

# FIO-MÁQUINA PARA FABRICAÇÃO DE ARAME UTILIZADO EM CONCRETO PROTENDIDO<sup>1</sup>

*Leandro Aparecido Marchi<sup>2</sup>  
Ronaldo Felisberto de Oliveira<sup>3</sup>  
Luciano de Castro Reis<sup>4</sup>  
Helder Carvalho Ferreira<sup>5</sup>*

## **Resumo**

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto das principais variáveis de processo, com foco na laminação, na ocorrência de fratura em cone durante a trefilação do fio-máquina para arame utilizado em concreto protendido. Na trefilação de aços perlíticos é crítico o controle da microestrutura, onde não é desejável a ocorrência de estrutura frágil como martensita e/ou cementita. A obtenção de uma estrutura adequada é determinada além da composição química, pelas condições de reaquecimento do tarugo e resfriamento na laminação do fio-máquina. Mediante a otimização das variáveis de processo foi possível obter melhorias consistentes do produto através da obtenção de uma estrutura homogênea do fio-máquina já na condição laminada, com resultados expressivos na trefilação.

**Palavras-chave:** Fio-máquina; Protendido; Fratura em cone.

## **WIRE ROD USED TO FABRICATE PRESTRESS CONCRETE**

## **Abstract**

This study aims to evaluate the impact of key process variables, regarding the occurrence of cup-and-cone fracture during drawing of wire rod used in prestressed concrete. In the drawing of the pearlitic steels, it is critical the control of the microstructure, such as martensite and / or cementite. Besides the chemical composition, cooling after rolling has a prominent role in achieving good performance in drawing. Through the optimization of process variables, it was possible to obtain consistent improvements of the product by obtaining a homogeneous structure of the wire rod with significant results on drawing.

**Keywords:** Cup-and-cone; Prestress concrete.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, Eng.Metalurgista, M.Sc., Eng. de Produto, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil.*

<sup>3</sup> *Membro da ABM, Técnico Metalurgista, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil..*

<sup>4</sup> *Membro da ABM, Eng.Metalurgista, M.Sc., Eng. Produção, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil.*

<sup>5</sup> *Membro da ABM, Eng.Metalurgista, M.Sc., Espec.de Produto, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços carbono para trefilação apresentam uma estrutura formada perlítica. Este constituinte garante níveis elevados de redução a frio, sem a ocorrência de falhas. No entanto, não é raro rupturas durante o a trefilação ou nos ensaios de liberação devido a presença de constituintes frágeis como martensita e/ou cementita. São vários os fatores que podem levar a ocorrência destas estruturas frágeis e consequente falha no processamento ou uso final do produto.

O fio-máquina destinado a fabricação de cordoalhas para concreto protendido é fabricado a partir de aço com alto teor de carbono, que é um agravante em relação à ocorrência das estruturas indesejáveis citadas anteriormente. É do conhecimento de que a trefilabilidade do fio-máquina também é influenciada por outros fatores, quer sejam estes associados à matéria prima, preparação superficial do fio-máquina e condições do processo de trefilação. Na Figura 1 é mostrado de forma esquemática as principais contribuições destes fatores e serão abordadas neste trabalho.

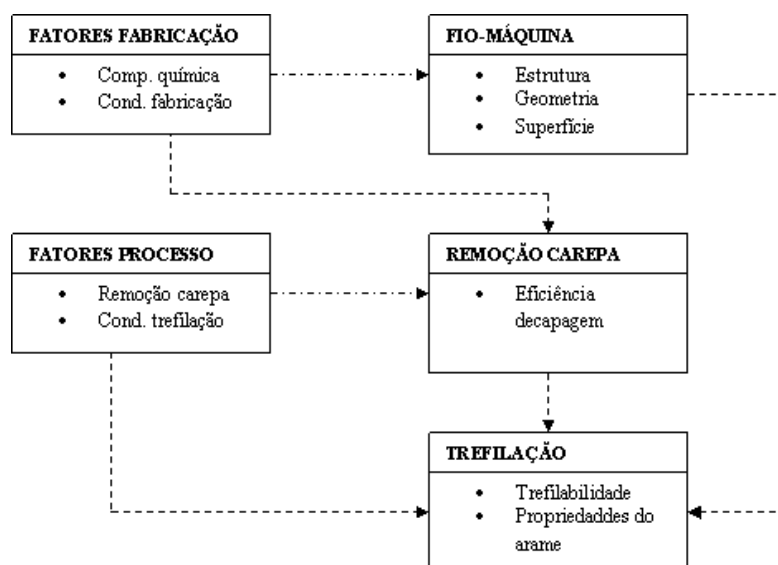


Figura 1. Fatores de processo e fabricação que afetam a trefilabilidade e propriedades do produto.<sup>(1)</sup>

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho será abordado a influencia das características do fio-máquina no desempenho da trefilação e nas propriedades do produto final.

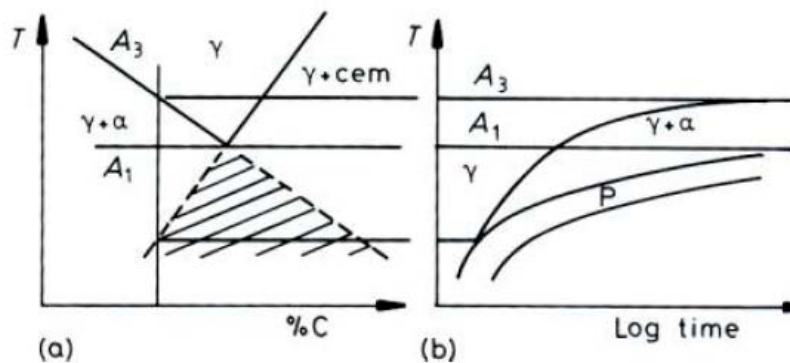
### 2.1 Importância da Estrutura do Fio-máquina

Uma das causas da fragilidade em aços de alto teor de carbono é atribuída a presença de cementita pró-eutetóide no contorno de grão. A precipitação de cementita pró-eutetóide no contorno de grão austenítico deteriora a ductilidade do material. Esta cementita pode ser eliminada pelo super-resfriamento controlado na etapa final de laminação do fio máquina, ou ainda, através de tratamento térmico de patenteamento, entretanto, este processo aumenta o custo de produção e tem uso limitado para aços com adição de cromo. A cementita pró-eutetóide é formada no resfriamento na faixa de temperatura  $A_{r_{cm}}-A_{r1}$  e se apresentam como sítios para

início de fratura. Portanto, o aumento da fração volumétrica da cementita com o teor de carbono reduz drasticamente a trefilabilidade, pois este constituinte é uma fase muito mais dura do que a matriz ferrítica.

Para a trefilação de aço carbono é desejável que a estrutura predominante seja formada por perlita fina, homogênea e com menor espaçamento inter-lamelar ( $S^*$ ). Este espaçamento é inversamente proporcional ao super-resfriamento abaixo da temperatura eutetóide ( $A_1$ ).

Caso a austenita com menos carbono do que a composição eutetóide seja resfriado isotermicamente abaixo de  $A_1$ , a fase pró-eutetóide irá ser formada antes da formação do constituinte perlítico. Ao contrário, caso a austenita apresente mais carbono do que a composição eutetóide, nestas condições é esperada também a formação da fase pró-eutetóide. Entretanto, se a composição da liga não diferir muito do ponto eutetóide, é possível que seja evitado a fase pró-eutetóide através do aumento no super-resfriamento abaixo de  $A_1$ . Esta região na qual é possível evitar a formação deste constituinte corresponde a condição em que a austenita está saturada de cementita e ferrita, simultaneamente. Esta região está representada na Figura 2 pela área achurada.



**Figura 2.** Efeito da temperatura de transformação na fração volumétrica de cementita pró-eutetóide.<sup>(2)</sup>

## 2.2 Influencia de Elementos de Liga na Supressão da Cementita Pró-eutetóide

É conhecido que vários elementos tem efeito significativo no retardo da ocorrência de cementita pró-eutetóide em aços hiper-eutetóides. Dentre estes elementos, iremos citar três que normalmente são adicionados aos aços para protendido: silício, manganês e cromo.

### 2.2.1 Efeito do silício

A diferença na espessura da cementita para dois aços, com e sem adição de silício pode ser visto na Figura 3. A este elemento é atribuído aumento na atividade do carbono na austenita, reduzindo assim, localmente, o gradiente de atividade do carbono e tem solubilidade desprezível na cementita. Por este motivo, este elemento é adicionado com objetivo de reduzir a formação de cementita pró-eutetóide.

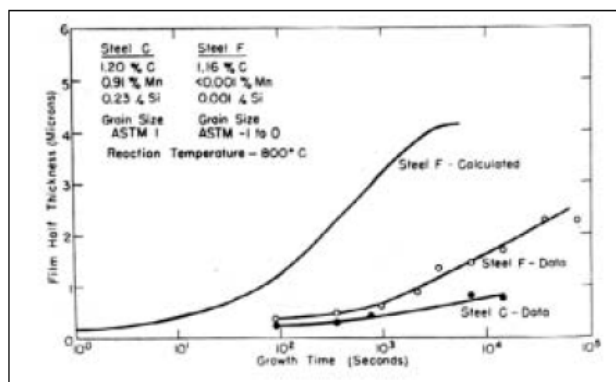


Figura 3. Efeito do silício na espessura da cementita pró-eutetóide.<sup>(3)</sup>

### 2.2.2 Efeito do manganês

Tem pouco efeito na cinética de crescimento da cementita, devido à elevada solubilidade entre  $Fe_3C$  e  $Mn_3C$ . Entretanto, o manganês reduz a fração volumétrica da ferrita pró-eutetóide por promover a estabilização da austenita através do abaixamento da temperatura  $A_{r3}$ , conforme pode ser visto na Figura 4.

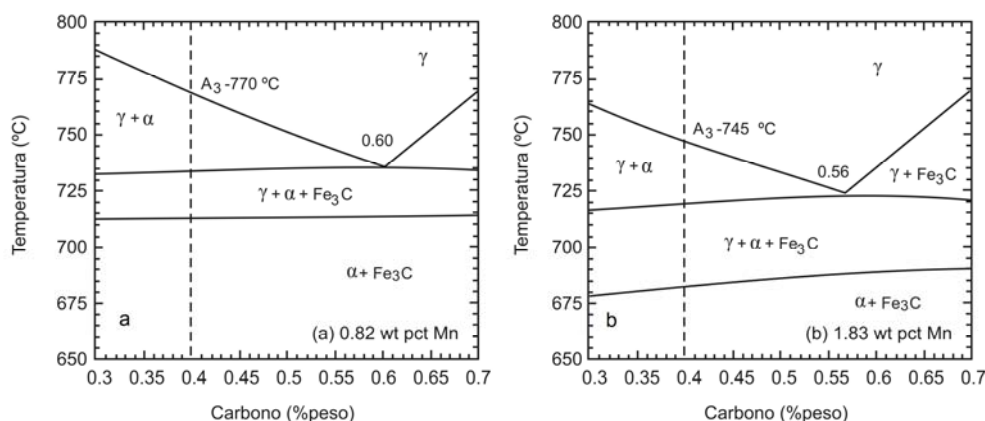


Figura 4. Efeito da adição de manganês na temperatura  $A_{r3}$  e composição eutetóide de um aço SAE5140. (a) 0,82%Mn; (b) 1,83%Mn (em peso).<sup>(4)</sup>

A Figura 5 mostra as microestruturas possíveis de serem obtidas para o aço SAE5140 com teores de manganês diferentes e submetido a diferentes taxas de resfriamento. No aço com baixo teor de manganês, é possível que a transformação austenita-perlita ocorra completamente em taxa de  $1,0^{\circ}C/s$ . Já no aço com teor mais elevado de manganês submetido a esta mesma taxa de resfriamento, é possível obter uma estrutura com presença de constituintes frágeis, como a martensita.

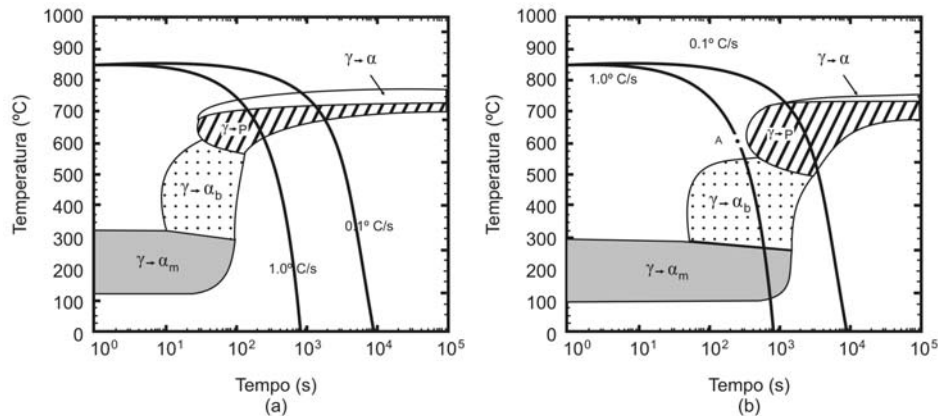


Figura 5. Transformação do aço SAE5140 com teores de (a) 0,82%Mn e (b) 1,83%Mn (em peso).<sup>(4)</sup>

### 2.2.3 Efeito do cromo

A adição de Cr em aços aumenta a temperatura eutetóide uma vez que este elemento estabiliza a ferrita. Sendo um elemento com forte tendência a formar carbonetos, na transformação perlítica, em princípio, o Cr se concentraria na cementita da perlita. No entanto, para valores elevados do superesfriamento no patenteamento e altas velocidades de resfriamento na etapa final do processo de laminação, esta "partição" é suprimida porque depende da difusão do Cr.

Assim, a adição de Cr em aço perlítico acarreta uma diminuição no espaçamento interlamelar devido ao aumento na temperatura eutetóide. Nos aços longos, durante a última etapa da laminação a quente que é o processo de resfriamento controlado, pode-se prever que as concentrações de Cr na ferrita e na cementita sejam as mesmas em virtude das altas taxas de resfriamento do fio máquina. A Figura 6 mostra este abaixamento através do deslocamento da curva para a direita o que abaixa a temperatura de início de transformação de T1 para T2.

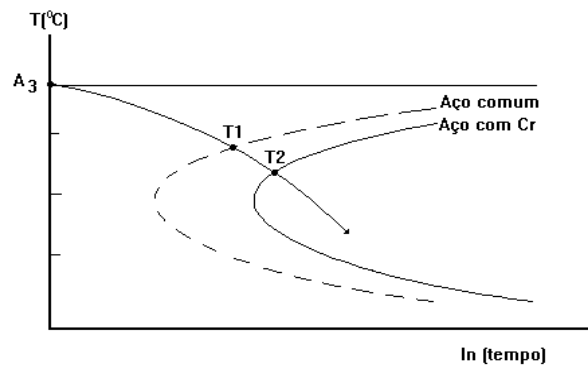


Figura 6. Efeito da adição de cromo na transformação perlítica.<sup>(5)</sup>

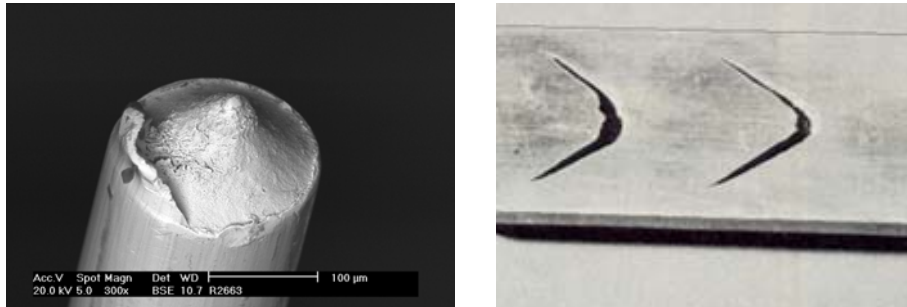
Zener<sup>(6)</sup> mostrou termodinamicamente que o espaçamento interlamelar da perlita,  $S$ , ser inversamente proporcional ao super-resfriamento  $dT$  abaixo da temperatura de transformação  $A_3$ . Daquela data em diante várias medidas experimentais vem confirmando a previsão de Zener.

Desta forma é possível obter um maior super-resfriamento, o que pode ser conseguido através do uso da mais alta taxa de ventilação disponível (desde que não produza bainita), agregada ao uso de elementos de liga que aumentem a temperabilidade do aço. Assim um super-resfriamento de  $(T1 - A_3)$  em um aço

comum pode passar para (T2- A<sub>3</sub>), conforme ilustrado no diagrama de transformação no resfriamento contínuo (diagrama TRC), ao lado.

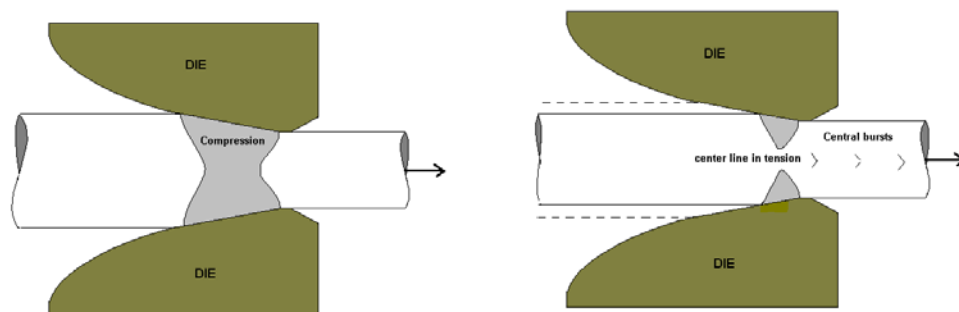
### 2.3 Efeito das Condições de Trefilação na Ocorrência de Fratura em Cone

É comum ocorrência de fratura durante a trefilação de aço alto teor de carbono com aspecto de taça e cone. O aspecto desta falha é mostrado na Figura 7.



**Figura 7.** Ilustração de uma fratura tipo taça e cone durante a trefilação. Corte longitudinal onde pode ser visto a presença do “central burst” no arame.<sup>(7)</sup>

Este tipo de falha tem sido associado à presença de estrutura heterogênea devido às condições de resfriamento do fio-máquina e da presença de elementos de liga conforme comentado. Existe também a possibilidade da contribuição das condições de trefilação, devido a presença de tensão central. Este fenômeno é ilustrado na figura 8, onde pode ser visto que existe situações favoráveis devido a combinação do semi-ângulo da fieira com grau de redução na geração desta tensão central.



**Figura 8.** Combinação de semi-ângulo e grau de redução na promoção de (a) zona compressiva ou (b) zona trativa durante a trefilação.<sup>(5)</sup>

Para condição adequada de semi-ângulo e redução existe baixa tendência à ocorrência de fratura em cone. Quando a combinação entre estes dois fatores não é adequada, existe a tendência da geração de tensão central conforme ilustrado na Figura 8b.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

A Tabela 1 mostra composição química do aço fabricado pela ArceloMittal destinado a arame para concreto protendido.

**Tabela 1.** Faixa de composição química ( % em peso) do aço utilizado neste estudo.

%S	%C	%Mn	%P	%Si	%Cr
0.0100	0.810	0.750	0.0100	0.200	0.180

Visando obtenção de uma estrutura adequada ao fio-máquina para trefilação, a partir da condição laminada, foi elaborado um Planejamento De Experimentos (PDE) de forma a garantir que o resultado obtido não possuam ruídos e sejam os mais próximos da condição ideal possível.

De acordo com as variáveis influentes relacionadas ao processo de laminação, as mais críticas são relacionadas ao ciclo de resfriamento após o processo de laminação. Portanto, estas serão as variáveis a serem estudadas: temperatura de cone, velocidade da esteira do Stelmor e nível de ventilação. A influencia destas variáveis foi testado em dois níveis conforme mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Níveis das variáveis do processo de resfriamento que foram testadas

Variável	Nível Alto	Nível Baixo
Temp. de cone (°C)	+	-
Velocidade de esteira (m/min)	+	-
Nível de ventilação (Nm <sup>3</sup> /h)	+	-

Para as variáveis estudadas o grande desafio foi assegurar uma taxa de resfriamento mínima ao longo de toda a espira, uma vez que existem limitações do equipamento para as bitolas praticadas.

Foram também fixadas as variáveis de composição química e bitola final do fio-máquina, uma vez que a corrida foi dividida em três partes iguais e laminadas na bitola de maior volume do cliente final. Assim a resposta durante a trefilação pode ser mais próxima da realidade. Também foi eliminado o ruído de operadores, já que todo teste foi processado em apenas uma maquina e pelo mesmo operador.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

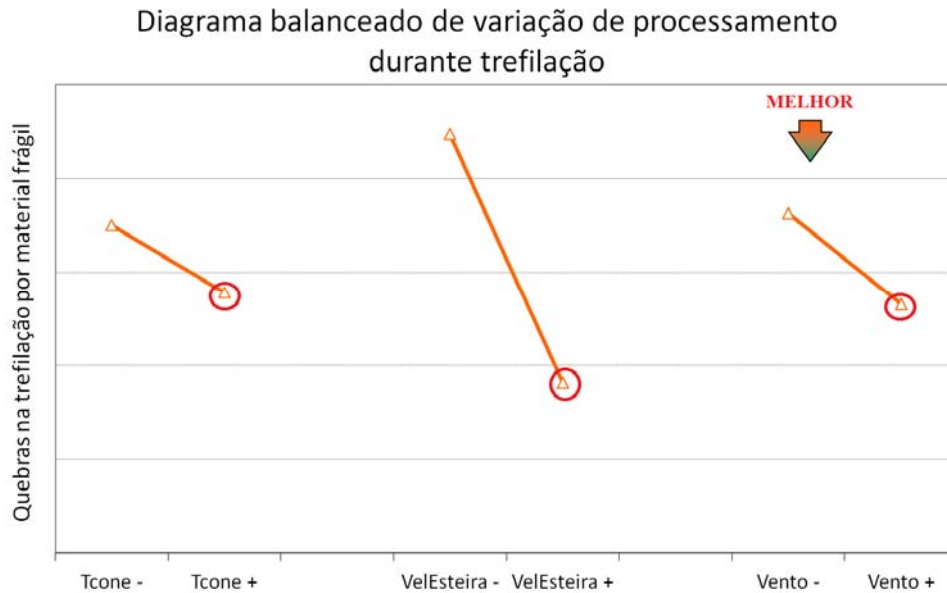
Foi construído um diagrama balanceado de acordo com a técnica Taguchi. Esta técnica assegura que cada variável seja independente dos experimentos e por isto pode ser agrupada em seus níveis e a média das respostas é calculada dentro de grupos, construindo assim diagramas lineares para cada uma das respostas. A Figura 9 mostra este diagrama para a variação do número de fraturas em cone durante a trefilação para todas as condições.

O diagrama balanceado é construído agrupando todas as variáveis comuns das condições analisadas. Note que neste tipo de diagrama a média é igual para todas as condições.

Este resultado apresenta como resposta o índice de quebra durante a trefilação para os três níveis testados. Os melhores resultados foram obtidos para as variáveis nos níveis mais elevados. A interpretação deste resultado nos mostra que aumentando a taxa de resfriamento, se comparada com a taxa atual, teremos melhorias na estrutura e conseqüentemente menor aparecimento de fases frágeis, que são prejudiciais ao processo de trefilação.

Interessante observar que a variável que mais impactou o resultado foi a velocidade de esteira. Esta variável nos mostrou que o fator de empacotamento das espiras na esteira tem um forte impacto nos resultados. Assim ao se aumentar a velocidade de

esteira, aumentou-se a taxa de resfriamento. Para as outras variáveis o ganho foi discreto, mas ainda sim no sentido de melhorias. Para se comparar as taxas de resfriamento, foram tomadas medidas do ciclo atual e do ciclo de resfriamento testado, conforme mostrado na Figura 10. Pode-se perceber um grande aumento da taxa de resfriamento, fazendo diminuir a formação de fase frágil cementita.



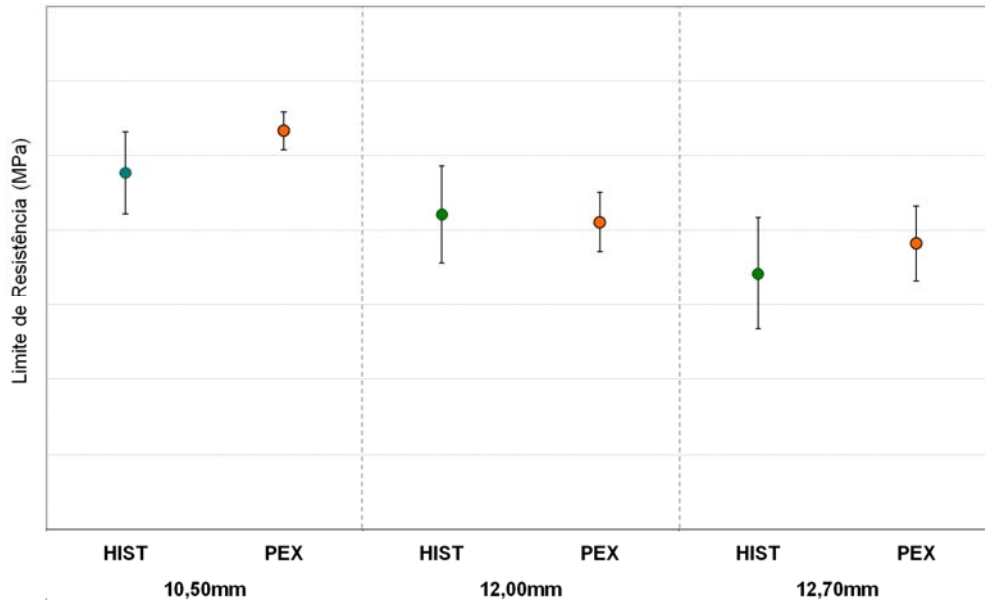
**Figura 9.** Diagrama balanceado das três variáveis testadas, segundo procedimento previsto pelo método de Taguchi.

Também foi avaliado a influencia da taxa de resfriamento nas propriedades mecânicas do material. Ela nos ajuda a confirmar que o aumento da taxa de resfriamento ajudou a eliminação das fases frágeis, já que foi observado aumento do limite de resistência que é uma consequência da melhoria no refinamento da estrutura. Também foi observada uma diminuição da dispersão deste limite de resistência para três bitolas testas, conforme mostrado na Figura 11.



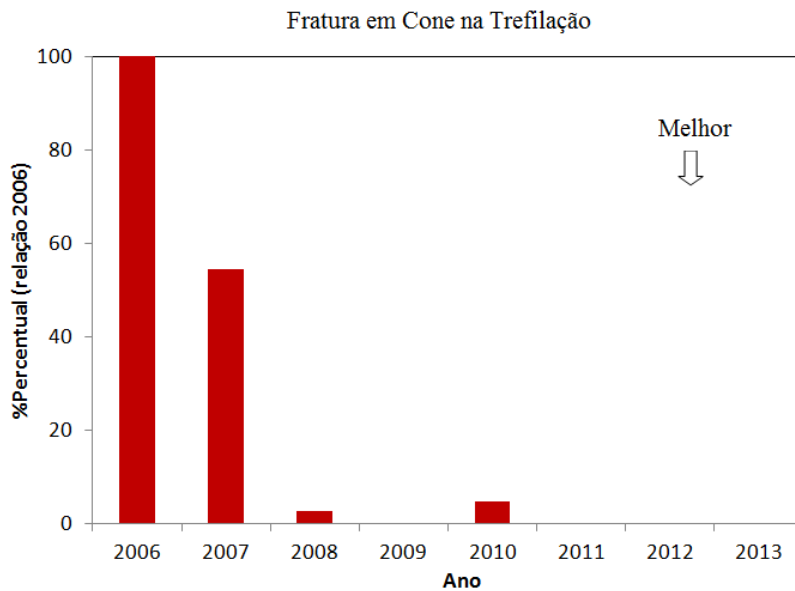
**Figura 10.** Taxa de resfriamento do Protendido no ciclo atual (azul) e no ciclo testado (vermelho).





**Figura 11.** Medição do limite de resistência do aço protendido em diferentes bitolas

A consequência de toda mudança no ciclo de resfriamento refletiu na melhoria de processabilidade durante a trefilação. O ciclo de resfriamento desenvolvido eliminou ocorrência de quebras durante a trefilação devido à presença de constituintes frágeis, conforme pode ser verificado pela Figura 12.



**Figura 12.** Resultados da ocorrência de fratura em cone a partir da implantação do novo ciclo de resfriamento.

## 5 CONCLUSÕES

O controle das variáveis de resfriamento no processo posterior a laminação do fio-máquina mostrou ser crítico na determinação das características de estrutura do material para garantir a trefilação direta. Entre estes fatores, merecem destaque:

- Controle da temperatura de cone;
- Velocidade da esteira;
- Nível de ventilação.

O controle destas variáveis de resfriamento pós laminação, possibilitaram a obtenção de resultados na trefilação com eliminação de fratura em cone devido a presença de estrutura frágil do fio-máquina na condição laminada.

## Agradecimentos

Os autores ficam agradecidos à ArcelorMittal Monlevade pela oportunidade de elaboração e apresentação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Murahashi et al., The influence of material and process factors on drawability of mechanically descaled high carbon steel wire rod, *Wire Journal International*
- 2 B. Sundman, B. Jansson, and J.O. Anderson: *CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide*, Elsevier Science, New York, NY, 1985, pp. 153-190.
- 3 R. W. Heckel and H. W. Paxton. Rates of growth of cementite in hypereutectoid steels. *Trans. Am. Soc. AIME*, vol. 218, 1960.
- 4 MAJKA, T. F.; MATLOCK, D. K.; KRAUSS, G. Development of microstructural banding in low-alloy steel with simulated Mn segregation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v.33A, p.1627-1637, 2002.
- 5 Boratto, F. M.; Cup and cone fracture during high carbon wire drawing. ArcelorMittal Monlevade, 2005.
- 6 Zener, C. Kinetics of the decomposition of austenite. *Transactions AIME*, (167), 1946, pp. 550-583.
- 7 S. Kalpakjian, *Mechanical Processing of Materials*, D. Van Nostrand, 1967, p. 175.