

INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE RESFRIAMENTO NA CAREPA PARA DECAPAGEM  
MECÂNICA (01)

Reinaldo Heitor Batista de Queiroga (02)  
Ricardo José Macêdo dos Santos (03)  
Dagoberto Brandão Santos (04)

SUMÁRIO

O trabalho relata uma experiência de variação das condições de resfriamento do fio-máquina num sistema de resfriamento controlado Stelmor, para obtenção de carepa para a decapagem mecânica. A carepa obtida foi caracterizada em laboratório através de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, ensaios de tração e difração de raios-x. Posteriormente foi realizado um teste em escala industrial para verificação do desempenho do material durante trefilação, medindo-se o consumo e desgaste de fiéis. Foram correlacionadas as características das carepas obtidas com os dados de desempenho do material para escolha da melhor condição de resfriamento.

- 
- (01) Contribuição técnica a ser apresentada no 1º Seminário de Trefilação de Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos - ABM - São Paulo, 18 e 19 de novembro de 1993.
- (02) Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Assistente Técnico da Engenharia de Produto da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, Contagem.
- (03) Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Assistente Técnico do Departamento de Garantia da Qualidade da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, João Monlevade.
- (04) Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Dr. Univ., Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

## 1 INTRODUÇÃO

Após a laminação a quente do aço, a exposição do material ao ar produz uma oxidação superficial composta de camadas de óxidos de ferro, que é normalmente chamada carepa. Esta carepa precisa ser removida antes do processamento posterior do material. Desta maneira, há a necessidade da remoção da carepa após a laminação do fio-máquina e antes do processo de trefilação, devido à exigências de acabamento superficial, além da manutenção do desempenho satisfatório das fieiras de trefilação, que não podem sofrer a abrasão dos óxidos presentes na carepa. A remoção da carepa é realizada basicamente por dois métodos:

- decapagem química;
- decalaminação mecânica.

A decapagem química do material é realizada pela imersão do rolo de fio-máquina em tanques de ácidos (sulfúrico ou clorídrico), lavagem e neutralização, seguida de uma etapa de preparação da superfície que consiste de cobertura com bórx, cal ou fosfato visando melhorar as condições de lubrificação durante a trefilação (1).

As propriedades necessárias para uma carepa voltada para decapagem química são:

- muito FeO e pouco Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- várias fissuras na carepa;
- pouca adesão ao metal base;
- carepa fina.

A decalaminação mecânica é baseada na expressiva diferença de ductilidade entre os óxidos e o metal base. Quando o fio-máquina é submetido à tensões de tração/compressão apropriadas, as camadas de óxido são quebradas se desprendendo do metal base. A forma mais praticada para este tipo de remoção mecânica da carepa consiste da passagem do fio por roletes, provocando dobramentos sucessivos em diferentes planos, gerando tensões na superfície do mesmo. O esquema de um decalaminador é mostrado na figura 1.

A lubrificação é um fator crítico que envolve a trefilação do fio-máquina decalaminado por não possuir uma cobertura que facilite o arraste do lubrificante para as fieiras de trefilação.

Segundo Tominaga (2), no caso da decalaminação mecânica as principais características da carepa devem ser:

- carepa sem trincas;
- carepa mais espessa;
- grande quantidade de FeO e mínima quantidade dos outros óxidos.

A decalaminação mecânica vem cada vez mais tomando espaço do processo de decapagem química devido à crescente preocupação com o questão da poluição ambiental, já que este processo é poluente e grandes investimentos precisam ser feitos para o controle do descarte de produtos utilizados, além da complexidade de uma instalação de decapagem química em comparação com a decalaminação mecânica. Dados de comparação entre os custos dos dois processos indicam uma economia de no mínimo US\$ 10.00, por tonelada de fio-máquina quando se utiliza a decalaminação mecânica em comparação à decapagem química.

## 2 MECANISMO DE FORMAÇÃO DA CAREPA

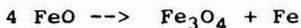
Os vários estudos realizados nesta área indicam a formação de três óxidos principais a altas temperaturas (3).

Os óxidos formados são:

- 1 - hematita,  $Fe_2O_3$ , óxido de maior valência;
- 2 - magnetita,  $Fe_3O_4$ , óxido intermediário;
- 3 - wustita,  $FeO$ , óxido de menor valência.

A formação de um óxido específico corresponderá à uma combinação de temperatura e teor de oxigênio.  $Fe_2O_3$  e  $Fe_3O_4$  podem formar-se a temperaturas abaixo de aproximadamente  $570^{\circ}C$ , mas a altas temperaturas, todos três óxidos podem existir. A carepa é formada em camadas paralelas, no sentido de aumentar o oxigênio contido, caminhando do Fe do metal base para wustita, magnetita e finalmente a hematita na interface carepa/atmosfera (FIG. 2). Paidassi (3), registrou que as relações entre as espessuras dos óxidos, na faixa de temperatura entre  $700$  e  $1200^{\circ}C$ , são 95% Feo, 4% magnetita e 1% de hematita no equilíbrio. No entanto, este balanço pode ser alterado.

A wustita é a menos abrasiva e mais solúvel em ácidos de todas as fases presentes na carepa. A wustita formada a alta temperatura caminha para uma reação eutetóide durante o resfriamento. Esta reação ocorre a aproximadamente  $570^{\circ}C$  e a equação pode ser escrita como:



Alguns autores citam que as maiores taxas desta reação ocorrem entre  $400$  e  $500^{\circ}C$ . Fischer et al. (4) registraram esta temperatura como  $400^{\circ}C$ , Chaudron e Forestier (5) registraram que a maior taxa de transformação ocorre a  $470^{\circ}C$ .

A formação de uma camada contínua de magnetita na interface carepa/metal é explicada pela decomposição do  $Fe_{1-y}O$  para  $Fe_3O_4$  durante um resfriamento realizado a baixas taxas, na faixa de temperaturas entre  $320$  e  $520^{\circ}C$  (6). Este comportamento é mostrado na figura 3, onde uma camada de magnetita interfacial se desenvolve abaixo de  $500^{\circ}C$  e ocorre mais rapidamente a  $450^{\circ}C$ . Pickens (7), no entanto, mostrou que a camada interfacial de  $Fe_3O_4$  pode ocorrer na faixa de temperaturas acima de  $500^{\circ}C$ , logo no início do resfriamento ao ar, quando a temperatura de cone é de  $1040^{\circ}C$ .

Estes óxidos podem ser satisfatoriamente caracterizados quando atacados por ácidos, para análise metalográfica, devido aos diferentes contrastes que apresentam quando observados por microscopia ótica (7) (8).

O estudo da cinética de oxidação ao ar do ferro puro, mostra que a película oxidada tem uma espessura que obedece a lei do crescimento parabólico (3), controlado por difusão mostrando que maiores temperaturas produzem maior espessura de carepa.

Quando a espessura da carepa é grande, a resistência da carepa é maior, e fissuras não são formadas. Quando a carepa é fina, sua resistência é baixa e fissuras são facilmente formadas. No entanto, uma carepa muito fina resulta em um aumento na flexibilidade da carepa e uma diminuição da pressão interna. Isto provoca uma

diminuição no número de fissuras. Na figura 4 pode ser visto que uma maior espessura da carepa propicia um melhor desempenho da decalaminação mecânica (9), uma vez que é grande a tensão interna na carepa grosseira, resultando em grandes tensões cisalhantes na superfície entre metal e carepa. O efeito do número de fissuras é evidenciado porque uma maior espessura produz um menor número de fissuras e uma maior distância entre estas. Desta forma, a carepa é facilmente descamada sob pequenas tensões alternadas entre os roletes na decalaminação.

#### **Aderência da carepa ao metal base**

O fenômeno de aderência de carepa ao metal base é o resultado da adesão específica que é ligada a forças intermoleculares que são influenciadas pela composição química do material. Esta influência é função principalmente da facilidade do elemento oxidar-se, ou não, mais facilmente que o ferro. Não existe acôrdo entre os autores na bibliografia quanto à influência dos elementos como manganês, cobre e enxofre.

A aderência mecânica entre a carepa e o metal base é associada ao aumento da rugosidade da superfície de contato entre a carepa e o metal durante o processo de oxidação.

Segundo alguns autores (2) (10), uma menor rugosidade é fundamental para uma decalaminação mecânica satisfatória. Quando irregularidades existem na superfície do fio, trincas são formadas nos processos de resfriamento. Estas trincas resultam em menores tensões de cisalhamento na superfície, sendo notada a presença do óxido residual em pontos de irregularidades superficiais.

#### **Formação de Carepa no Resfriamento Controlado do Fio-máquina**

O sistema de resfriamento controlado de fio-máquina, Stelmor, consiste basicamente das seguintes etapas: i) O fio-máquina sai da última cadeira de laminação no bloco acabador, à temperaturas em torno de 1050 a 1100°C; ii) é bruscamente resfriado em duas zonas de resfriamento em água, intercaladas por uma zona de equalização; iii) logo a seguir vai ao cone do formador de espiras. iv) A partir daí, as espiras caem horizontalmente sobre uma esteira que se move com velocidade variável, porém, regulável, sobre várias zonas de resfriamento ao ar soprado, com ventiladores de abertura regulável e tampas removíveis (sistema chamado "retarded cooling"). Desta forma, pode-se controlar, dentro de uma faixa, a temperatura do fio-máquina no cone e seu resfriamento na esteira.

A temperatura de cone é a temperatura na qual o fio-máquina sai da última caixa de resfriamento em água e entra no formador de espiras antes do resfriamento ao ar. Esta temperatura, adotada como inicial para o resfriamento controlado ao ar, tem grande influência na formação da carepa (2) (7) (10). Este efeito é mostrado na figura 5.

Na decalaminação, uma maior temperatura de cone produz uma decapagem em escamas maiores, e com menor quantidade de carepa residual (2).

Para taxas de resfriamento acima de 1°C/s, a influência da temperatura de cone é pequena. Para taxas de resfriamento menores que esta, existe uma perda no resultado da decalaminação mecânica, principalmente para temperaturas de cone mais baixas (FIG.6).

### 3 METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais realizados para o desenvolvimento do trabalho, consistiram da obtenção de carepa com diferentes constituições, caracterização das mesmas e teste industrial dos resultados obtidos experimentalmente.

#### Obtenção da Carepa

Foi utilizado um aço da produção normal da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, usado para produção de arame farpado, com teor de carbono da ordem de 0,14%, laminado na bitola de 5,5mm, no trem de laminação de fio-máquina 2 da Usina de J. Monlevade. A velocidade de saída do fio de 5,5mm na última cadeira é de 100m/s.

O resfriamento do fio foi feito através do sistema de resfriamento controlado, Stelmor, para obtenção de carepa com diferentes características. As seguintes variáveis de processo foram controladas:

- a) - temperatura de cone;
- b) - abertura dos ventiladores;
- c) - velocidade das esteiras;
- d) - sistema de resfriamento retardado ("retarded cooling").

O procedimento para obtenção da carepa foi dividido basicamente em duas etapas. A primeira etapa objetivou a comparação entre duas condições de resfriamento diferentes, para uma mesma temperatura de cone. Uma vez determinada a melhor condição de resfriamento (através de resultados industriais) entre as duas testadas, foi feito um ajuste da temperatura de cone, constituindo esta a segunda etapa.

As condições de resfriamento da primeira e segunda etapa estão descritas nas tabelas I e II.

#### Caracterização do Material

As amostras obtidas, após a laminação do material, foram utilizadas para caracterização da carepa formada e de algumas propriedades mecânicas do fio-máquina.

Os ensaios e exames realizados estão listados a seguir:

- Microscopia ótica: para determinar de forma bastante aproximada a proporção e o tipo de óxido constituinte da carepa e a microestrutura do metal..
- Ensaio K: este ensaio realizado conforme procedimento interno da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira permite quantificar a carepa inicial e a carepa residual após deformação, e serve de parâmetro para verificar a facilidade de desprendimento da carepa do metal.
- Ensaio de tração: foram determinados os limite de escoamento, e de resistência para cada condição.
- Difração de raios-x: foi utilizada para a identificação precisa dos constituintes da carepa e a quantidade relativa destes em cada caso.
- Microscopia eletrônica de varredura: foi utilizada para a visualização de aspectos estruturais da carepa e da interface com o metal, i.e., um exame com maior profundidade de foco.

#### Teste Industrial

O material laminado foi trefilado na Trefilaria da Companhia Side-

rúrgica Belgo-Mineira - Fábrica de arame farpado (FAMO), para a bitola de 1,50mm em 9 passagens com velocidade final de 15m/s. Os ítem verificados para determinação do desempenho do material, durante o processo de trefilação foram:

- a) - arrebetamentos/tonelada;
- b) - fieiras/toneladas;
- c) - degaste das fieiras.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### Variáveis do Resfriamento Controlado

As figura 7 mostra o perfil das curvas de resfriamento, nos ciclos A, B e C, plotando-se a temperatura medida em relação à distância do formador de espiras. A distância de 80m corresponde ao fim do Stelmor, onde o material é bobinado. Nota-se que o ciclo A apresenta uma taxa de resfriamento mais acelerada no início, e esta taxa vai tornando-se cada vez menor a partir de aproximadamente 20m do formador de bobinas. Este comportamento é explicado pela utilização neste ciclo do sistema de resfriamento retardado. O ciclo B apresenta um resfriamento mais uniforme, devido à abertura constante dos ventiladores ao longo do Stelmor. A menor taxa de resfriamento inicial em comparação com o ciclo A pode ser explicada pela menor abertura dos ventiladores nestas zonas iniciais de resfriamento.

É ainda interessante verificar que o material no ciclo A é bobinado a uma temperatura maior que no ciclo B. Na verdade este comportamento é explicado pela baixa taxa de resfriamento produzida pela utilização do resfriamento retardado no ciclo A, combinado com a alta velocidade da esteira, que não permite o resfriamento mais acentuado do fio durante o período que permanece sobre a mesma. Após o bobinamento a taxa de resfriamento das espiras é muito lenta e não uniforme devido ao acúmulo de matéria.

Na figura 8 é mostrada a curva de resfriamento dos ciclos B e C, testados na segunda etapa do projeto experimental. Neste caso, não há uma diferença sensível entre o perfil das curvas dos dois ciclos, já que nesta fase a única diferença é a temperatura de cone, que foi visada 900°C no ciclo C, portanto, 25°C mais alta que no ciclo B.

##### Caracterização do Fio-Máquina

Os resultados referentes às quantidades de óxido total e de óxido residual, obtidos através do ensaio K, para os ciclos de resfriamento utilizados estão listados nas tabela III.

Para análise destes resultados, e efetiva comparação entre as médias, foi utilizado um teste estatístico de comparação de médias chamado "teste t"<sup>(11)</sup>, para determinação da diferença mínima significativa (d.m.s.). A tabela IV apresenta a comparação entre os diversos ciclos. Pode-se verificar que existe uma variação considerável entre os diferentes ciclos de resfriamento, já que apresentaram uma diferença maior que a d.m.s. (calculada para 5% de significância).

As figuras 9 e 10 foram montadas comparando-se os resultados obtidos do ensaio K, e as condições em que foram realizadas as experiências. Também foram locados de dados obtidos da bibliografia<sup>(2)</sup>

, que trabalham com menores temperaturas de cone (800 a 850°C), e menores taxas de resfriamento (1 a 3 °C/s). Nota-se a forte influência da temperatura de cone na quantidade de óxido. A taxa de resfriamento também exerce influência na quantidade de óxido, mas de forma menos acentuada que a temperatura de cone. A taxa de resfriamento utilizada neste gráfico considerou apenas o tempo necessário para o resfriamento do fio de 900 a 600°C, onde ocorre o maior crescimento da carepa.

Um outro resultado, que foi observado através da análise dos dados da tabela III, se refere a relação entre a quantidade total de óxido e a quantidade de óxido residual. A figura 11 mostra que uma maior quantidade de carepa, produz uma menor quantidade de óxido residual.

#### **Constituintes da carepa**

Nota-se, através dos dados de espessura da camada de carepa da tabela V determinados via metalografia quantitativa a concordância dos resultados de quantidade de óxidos formada na tabela III.

Na tabela VI estão os resultados da proporção dos constituintes, obtidas através de metalografia. Nestes resultados, verifica-se que a proporção de FeO no ciclo A é praticamente igual a média dos valores obtidos para os ciclos B1 e B2. A diferença significativa entre estes dois ciclos é a taxa de resfriamento. Desta forma, pode-se dizer que a taxa de resfriamento nas condições testadas não tem influência significativa na proporção de FeO presente na carepa. No entanto, como mostrado anteriormente esta menor taxa de resfriamento possibilita um maior crescimento da carepa, produzindo menos carepa residual.

A figura 12 mostra a relação entre a temperatura de cone e a proporção de FeO. Neste caso este aumento do FeO deve ser explicado pela temperatura em que o óxido foi formado. Temperaturas em torno de 900°C apresentam uma maior quantidade de FeO. É interessante notar que a comparação entre os fenômenos que ocorrem nos ciclos A e B1 e entre A, B2 e C, sugere que o papel da temperatura de cone é mais significativo que o papel da taxa de resfriamento na constituição da carepa.

Os resultados obtidos a partir da difração de raios-x, possibilitaram uma análise semi-quantitativa dos óxidos presentes, além de uma análise qualitativa confiável. Os óxidos que estão presentes na carepa de todos os ciclos foram identificados como: wustita, magnetita e hematita. A quantidade destes óxidos foi estimada de forma aproximada, através da medição de intensidade dos picos (22) para cada óxido. A intensidade de cada pico foi dividida pela soma das intensidades dos picos da wustita e magnetita. A quantidade de hematita foi desprezada, já que a mesma praticamente não foi detectada na microscopia ótica, e aparece com baixíssima intensidade no resultado de difração. Esta pequena quantidade de hematita confirma os dados teóricos de constituição de carepa. Os dados da difração apresentaram uma proporção de aproximadamente 80% de FeO, confirmando os dados da metalografia quantitativa.

#### **Caracterização estrutural**

A microestrutura do fio-máquina foi analisada através de microscopia ótica e eletrônica de varredura. Foram estudadas tanto a estrutura do metal como a estrutura da carepa. O material apresentou

uma estrutura uniforme de ferrita-perlita em todos os ciclos, sem variação significativa do tamanho médio de grão. Como esperado, por tratar-se de um aço de baixo teor de carbono, não ocorreu diferença significativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas entre as diversas condições de resfriamento.

A estrutura da carepa pode ser vista na figura 13. Nota-se claramente a presença de dois óxidos distintos, FeO e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. O terceiro óxido detectado na difração de raios-x, hematita, não foi detectado na microscopia ótica ou eletrônica, devido a pequena quantidade presente. Nota-se ainda que a camada de wustita encontra-se próxima ao metal, enquanto que a magnetita encontra-se na camada externa. O aumento da espessura de carepa, pode ser notado na comparação entre as figuras 14 (ciclo A) e 15 (ciclo C).

A ocorrência de filme ou núcleo de magnetita não foi detectada em nenhuma das amostras analisadas, tanto nos ensaios de tração como nos exames metalográficos. No entanto, durante a fase do teste industrial do material, referente ao ciclo A, verificou-se a ocorrência de um óxido fino e extremamente aderente ao fio máquina (Fig.16). Esse apareceu de forma intermitente e permaneceu preso ao fio mesmo após os primeiros passes de trefilação. Esse óxido foi estudado e constatou-se que era composto totalmente de magnetita em contato com o metal base, não apresentando a wustita intermediária. Este resultado foi surpreendente, já que as curvas de resfriamento das condições usadas sobrepostas às curvas de formação de magnetita propostas por Baud<sup>(6)</sup> não passam pela região de formação da magnetita (FIG 17). A explicação para este fenômeno provavelmente pode ser feita de duas maneiras

- A primeira leva em consideração as diferentes taxas de resfriamento a que é submetido o fio no Stelmor, que é função da sobreposição de espiras. Desta forma algumas regiões das espiras podem apresentar temperaturas mais altas que a temperatura indicada na curva de resfriamento da figura 7. O material deste ciclo é bobinado à temperaturas mais altas, e sendo muito baixa a taxa de resfriamento da bobina, seria possível uma superposição com o campo de formação da magnetita. Neste caso, haveria a formação do filme de magnetita na interface. Para os outros ciclos, isto não acontece devido a baixa temperatura de bobinamento.

- A segunda, é a possibilidade da carepa inicialmente formada a altas temperaturas desprender-se do fio, devido a forte ventilação usada, e posteriormente ocorrer uma oxidação destas regiões dentro de uma faixa de temperatura de formação da magnetita. Neste caso, não seria um filme de magnetita na superfície, mas sim uma reoxidação.

A relação entre as imperfeições de superfície e a ocorrência de fissuras na carepa foi detectada com clareza em várias amostras examinadas (FIG. 18) onde nota-se a propagação de uma trinca na carepa, com despreendimento da mesma de forma longitudinal no fio máquina, acompanhando uma imperfeição do fio gerada na laminação. Apesar deste fato, a carepa obtida durante os ensaios de tração para determinação do fator K, despreendeu-se do fio normalmente em escamas de pequeno tamanho, porém, não foi pulverulenta.

#### **Teste Industrial**

Os resultados do teste industrial, que consistiu da trefilação do

fio-máquina obtido sob diferentes condições de resfriamento, pode ser visto na tabela VII.

O item arrebatamento é fortemente afetado por defeitos superficiais e internos do material, sendo fracamente afetado pela carepa.

O item consumo de fieiras permite avaliar o número de fieiras necessário para trefilar uma tonelada de fio. Nota-se que os resultados apresentados na segunda etapa da experiência foram substancialmente melhores que os resultados obtidos da primeira etapa. Este comportamento é compatível com os dados de caracterização da carepa do fio-máquina, já que os ciclos com menor quantidade de óxidos residuais, apresentaram melhores resultados referentes ao consumo de fieiras.

O desgaste das fieira indica o aumento da bitola da fieira durante a trefilação em condições normais. Neste item também pode ser verificado o melhor resultado obtido na segunda etapa da experiência. Este resultado indica que foi obtida uma melhor lubrificação, e que havia menos partículas abrasivas em contato com a fieira. O resultado é compatível com a proporção dos óxidos na carepa formada nos diferentes ciclos. Nota-se que o aumento da proporção de wustita corresponde a um menor desgaste das fieiras.

Ao se fazer uma análise destes dados, é interessante notar o resultado referente ao consumo e desgaste de fieiras, que foi bastante insatisfatório para o material do ciclo A. A diferença expressiva entre o ciclo A e os demais não deve ser explicada somente em função da quantidade de carepa residual, ou da baixa proporção de FeO na carepa. A ocorrência de filmes de magnetita detectados no material deste ciclo deve ter sido o principal responsável pelo mal desempenho deste material, já que este filme foi caracterizado como extremamente aderente, além de ser um óxido bem mais abrasivo que o FeO.

## 5 CONCLUSÃO

Foram testadas diferentes condições de resfriamento para um aço BTC, para verificar as características da carepa gerada e o desempenho do material na trefilação.

Pôde-se obter diferentes características da carepa variando-se a taxa de resfriamento e a temperatura de cone no resfriamento controlado do fio-máquina. Para a faixa de utilização do resfriamento controlado Stelmor, a temperatura de cone mostrou-se mais influente que a taxa de resfriamento na quantidade de carepa gerada.

Uma maior quantidade de carepa inicial propiciou uma menor quantidade de carepa residual após alongamento. O ciclo C, com maior quantidade de carepa inicial, obteve os melhores resultados no teste industrial. A caracterização do material em laboratório indicou o ciclo C como aquele que deveria apresentar melhor desempenho industrial.

As temperaturas de cone mais elevadas entre as testadas, levaram a uma maior proporção de FeO na carepa.

Não houve influência dos ciclos de resfriamento nas propriedades

mecânicas testadas.

Foi detectado e determinado um óxido extremamente aderente ao arame após trefilação. Esse é constituído de magnetita proveniente do material resfriado a taxas altas no início e a taxas baixas para a faixa de temperaturas intermediárias. O mecanismo de formação deste óxido não foi comprovado. Este óxido parece ter sido o motivo pelo qual o ciclo A teve desempenho tão inferior em relação aos outros ciclos.

#### ABSTRACT

The thickness and composition of wire rod scale of a low carbon steel was optimized in order to improve its mechanical descaling properties prior to wire drawing. For such experiments on the cooling cycle of the "Stelmor Line" of the Belgo Mineira Works were performed. The main controlled variables were laying head temperature and post-rolling cooling rate.

The wire rod scale was analyzed in laboratory (thickness, oxide type, total and residual scale) by the use of optical/electronical microscopy and x-ray diffraction.

Industrial performance testes were also done on samples of all cooling conditions in order to correlate the laboratory measurements with drawing parameters.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CENTRE d'ÉTUDES SUPÉRIEURES DE LA SIDERURGIE FRANÇAISE, St. Germain. La calamine du fil machine. Nov, 1974.
2. TOMINAGA, J. et al.. Manufacture of wire rods with good descaling property. *Transactions ISIJ*, v. 22, n.8, p.646, 1982.
3. PAÏDASSI, J. Sur la cinétique de l'oxidation du fer dans l'air dans l'intervalle 700 - 1250°C. *Acta Metallurgica*, v.6, p. 184-194, mar. 1958.
4. FISHER, W. A. et al. *Arch Eisenhüttenw*, 27, 1956. In: *Ibdem Ref (2)*.
5. CHAUDRON, G. et al *Acad. Science*, 178, 1924. In: *Ibdem Ref(2)*.
6. BAUD, J. et alli Étude du mécanisme de formation dun filme de magnétite à l'interface métal-calamine lors du refroidissement des produits siderurgiques. *Memories Scientifiques. Revue Metallurgic*, p.371-377, juin 1978.
7. PICKENS, J. W. The microstructural characteristics of oxide scale formed during bar processing. In: AIME. *Mechanical Working and Steel Processing*. Warrendale, 1983 p. 39-65.
8. FUNKE, P., LUEG, W. Exames de formação de carepa em fio-máquina. N.22, out 1959. Tradução de 'Stahl U. Eisen'.
9. BOCKENHOFF, H. J. Descaling high carbon rod. *Wire Industry*,

p.45-49, jan 1986.

10. FERREIRA, H. C., RAMALHO, J. G. Propriedades da carepa de fio-máquina para decalaminação mecânica. In: SEMINÁRIO SOBRE DECALAMINAÇÃO MECÂNICA, I, 1990. Contagem, abr 1990.

11. VIEIRA, S., HOFFMANN, R. A comparação entre médias. *Estatística Experimental*, Editora Atlas, cap. 6, p.61-75, 1989.

Tabelas I e II - Condições de resfriamento na obtenção da carepa

CICLO	TEMPERATURA DO CONE (°C)	VENTILADORES				VELOCIDADE ESTEIRA (m/s)	POSICAO DAS TAMPAS DO STELMOR
		1	2	3	4		
A	875	100	100	0	0	0,7	FECHADAS A PARTIR DA 3
B	875	50	50	50	50	0,4	TODAS ABERTAS

CICLO	TEMPERATURA DO CONE (°C)	VENTILADORES				VELOCIDADE ESTEIRA (m/s)	POSICAO DAS TAMPAS DO STELMOR
		1	2	3	4		
B	875	50	50	50	50	0,4	TODAS ABERTAS
C	900	50	50	50	50	0,4	TODAS ABERTAS

Tabela III - Quantidade de óxido total e residual obtido

ETAPA	CICLO	TOTAL OXIDO g/kg		OXIDO RESIDUAL g/kg	
		MEDIA	DESVIO	MEDIA	DESVIO
1	A	3,30	1,11	0,31	0,10
	B	3,95	0,56	0,21	0,06
2	B	4,41	0,43	0,23	0,12
	C	7,22	1,24	0,02	0,08

Tabela IV - Comparação entre os ciclos utilizando a d.m.s.

COMPARACAO ENTRE CICLOS	OXIDO TOTAL (g/kg)	OXIDO RESIDUAL (g/kg)
CICLO A - CICLO B	0,65	0,10
CICLO B1 - CICLO B2	0,46	0,02
CICLO B - CICLO C	2,81	0,06
CICLO A - CICLO C	3,92	0,14
D.M.S.	0,56	0,09

Tabela V - Espessura da carepa      Tabela VI - Proporção dos óxidos

CICLO	ESPESSURA (mm)
A	15
B1	18
B2	19
C	29

CICLO	WUSTITA(%)	MAGNETITA(%)
A	77	23
B1	75	25
B2	80	20
C	86	14

Tabela VII - Resultados do teste industrial

CICLO	ARREBA/m	FIEIRA/m	DESGASTE FIEIRA (mm/mX10 <sup>3</sup> )
A	0,35	1,16	4,32
B1	0,36	0,60	3,77
B2	0,42	0,47	3,27
C	0,62	0,36	1,99

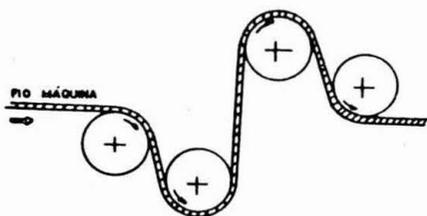


Figura 1 - Esquema de dobramentos sucessivos do fio-máquina através de roletes.

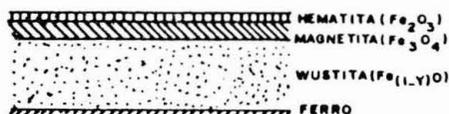


Figura 2 - Representação esquemática dos óxidos na carepa

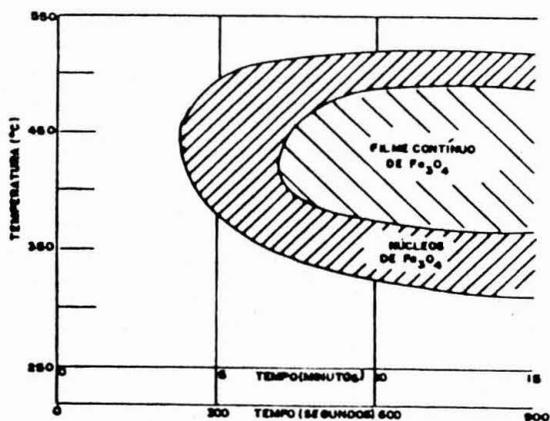


Figura 3 - Curva T-T para formação do filme de magnetita

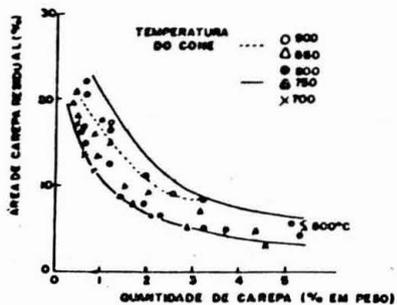


Figura 4 - Relação entre carepa inicial e carepa residual

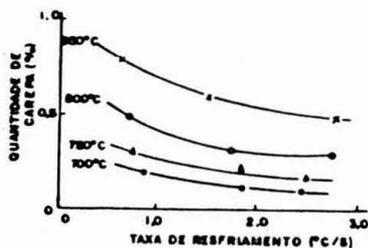


Figura 5 - Efeito da temperatura de cone na quantidade de carepa

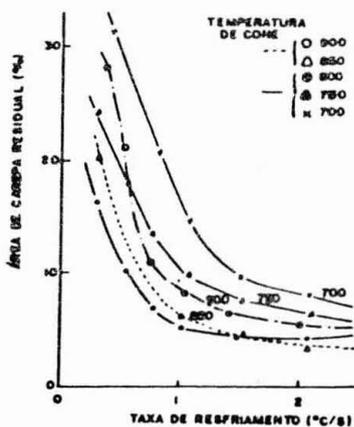


Figura 6 - Efeito da taxa de resfriamento na formação da carepa

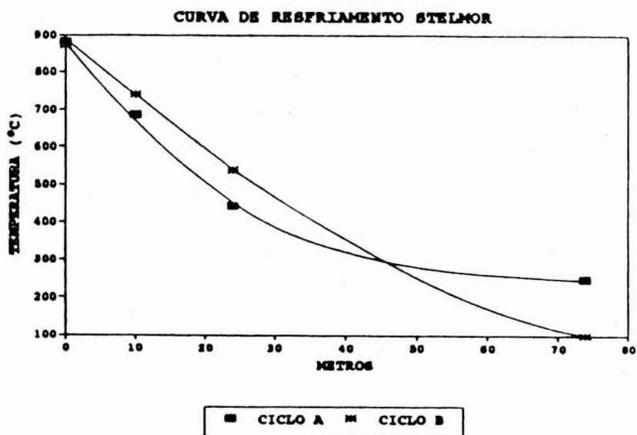


Figura 7 - Perfil do resfriamento nos ciclos A e B

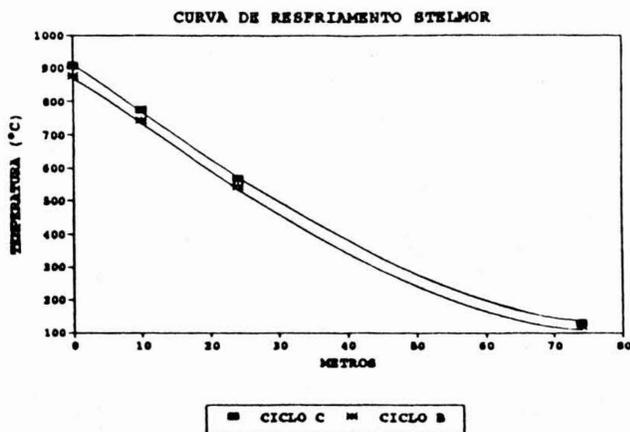


Figura 8 - Perfil do resfriamento nos ciclos B e C

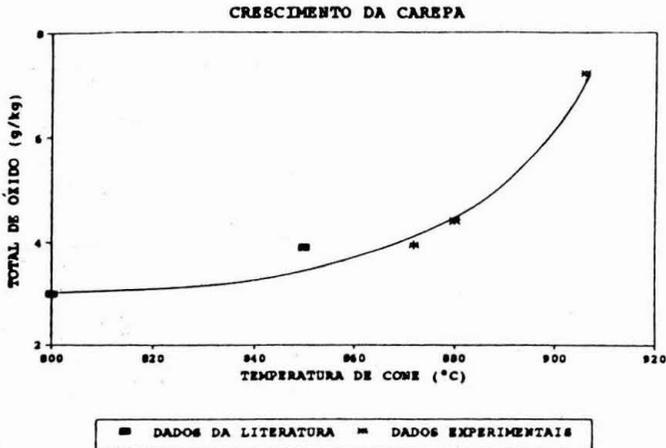


Figura 9 - Influência da temperatura de cone na quantidade de carepa

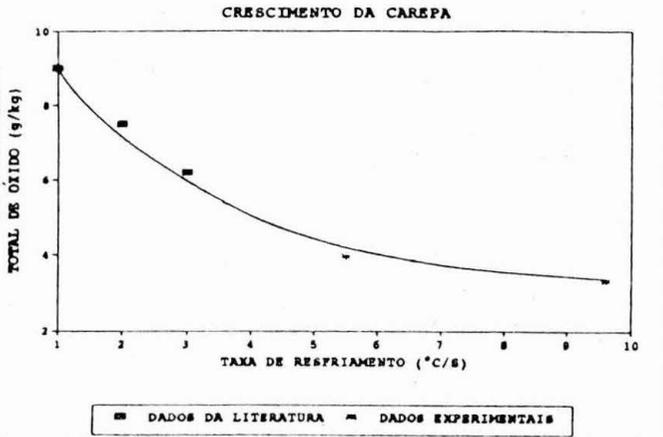


Figura 10 - Influência da taxa de resfriamento na quantidade de carepa

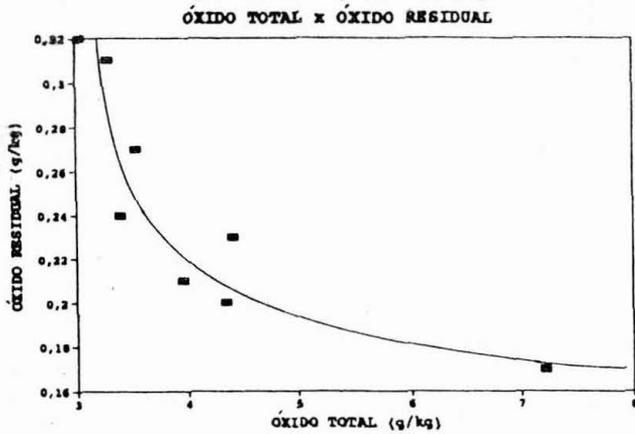


Figura 11 - Relação entre a carepa inicial e final encontrada

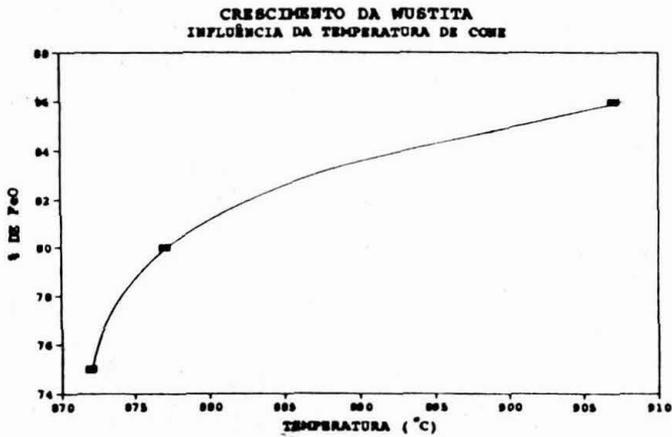


Figura 12 - Influência da temperatura de cone na formação de FeO



Figura 13 - Óxidos presentes na carepa

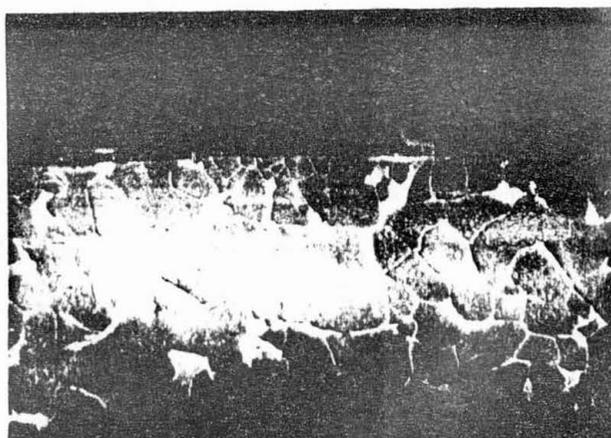


Figura 14 - Carepa ciclo A

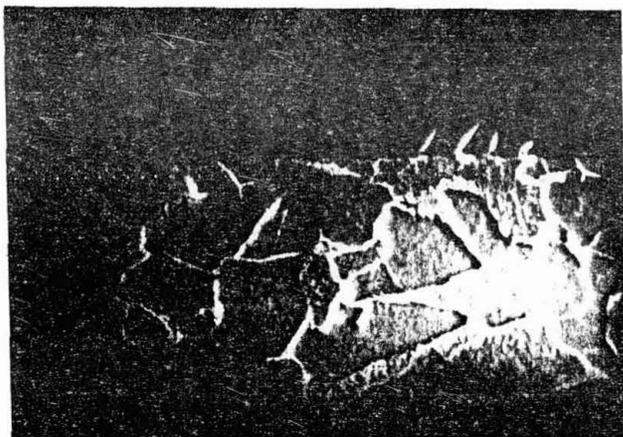


Figura 15 - Carepa ciclo C



Figura 16 - Ocorrência de óxido aderente

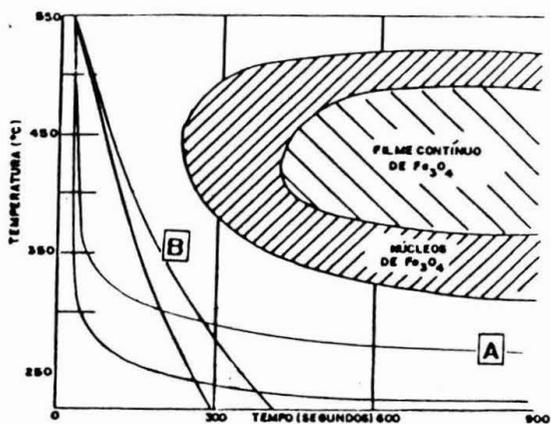


Figura 17 - Sobreposição da curva de resfriamento com a curva de formação da magnetita

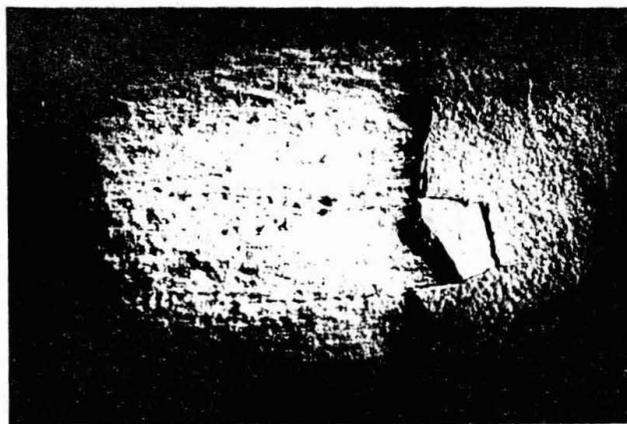


Figura 18 - Formação de trinca na carepa