

TREFILAÇÃO DE AÇO ALTO TEOR DE CARBONO: CONSIDERAÇÕES SOBRE CARACTERÍSTICAS DO FIO- MÁQUINA E PARÂMETROS DE PROCESSO COMO GARANTIA DE BOA PERFORMANCE ¹

Helder Carvalho Ferreira ²
Leandro Marchi ³
Ronaldo Felisberto ⁴

Resumo

A trefilabilidade é uma medida da quantidade de redução que o arame poderá sofrer, indica o limite na trefilação onde a partir do mesmo ocorrerá falhas ou ruptura do arame. A trefilabilidade do fio-máquina é influenciada por muitos fatores, quer sejam estes associados à matéria prima, preparação superficial do fio-máquina e condições do processo de trefilação. Estudo tem sido feito sob a ótica do processo de fabricação e da trefilação com objetivo de melhorar a trefilabilidade, onde o objetivo é obter um arame de melhor qualidade sob o ponto de vista do cliente final, associado a uma melhoria no desempenho do processo. O objetivo deste trabalho é discutir de forma resumida as influências destes fatores na trefilabilidade dos aços de alto teor de carbono.

Palavras-chave: Trefilabilidade; Fio-máquina; Alto carbono.

HIGH CARBON STEEL DRAWABILITY: WIRE ROD CHARACTERISTICS AND PROCESS PARAMETERS AS A GUARANTEE OF GOOD PERFORMANCE

Abstract

Drawability is a common parameter used to identify the amount of reduction that the wire is able to sustain. It indicates the limit where imperfections or rupture of the wire start to occur. The drawability of the wire rod is influenced by many factors such as: wire rod structure and surface cleanness, and drawing parameters. Several studies have been done in order to improve the drawability where the final objective is to obtain a wire with the best quality from the point of view of the final customer. The main goal of this work is to discuss, in a summarized way, the main variables that affect high carbon steels' drawability.

Key words: Drawability; Wire rod.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Especialista de Produto da Gerência Técnica, Usina de Monlevade, Belgo Arcelor-Brasil.

³ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, M.Sc., Controle de Processo, Usina de Monlevade, Belgo Arcelor-Brasil.

⁴ Membro da ABM, Técnico Metalurgista da Gerencia de Metalurgia, Usina de Monlevade, Belgo Arcelor.

1 INTRODUÇÃO

A trefilabilidade é uma medida da quantidade de redução a frio que o arame poderá sofrer, indica o limite na trefilação onde a partir do mesmo ocorrerá falhas ou ruptura do arame⁽¹⁾. É do conhecimento de todos de que a trefilabilidade do fio-máquina é influenciada por muitos fatores, quer sejam estes associados à matéria prima, preparação superficial do fio-máquina e condições do processo de trefilação. Estudo tem sido feito sob a ótica do processo de fabricação e da trefilação com objetivo de melhorar a trefilabilidade, onde o objetivo é obter um arame de melhor qualidade sob o ponto de vista do cliente final, associado a uma melhoria no desempenho do processo. Este trabalho se propõe a discutir de forma resumida as influências destes fatores conforme esquema apresentado na Figura 1.

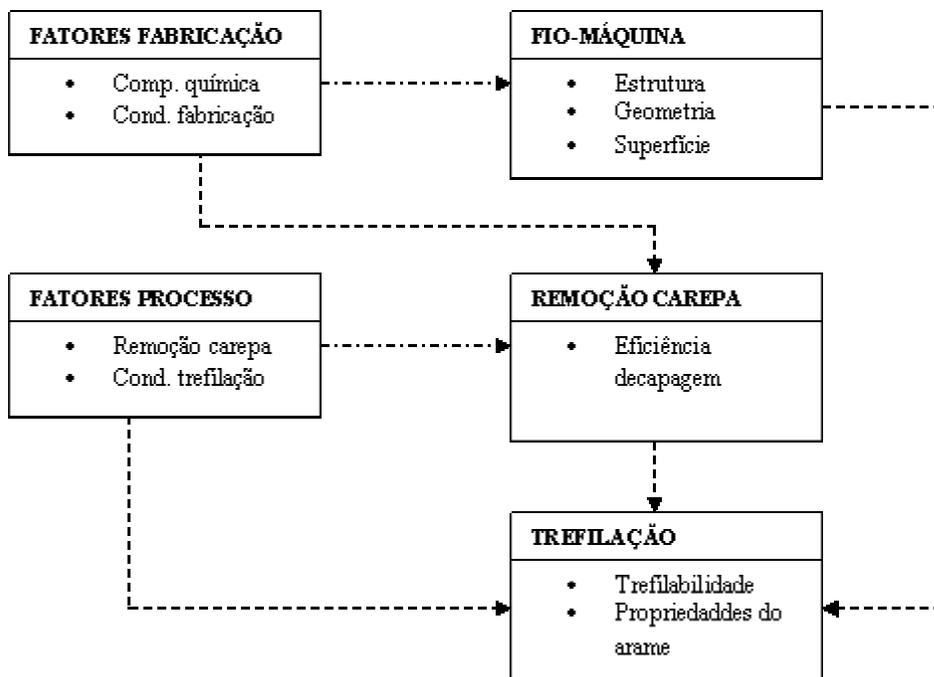


Figura 1. Fatores de processo e fabricação que afetam a trefilabilidade do fio-máquina.⁽²⁾

2 FATORES INFLUENTES NA TREFILABILIDADE

Será descrito a seguir, os principais fatores que impactam na trefilabilidade conforme as etapas apresentadas na figura 1.

2.1 Fatores de Fabricação do Fio-máquina

Dentre os fatores de fabricação do fio-máquina, aqueles com impacto na estrutura para a condição laminada, na sanidade interna e superficial são os mais significativos, embora outros fatores não citados possam ter papel fundamental para aplicações específicas. Neste universo, podemos destacar as principais etapas do processo de fabricação com forte impacto na qualidade do fio-máquina para trefilação.

2.1.1 Elaboração do aço

O ciclo de fabricação do aço se inicia com a redução do minério de ferro encontrado na natureza sob a forma de Magnetita (Fe_3O_4) com teor de 72% Fe e 28% O, ou ainda sobre a forma de Hematita (Fe_2O_3) 70%Fe e 30% O. Este último é o minério mais utilizado na Siderurgia e o Brasil é um dos maiores produtores mundiais.⁽³⁾

A transformação do ferro gusa em aço ocorre na aciaria, onde após a dessulfuração temos o refino primário no convertedor LD.⁽⁴⁾ Nesta etapa do processamento ocorre uma redução nos teores de C, Si, Mn e P. O forno Panela é responsável pelo refino secundário onde além de ajustar a composição química final de acordo com o aço a ser fabricado também melhora sua limpidez, que impacta fortemente nas características do produto trefilado.

2.1.2 Lingotamento

No lingotamento contínuo ocorre a transformação do aço da sua forma líquida para a sólida de forma contínua.⁽⁵⁾ Neste processo, o aço líquido proveniente do refino secundário é vazado de uma panela para um reservatório denominado distribuidor e deste para o molde. O distribuidor irá armazenar aço líquido suficiente para promover um fluxo contínuo de aço para o molde, mesmo durante a troca de painéis. Além desta função, o distribuidor funciona como uma estação de refino para flotar inclusões.

A formação de trincas é um dos principais problemas no lingotamento contínuo dos aços. As trincas podem ocorrer quase que em qualquer parte da superfície ou no interior do tarugo. Com o avanço nos métodos de estudo, é possível determinar com maior precisão a temperatura em que ocorre a trinca. Verifica-se que, em sua maioria, o trincamento ocorre durante o intervalo de solidificação, onde as fases sólidas e líquidas coexistem.⁽⁶⁾

2.1.3 Reaquecimento

Os fornos contínuos de reaquecimento de semiprodutos desempenham um importante papel na área de laminação a quente. Basicamente os fornos possuem zonas de aquecimento, tais como: pré-aquecimento, aquecimento e encharque com a finalidade de tornar o semiproduto adequado ao processo de conformação mecânica. Para

garantia de um produto isento de defeitos, alguns requisitos devem ser satisfeitos, entre os quais podemos destacar:

- Temperatura de desenformamento adequada ao processo de laminação;
- Uniformidade de temperatura ao longo das seções dos materiais;
- Controle adequado da pressão interna do forno;
- Formação de carepa de fácil remoção.

2.1.4 Laminação

Este processo transforma a estrutura bruta de solidificação em uma estrutura refinada formada por grãos distribuídos uniformemente ao longo do material. A função básica da laminação é a redução da espessura da peça sendo trabalhada. Para produção em larga escala normalmente instala-se uma série de pares de cilindros, um atrás do outro, formando assim um “trem de laminação”. Uma vez que a saída de uma dada cadeira é de espessura menor do que a anterior a velocidade aumenta progressivamente, pois o volume do material se conserva, o que é um princípio básico. A sincronização das velocidades das cadeiras é fundamental no processo e somente com o advento da eletrônica é que foi possível o surgimento dos laminadores de alta velocidade.⁽⁷⁾ A laminação a quente é realizada em altas temperaturas (900 a 1250°C), durante este processo os grãos irão se recrystalizar dinamicamente, ou seja, durante a própria deformação, ou imediatamente após a laminação, conforme mostrado na Figura 2.

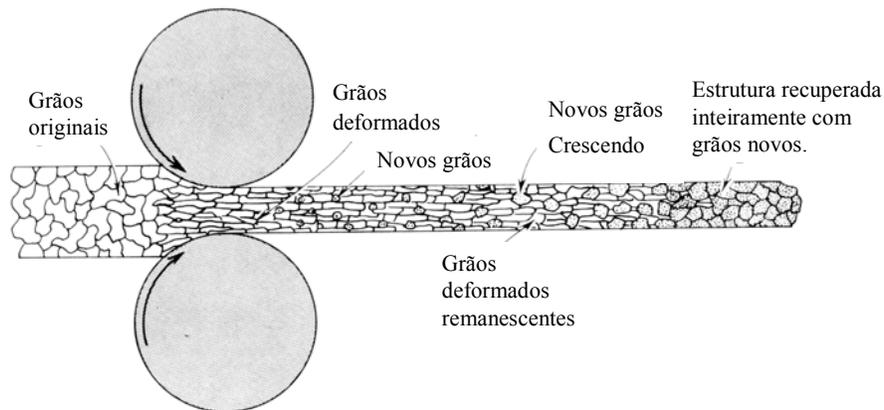


Figura 2. Desenho esquemático mostrando a recrystalização imediatamente após deformação em um dado passe de laminação a quente.⁽⁸⁾

2.1.5 Resfriamento controlado

O sistema de resfriamento do fio-máquina consiste em duas etapas. Na primeira etapa o resfriamento é à base de água onde diversas caixas d'água estão instaladas após a última cadeira de laminação. A outra etapa do resfriamento consiste do resfriamento controlado por ventilação forçada. O resfriamento controlado foi desenvolvido com a finalidade de eliminar o patenteamento requerido para alguns aços destinados a trefilação.

2.2 Fatores do Processo de Trefilação

Em cada etapa do processo de trefilação, a deformação e as propriedades mecânicas são determinadas por características metalúrgicas,⁽⁹⁾ as quais consistem de:

- Composição química;
- Tamanho de grão, sub-estrutura, tamanho e forma das segundas fases;
- Orientação e distribuição dos grãos;
- Características da superfície do fio-máquina;
- Macro e micro tensões durante o processo de deformação.

Uma abordagem detalhada do processo de trefilação deve levar em conta todos estes pontos levantados. Não é objetivo deste trabalho discutir todos estes parâmetros. Nesta seção será feito apenas uma abordagem superficial das duas últimas características abordadas anteriormente, a saber: preparação superficial do fio-máquina e condições de trefilação.

2.2.1 Preparação superficial do fio-máquina

O fio-máquina laminado a quente é naturalmente coberto com uma camada de carepa, advinda da oxidação a altas temperaturas. Esta camada de óxido de ferro deve ser completamente removida antes da trefilação. A perfeita eliminação desta carepa depende intrinsecamente de suas próprias características, tais como: natureza e proporção dos diferentes óxidos presentes e da aderência destes ao metal base.

Existem basicamente dois métodos para retirada da carepa: decapagem química e decapagem mecânica. A carepa para decapagem química⁽¹⁰⁾ deve apresentar as seguintes características: muito FeO, pouco Fe₃O₄ e nenhum Fe₂O₃; muitas trincas; baixa aderência e pequena espessura. Já a carepa para decapagem mecânica as características importantes são: peso de 4,0 a 7,0g/kg; espessura superior a 12µm; relação FeO/Fe₃O₄ de 4:1; alto nível de tensão interna; baixa rugosidade superficial e poucas trincas. A Tabela 1 mostra a dureza destes constituintes.

Tabela 1. Microdureza dos constituintes da carepa

ÓXIDO	DUREZA (HV)
FeO	270 - 350
Fe ₃ O ₄	430 - 500
Fe ₂ O ₃	1030

Do ponto de vista de abrasão da fiação interessa que a camada de óxido seja formada o mais possível por FeO, cuja quantidade residual provocará menos desgaste para a fiação. Morfologicamente o FeO e o Fe₃O₄ são porosos e o Fe₂O₃ é compacto. Vários trabalhos^(2,9) mostram que a trefilabilidade piora com o aumento do nível de carepa residual, conforme pode ser visto na Figura 3.

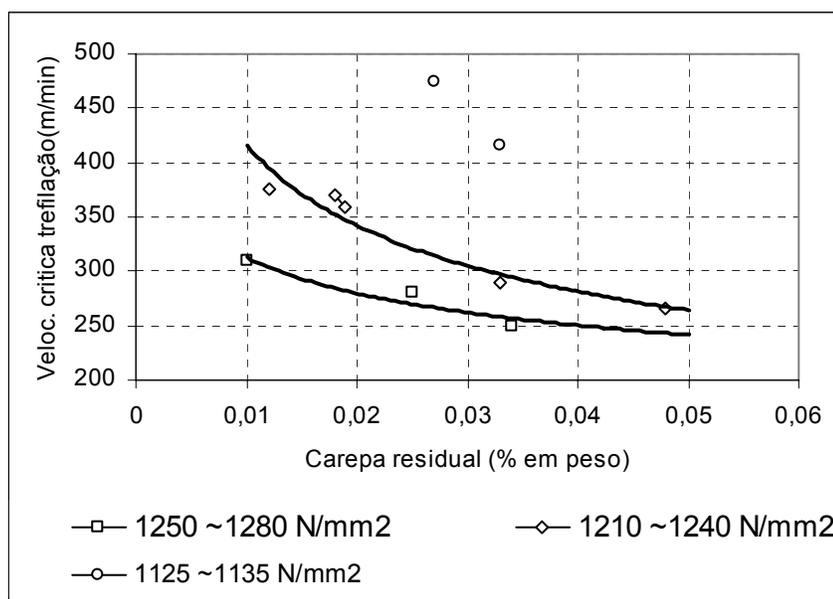


Figura 3. Influência da carepa residual e tensão na trefilabilidade.⁽²⁾

2.2.2 Condições da trefilação

A trefilação consiste na passagem de uma barra através de uma fieira mediante aplicação de uma força de tração a saída desta fieira. A análise da trefilação envolve a consideração de uma série de questões, tais como: esforço necessário para executar a operação, lubrificação na interface fieira/metal, evolução térmica do produto sob processamento, grau de redução, ângulo da fieira etc. A falha na lubrificação pode levar a um desgaste excessivo da fieira, quebras associadas a defeitos superficiais no arame. A questão da lubrificação é mais crítica no primeiro passe, que uma vez bem estabelecida, facilita todo o processo subsequente. Assim, reduções mais elevadas devem ser adotadas no primeiro passe para garantir uma boa condição de lubrificação e minimizar variações dimensionais do fio-máquina. Uma condição de lubrificação inadequada, principalmente no primeiro passe, irá introduzir vários tipos de defeitos, tais como: pé de corvo, trinca transversal, risco, rasgado de fieira etc. Estes defeitos oriundos de falha da lubrificação apresentam aspectos brilhantes e na maioria dos casos são transversais ao eixo de trefilação.

Uma atenção especial também deve ser dada à temperatura durante a trefilação, principalmente para os últimos passes. Para temperaturas acima de 150°C pode haver falha na película entre a fieira/metal ocasionando defeitos no produto e alteração nas propriedades do produto. A temperatura do arame no último passe pode ser tão importante quanto o nível de deformação com relação às propriedades mecânicas. O encruamento e a fricção devido ao atrito geram calor que associado com o calor vindo dos passes anteriores, pode provocar recuperação e até recristalização. Este efeito pode ser particularmente mais pronunciado na superfície do arame e pode levar a alteração nas propriedades do arame quando solicitado a esforços posteriores de torção e dobramento.

Temperaturas acima de 75°C podem ocorrer variações nas propriedades mecânicas dos aços devido ao envelhecimento por deformação, as mesmas são atribuídas ao ancoramento das deslocações por átomos de carbono e nitrogênio em solução sólida, sendo este ancoramento o resultado da interação entre os campos de tensão das deslocações e os campos de tensão, gerados pela presença de solutos intersticiais na ferrita. O potencial de interação é atrativo e provoca a difusão dos intersticiais para as deslocações, formando as chamadas "atmosferas de Cottrell".⁽¹⁰⁾

Para condições severas de trefilação, deve-se utilizar a fosfatização da superfície do fio-máquina, havendo neste caso a formação de uma camada de fosfato de zinco e ferro, de extrema aderência. Estas camadas de fosfato também são ótimas para o arraste de lubrificante(sabão), melhorando assim o desempenho da trefilação. Do ponto de vista de arraste, no caso de sabão em pó, quanto maior a rugosidade da superfície do arame e menor a granulometria do sabão, maior será o arraste. Outro ponto importante é evitar a formação de túneis e pelotas no recipiente de sabão, pois o arraste de lubrificante fica muito prejudicado.

Outro aspecto de grande importância na trefilação de aços alto teor de carbono é o nível de tensão no centro do arame. A Figura 5 ilustra como a tensão pode ocorrer na linha central do arame em função do grau de redução e ângulo da fieira. Na Figura 4(a) é mostrado um passe normal, no qual ocorre um nível de tensão compressiva. Caso a redução ou ângulo não for adequado, a região de compressão pode diminuir e ser desenvolvido então uma região trativa, gerando um defeito chamado "central burst", conforme ilustrado na Figura 4(b).

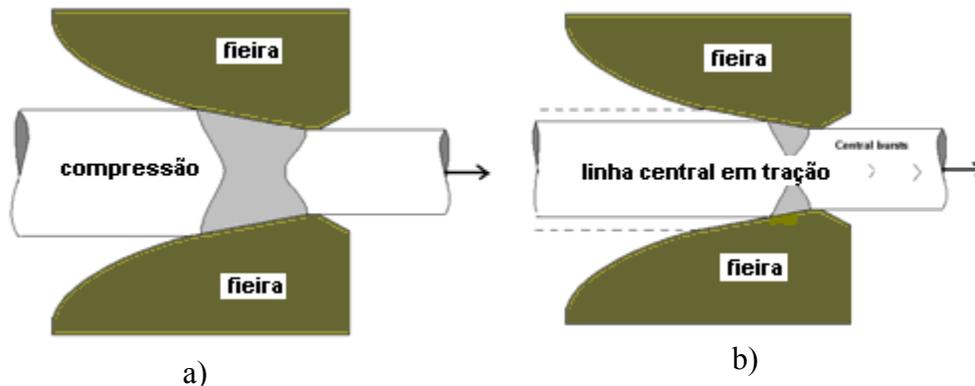


Figura 4. Efeito da combinação ângulo da fieira e redução na geração de tensão central.⁽¹²⁾

A tensão central pode ser calculada em função do ângulo e redução, considerando uma condição ótima de lubrificação.⁽¹³⁾ Alguns resultados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Tensão hidrostática central

Redução	Semi-ângulo	Delta	Tensão Central
10	4	2,65	0,25
10	12	7,95	0,70
20	4	1,25	Compressão
20	12	3,76	0,50
30	4	0,79	Compressão
30	12	2,36	0,30

Como pode ser observado na tabela, temos uma condição compressiva para alta redução e baixo ângulo de fieira. Por outro lado, uma pequena redução e ângulo maior podem levar a uma condição indesejada de tensão central trativa. Desta forma, podemos dizer que existe uma tendência de ruptura *cup and cone* para as condições: aumento do ângulo da fieira, aumento do atrito na interface metal/fieira e baixo nível de redução por passe. Para ângulo de fieira e redução por passe selecionados de tal maneira a termos somente tensões compressivas, o processo de trefilação será mais robusto diante de perturbações na lubrificação ou imperfeições na matéria prima.

Uma outra maneira de avaliar as condições de trefilação é através do parâmetro delta (Δ) também mostrado na Tabela 2. O conceito do fator delta é mostrado na Figura 5 e é dado pelas seguintes relação entre o diâmetro médio de deformação e o comprimento da deformação (A / B), que mediante desenvolvimento, pode ser expressa por:

$$\Delta \cong \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2 \quad (1)$$

Sendo, α o semi ângulo (rad) e r a redução em fração.

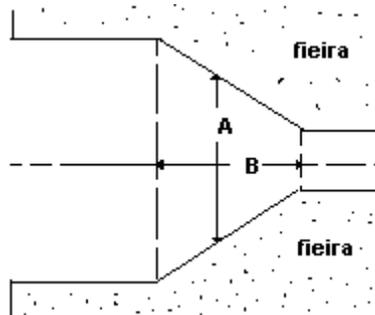


Figura 5. Conceito da definição do fator delta (Δ)

Recomenda-se que para bom desempenho da trefilação de aços perlíticos o fator delta não exceda 2,10 o que corresponde a uma tensão central de 0,21.⁽¹¹⁾ Este tipo de problema, ocorrência de *central burst*, pode ser solucionado através da análise do diagrama apresentado na Figura 6.

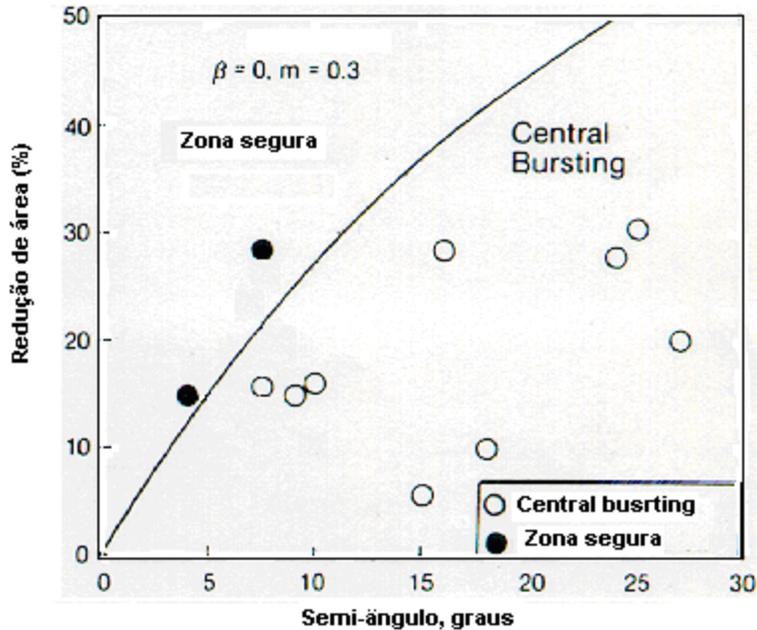


Figura 6. Efeito da geometria e redução por passe na ocorrência de *central bursting* na trefilação.⁽¹⁴⁾

Uma outra questão importante é a variação da ductilidade do arame com os níveis de redução acumulada. A ductilidade do arame de aços perlíticos pode ser desdobrada nos seguintes componentes ilustrados na Figura 7:

- queda na ductilidade devido ao encruamento – linha A
- aumento na ductilidade devido ao giro da perlita – linha B
- queda na ductilidade, após alinhamento da perlita – linha após ponto D
- ductilidade inicial do fio-máquina – ponto P

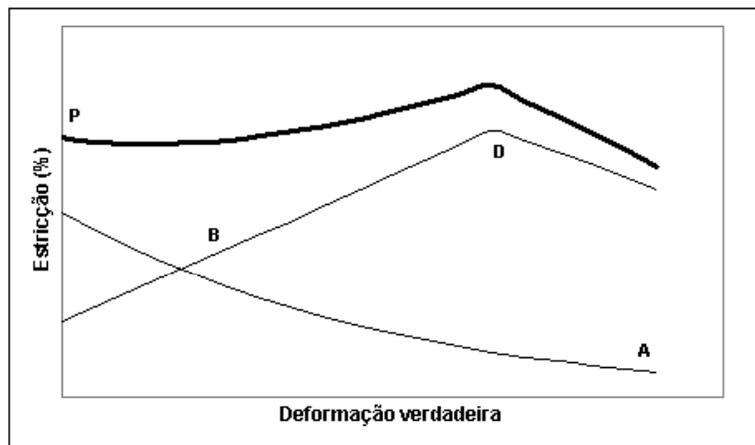


Figura 7. Variação da ductilidade com a deformação na trefilação de aços perlíticos.⁽¹⁵⁾

Este ponto de início de fragmentação da cementita é chamado na literatura⁽¹⁶⁾ de φ_{Fe_3C} que é função do carbono equivalente e do espaçamento interlamelar da perlita:

$$\varphi_{Fe_3C} = 19.(C_{eq})^{-0,75}/\sqrt{S} \quad (2)$$

Onde C_{eq} é carbono equivalente, S é o espaçamento interlamelar da perlita:

$$S = 1190(dT)^{-1/2} \cdot (2,5 - 1,5 \cdot C_{eq}) \quad (3)$$

Onde dT é o super-resfriamento durante a formação da perlita.

É importante elevar a ductilidade a partir do fio-máquina. Esta ductilidade é basicamente influenciada pelo tamanho de grão austenítico (G) e pelo espaçamento interlamelar da perlita (S), representada pela equação (4) desenvolvida através de regressão múltipla⁽¹⁷⁾ para estrição (Z), sendo S em angstrom e G em micron:

$$Z(\%) = 1485.S + 178.G^{-1/2} - 40,6 \quad (4)$$

Esta equação mostra que para se aumentar a ductilidade é necessário refinar o grão austenítico e diminuir o espaçamento interlamelar da perlita. Através da adição de elementos microligantes formadores de carbo-nitretos, como o alumínio, nióbio ou titânio é possível evitar o crescimento do grão austenítico no aquecimento. O controle do espaçamento interlamelar da perlita é inversamente proporcional ao super-resfriamento dT abaixo da temperatura de transformação, A3.

3 COMETÁRIOS FINAIS

A trefilação de arames alto teor de carbono é um processo cuja performance está intimamente relacionada a qualidade da matéria prima, fio-máquina e das variáveis do processo de trefilação, onde pode ser destacado:

- Estrutura – isenção de constituintes frágeis do tipo rede de cementita e martensita;
- Geometria – baixo nível de variação na bitola do fio-máquina;
- Superfície – baixo nível de carepa residual bem como ausência de defeitos superficiais;
- Parâmetros do processo de trefilação – velocidade compatível com as condições de arraste do lubrificante minimizando o aumento da temperatura, evitando assim variação nas propriedades mecânicas do produto trefilado. A escolha adequada das condições de redução por passe e ângulo de fiação é também fundamental para evitar a formação de defeitos do tipo “central burst”.

Devido a complexidade do tema, este trabalho abordou apenas algumas características da matéria prima e do processo de trefilação que foram consideradas de maior relevância na busca de melhoria da performance para fio-máquina alto teor de carbono.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Belgo Arcelor Brasil, Usina de Monlevade, pela oportunidade de publicação deste trabalho

REFERÊNCIAS

- 1 TAKAHASHI, T. et. al., Strengthening of hard-drawn steel wire with improved ductility. *Wire Journal*, Guilford, v.13, n. 11, p. 78-82, Nov. 1980.
- 2 MURAHASI et al., The influence of material and process factors on drawability of mechanically descaled high carbon steel wire rod, 63rd Annual Convention of the Wire Association International, Atlanta, Ga., USA, 1993.
- 3 SILVA A. L. C., Mei, P R. *Aços e ligas especiais*. Edgard Blucher, 2007, 664.
- 4 CHAVES, A. J. M. Avaliação do Desempenho Operacional de um Convertedor LD Através do Desenvolvimento do Processo de Sopro com Lança de Quatro Furos . Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2006. 124p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 5 THOMAS, B.G., Continuous Casting, *The Encyclopedia of materials: Science and Technology*. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, v.2, p. 1595-1599, 2001.
- 6 PENNA, L. V. Trinca de Solidificação Off-Corner no Lingotamento Contínuo de Tarugos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 221p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 7 BORATTO, F. Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, *Comunicação Pessoal*, 2004.
- 8 SICILIANO, F. PADILHA, A., Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura, 2005, Assoc. Brasileira de Metais.
- 9 E.AERNOUDT, Materials response to wiredrawing, *Wire Journal International*, WAI;BISPA Joint Conference, Stratford-upon-Avon, England, September 1988.
- 10 NUNES, M. - Otimização da carepa destinada a decapagem mecânica em aços alto teor de carbono, Tese de Mestrado, UFMG, 1997.
- 11 GONZALEZ, B. M. et al., Measurement of Dynamic Strain Aging in Pearlitic Steels by Tensile Test, *ISIJ International*, Vol. 43 (2003), No. 3, pp. 428–432.
- 12 BORATTO, F.; Anais do Seminário Interno de Metalurgia, Belgo Mineira, nov. 2003
- 13 R. N. Wright, *Wire Technology*, 1976, vol. 4, n.5, pp 57.
- 14 Z. ZIMERMAN, et al., *Wire Journal International*, aug. 1983, pp.64-71
- 15 BORATTO, F.; Estudo da ductilidade de arame de aços perlíticos para obtenção de ductilidade elevada no produto final sem tratamento térmico intermediário, Nota Técnica Interna, Belgo Mineira, jul. 1996.
- 16 ROBONY, *Wire Industry*, fev. 1987, p.127-128.
- 17 BORATTO, F., Anais do Seminário Interno de Metalurgia, Belgo Mineira, nov. 2003.