

ESTUDO DA ADEQUAÇÃO DE CAREPA NO PROCESSAMENTO DE FIO MÁQUINA NA VOTORANTIM SIDERURGIA¹

Marina Furtado Freire²
 Romério Rodrigues Lacerda³
 Rogério Ferreira Ribeiro⁴
 Davidson Martins da Silva⁵
 Márcio de Fátima Rosa⁶

Resumo

Objetivo do trabalho é melhorar a qualidade da carepa (morfologia e espessura) do fio máquina laminado a quente para adequar ao uso no processo de trefilação e/ou laminação a frio, que necessitam de carepa própria para decapagem mecânica, através de dois experimentos práticos de alteração de programas de resfriamento no laminador da Votorantim Siderurgia. O primeiro experimento teve como resultado uma carepa de espessura 15 μm , que é a espessura máxima recomendada para decapagem mecânica. O segundo experimento teve como resultado uma carepa de 9 μm adequada ao tipo de decapagem. Concluiu-se que a espessura e morfologia da carepa terciária são função do tempo e temperatura a que o fio máquina é exposto em um programa de resfriamento na saída do laminador e para este estudo uma ventilação maior resultou em carepa mais adequada e não aderente para uma mesma temperatura de chegada do produto no Stelmor.

Palavras-chave: Carepa; Fio máquina.

STUDY FOR TO SUIT MILL SCALE OF WIRE ROD IN STEEL HOT ROLLED AT VOTORANTIM SIDERURGIA

Abstract

Study aims to improve the quality of mill scale (morphology and thickness) of wire rod hot rolled to suit the use in the process of drawing and / or cold rolling, they need to own pickling of scale mechanical, two practice experiments program change cooling in steel rolling mill of Votorantim. The first experiment resulted in a mill scale thickness 15 micrometers thick which is the maximum recommended for mechanical stripping. The second experiment resulted in 9 micrometers of mill scale appropriate to the type of etching. It was concluded that the thickness and morphology of the tertiary mill scale are a function of time and temperature at which the wire rod is exposed to a cooling program in the output of the rolling mill and for this study resulted in an increased rate mill scale thicker and non-adherent to a same temperature of the product on arrival Stelmor.

Key words: Wire rod; Mill scale.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP

² Engenheira Metalúrgica UFF – Mestranda em Eng. Metalúrgica. Engenheira Sênior, Votorantim Siderurgia.

³ Engenheiro Metalúrgico UFF. Técnico especialista, Votorantim Siderurgia.

⁴ Engenheiro Metalúrgico UFF – MSc Engenharia de Materiais USP. Coordenador de produção, Votorantim Siderurgia.

⁵ Engenheiro Metalúrgico UFF. Engenheiro Pleno, Votorantim Siderurgia.

⁶ Técnico Metalógrafo. Técnico especialista, Votorantim Siderurgia.

1 INTRODUÇÃO

O fio máquina é um produto obtido por laminação a quente de tarugos de secção quadrada, em diâmetros de 5,50 mm até 22,5 mm, que são posteriormente aplicados em processos de trefilação de arames e/ou laminação a frio. Suas características de qualidade são avaliadas pelo seu dimensional, propriedades mecânicas, que são função do aço utilizado e das variáveis de processo de laminação, e qualidade superficial que deve ser a melhor possível, sem defeitos ou avarias.

O fio máquina laminado a quente apresenta sempre uma camada superficial aderente de ferro oxidado – a carepa – gerada pela exposição do aço aquecido à atmosfera que contém oxigênio e que é influenciada pelo tratamento térmico a que se expõe o produto na saída da laminação.

A carepa é inerente ao processo de laminação a quente de fio máquina e forma-se na superfície do mesmo onde na posterior aplicação pode gerar algumas perdas em função da sua espessura e morfologia, muitas vezes dura e abrasiva.

O agente motivador do presente trabalho foi a reclamação de um cliente específico que compra volume considerável (1.500 t/mês) de fio máquina 5,50 mm e 6,35 mm baixo carbono para aplicação em trefilação de arames bitolas 1,24 mm e 2,10 mm, onde o mesmo reclama da qualidade da carepa do fio máquina da Votorantim, dizendo ter espessura muito alta acima de 20 μm e ainda a presença de subcarepa aderente com prejuízos na lubrificação durante a trefilação.

Também se avaliou a qualidade da carepa para as aplicações internas da Votorantim nos processos de trefilação e laminação a frio e constatou-se a necessidade de melhorar a qualidade da mesma.

2 OBJETIVO

De acordo com o processo de decapagem mecânica utilizado pelo cliente e também dentro da Votorantim em seus processos internos, o trabalho teve por objetivo adequar a espessura e morfologia da carepa do fio máquina bitolas 5,50 mm e 6,35 mm aço baixo carbono, de acordo com referências técnicas de artigos e bibliografias, através de alterações no processo de resfriamento do produto na saída do laminador.

3 LAMINAÇÃO A QUENTE NA VOTORANTIM

É um processo de conformação mecânica, que ocorre pela passagem de uma barra entre dois cilindros, com eixos paralelos entre si e que giram em sentido contrário, com os objetivos:

- desenvolver a forma desejada do corpo, de modo a torná-lo adequado a uma determinada aplicação (por exemplo, fio máquina de secção circular ou vergalhão nervurado em rolo);
- melhorar as propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas; e
- desenvolver uma produtividade elevada.

No processo de laminação ocorrem basicamente três deformações plásticas:

- redução da altura;
- alargamento; e
- alongamento.

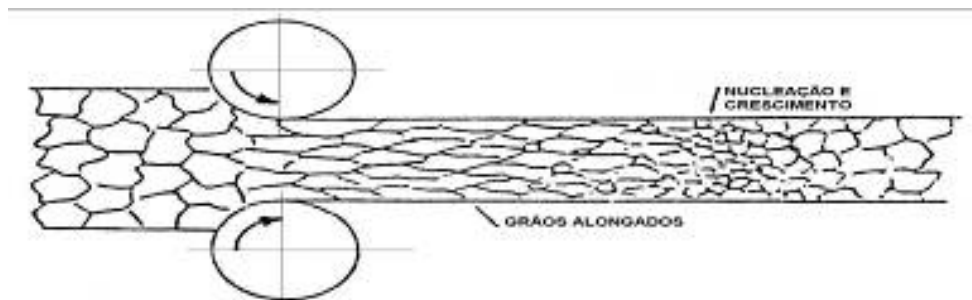


Figura 1. Deformações de laminação.

Após ganhar a forma desejada o produto passa por um tratamento térmico no caso de fio máquina de normalização, com resfriamento forçado a ar, através de ventiladores que permitem o controle da vazão de ar e a velocidade com que o produto será exposto. Este tratamento térmico visa refinar o tamanho de grão e ajustar as propriedades mecânicas do fio máquina de acordo com seu padrão de especificação.⁽¹⁾

Antes, porém, ao sair do bloco acabador recebe um resfriamento à água, onde ainda no campo austenítico um fio máquina bitola 5,50 mm, por exemplo, passa de 1.100°C para 850°C em 0,6 segundos, aproximadamente. Este resfriamento serve para retirar a carepa formada durante a conformação a quente e também não permitir crescimento excessivo de grão austenítico. A temperatura final deste processo (ou temperatura no formador de espiras) determinará o tipo de carepa do fio máquina e o tempo de exposição ao resfriamento a ar do Stelmor determinará a espessura, isso ocorre enquanto o fio máquina está rubro no Stelmor (850°C – 600°C).

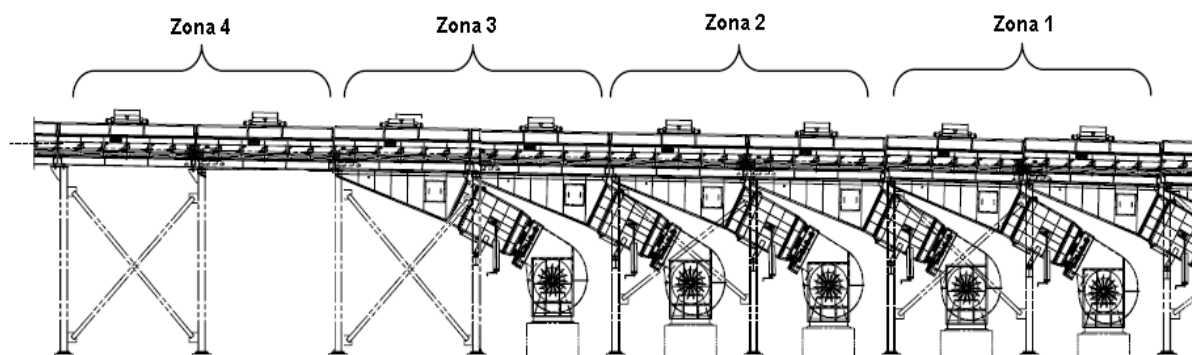


Figura 2. Zonas de resfriamento no Stelmor do laminador de Resende.



Figura 3. Vista de cima do Stelmor do laminador de Resende.

Como resumo o fluxo de processo da laminação da Votorantim é conforme Figura 4.

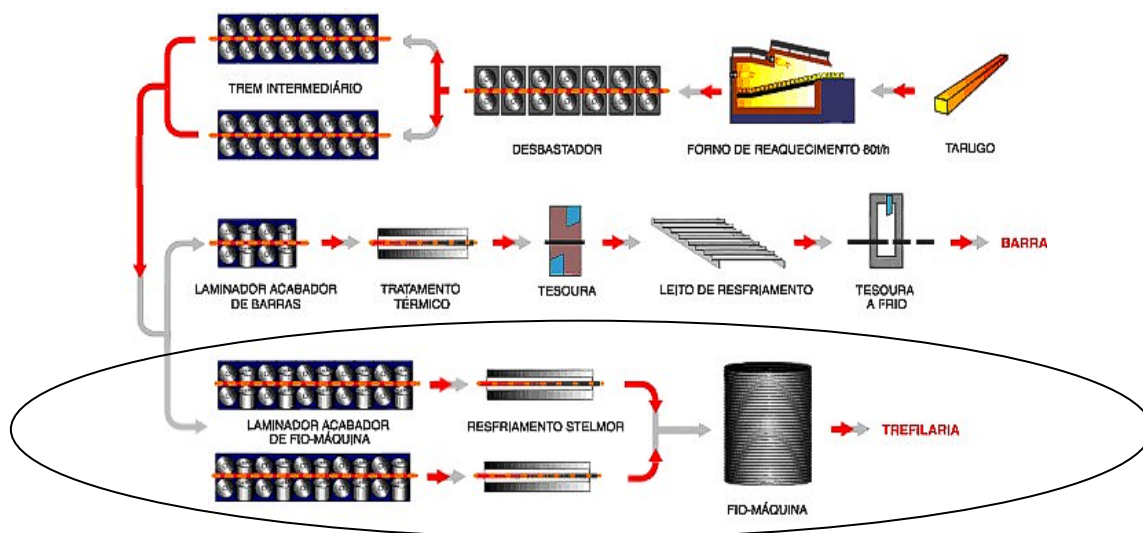


Figura 4. Fluxo do processo de laminação de fio máquina da Votorantim.

A formação da carepa se dá em três momentos no processo de laminação a quente: carepa primária, carepa secundária e carepa terciária. A carepa primária é formada durante o processo de reaquecimento dos tarugos em fornos. A carepa secundária é formada durante o processo de laminação e a carepa terciária dentro do bloco de acabamento e da linha de resfriamento.⁽¹⁻³⁾

3.1 Carepa

Todo fio máquina laminado a quente terá na sua superfície uma camada de carepa, que é uma camada de óxidos proveniente da reação do oxigênio do ar com o ferro contido no aço, durante o processo de laminação a quente.

A carepa do fio máquina é constituída basicamente de FeO, embora funcione como inibidora da formação de Fe₂O₃ (óxido mais aderente) é indesejável ao processo de trefilação e por isto tem que ser eliminada através de um processo de decapagem química ou mecânica, uma vez que ela é lisa, dura e abrasiva.

No processo de trefilação ou laminação a frio quando a carepa não se desprende totalmente do fio máquina na decapagem compromete a aderência do sabão lubrificante e ainda desgasta e entope fieiras, causando interrupções no processo.

A qualidade do trabalho para remoção da carepa depende fundamentalmente de sua estrutura, espessura e composição, os quais são obtidos pelo controle do aquecimento e resfriamento do aço durante a laminação.^(4,5)

3.2 Formação da Carepa e suas Características:

De acordo com a formação da carepa esta pode apresentar as morfologias conforme Tabela 1.

Tabela 1. Características de carepas

	FeO (Wustita)	Fe ₃ O ₄ (Magnetita)	Fe ₂ O ₃ (Hematita)
Coloração (Sem ataque)	Cinza	Preto	Avermelhada
Coloração (Com ataque - Nital)	Cinza escuro	Cinza claro	Branco brilhante
Morfologia	Porosa	Porosa	Compacta
Dureza(Vickers)	270 - 350	430-500	1000

Ao final da laminação a quente pode, portanto, ser constituída de um, dois ou os três tipos dos óxidos acima mostrados na Tabela 1. A temperatura com a qual o óxido é formado determina a espessura e a sua morfologia.

A quantidade de carepa é função do tempo e da temperatura. A influência da temperatura na morfologia de formação e participação das parcelas dos óxidos é mostrada nas Figuras 5 e 6.

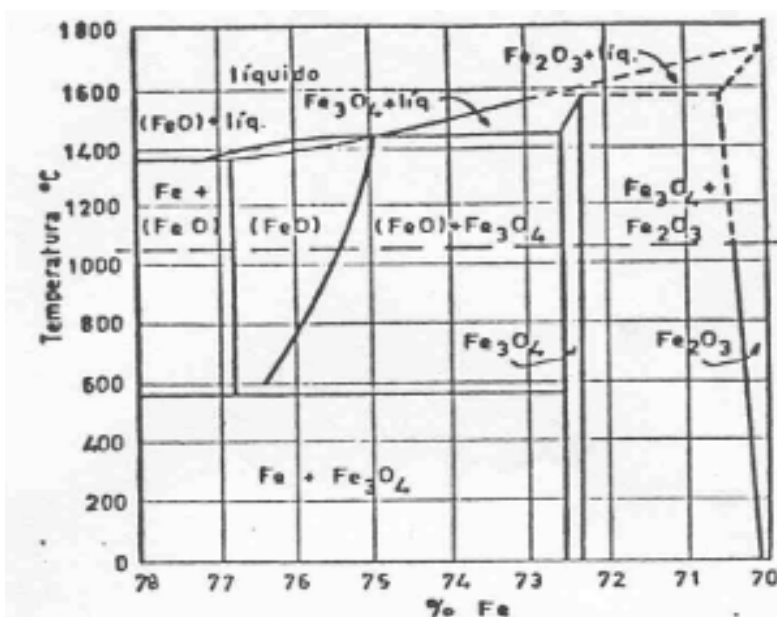


Figura 5. Diagrama de equilíbrio Fe – oxigênio.

A presença dos compostos se dá conforme o gráfico de Benard e Coquele, o diagrama Fe-O (Figura 5) e o gráfico de Crescimento isotérmico de espessura x tempo conforme (Figura 6).

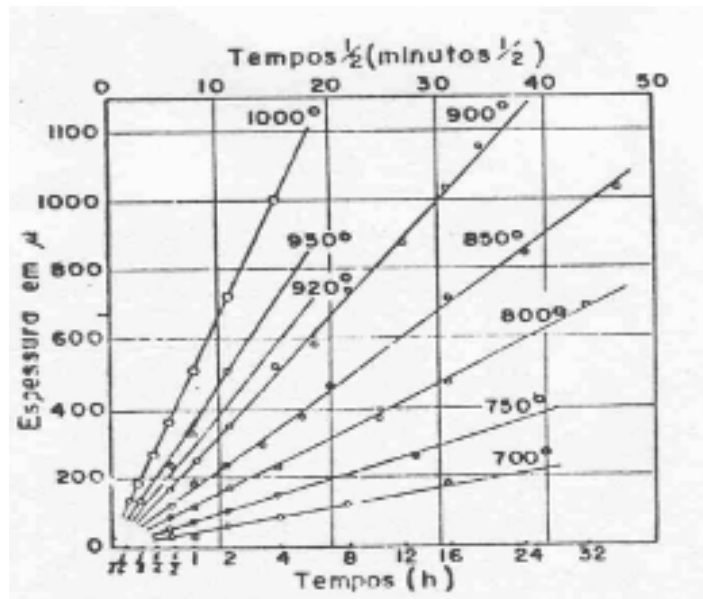


Figura 6. Curvas de crescimento isotérmico da espessura total da película oxidada de ferro no intervalo de 700°C a 1.000°C.

A partir de 650°C se intensifica a formação do FeO, sem presença de Fe₂O₃ e Fe₃O₄, que só vai ocorrer acima de 920°C, ou abaixo de 650°C.

A Figura 6 nos mostra que a temperatura afeta muito mais na formação da espessura de carepa que o tempo. Como exemplo se mostra que para formar uma espessura de óxido de 400 μm necessita 24 h a 750° ou apenas 2 h a 920°C.

Quando o resfriamento do fio máquina ocorre em temperaturas entre 750°C e 900°C, a carepa formada consiste basicamente de FeO (90% – 95%) e Fe₃O₄ (5% - 10%) muito pouco por peso.

O FeO é considerado o mais macio entre os três, os demais são mais duros e abrasivos.

De acordo com a preparação da amostra de fio máquina para análise da carepa, a mesma pode apresentar-se de acordo com sua morfologia de colorações variadas Tabela 1.

No processo de resfriamento Stelmor, o FeO é geralmente o maior constituinte da carepa, desde que a temperatura no formador de espiras esteja entre 820°C e 860°C.

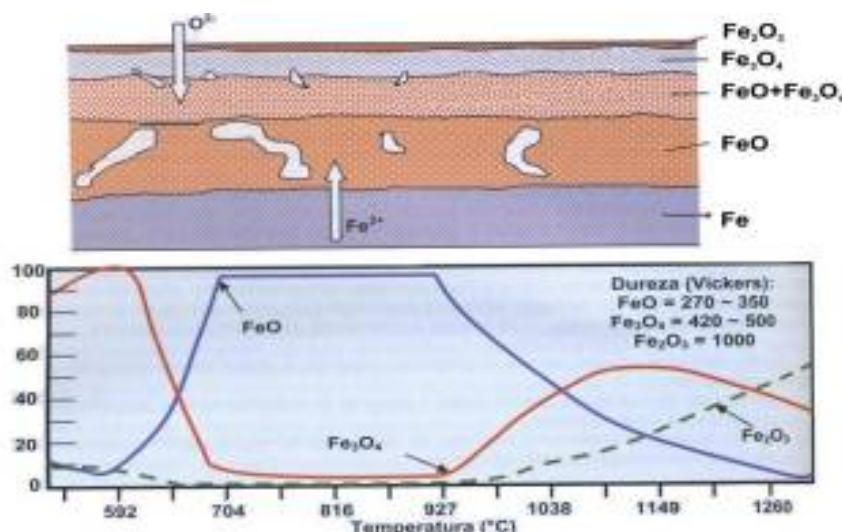


Figura 7. Crescimento das camadas de ferro na formação da carepa.

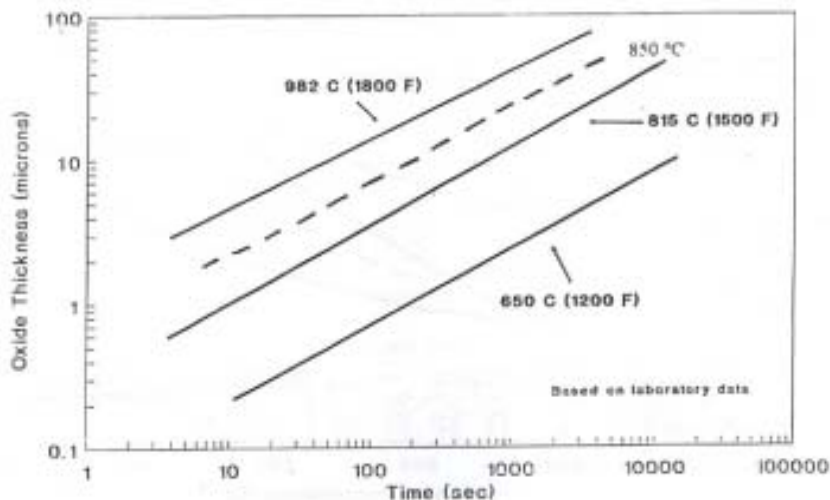


Figura 8. Espessura de carepa para três diferentes temperaturas no formador de espiras.

A Figura 7 mostra formação típica de carepa no fio máquina resfriado no Stelmor. E a Figura 8 apresenta a espessura da carepa em função do tempo de permanência, ao ar, para três diferentes temperaturas no formador de espiras.

A espessura da carepa pode calculada através da fórmula:

$$X = k \sqrt{t}$$

Onde x é espessura da carepa; k é coeficiente função da temperatura; e t é tempo de exposição ao resfriamento a ar.

Existe ainda a formação da subcarepa que também é chamada de carepa aderente e é uma película composta de $FeO + Fe_3O_4$ que se forma abaixo da camada de FeO poroso em função do excesso de temperatura e variação da atividade do O. A sub carepa apresenta-se conforme Figura 9.^(4,5)

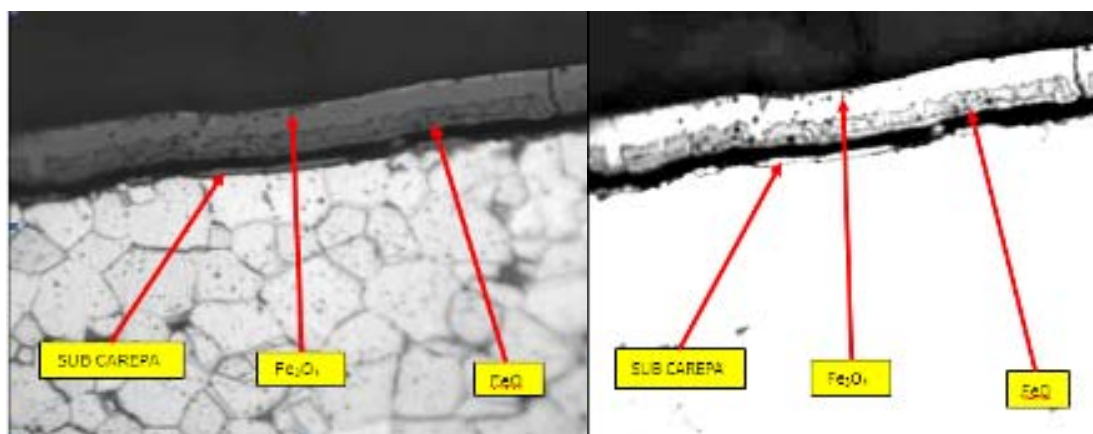


Figura 9. Micrografias de fio máquina 5,50 mm, baixo carbono com a composição da carepa - ataque nital 3% - aumento 1.000X.

3.3 Processos de Decapagem de Fio Máquina

Existem dois tipos de decapagem de fio máquina, mecânica e química.

3.3.1 Decapagem mecânica

A carepa é retirada mecanicamente através da deformação do fio máquina, pela passagem forçada em roletes dispostos em pelo menos dois planos, no decapador mecânico.

Causa a quebra da carepa e limpeza da superfície do fio máquina. É o método de menor custo.

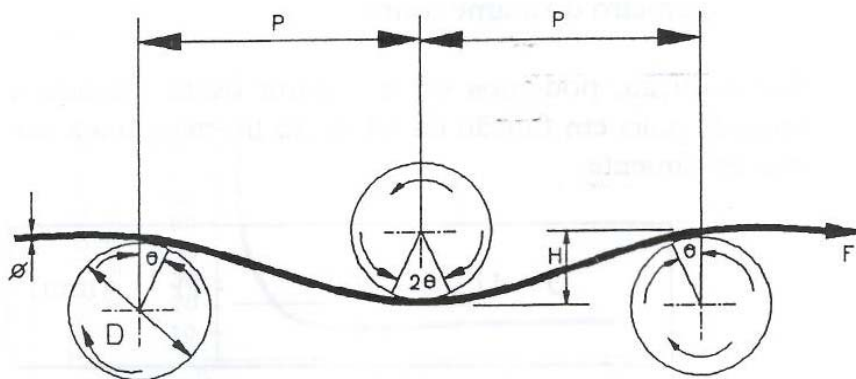


Figura 10. Conjunto de três polias para decapagem mecânica representada em um só plano.

As polias não são acionadas e o material é puxado pela força F diretamente pelo primeiro bloco da máquina de trefilar. Como resultado ocorre a deformação plástica por flexão e um alongamento da fibra mais externa do arame dobrado sobre a polia.

A eficiência da decapagem mecânica depende:

- altura (H) acima de D .
- número de polias; e
- diâmetro da polia (menores polias conferem maior alongamento ao material).^(4,5)

3.3.2 Decapagem química

Este processo se dá pela imersão do material oxidado em banhos de ácidos.

- sulfúrico: ocorre a penetração de ácido pelas trincas das camadas mais externas da carepa e pelos poros das camadas mais internas, até atingir o ferro e ocorrer reação (evolução de H formando gás que quebra carepa);



- clorídrico (muriático): se dá pela dissolução da carepa, por reações que produzem cloreto ferroso ($FeCl_2$).



Os óxidos de ferro são relativamente insolúveis em H_2SO_4 , reage preferencialmente com o metal base (Fe). Já com HCl os óxidos são solúveis levando a formação de cloretos.

Quanto maior a bitola do fio máquina, maior deverá ser o tempo de imersão do fio máquina no banho de HCl .^(4,5)

3.3.3 Carepa ideal

De acordo com literatura a carepa para decapagem mecânica ideal deve ter a seguinte composição:

- % FeO – 80 mínimo;
- % Fe_3O_4 - 18 máximo;
- % Fe_2O_3 - 2 máximo.

Espessura ideal > que 10 μm , sabe-se que a concorrência utiliza valores entre 9 μm e 15 μm .

Para decapagem química a carepa ideal deve ter a seguinte composição:

- %FeO – 80 mínimo;
- %Fe₃O₄- 18 máximo;
- %Fe₂O₃- 2 máximo.

Espessura ideal de máximo 10 μm , sabe-se que a concorrência utiliza valores entre 6 μm e 9 μm .

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos deste trabalho foram realizados no laminador da Votorantim na Unidade Resende, onde foi alterado o processo de resfriamento via Stelmor para produção de fio máquina bitola 5,50 mm e 6,35 mm a fim de se obter a espessura ideal de carepa e maior quantidade possível de FeO em sua composição.

4.1 Materiais

Para o primeiro experimento foram selecionadas duas corridas de fio máquina 6,35 mm baixo carbono para avaliação. Para o segundo experimento foram selecionadas 4 corridas de fio máquina 5,50 mm baixo carbono.

Os equipamentos utilizados foram dispositivo para enrolamento de fio máquina, máquina de tração de 30 t Tinus Olsen, estereomicroscópio Olympus SZ61 aumento de 80x e microscópio óptico Olympus BX51M com aumento de até 2.000x.

4.2 Método

Para iniciar a proposta de alteração, fez-se uma análise do processo de resfriamento utilizada na produção de fio máquina 5,50 mm e 6,35 mm na Votorantim, que era o mesmo para as duas bitolas e mesmo aço, conforme abaixo:

- temperatura no formador de espiras: 890°C.
- temperatura do forno: 1.070°C, 1.050°C, 1.050°C.
- velocidade do laminador 100 m/s.
- velocidade do transportador: 49 m/min.

Tabela 2. Abertura dos ventiladores do Stelmor

1º Ventilador	2º Ventilador	3º Ventilador	4º Ventilador	5º Ventilador	6º Ventilador
0%	0%	0%	0%	0%	0%

Para garantia dos resultados a equipe registrou os dados on line de processo do laminador e coletou amostras de 50 cm para avaliação da carepa.

Também se avaliou a característica da carepa do fio máquina de processo da Votorantim, também objeto da reclamação do cliente, que se apresentava grossa aproximadamente 31,645 μm e com subcarepa conforme Figura 11.

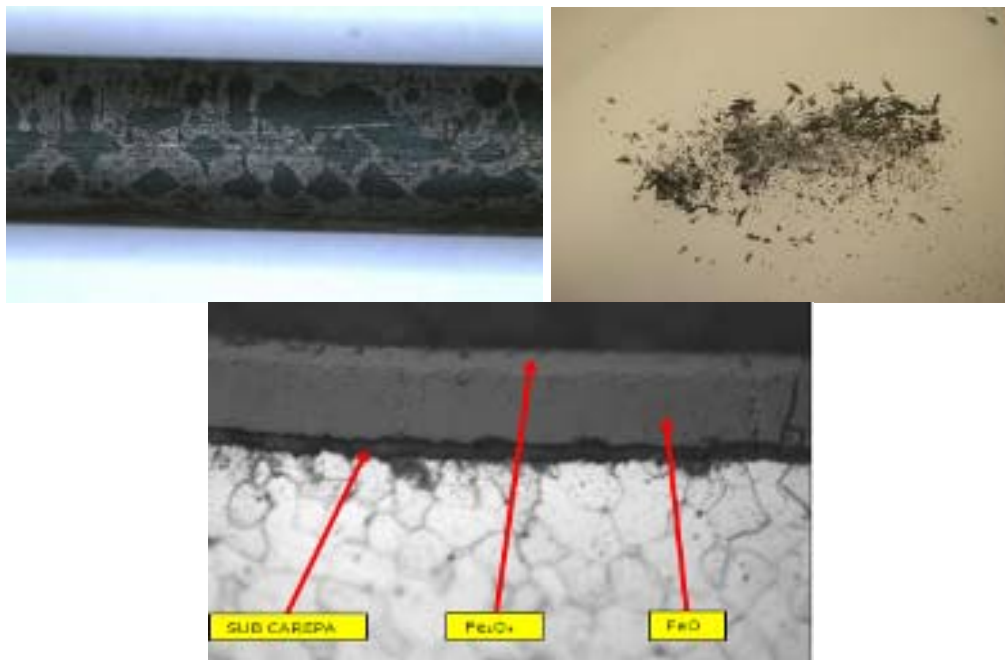


Figura 11. Aparência do fio máquina após decapagem mecânica evidenciando a presença de subcarepa, a composição da carepa segundo microscopia óptica com ataque nital 3%, 1.000x e a quantidade de carepa desprendida após teste de enrolamento.

Na experiência 1, com fio máquina 6,35 mm aço 1006, adotou-se como plano de resfriamento os seguintes parâmetros:

- temperatura no formador de espiras: 890°C;
- temperatura do forno: 1.070°C, 1.050°C, 1.050°C;
- velocidade do laminador 100 m/s;
- velocidade do Transportador: 49 m/min.

Tabela 3. Abertura dos ventiladores do Stelmor experiência 1

1º Ventilador	2º Ventilador	3º Ventilador	4º Ventilador	5º Ventilador	6º Ventilador
5%	5%	5%	50%	50%	50%

Na experiência 2, com fio máquina 5,50 mm aço 1006, adotou-se como plano de resfriamento os seguintes parâmetros:

- temperatura no formador de espiras: 890°C;
- temperatura do forno: 1.070°C, 1.050°C, 1.050°C;
- velocidade do laminador 100 m/s;
- velocidade do Transportador: 49 m/min.

Tabela 4. Abertura dos ventiladores do Stelmor experiência 2

1º Ventilador	2º Ventilador	3º Ventilador	4º Ventilador	5º Ventilador	6º Ventilador
10%	10%	10%	100%	50%	50%

Após a laminação dos fios máquina e amostras coletadas, realizou-se ensaio de tração nas mesmas e ensaio de enrolamento, que foi feito com torção do material em torno do seu próprio eixo conforme Figura 12.



Figura 12. Ensaio de enrolamento do fio máquina.

Na metalografia preparou-se as amostras com corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque com nital 3% para verificação da morfologia da carepa no microscópio óptico e a análise macro se deu nas amostras após ensaio de tração e enrolamento, que removem a carepa da superfície do material.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 13 mostra os resultados do experimento 1, com fio máquina 6,35 mm.



Figura 13. Aparência do fio máquina após ensaio de enrolamento e tração evidenciando a ausência de carepa aderente, ou subcarepa, a composição da carepa segundo microscopia óptica com ataque nital 3%, 1.000x e a quantidade de carepa desprendida após teste de enrolamento.

Conforme Figura 13, a carepa do fio máquina 6,35 mm após alteração somente da abertura dos ventiladores do Stelmor se apresentou com composição composta por 78% de FeO e 22% de Fe₃O₄ e com espessura total de 15,63 µm segundo microscopia óptica e a quantidade de carepa desprendida após teste de enrolamento foi bem melhor que comparado ao fio máquina de processo da Votorantim conforme Figura 11.

A Figura 14 mostra os resultados do experimento 2, com fio máquina 5,50 mm.



Figura 14. Aparência do fio máquina após ensaio de enrolamento e tração evidenciando a ausência de carepa aderente, ou subcarepa, a composição da carepa segundo microscopia óptica com ataque nital 3%, 1.000x e a quantidade de carepa desprendida após teste de enrolamento.

Conforme Tabela 4, a carepa do fio máquina 5,50 mm após alteração somente da abertura dos ventiladores do Stelmor se apresentou com composição composta por 85% de FeO e 15% de Fe₃O₄ e com espessura total de 9,29 µm segundo microscopia óptica e a quantidade de carepa desprendida após teste de enrolamento foi bem melhor que comparado ao fio máquina proveniente da reclamação do cliente conforme Figura 11 e também melhor que do fio máquina do experimento 1 conforme Figura 13.

Os resultados do primeiro experimento com fio máquina 6,35 mm foram melhores que do fio máquina de processo da Votorantim, mas a espessura da carepa ficou com 15,63 µm, valor que conforme literatura é adequado para o processo de decapagem mecânica, mas que foi maior que o parâmetro de máximo 15 µm adotado pelo concorrente.

Já no segundo experimento o valor obtido para espessura da carepa de 9,29 µm ficou dentro do padrão adequado para decapagem mecânica e conforme padrão do concorrente. Também obteve-se uma morfologia ideal composta na sua maior quantidade de FeO e de pouco de Fe₃O₄ sem presença de carepa aderente.

Pelo trabalho se conclui que ao garantir chegar no Stelmor com a temperatura adequada de 890°C e com o aumento da ventilação de 0/0/0/0/0/0 para 5/5/5/50/50/50 ou 10/10/10/100/50/50 houve a geração da carepa com o constituinte adequado preponderante FeO e com a espessura adequada de 9 µm e 15 µm.

Importante ressaltar que não houve perdas das propriedades mecânicas do fio máquina com as alterações feitas no resfriamento destes fios máquina, os valores obtidos se mantiveram dentro da faixa de valores padrão.

Também não houve mudanças significativas na espessura da carepa em função da bitola do fio máquina ter variado de 5,50 mm (experimento 2) e 6,35 mm (experimento 1). As alterações são significativas em bitolas mais grossas, a partir de 14 mm e maiores, já que nestas a diminuição da temperatura é mais difícil e o produto fica maior tempo formando a carepa.

6 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento destes dois experimentos foi possível controlar e adequar a espessura da carepa, bem como a sua composição final, no fio máquina 5,50 mm e 6,35 mm baixo carbono da Votorantim, sem alterar variáveis importantes do laminador e nem mesmo prejudicar as outras características do produto como propriedades mecânicas.

O produto atende agora as necessidades do cliente que utiliza o processo de decapagem mecânica e também melhorias nos processos internos foram observadas.

Agradecimentos

Agradecemos ao amigo Hélio Fidêncio, metalógrafo com 45 anos de experiência a dedicação paciência, ao amigo Engenheiro Guaraci Barbosa pelo suporte técnico e envolvimento com o trabalho e a todos os que participaram, de forma direta ou indireta neste estudo.

Também agradecemos a Votorantim a confiança depositada, recursos disponibilizados e reconhecimento das soluções internas encontradas para problemas que afetam inclusive o cliente final.

REFERÊNCIAS

- 1 Manual de funcionamento da Morgan Worcester do laminador de Resende, Votorantim, setembro 2009.
- 2 Filatov, D.: Zunder beim Warmwalzen von Stahl: Bildung, Verhalten im Walzspalt und Beizbarkeit. Umformtechnische Schriften, Band 131. Shaker Verlag, Aachen 2006.
- 3 Schauwinhold, D, Wiegels, Herbert . Surface defects in hot rolled flat steel products. 2nd ed. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1996.
- 4 Cetlin, P.R. Curso de trefilação de arames de aço. Belo Horizonte MG: Fundação Christiano Ottoni, 1986.
- 5 Batista, José e Mendonça, Alexandre. Artigo Especificação da Carepa adequada ao processo de decapagem. Publicação Interna, 1994.