro de uma mesma espira.

O limite de resistência para cada uma das posições de teste foram traçadas na Figura 5.

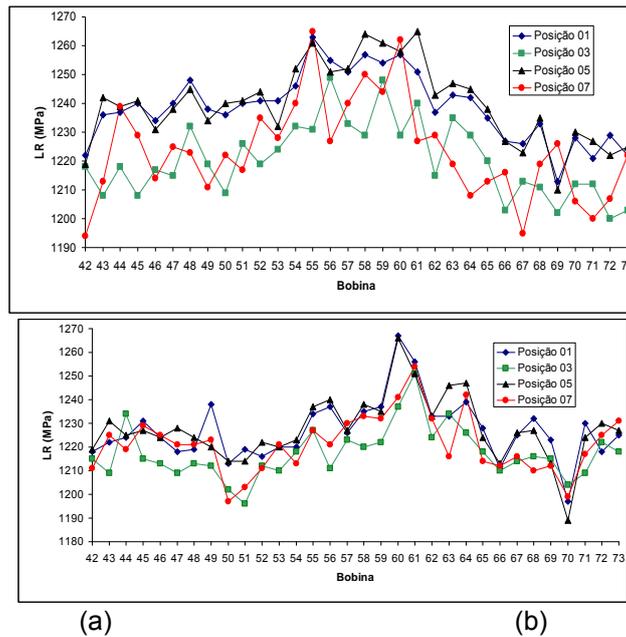


Figura 5: Limite de resistência obtido em cada uma das posições de amostragem (a) amostras de cabeça e (b) amostras de cauda

3.2.2 Avaliação das condições de resfriamento no valor de LR

Considerando-se todas as variações nas condições de resfriamento a variação máxima de limite de resistência dentro da mesma corrida foi de 71 MPa (Figura 6).

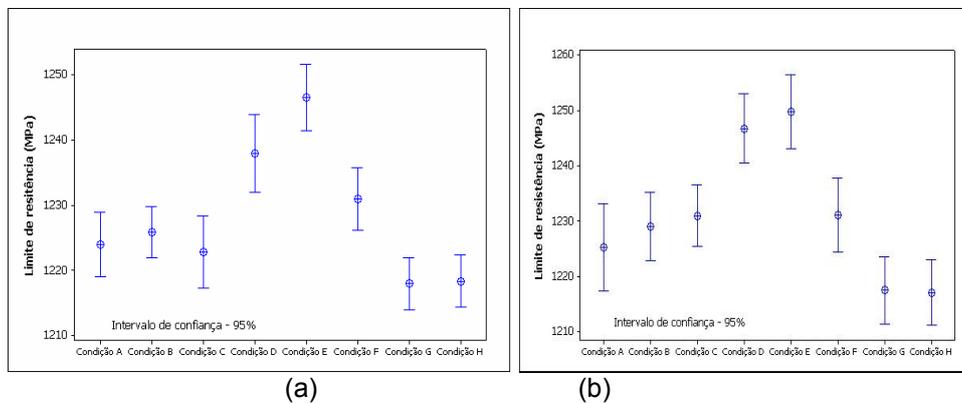


Figura 6: Limite de resistência em função da condição de resfriamento (a) amostras de cabeça e cauda (b) amostras de cabeça.

A Figura 6 mostra que os resultados de limite de resistência (LR) são mais elevados para as condições de resfriamento D e E. As condições de resfriamento D e E tem em comum a temperatura do fio-máquina no formador de espiras mais elevada (940°C) e maior percentual de abertura dos ventiladores (100%).

As condições G e H apresentaram valor médio de LR ligeiramente inferior. Nestas condições a temperatura do fio-máquina no formador de espiras foi de 870°C com 50% de abertura dos ventiladores.

Estes resultados estão de acordo com as taxas de resfriamento (Figura 3). Ou seja, as condições com menores taxas de resfriamento apresentaram os menores resultados de limite de resistência e as condições de resfriamento com maiores taxas de resfriamento apresentaram os maiores resultados de limite de resistência.

Utilizando-se a técnica de projeto de experimentos fatorial (DOE) através do programa Miniab alguns gráficos foram traçados (Figura 7) com o objetivo de avaliar a influência das variáveis de resfriamento no valor obtido de limite de resistência.

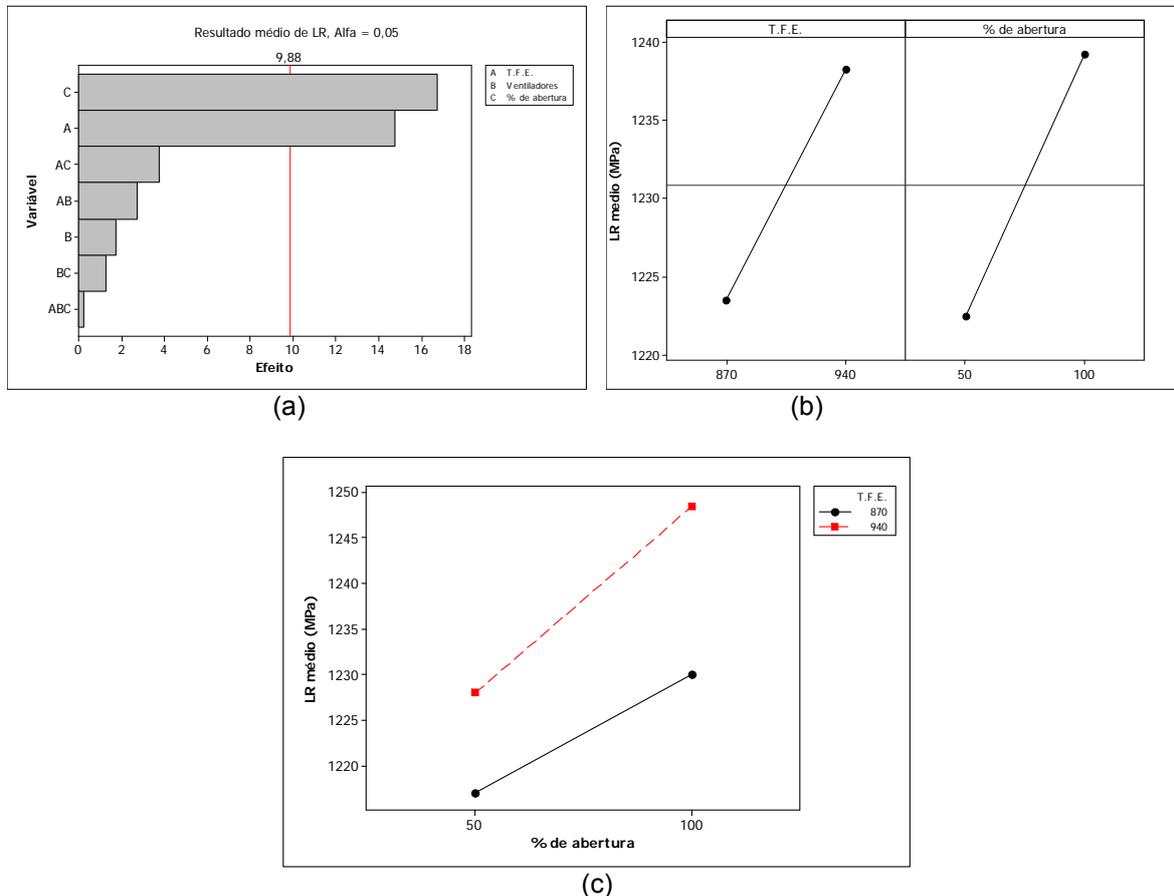


Figura 7: (a) Influência das variáveis do resfriamento controlado no limite de resistência médio; (b) Efeito da temperatura do fio-máquina no formador de espiras e do percentual de abertura dos ventiladores no limite de resistência médio; (c) Efeito da temperatura do fio-máquina no formador de espiras e do percentual de abertura dos ventiladores no limite de resistência médio

As variáveis do resfriamento controlado que afetaram o resultado médio do limite de resistência foram o percentual de abertura dos ventiladores e a temperatura do fio-máquina no formador de espiras (T.F.E.). As formas que estas duas variáveis afetaram o resultado médio de limite de resistência podem ser vistas nas Figuras 7a e 7b.

Conforme a Figura 7b, elevando-se a temperatura do fio-máquina no formador de espiras e aumentando-se o percentual de abertura dos ventiladores o limite de resistência médio aumenta.

O aumento da temperatura do fio-máquina no formador de espiras de 870°C para 940°C provocou um aumento de 14 MPa no limite de resistência e um aumento do percentual de abertura dos ventiladores de 50% para 100% provocou um aumento de 16 MPa no limite de resistência.

A Figura 7c mostra que o efeito do percentual de abertura dos ventiladores é maior para temperaturas mais elevadas do fio-máquina no formador de espiras.

Os resultados obtidos não mostraram nenhum efeito da variação do número de ventiladores nos resultados de limite de resistência. Este fato poderia ser explicado de duas maneiras:

- a reação Austenita → Cementita + Perlita foi totalmente finalizada antes da redução da abertura dos ventiladores em todas as condições de resfriamento estudadas;
- devido à elevada espessura do fio-máquina (11mm) as diferentes taxas de resfriamento entre o centro e superfície minimizaram o efeito desta variável.

3.3 Alinhamento de Martensita

Somente as amostras da cabeça de três bobinas em de cada condição de resfriamento foram analisadas.

Tabela 4: Resultados obtidos de alinhamento de martensita

Condição	A			B			C			D			E			F			G			H			
Bobina	43	44	45	47	48	49	51	52	53	55	56	57	59	60	61	63	64	65	67	68	69	71	72	73	
Posição 01	2	1	3	2	2	2	3	1	1	2	1	2	2	3	2	2	3	2	2	1	2	2	2	1	2
Posição 03	1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	3
Posição 05	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	1	3	1	1	3	2	1	1	1	1
Posição 07	0	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	3	2	2	2	2	3	2	2	1	1	1	2

Somente as bobinas de números 60 (condição de resfriamento E) e 64 (condição de resfriamento F) foram consideradas inadequadas para a aplicação final no que diz respeito ao alinhamento de martensita (mais de um resultado 3).

Não foi possível determinar nenhuma correlação entre o nível do alinhamento de martensita com as condições de resfriamento. Entretanto a condição de resfriamento B foi a que apresentou os melhores resultados. Este resultado pode até certo ponto ser explicado visto que é nesta condição onde temos o menor número de ventiladores com abertura diferente de 30%.

3.4 Rede de Cementita

Somente as amostras da cabeça de três bobinas em de cada condição de resfriamento foram analisadas.

Tabela 5: Resultados obtidos de rede de cementita

Condição	A			B			C			D			E			F			G			H			
Bobina	43	44	45	47	48	49	51	52	53	55	56	57	59	60	61	63	64	65	67	68	69	71	72	73	
Posição 01	1	0	0	0	1	0	1	2	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	
Posição 03	2	1	1	0	1	1	1	2	0	1	1	1	0	0	0	2	0	0	1	0	1	1	1	1	1
Posição 05	2	1	1	0	1	1	0	2	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
Posição 07	2	1	1	0	1	1	1	2	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1

Os resultados de uma maneira geral são considerados satisfatórios para todas as condições de resfriamento. No entanto, as condições A, C, F (bobina 63) e G apresentaram os piores resultados.

Apesar do resultado ruim obtido na posição 3 da bobina 63, considera-se o resultado da condição de resfriamento F satisfatório visto que as bobinas 64 e 65 laminadas na mesma condição não apresentaram rede de cementita.

Os piores resultados obtidos nas condições de resfriamento A, C e G podem ser explicados pela baixa abertura dos ventiladores (50%). Neste caso a velocidade

de resfriamento é mais lenta nos primeiros ventiladores favorecendo a formação da rede de cementita principalmente em regiões mais segregadas.

3.5 Filme de Magnetita e Carepa Azul

Tabela 6: Classificação visual com relação à formação de carepa azul¹

Condição	A				B				C				D				E				F				G				H			
Bobina	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
Classificação	2	1	2	2	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

¹ Classificação empírica utilizada pelos autores

A presença de carepa azul foi mais pronunciada nas condições de resfriamento A, C, D e E onde a temperatura no formador de espiras foi mais elevada (940°C).

O que normalmente se observa no processo de laminação de fio-máquina, e que também foi observado neste trabalho, é que a utilização de temperaturas elevadas no formador de espiras leva a formação de bolhas na carepa. Estas bolhas são facilmente desprendidas em algumas regiões do fio-máquina devido à ação dos ventiladores e quando a temperatura do material fica entre 570°C e 300°C ocorre à formação de magnetita.

3.6 Espaçamento Interlamelar (SP)

Como se trata de um fio-máquina de 11mm as taxas de resfriamento serão diferentes para o centro, meio e borda. Para que a influência das diferentes condições de resfriamento fosse avaliada fez-se necessário a determinação do espaçamento lamelar nas diferentes posições da espira bem como em diferentes posições ao longo do diâmetro do fio-máquina.

A variação de Sp ao longo diâmetro pode ser verificada para cada condição de resfriamento nas Figura 8.

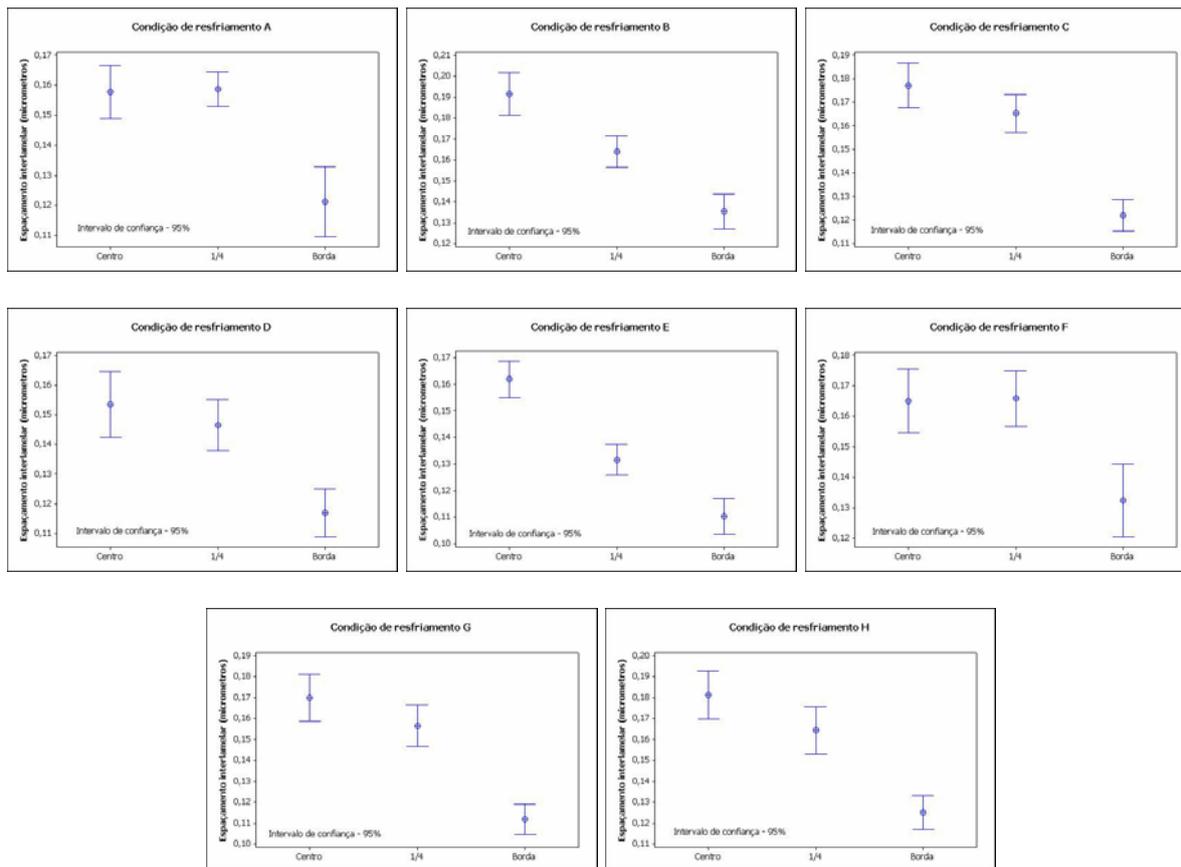


Figura 8: Variação do espaçamento interlamelar da perlita, S_p , ao longo do diâmetro do fio-máquina para as diversas condições de resfriamento.

O espaçamento interlamelar aumenta na direção do centro do fio-máquina independente da condição de resfriamento utilizada. Este fato pode ser explicado pela menor taxa de resfriamento no centro do fio-máquina. Nesta região a perlita se forma a uma temperatura mais elevada que na borda do material. Na Figura 9 é possível verificar a influência das condições do resfriamento controlado no espaçamento interlamelar no centro, $\frac{1}{4}$ do diâmetro, borda do fio-máquina e no espaçamento interlamelar médio.

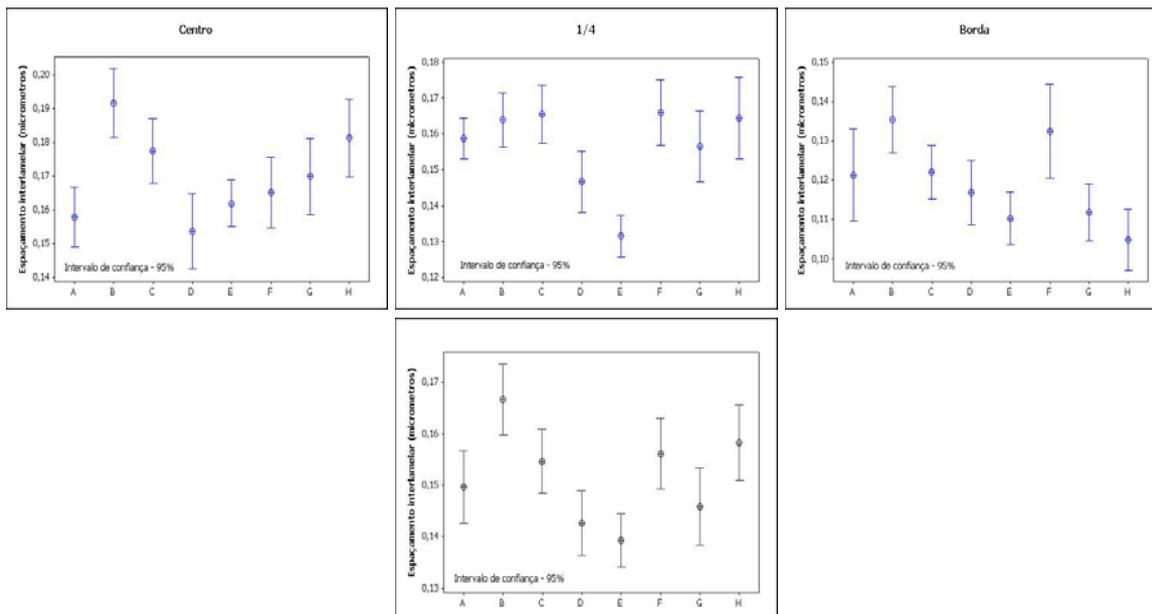


Figura 9: Variação do espaçamento interlamelar da perlita, S_p , no centro, $1/4$ do diâmetro, borda do fio-máquina e espaçamento interlamelar médio.

A condição de resfriamento que apresentou o menor espaçamento interlamelar no centro foi a “D” (temperatura no formador de espiras foi de $940 \pm 10^\circ\text{C}$, o percentual de abertura dos ventiladores foi de 100% e foram utilizados 10 ventiladores com este percentual de abertura máximo). Já a condição de resfriamento B apresentou o maior espaçamento interlamelar no centro do fio-máquina (temperatura do fio-máquina no formador de espiras foi de $870 \pm 10^\circ\text{C}$ com 07 ventiladores na abertura máxima). Na condição B, provavelmente, a austenita no centro do fio-máquina tenha se transformado em perlita após o ventilador de número 07 onde os ventiladores estavam com a abertura de apenas 30%.

A $1/4$ do diâmetro do fio-máquina ainda é possível verificar uma certa influência da condição de resfriamento. Na borda do fio-máquina a variação do espaçamento interlamelar não foi muito afetada pela condição de resfriamento. As condições de resfriamento D e E apresentaram o menor espaçamento interlamelar médio.

4 DISCUSSÃO

4.1 Limite de Resistência (LR)

- A variação máxima do LR dentro de uma espira foi de 38MPa nas amostras de cabeça e de 30MPa nas amostras de cauda.
- A temperatura do fio-máquina no formador de espiras e o percentual de abertura dos ventiladores apresentaram correlação com o valor de LR obtido.
- O resultado de LR aumenta com o aumento da temperatura do fio-máquina no formador de espiras e com o aumento do percentual de abertura dos ventiladores.
- O efeito do percentual de abertura dos ventiladores é mais pronunciado em temperaturas mais elevadas do fio-máquina no formador de espiras.

4.2 Alinhamento de Martensita

- Apesar de não ter sido encontrada correlação entre as condições de resfriamento e o alinhamento de martensita, a condição de resfriamento B apresentou os melhores resultados (menor número de ventiladores com percentual de abertura maior que 30%).

4.3 Rede de Cementita

- As condições de resfriamento onde o percentual de abertura dos ventiladores foi menor (50%) apresentaram os piores resultados relacionados à formação de rede de cementita.

4.4 Formação de Magnetita (Carepa Azul)

- As condições de resfriamento com maior temperatura do fio-máquina no formador de espiras apresentaram maior tendência à formação do filme de magnetita.

4.5 Espaçamento Interlamelar

- As condições de resfriamento E e D apresentaram menor espaçamento interlamelar .

5 CONCLUSÃO

O procedimento utilizado mostrou-se bastante adequado ao desenvolvimento aços hipereutetóides possibilitando determinar as condições de resfriamento para obtenção de microestrutura e propriedades mecânicas adequadas:

- Uma maior temperatura do fio-máquina no formador de espiras favorece a obtenção de um limite de resistência mais elevado e um espaçamento interlamelar menor. No entanto, esta temperatura não pode ser elevada a ponto de favorecer a formação de carepa azul.
- O percentual de abertura dos ventiladores deve ser a maior possível com o objetivo de minimizar a formação de rede de cementita e reduzir o espaçamento interlamelar.
- O número de ventiladores com a abertura máxima deve ser o mínimo possível para minimizar a probabilidade de formação de alinhamento de martensita, mas suficiente para garantir que a reação Austenita → Cementita + Perlita aconteça em temperaturas adequadas.

Agradecimentos

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular, a Luiz C. Cruz, Jorge A. C. Cohn, Ernesto J. Discacciati, Ayrton Mangualde, Rubem de S. M. Lisboa, Odivaldo A. Silva, Tales F. C. Lelis, Willian T. Soares, Carlos Borges e Éder L. da Silva.



REFERÊNCIAS

- 1 Bae, C.M. & Nam, W.J. Microstructure control of wire rods for drawing without patenting. *Wire Journal International*. 2000, pp. 228-232.
- 2 Bae, C.M. et alii. Pearlitic steel wire rods with low cementite volume fraction for direct drawing. *Wire Journal*. October 1992, pp. 73-77.
- 3 Jaiwal, S. & McIvor, I.D. Microalloyed high carbon steel rod. *Ironmaking and SteelMaking*. 1989, Vol. 16, pp. 49-54.
- 4 Maruyama, N. et alii. Microstructure control strengthening of high-carbon steel wires. *Nippon Steel Technical Report*. Janeiro 2005, pp. 56-61.
- 5 Bowering, R.E. The microstructure and mechanical properties of hot rolled wire rods controlled cooled on a moving conveyor. *The Steel Co. of Canada*. 1974, pp. 65-95.
- 6 Ramalho, J. G. Desenvolvimento de aço produzido por lingotamento contínuo para fio-máquina de alta resistência adequado à trefilação direta. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1994. 188p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 7 Jaiswal, S. et alii. Microalloyed high carbon rod. *Wire Industry, Oxted*, v.52, n.624, p.79-82, Dec. 1985.
- 8 Kazeminezhad, M. & Taheri, A. K. The effect of controlled cooling after hot rolling on the mechanical properties of a commercial high carbon steel wire rod. *Materials & Design*, Tehran, v.24, p. 415-421, April, 2003.
- 9 American Society for Testing and Materials. ASTM E 8M: standard test methods for tension testing of metallic material, 2009.