

CARLOS ANDRÉ DE SOUZA SOBREIRA ROCHA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE DECAPAGEM
PARA AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃOS NÃO ORIENTADOS**

ESP/SO
2008
R582

São Paulo
2008

CARLOS ANDRÉ DE SOUZA SOBREIRA ROCHA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE DECAPAGEM
PARA AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃOS NÃO ORIENTADOS**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a conclusão de MBA em Siderurgia

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Neusa Alonso
Falleiros

São Paulo

2008

CARLOS ANDRÉ DE SOUZA SOBREIRA ROCHA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE DECAPAGEM
PARA AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃOS NÃO ORIENTADOS**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a conclusão de MBA em Siderurgia

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Neusa Alonso
Falleiros

São Paulo

2008

A Deus, por tudo.
À minha esposa
Cristiane , a minha mãe
Edite, familiares e
amigos pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de educação continuada implementado na Companhia Siderúrgica Paulista pela realização deste valoroso curso e aos meus superiores por me permitirem dedicar o tempo necessário.

A Superintendência da Laminação a Fio (C-IPF) e as Gerências do Suporte Técnico da Laminação a Frio (C-IFT), Decapagem e Acabamento a Quente (C-IFT) juntamente com seus funcionários pelo desenvolvimento deste trabalho.

A Prof.a Dra. Neusa Alonso Falleiros pela orientação, dedicação, compreensão, incentivo e confiança depositada.

Ao Centro de Informações Técnicas da Companhia Siderúrgica Paulista pelo fundamental trabalho na procura de informações e referências.

RESUMO

ROCHA, C. A. S. S. Estudo dos parâmetros de processo de decapagem para aços elétricos de grãos não-orientados, 2008. 72f. Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a conclusão de MBA em Siderurgia. São Paulo, 2008.

A Decapagem tem como principal finalidade remover a camada de óxido (carepa) formada na superfície da tira após o processo de Laminação de Tiras a Quente. Essa remoção ocorre através da imersão da chapa em tanques com ácido clorídrico (HCl) com velocidade controlada de tal forma que garanta a permanência da superfície da chapa em contato com o aço para que ocorra a remoção do óxido. Logo após o material é protegido com a aplicação de óleo protetivo evitando o ataque do O₂ atmosférico ao metal base. Durante o processamento na Decapagem ocorrem outras operações como inspeção superficial, soldagem de bobinas para aumento do peso em processo melhorando a produtividade e aparentamento das bordas laterais em função da largura solicitada pelo cliente. O ácido usado para remoção do óxido é recuperado nas Unidades de Regeneração de HCl e devolvido para linha para novamente executar seu papel de remoção dos óxidos de novas bobinas. Neste trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os principais parâmetros de processo de decapagem de aços elétricos de grãos não orientados, e uma avaliação dos parâmetros de operação de uma linha de decapagem contínua clorídrica. Foi verificada a influência dos principais parâmetros de processo como a temperatura e a concentração do banho que apesar do aumento de ambos os fatores apresentam aumento da velocidade de processo da decapagem contribuindo

para o aumento da produtividade sem afetar a qualidade do material a ser decapado.

Palavras-chave: Decapagem. Carepa. Aço elétrico.

ABSTRACT

ROCHA, C. A. S. S. Study of the parameters of the pickling process to electrical steels, non-grain oriented: 2008. 72f. Monograph submitted to the Continuing Education Program - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo for the completion of Siderurgy MBA. São Paulo, 2008.

The pickling line main purpose is to remove the layer of oxide (scale) formed on the surface of the strip after the process of the Hot Strip Mill. This removal occurs through immersion of the plate in tanks with hydrochloric acid (HCl) with speed controlled in a way that guarantees the permanence of the surface of the plate in contact with the steel for the occurrence of the removal of the oxide. Soon after the material is protected with the implementation of protective oil avoiding the attack of atmospheric O₂ to the base metal. During processing pickling occur in other operations such as surface inspection, welding of coils to increase the weight in the process improving productivity and trimming edges of the side depending on the width requested by the customer. The acid used for removal of the oxide is recovered in Units Regeneration HCl and returned to line to again perform its role of removal of oxides of new coils. In this work, a search was carried out literature on the main parameters of the process of blasting electric steel grain not targeted, and an evaluation of the parameters of operation of a continuous pickling line hidrochloric. It verified the influence of the main process parameters such as temperature and concentration of the bath that despite the increase of both factors have increased the speed of the pickling process contributing to the increase in productivity without affecting the quality of the material to be pickling.

Keywords: Pickling. Scale. Electrical Steel.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 REGIÕES DE EFICIÊNCIA E DE DEFICIÊNCIA DA DESCAREPAÇÃO NO DIAGRAMA RELACIONANDO QUANTIDADE DE ÁGUA POR ÁREA DESCAREPADA E PRESSÃO DE IMPACTO	21
FIGURA 2– ESKEMA ILUSTRATIVO DA FORMAÇÃO DA CAREPA	22
FIGURA 3 – PORCENTAGENS APROXIMADAS DE FeO , Fe_2O_3 , E Fe_3O_4	23
FIGURA 4 – CRESCIMENTO DA CAREPA DURANTE A LAMINAÇÃO	24
FIGURA 5– PERDAS RELATIVAS DE CAREPA EM AÇOS COM ALTAS TEMPERATURAS.....	28
FIGURA 6– LAY OUT DE UMA LINHA DE DECAPAGEM CONTÍNUA.....	34
FIGURA 7– LAY OUT DOS TANQUES DE ÁCIDO DE UMA LINHA DECAPAGEM TURBULENTA.....	34
FIGURA 8- DETALHAMENTO SUPERFICIAL DA CHAPA DECAPADA DE ACORDO COM OS TIPOS DE DECAPAGEM QUÍMICA. A) DECAPAGEM SULFÚRICA E B) DECAPAGEM CLORÍDRICA.	38
FIGURA 9 – ROLO QUEBRADOR DE CAREPA E DESEMPENADEIRA DE ENTRADA.....	40
FIGURA 10 – PROCESSO DE SOLDAGEM ENTRE BOBINAS – A) SOLDAGEM, B) REBARBAGEM E C) BOBINAS COM A SOLDA REBARBADA.....	51
FIGURA 11 – DIVISÃO DA LINHA DE DECAPAGEM POR ÁREAS.....	55
FIGURA 12 – IDENTIFICAÇÃO DO PRINCIPAL GARGALO NA LINHA DE DECAPAGEM	56
FIGURA 13 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE HCl LIVRE NO TEMPO DE DECAPAGEM.	59
FIGURA 14- EVAPORAÇÃO DO LÍQUIDO COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DE EVAPORAÇÃO E COM VELOCIDADE DO AR ACIMA DO LÍQUIDO CONSTANTE EM 0,25M/S. TEMPERATURA DO AR, 20°C; UMIDADE, 30%.	60
FIGURA 15 - EFEITO DA VELOCIDADE DA TIRA NO TEMPO DE DECAPAGEM EM SOLUÇÃO DE HCl DE UM AÇO BAIXO CARBONO LAMINADO A QUENTE	62

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – ANÁLISE DAS PRIORIDADES DAS ANOMALIAS ENCONTRADAS NO PROCESSO DA DECAPAGEM DE AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃOS NÃO ORIENTADOS.....	57
GRÁFICO 2 – CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO NO BANHO	58
GRÁFICO 3 – VARIAÇÃO NA TEMPERATURA DO BANHO DA SOLUÇÃO DECAPANTE.....	59
GRÁFICO 4 – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DO PROCESSAMENTO DO AÇO ELÉTRICO DE GRÃO NÃO ORIENTADO EM FUNÇÃO DOS PARÂMTROS DE ACIDEZ E TEMPERATURA DO BANHO.	61
GRÁFICO 5 – ANÁLISE DAS ANOMALIAS ANTES E APÓS OS RESULTADOS ENCONTRADOS NO PROCESSO	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - QUADRO COMPARATIVO DOS TIPOS DE DECAPAGEM QUÍMICA.....	37
TABELA 2 – DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO DA PRIORIDADE DA ANOMALIA	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO.....	13
3. AÇOS CARBONO PARA FINS ELÉTRICOS (AÇOS GNO)	14
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS CARBONO PARA FINS ELÉTRICOS	14
3.1.1 Aços elétricos de grão orientado.....	14
3.1.2 Aços elétricos de grão não orientado	15
3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	17
4. PROCESSAMENTO	18
4.1 ACIARIA.....	19
4.2 LAMINAÇÃO A QUENTE	19
4.2.1 Principais características da carepa.....	20
4.2.2 Crescimento da camada de carepa durante a laminação a quente	23
4.2.3 Efeito da carepa na Atmosfera.....	26
4.2.4 Efeito dos elementos de liga sobre a formação da carepa.....	26
4.2.5 Influência nas temperaturas de bobinamento(TB), acabamento (TA) e taxa de resfriamento nas características da carepa.....	29
5. PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO EM AÇOS.....	30
6. DECAPAGEM	31
6.1 TIPOS DE DECAPAGEM.....	33
6.1.1 Decapagem por ácido sulfúrico.....	35
6.1.2 Decapagem por ácido clorídrico.....	36
6.1.3 Outras misturas ácidas:.....	37
6.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DECAPAGEM	38
6.2.1 Seção de Entrada	39

6.2.2 Seção de Processo	40
6.2.3 Seção de Saída.....	41
6.3 CONTROLES E VARIÁVEIS DO PROCESSO	42
6.3.1 Concentração de Ácido e Cloreto Ferroso	43
6.3.2 Concentração de Inibidor	43
6.3.3 Temperatura.....	46
6.4 VARIÁVEIS SECUNDÁRIAS.....	47
6.4.1 Lavagem	47
6.4.2 Secagem	48
6.4.3 Oleamento.....	48
6.5 VARIÁVEIS TERCIÁRIAS	49
6.5.1 Descarte do Defeito Inerente ao Processo no Laminador de Tiras a Quente:	49
6.5.2 Soldagem entre bobinas	50
7. UTILIDADES	51
8. REGENERAÇÃO DE ÁCIDO CLORÍDRICO.....	53
9. METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS	54
9.1 DIVIDIR A MÁQUINA POR ÁREAS	55
9.2 IDENTIFICAR AS ÁREAS CRÍTICAS.....	56
9.3ANÁLISE DAS PRIORIDADES DAS ANOMALIAS	56
9.4RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
10. CONCLUSÕES	64
11. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	65
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1. Introdução

O processo de laminação a quente, invariavelmente, conduz à formação de óxidos de ferro na superfície da tira laminada a quente, devido a altas temperaturas de processamento, grande quantidade de oxigênio disponível para reagir e, principalmente, à alta reatividade do ferro nestas condições.

Em um aço de baixa liga, três fases do óxido de ferro são possíveis de serem encontradas: a hematita (Fe_2O_3), que é a fase com maior grau de oxidação, a magnetita (Fe_3O_4), que possui um grau de oxidação intermediário, e a wustita (FeO), que é a fase com menor grau de oxidação.

A quantidade e a constituição desta carepa variam em função das condições de resfriamento da tira após o bobinamento na laminação a quente, que por sua vez afetarão o tempo de decapagem.

A concentração de ácido presente no banho de decapagem é outra variável de processo que influencia o tempo de decapagem de uma tira. Essa variável, quando otimizada, acelera o processo e reduz o consumo de ácido.

Outra variável que auxilia o ataque do ácido sobre a camada de óxido, é a quantidade de alongamento fornecido pela tira em função de gerar trincas na estrutura da carepa. Estas trincas possuem a função de facilitar a penetração do ácido e aumentar a superfície de contato para a reação¹.

Além disso, temos as variáveis mecânicas que afetam o processo de decapagem dos aços que são: Soldagem entre as bobinas, velocidade do centro da tira e aparentamento lateral.

2. Objetivo

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Avaliar a influência dos parâmetros de temperatura e concentração de ácido presente no banho da decapagem devido ao aumento da temperatura de bobinamento, o que causa a formação de uma carepa de óxido mais aderente, o que dificulta a remoção da mesma no banho da solução clorídrica.
- Com a avaliação da influência desses parâmetros notamos que podemos ter uma produtividade maior no que se refere a processamento de aços elétricos de grãos não orientados sem afetar a qualidade da decapagem do material.

Para atingir tais objetivos foram empregadas as seguintes metodologias:

- Divisão da linha de decapagem por áreas.
- Identificação dos gargalos.
- Definição de indicador de desempenho.
- Introdução de um sistema de registro de anomalias e monitoramento.
- Análise e resolução das anomalias.

3. Aços Carbono para Fins Elétricos (Aços GNO)

"Aços elétricos" interessam a dois segmentos econômicos onde o Brasil tem engenharia forte, a siderurgia e a indústria da eletricidade. Um por cento do volume total de aços produzidos anualmente é utilizado por suas propriedades elétricas e magnéticas. Do total de 7 milhões de toneladas anuais, 1 milhão de toneladas são usadas em transformadores (os aços chamados de grão-orientado - GO), 4 milhões são usados em motores elétricos de bom rendimento elétrico e 2 milhões de toneladas se aço tipo 1006 são usados nas aplicações de menor exigência ².

3.1 Classificação dos aços carbono para fins elétricos

É interessante detalhar um pouco mais as principais famílias de aços para fins elétricos:

3.1.1 Aços elétricos de grão orientado

Os aços de grão-orientado: são utilizados em transformadores, são aços com 3% de silício ou mais produzidos de maneira a induzir uma forte textura cristalográfica do tipo $\{110\}<001>$ ³, ou seja, quase a totalidade dos cristais que

compõem a chapa têm seus planos {110} paralelos à superfície da chapa, com a direção <001> paralela à direção longitudinal da chapa. Nesta condição, suas propriedades magnéticas são excelentes, mas apenas em uma direção. No caso de transformadores grandes, onde o circuito magnético pode ser montado sempre alinhando o fluxo magnético na direção longitudinal da chapa, o uso de aços de grão-orientado é a melhor solução. Seu custo é da ordem de US 1.500/ton.

3.1.2 Aços elétricos de grão não orientado

Por outro lado, muitas aplicações exigem isotropia de propriedades no plano da chapa, onde é mandatório o uso dos aços de grãos-não-orientado. A condição de isotropia planar crítica para a aplicação em motores elétricos, que é de longe o principal segmento consumidor de aços elétricos, seguido pelo uso em pequenos transformadores.

Três subfamílias de aços elétricos de grãos-não-orientado são utilizadas: Os aços siliciosos "totalmente processados", ou seja, prontos para estampagem e uso, entregue pela usina já com baixo carbono e com recozimento final, com custo ao redor de US 1.000/ton.

Os aços "semi-processados", siliciosos ou não, comprados por empresas que fazem o tratamento térmico final em sua planta industrial, e que são preparados para ter grande crescimento de grão nesse recozimento final, onde ocorrerá eliminação

das tensões residuais, descarbonetação e recristalização com grande tamanho de grão final e que são, em geral, de custo mais baixo (custo em torno de US 700/ton).

E por fim os "aços ABNT 1006/1008", que não são produzidos especialmente para fins eletromagnéticos, mas são usados em larga escala até mesmo sem reconhecimento, por serem os aços planos de mais baixo custo (U\$ 450 / tonelada), são utilizados para motores elétricos com intervalo de tempo curto.⁴

A tecnologia atual de fabricação dos motores elétricos utiliza chapas de aço que são puncionadas para obter as formas requeridas no estator e no rotor e, naqueles onde se exige melhor desempenho energético, aplica-se um tratamento térmico que visa a redução do teor de carbono do aço a menos de 0,003%, a eliminação de qualquer encruamento, a obtenção de tamanhos de grão na faixa de 100 a 150 μ m e a criação de uma isolamento elétrica interlamelar por oxidação. O material mais utilizado nos motores elétricos continua sendo a chapa de aço tipo ABNT 1006 sem reconhecimento, pelo seu baixo custo, correspondendo a 30% das 335.000 toneladas anuais de aços elétricos usados em máquinas elétricas.

A necessidade de induzir a sociedade a reduzir o consumo de energia elétrica tem levado os governos de todo o mundo a pressionar os fabricantes de eletrodomésticos na direção do aumento do rendimento energético de seus motores. Um dos meios disponíveis para aumentar o rendimento energético dos motores é utilizar aços com menores perdas magnéticas. Um motor de geladeira tem, tipicamente, potência nominal de 150W e utiliza 3kg de aço, ou seja, tem potência de 50W/kg. Se a indução magnética média no interior do seu circuito magnético for da ordem de 1,5T, as perdas magnéticas consumiriam 36% da potência, se fosse usado um aço SAE J403 – GR 1006 sem reconhecimento, ou apenas 8% da potência se usar um aço de "alta eficiência". Assim, o mercado pode mudar significativamente,

dependendo até da legislação ligada ao consumo energético dos produtos que o utilizam.

Os aços elétricos têm um papel muito importante na matriz energética do país e do planeta, pois aproximadamente 50% da energia elétrica produzida anualmente são utilizadas por motores de tração. Parte dessa energia elétrica é dissipada como "perdas elétricas". Estima-se que as perdas consumissem 4,5% da energia elétrica gerada nos Estados Unidos, implicando em 1992 num custo de 7,5 bilhões de dólares anuais. A eficiência dos motores elétricos varia entre 50 e 90%. A eficiência diminui, quanto menor o tamanho do motor, por diversas razões, uma delas sendo a razão geométrica entre o comprimento do entreferro (distância entre estator e rotor do motor) e o comprimento total do circuito magnético. Os grandes motores, de potência maior que 125 CV (100KW), utilizaram 500 das 1600 Twh mobilizadas nos motores americanos em 1985, dissipando 30 Twh nas perdas elétricas (rendimento global de 470/500, ou seja, 94%). Os pequenos motores, de potência menor que um CV, utilizaram apenas 133 Twh, mas dissiparam 47 Twh (rendimento global de 65%)

5.

3.2 Composição Química

Para atender a diferentes demandas de qualidade e custo, os aços elétricos são produzidos numa gama de composições químicas que os diferencia dos demais aços, até mesmo dentre as diferentes classes de aços elétricos. Seu teor de carbono final tem que ser abaixo de 30 ppm, mas podem ser produzidos com carbono abaixo

de 0,06%, se for descarbonetado no recozimento final realizado após o corte final das lâminas. A tendência é produzi-los com carbono abaixo de 0,003%. A classe de menor custo tem silício na faixa dos milésimos e alumínio na ordem de 0,04%. O efeito benéfico da adição de silício e alumínio – aumentar a resistividade elétrica – faz com que esses elementos sejam usados em até 3,5 e 0,5%, respectivamente, mas com sensível aumento de custo.

As impurezas que formam inclusões de nitretos, sulfetos e óxidos, além de seu efeito deletério direto nas propriedades magnéticas, afetam-nas também indiretamente através de seu efeito no tamanho de grão e textura. Só a precipitação de nitretos de alumínio logo antes ou durante a recristalização torna importante o efeito das inclusões na textura⁶.

4. Processamento

A Maioria das aplicações dos aços para fins eletromagnéticos utiliza chapas laminadas de espessura abaixo de 0,7mm. São aços produzidos por lingotamento contínuo seguido de laminação a quente, laminação a frio e recozimento⁷.

4.1 Aciaria

O processo da Aciaria tem como objetivo a metalurgia primária. Após o recebimento de sua principal matéria prima, o ferro gusa, inicia-se os processos de transformação da fabricação do aço.

A redução de elementos químicos na composição do ferro gusa por meio da injeção de oxigênio e a adição de ferros-liga torna a mistura um dos produtos mais importantes na vida do homem. Na Aciaria chamamos de aço líquido, em função do seu estado físico, a uma temperatura de aproximadamente 1600 °C.

4.2 Laminação a Quente

A Laminação a Quente tem por objetivo reduzir a espessura do material, que parte de uma placa de mais de 200 mm e produz uma chapa bobinada de aproximadamente 2 mm de espessura. A textura da bobina laminada a quente (BQ) tem influência na textura final do aço. Vários aspectos da microestrutura do final da laminação a quente tem efeito importante na textura final, tais como o tamanho de grão e participação do carbono e nitrogênio durante a solução sólida e os precipitados.

Existem grandes diferenças de processamento associadas à variação da temperaturas ao longo do processo, devido ao emprego de equipamentos diferentes. O mais comum é o uso de trens de laminação como no caso, Cosipa, Usiminas e

CSN, enquanto a Arcelor Mittal Inox dispõe de um laminador reversível com reaquecimento nos dois lados do laminador .

A maior parte das atenções da literatura costuma se voltar aos controles das temperaturas de reaquecimento das placas, do final de laminação (acabamento) e da temperatura de bobinamento com o objetivo de controlar o tamanho de grão e forçar a precipitação de nitretos da bobina laminada a quente (BQ) ⁶.

4.2.1 Principais características da carepa

A carepa de óxido deve ser completamente removida após o aço ser laminado a quente, a fim de evitar o desgaste sobre matrizes e rolos sobre a superfície da chapa e evitar defeitos no produto final.

A espessura da camada oxida é diretamente proporcional a temperatura da chapa, quanto maior for, mais espessa será. Em contrapartida, quanto mais fina for a camada, maior será a dificuldade para remoção, exigindo processos químicos diferentes dos utilizados durante a laminação a quente da tira.

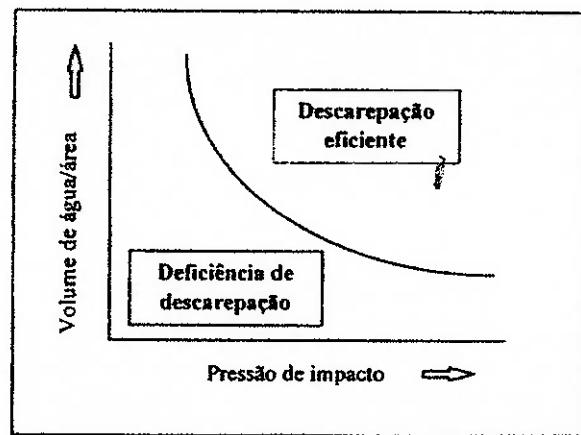


Figura 1 Regiões de eficiência e de deficiência da descarepação no diagrama relacionando quantidade de água por área descarepada e pressão de impacto⁸.

Os principais óxidos formados na camada de carepa são: hematita (Fe_2O_3) – 2%, magnetita (Fe_3O_4) – 18% e wustita (FeO) – 80%. Quanto mais alta for a temperatura mais espessa será a camada do óxido Fe_2O_3 , sendo este um óxido de maior dificuldade de remoção na decapagem.

A carepa na verdade é constituída por três tipos de camadas de óxidos com diferentes proporções de ferro e oxigênio: Hematita (Fe_2O_3), que contém 30,1% de oxigênio, a wustita (FeO), com 22,3% de oxigênio, e a magnetita (Fe_3O_4), contém 27,6% de oxigênio.

Wustita (FeO) é a fase mais interna e adjacente ao metal (Figura 1), com o menor teor de oxigênio. Abaixo de 570 °C (1058 °F) a wustita não é estável. O seu conteúdo na carepa aumenta com o aumento da temperatura e quando a temperatura está acima de 700 °C (1292 °F), a wustita ocupa cerca de 95% da camada de carepa (Gráfico 2). A fase da wustita relativamente tem um ponto de baixa fusão, 1370 a 1425 °C (2498 a 2597 °F), em comparação com a de outras fases da carepa e do aço em si. Derretimento da camada wustita (lavagem) acelera a taxa de escamação e novos aumentos grão fronteira penetração que produz

superfície de qualidade inferior, aumenta o consumo de combustível e reduz a produtividade.

Magnetita (Fe_3O_4) é a fase intermédia da carepa (Figura 1). Quando a temperatura do aço é inferior a $500^{\circ}C$ ($932^{\circ}F$), a tabela contém apenas magnetita (Gráfico 2). À medida que a temperatura aumenta para cerca de $700^{\circ}C$ ($1292^{\circ}F$), a formação da wustita ocorre em detrimento da magnetita e, em temperaturas elevadas, a magnetita ocupa apenas 4% da camada de carepa. A Magnetita é mais difícil e mais desgastante do que wustita.

Hematita (Fe_2O_3) é a fase externa da carepa (Figura 1). A Hematita é formada na temperatura acima de aproximadamente $800^{\circ}C$ ($1472^{\circ}F$), como mostrado no gráfico 2 e, em temperaturas elevadas, que ocupa cerca de 1% da camada da carepa. Semelhante a magnetita, a hematita é dura e desgastante⁹.

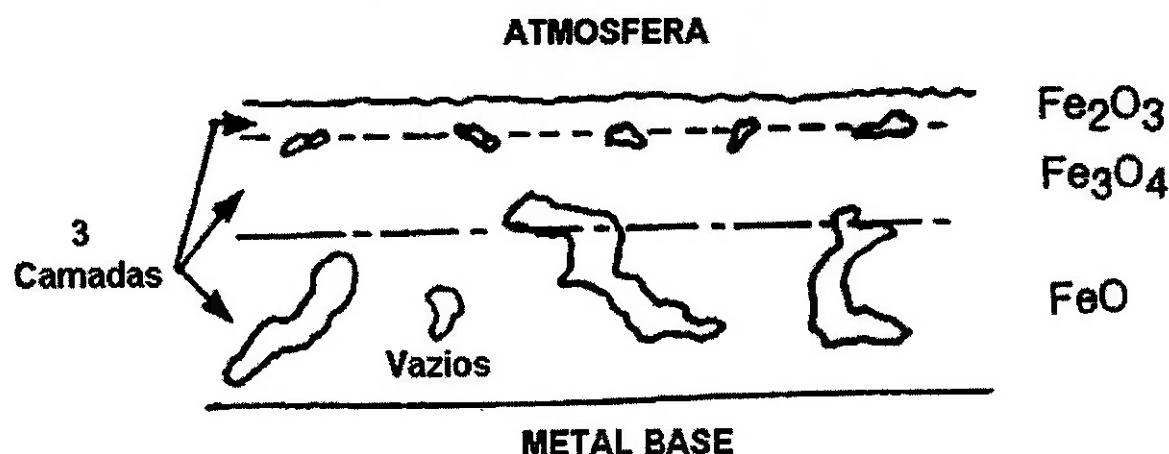


Figura 2—Esquema ilustrativo da formação da carepa

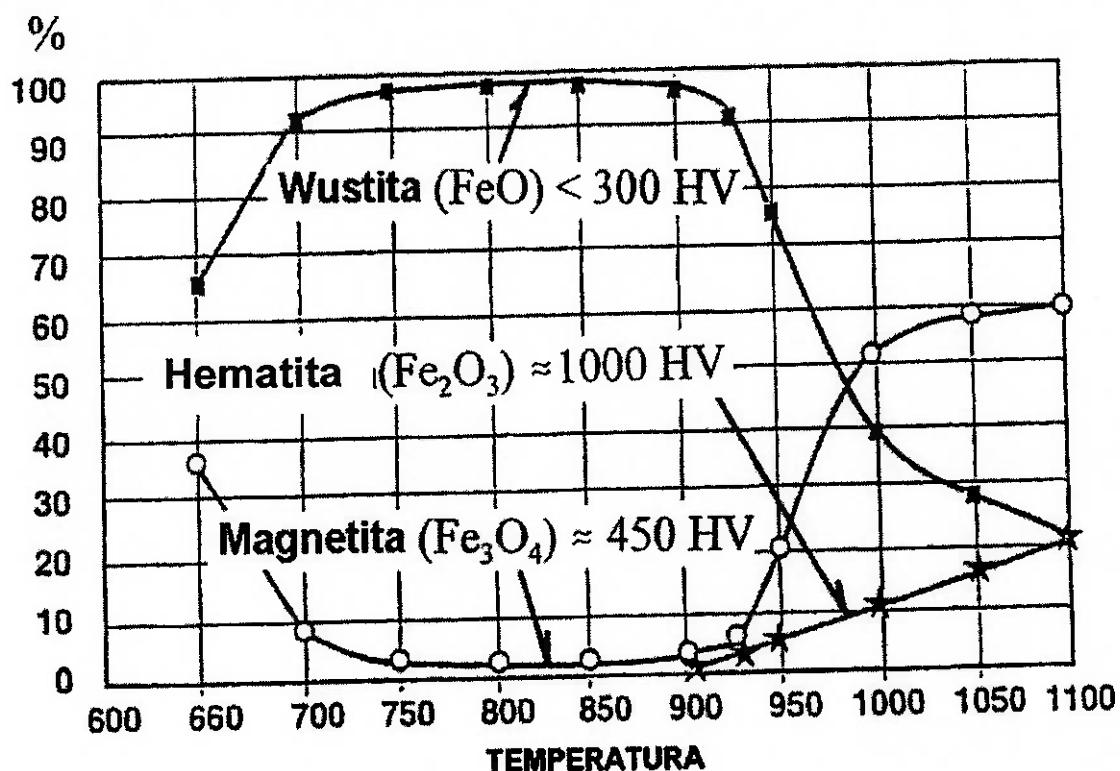


Figura 3 – Porcentagens aproximadas de FeO, Fe₂O₃, e Fe₃O₄

4.2.2 Crescimento da camada de carepa durante a laminação a quente

Devido a camada de óxido formada durante a laminação a quente ser dúctil a altas temperaturas, não fraturar e ser bem aderente ao substrato, pode-se dizer que a espessura da carepa reduz na mesma proporção que é realizada na tira.

Desta forma o processo de laminação a quente apresenta ciclos contínuos de redução e crescimento de espessura de carepa. A redução ocorre na cadeira de laminação e o crescimento entre cadeiras, este último também pode ser notado após a última cadeira até o início das cortinas de água. Devido a grande redução de

temperatura superficial, variações na espessura de óxidos durante o resfriamento podem ser desconsiderados.

Assim, a espessura da carepa, até o início do bobinamento, é função basicamente da quantidade de redução aplicada no laminador, velocidade de processo e temperatura superficial da tira.

Assumindo estas considerações pode-se entender o comportamento da carepa durante o processo de laminação a quente. A figura 2 mostra os ciclos de crescimento e redução de espessura dos óxidos de ferro, durante os passes de laminação¹⁰.

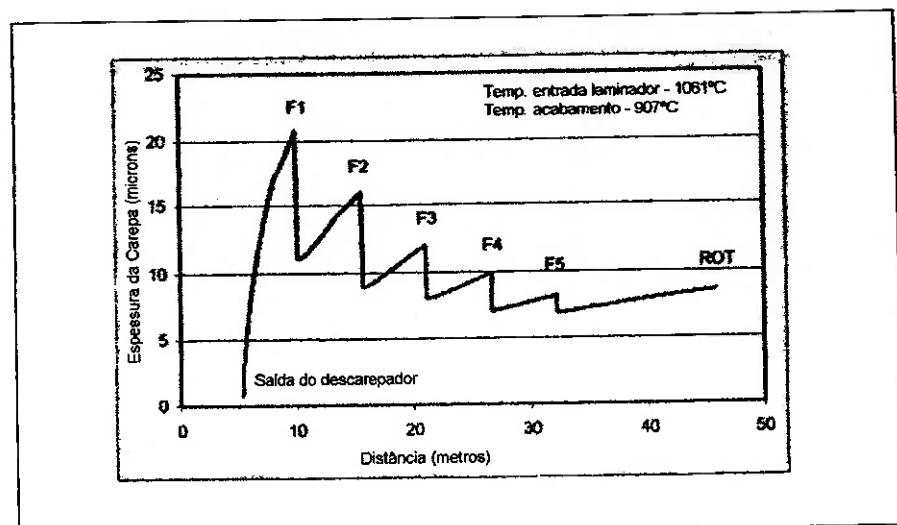


Figura 4 – Crescimento da carepa durante a laminação¹¹

Caso as temperaturas de bobinamento sejam mais baixas, tanto o gradiente de temperatura quanto a disponibilidade de oxigênio possuem papel importante na formação da carepa. No caso de temperaturas de bobinamento entre 520°C e 660°C a região de maior crescimento de carepa se encontra entre 60 mm e 120 mm das

bordas, onde a concentração de oxigênio é maior que no centro e a temperatura é maior que nas bordas.

O processo de formação da carepa tem início através da formação do filme óxido na superfície metálica e avança pela difusão do oxigênio em óxido de ferro. Essa difusão é descrita por uma relação geral, que é exponencial com a temperatura e parabólica com o tempo¹¹.

$$M = \frac{a\sqrt{t}}{\rho} \exp\left[\frac{-b}{T + 460}\right] \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{w} + \frac{1}{L} \right) \quad \text{eq. (1)}$$

Onde:

h, w, L = espessura, largura e comprimento da placa (polegadas).

M = massa de perda da carepa por unidade de peso da placa em toneladas / ton

t = tempo escamação

T = temperatura da carepa °F

ρ = densidade da carepa, libra /polegada³

a, b = constantes que dependem do tipo de aço e atmosfera do forno.

Para carepas feitas de aço carbono com 0,30% C, residente no forno com 100% de combustão no ar, $a = 31,7$ e $b = 22,8$. A escamação mais abrangente para o modelo de laminação de tiras descrito por Browne.¹²

4.2.3 Efeito da carepa na Atmosfera

Em relação à oxidação de aço contendo os gases na atmosfera em torno do aço podem ser divididos em dois grupos:

1. Gases comburentes: oxigênio (O₂), vapor d'água (H₂O) e dióxido de carbono (CO₂).
2. Gases redutores: monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂).

Os processos de redução e oxidação são reversíveis e descritos pelas seguintes fórmulas: ¹³



4.2.4 Efeito dos elementos de liga sobre a formação da carepa

A taxa de formação de carepa pode ser modificada na presença de elementos de liga e residuais presentes no aço. O efeito de vários elementos sobre a carepa é descrita resumidamente abaixo.

Carbono – O carbono se difunde na interface óxido metal onde se forma o monóxido de carbono (CO) como resultado da reação química do ferro com o óxido

de ferro (FeO). A presença de monóxido de carbono na interface do óxido metal forma um vazio entre a carepa e o metal, reduzindo a aderência da carepa. A formação desse vazio sem o aumento das trincas na carepa reduz a taxa de descamação .Porém a altas temperaturas e altos teores de carbono, a pressão do gás nesses vazios eleva as trincas da carepa. Isso aumenta o contato do metal com a atmosfera do forno aumentando a taxa de formação da carepa.

Manganês - Está presente no aço como elemento de liga e produz um efeito negligenciável sobre as propriedades de oxidação¹⁴.

Cromo - O efeito do cromo sobre a taxa de oxidação é insignificante quando ela está presente em aço como um elemento residual. Em aços inoxidáveis, cromo, forma uma camada protetora de óxido de cromo Cr₂O₃ que oferece resistência à oxidação. O processo de formação desta camada protetora é muitas vezes referido como o processo de passivação¹⁵.

Alumínio - Alumínio também não é eficaz quando presentes em aço em um nível residual. Como elemento de liga, que forma uma camada protetora resistente ao óxido de alumínio Al₂O₃ que reduz a taxa de oxidação.

Silício – O Silício reage com o oxigênio difundindo no aço na região da interface óxido metal e precipitados gerando óxido de silício (SiO₂). As partículas de SiO₂ formam uma fase separada de fayalita Fe₂SiO₄, que retarda a taxa de oxidação, esta fase se funde a 1171° C (2140 ° F). Com a formação da fase líquida, fundida o efeito protetivo desaparece e a taxa de oxidação aumenta bruscamente¹⁶. Os aços acalmados ao silício possuem 0,25% Si. Porém isso é suficiente para formar ilhas de silicatos na película de carepa, o que aumenta a aderência da carepa no aço.¹⁴.

Níquel - A difusão coeficiente de níquel em ferro é baixa, é concentrada numa camada fina em torno da carepa. Essa camada reduz a taxa de escamação. No entanto, o ataque resultante de ligas de níquel no óxido torna a carepa mais aderente, que dá origem a excesso de carepa em laminados. Este problema torna-se mais grave com o aumento do teor de níquel¹⁴.

Cobre - Similar ao níquel, o cobre é rejeitado na interface do óxido -metal. No entanto, o cobre não cria uma carepa mais aderente como problema juntamente com o níquel. Quando o teor de cobre na interface óxido metálica excede 8%, em separado, a fase rica em cobre é precipitada. Esta fase funde em 1096 ° C (2005 ° F) e constitui uma camada entre o metal e o óxido o que causa defeitos superficiais a quente¹⁴.

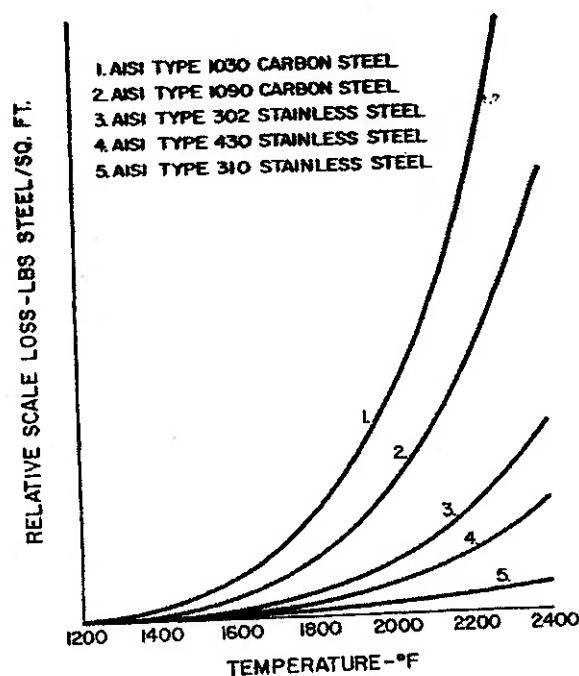


Figura 5– Perdas relativas de carepa em aços com altas temperaturas¹⁰.

4.2.5 Influência nas temperaturas de bobinamento(TB), acabamento (TA) e taxa de resfriamento nas características da carepa.

Um bom entendimento da relação entre a estrutura da carepa, das condições de resfriamento e temperatura de bobinamento é fundamental para se justificar a performance das tiras laminadas a quente durante a decapagem.

Após o bobinamento e durante o resfriamento, é possível que a camada de óxido continua a crescer, mesmo que pouco oxigênio esteja disponível.

Em temperaturas acima de 570°C a wustita sempre estará presente, abaixo deste valor se torna instável e outros diferentes tipos de óxidos podem se desenvolver dentro da camada original de wustita, dependendo das condições de resfriamento.

Caso a temperatura de bobinamento seja muito baixa, ou então a taxa de resfriamento seja muito elevada a maior parte da wustita fica retida, porém alguns precipitados de magnetita são formados, mesmo que a taxa de resfriamento seja muito alta, acima de 60°C/min.

Quando as taxas de resfriamento e temperaturas de bobinamento estão compreendidos em certas faixas, uma camada contínua de magnetita pode ser formada logo acima do substrato do aço, enquanto a maioria da wustita permanece retida.

Sob condições normais de operação, ou seja, altas temperaturas de bobinamento e baixas taxas de resfriamento, a maioria da wustita se transforma em uma mistura de magnetita/ferro eutetóide. Uma certa quantidade de precipitados de

magnetita e pequenas quantidades de wustita retida na interface aço/carepa são estruturas comuns de serem encontradas.

5. Proteção contra corrosão em Aços

A corrosão atmosférica nos aços é um processo natural e espontâneo resultante de reações químicas e/ou eletroquímicas, através do qual o ferro retorna ao estado de menor energia - óxidos de ferro - que provoca a deterioração do material gerando o produto de corrosão que é conhecido como ferrugem.

O ar atmosférico é composto basicamente de oxigênio, nitrogênio e vapor d'água, podendo ainda conter outros constituintes como gases e partículas, dependendo das atividades exercidas e dos fenômenos naturais envolvidos na localidade. Basicamente, podemos classificar a atmosfera como:

Atmosfera Rural: caracterizada por baixa concentração de poluentes (S e CO₂).

Atmosfera Marinha: caracterizada pela presença de cloretos, que variam em função da proximidade do mar.

Atmosfera Urbana: Caracterizada pela presença de diversos gases como SO₂, NO_x e CO₂.

Atmosfera Industrial: caracterizada pela presença de diversos compostos sendo os principais: Sulfeto (SO₂ e H₂S), cloreto, amônia, CO₂, etc.. dependendo da atividade industrial presente.

Atmosfera Mista: Onde se misturam as atmosferas industrial-urbana, marinha-urbana.

Os aços tornam-se mais resistentes a corrosão pela adição de elementos de liga, ou quando se faz o isolamento da superfície do metal com o meio corrosivo através de revestimentos metálicos, revestimentos inorgânicos (fosfatização, cromatização.) e revestimentos orgânicos (aplicação de tinta).

Durante o processo de produção de aço, em algumas fases do processo, sua superfície deve estar protegida com os fluidos de proteção temporária, também conhecido como óleos protetivos, que impedem que o material seja deteriorado quando ainda encontra-se sem qualquer isolamento.¹⁷

6. Decapagem

A decapagem é o mais comum de vários processos utilizados para remover a carepa de óxido da superfície. O termo refere-se à remoção química do material através da imersão em uma solução aquosa ácida. O processo teve origem no final do século 18 quando chapas finas de aço foram decapadas por imersão em cubas de vinagre. Grandes variações são possíveis no tipo, força e temperatura do ácido, soluções utilizadas, dependendo do tempo de imersão, bem como a espessura, a composição química do material e a natureza física da carepa.

No processo de decapagem cumprem-se as seguintes finalidades:

- Eliminar a camada de óxidos (carepa) para melhorar o aspecto da superfície da tira;

- Diminuir o coeficiente de atrito da superfície metálica quando submetida ao processo de laminacão a frio;
- Fazer oleamento da tira decapada, evitando uma posterior oxidação, bem como fazer lubrificação para melhorar a eficiência do processo de laminacão a frio (menor consumo de energia);
- Aumentar o peso das bobinas a frio, fazendo o agrupamento das bobinas laminadas a quente, por intermédio de solda;
- Acertar as bordas das tiras, por meio de tesoura rotativa de bordas (*Side Trimmer*). No nosso caso, atualmente estamos processando BNAP para a laminacão a frio, observando algumas restrições.
- Eliminar os defeitos da tira, tais como: Dobra, bolsas, borda serrilhada e outros, por meio de tesoura manual;
- Fazer inspeção da superfície da bobina, verificando o atendimento ou não da qualidade a que se destina;
- Gerar produto acabado, BQD (Bobina a Quente Decapada) e CFQD (Chapa Fina a Quente Decapada). Este último será processado na linha de tesouras da laminacão a quente.

As principais características do material decapado são:

- Aumento da vida útil, eliminando condições irregulares e promovendo uma superfície limpa no produto acabado.
- Permissão de uma boa junção ou aderência de revestimentos metálicos no material e aderência satisfatória quando uma pintura ou revestimento não metálico é usado.

- Eliminação da falta de uniformidade e superfícies irregulares durante a redução a frio.

6.1 Tipos de Decapagem

Industrialmente a operação de decapagem podem ser realizada através dos seguintes métodos abaixo¹⁸:

- *Push Pull* - Que consiste de uma desenroladeira, de dois a três pequenos tanques de processo, lavagem, secagem, oleamento e bobinamento. As bobinas são decapadas uma a uma o que permite uma enorme flexibilidade de operação e garante a facilidade de operação e manutenção. Como não há necessidade de acumuladores nessas linhas, essas linhas têm muito baixo custo de investimento e que são muito eficientes em termos de custos, porém esse processo nos dá uma baixa produtividade.
- Contínua – As bobinas de tiras laminadas a quente antes de serem decapadas são emendadas por uma solda de topo tornando o processo contínuo, uma vez que as mesmas possuem estações de acumulação de tiras antes de serem decapadas, o que torna o processo mais produtivo.

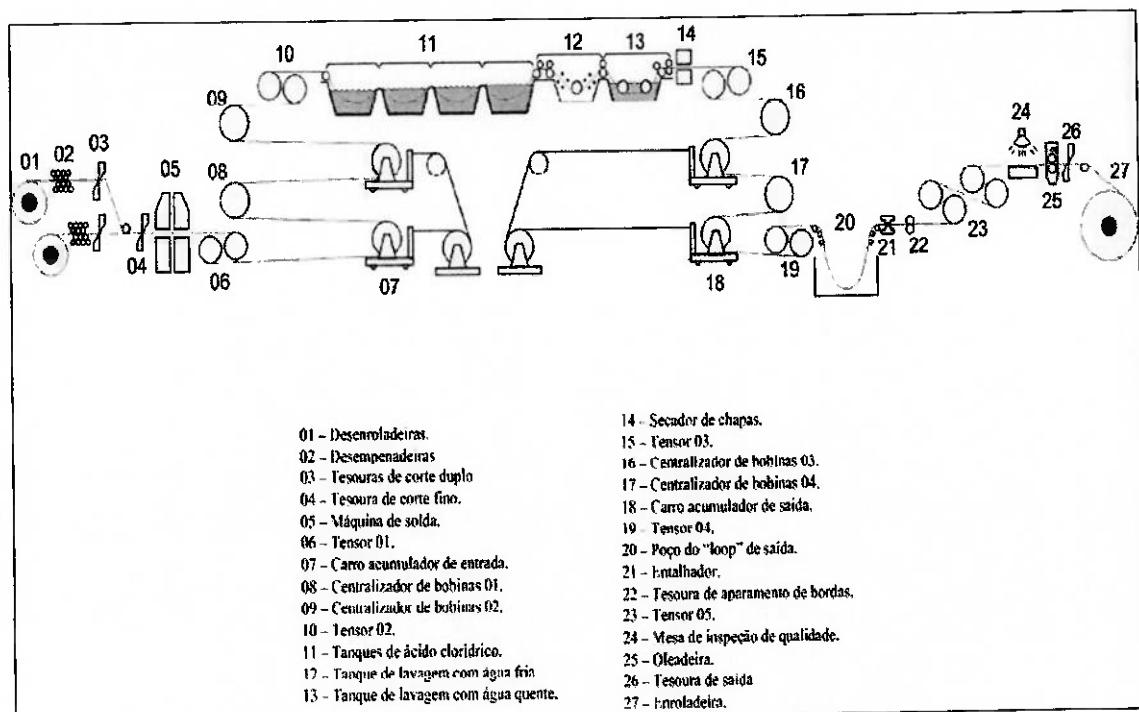


Figura 6– Lay out de uma linha de decapagem contínua

- **Acoplada (turbulenta)** – Neste caso o processo de decapagem é realizado em tanques rasos e com tensionamento da tira. Por sua vez o consumo de ácido é relativamente menor e a qualidade superficial é maior.

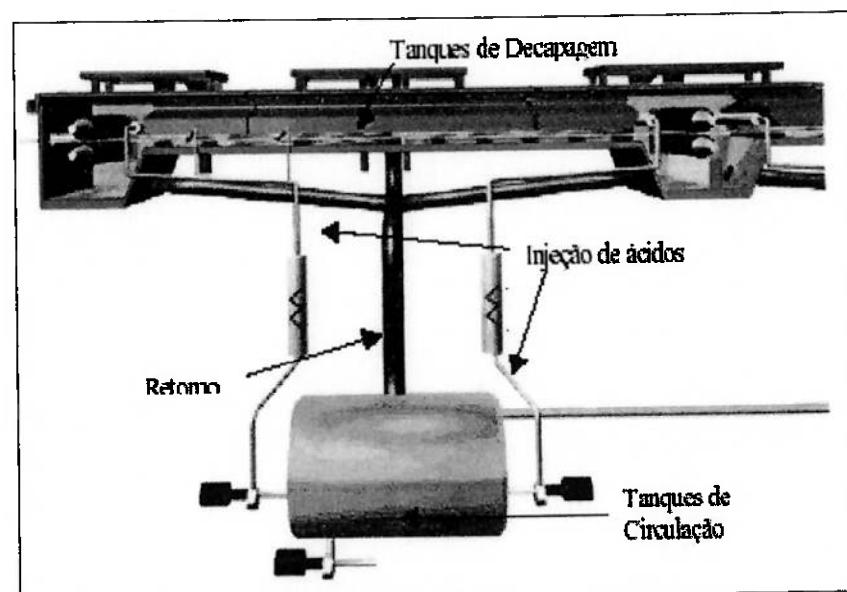


Figura 7– Lay out dos tanques de ácido de uma linha decapagem turbulentica

A remoção da carepa é realizada através do banho da tira em solução ácida.

Os principais processos de decapagem estão classificados nos itens a seguir.

6.1.1 Decapagem por ácido sulfúrico.

A ação do H_2SO_4 sobre os óxidos e o metal base ocorre seguindo as reações químicas abaixo:



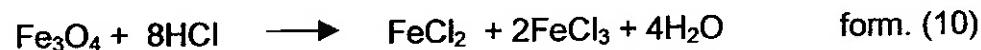
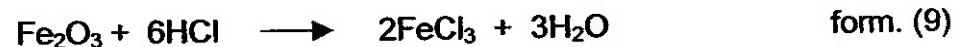
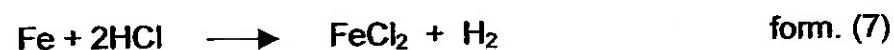
As camadas de Fe_2O_3 e Fe_3O_4 são relativamente insolúveis, entretanto o ácido pode penetrar através das fissuras na superfície da carepa e assim reagir com a camada mais solúvel que é FeO , o que facilita a remoção das camadas externas pôr desagregação. Para acelerar o processo de decapagem com este tipo de ácido é necessário uma previa quebra da carepa. A temperatura da solução decapante deve variar entre 95 a 100°C.

A comercialização do ácido sulfúrico normalmente é fornecida numa concentração de 93%, enquanto a do ácido clorídrico é fornecida em concentrações de 30 à 35 %. Uma vantagem de usar o ácido sulfúrico é a menor vaporização da solução decapante. Uma das desvantagens do ácido sulfúrico é quanto ao aspecto

superficial da chapa, principalmente quando se trata de aços alto carbono, bem como um efeito inibidor dos sais de ferro no banho sobre a solução de ácido sulfúrico ¹⁹.

6.1.2 Decapagem por ácido clorídrico.

A ação do HCl sobre os óxidos e o metal base ocorre seguindo as reações químicas abaixo:



O ácido clorídrico reage com todos os tipos de óxidos, não sendo portanto necessário o uso do quebrador de carepa como equipamento auxiliar numa linha de decapagem que utiliza este ácido alem de se trabalhar com velocidades elevadas e temperatura mais baixa (+/- 80°C)¹⁹.

ITEM	DECAPAGEM	
	Clorídrica	Sulfúrica
Eficiência na remoção da carepa	☺ fácil	☹ difícil
Aspecto superficial da tira	☺ ótima	☺ boa
Produtividade	☺ alta	☹ baixa
Custo de operação	☺ baixo	☹ alto

Tabela 1 - Quadro comparativo dos tipos de decapagem química

6.1.3 Outras misturas ácidas:

A excessiva contaminação do banho decapante é resultado de excesso de óleo na chapa de aço. Para evitar este problema, o aço oleado deve ser desengraxado antes de ser decapado. Logo em seguida ao decapar o aço, usa-se um agente inibidor na solução ácida para aumentar a eficácia e a eficiência do banho, reduzindo assim o tempo de imersão.

O ácido nítrico é utilizado geralmente nas decapagens de ácido inoxidável, que não é o caso de decapagens de aços carbono que opera com linhas químicas de ácido sulfúrico e/ou clorídrico.

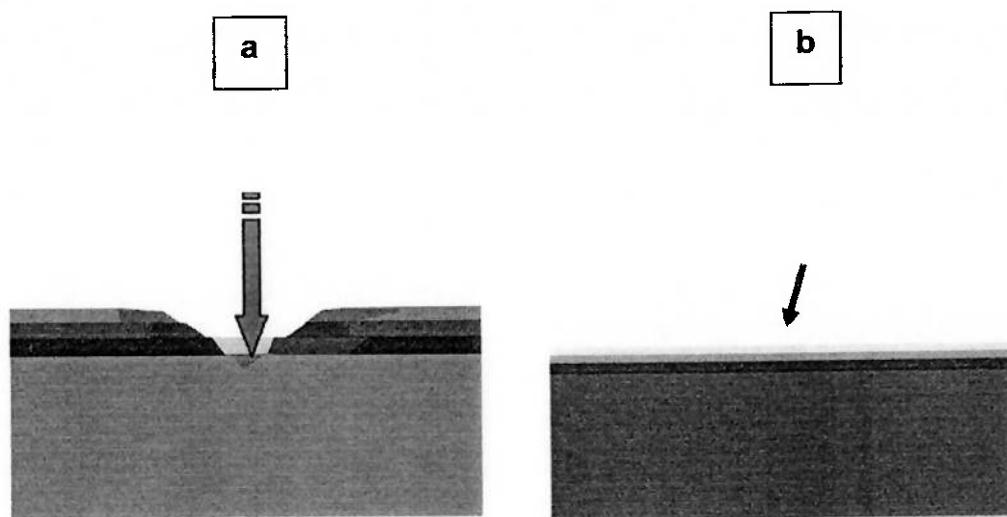


Figura 8- Detalhamento superficial da chapa decapada de acordo com os tipos de decapagem química. a) Decapagem Sulfúrica e b) Decapagem clorídrica.

Por se tratar de um ácido de maior afinidade química com o metal base, o ácido sulfúrico está sempre mais propenso a gerar defeitos inerentes como super decapado (corrosão excessiva na chapa) (fig. 4 a). Para evitar a corrosão ao metal é necessário o uso de produtos que inibam esta reação (inibidor)²⁰.

6.2 Descrição do processo Decapagem

As linhas de decapagem a serem estudadas no desenvolvimento do trabalho, são linhas do tipo clorídrica contínua e foram dimensionadas para remover a carepa da superfície da tira laminada a quente, de dimensões compreendidas entre 1,8 à

5,0 mm de espessura e de 700 a 1550 mm de largura em bobinas de até 15 toneladas.

6.2.1 Seção de Entrada

As bobinas são recebidas no equipamento com o eixo na vertical e são colocadas na ordem previamente estabelecida pela programação, através da ponte rolante no virador de bobinas, que por sua vez tombará as mesmas, para que sejam removidas pelo carro de bobinas.

O carro de bobinas irá então fazer o enfiamento da mesma no mandril da desenroladeira para se dar início a produção. O rolo quebrador de carepa é abaixado e com a ajuda da mesa de enfiamento, a ponta é encaminhada a desempenadeira. A desempenadeira puxa a tira até a tesoura transversal para que sejam cortados os defeitos da ponta da tira.

Logo após os descartes de pontas e defeitos, uma vez que a linha é contínua, as bobinas são unidas por uma solda que tem por objetivo evitar a interrupção do processo de decapagem e aumentar a produtividade das linhas seguintes.

O rolo quebrador de carepa, é um equipamento utilizado para evitar o aparecimento do defeito “quebra de superfície” na tira durante o desbobinamento e também com o objetivo de quebrar a camada de óxido facilitando o processo de decapagem.

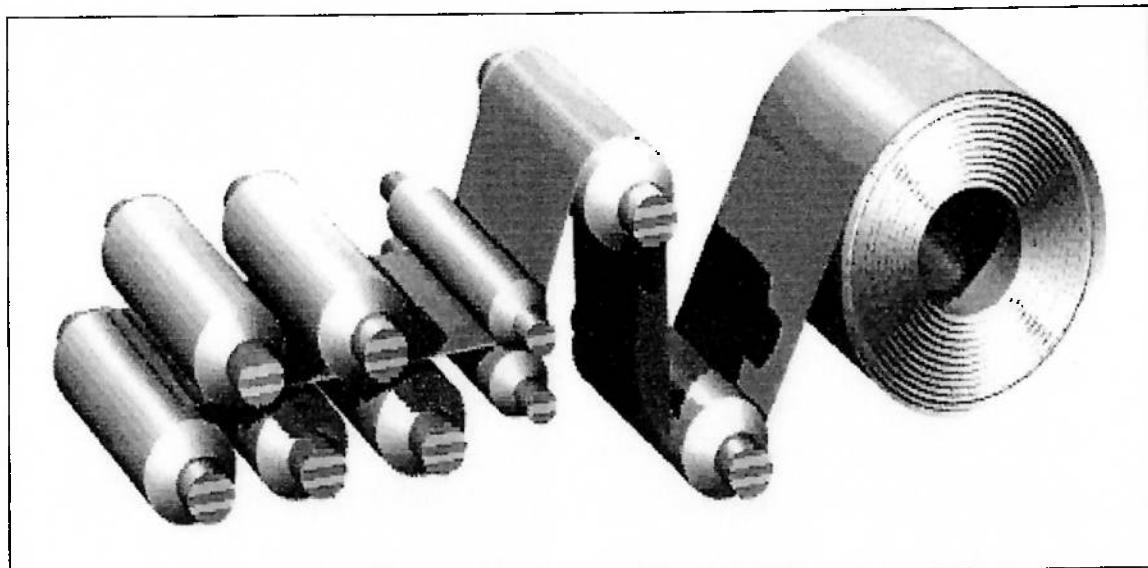


Figura 9 – Rolo quebrador de carepa e desempenadeira de entrada

6.2.2 Seção de Processo

Nessa seção estão localizados 4 tanques ácidos nos quais cada um com uma solução de ácido clorídrico de concentrações diferentes, onde o ácido caminha através de um sistema de cascata entre os tanques de recirculação do último para o primeiro tanque reduzindo a sua concentração, isto é, o tanque com a menor concentração de ácido, tanque nº1, é também o de maior concentração de ferro. Do tanque nº1 o ácido é encaminhado para a unidade de regeneração de ácido clorídrico. Cada tanque tem um sistema de trocadores de calor para aquecimento e controle da temperatura da solução.

Na saída do último tanque ácido está instalado um conjunto de rolos enxugadores, que tem como finalidade remover o ácido residual que está na chapa, para evitar a degradação da qualidade superficial da tira, pois originam defeitos

como oxidação, além de prejudicar processos posteriores a decapagem. Para evitar tais problemas é utilizado o sistema de lavagem. A deficiência ou mal funcionamento ocasiona defeitos como mancha de parada e degradando a superfície do material.

Além de defeitos, o sistema de lavagem também trás consequências ambientais decorrentes do consumo de água, que após lavar a tira torna-se ácida e inadequada para ser devolvida ao meio ambiente ou consumida, sendo necessário tratá-la.

O sistema de lavagem é dividido em duas seções, primeira e segunda lavagem. Na primeira lavagem a tira passa entre jatos de água tipo "Spray", na segunda lavagem a tira é mergulhada no tanque. As duas lavagens são feitas com água potável renovada para evitar o aparecimento de defeitos superficiais.

Logo em seguida a tira passa por um sistema de secagem para promove

Um sistema de exaustão coleta todos os fumos ácidos da linha e os encaminha ao lavador de gases para tratamento e posterior lançamento na atmosfera.

6.2.3 Seção de Saída

Após a secagem da tira a tira é inspecionada visualmente na face superior para a detecção de defeitos na superfície da chapa, logo em seguida a mesma passa por uma estação de aparmento lateral na largura da chapa conforme especificações do cliente.

Ao ser aparado o material passa por uma mesa de inspeção de qualidade na superfície superior da chapa para a detecção de defeitos, em seguida a chapa é oleada para proteção contra oxidação e novamente é enrolada na bobinadora para prosseguimento a etapa de laminação de tiras a frio.

6.3 Controles e variáveis do processo

Para ocorrer uma perfeita decapagem, três variáveis são de fundamental importância: velocidade, concentração do meio ácido e temperatura, pois a decapagem está diretamente ligada a um tempo de permanência da tira em um meio ácido com parâmetros pré-determinados.

Na Decapagem, a velocidade máxima de processo está limitada a 180 m/min. Existem procedimentos estabelecidos em relação ao tipo de aço que será processado, pois conforme já citamos anteriormente, de acordo com o processo utilizado na Laminação a Quente, a camada oxida será de mais difícil remoção, exigindo velocidade mais baixa.

No meio ácido os parâmetros estabelecidos são a concentração de ácido, cloreto ferroso e inibidor, como também a temperatura.

6.3.1 Concentração de Ácido e Cloreto Ferroso

Em períodos já estabelecidos, são coletadas amostras da solução ácida para determinação da concentração do banho, pois durante a continuidade do processo a tendência é a degradação do meio decapante, reduzindo o teor de ácido livre (ácido que não reagiu com o aço) e aumentando o teor de FeCl_2 (cloreto ferroso), daí a importância do controle destes parâmetros para não ocorrer a saturação. A adição de ácido é necessária para a garantia de eficiência do processo.

Como o processo de decapagem é formado por tanques, onde a solução ácida transborda entre eles em forma de cascata, a solução saturada sai pelo ladrão do primeiro tanque para um sistema de tratamento, denominado Regeneração de Ácido Clorídrico.

6.3.2 Concentração de Inibidor

Como já foi relatada anteriormente, a reação química $\text{Fe} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2$, onde o ácido tem uma preferência em reagir com o ferro, daí a importância da proteção do metal para evitar a super decapagem; por este motivo, é adicionado ao meio decapante, um produto denominado inibidor, em uma quantidade previamente definida, com o intuito de proteger o ácido e consequentemente reduzindo custo, pois desta forma a reação teoricamente ocorrerá apenas com os óxidos não degradando ou acarretando perda no produto.

Os Inibidores são adicionados ao banho decapante, a fim de:

- Minimizar o ataque ácido sobre a base metálica com perda excessiva de ferro.
- Evitar uma decapagem exagerada, o que contribui para a má qualidade superficial.
- Reduzir a pulverização de solução ácida resultantes da forma que o hidrogênio faz quando ataca o aço.
- Reduzir o consumo de ácido.
- Minimizar o risco de fragilização do hidrogênio.
- Ter efetiva inibição na dissolução do metal e na reação de evolução de hidrogênio;
- Não retardar a velocidade de decapagem;
- Ser efetivo a baixas concentrações e altas temperaturas;
- Ser termicamente e quimicamente estável;
- Ter boas características sulfactantes;
- Não afetar o processo de regeneração.

Portanto, um inibidor geralmente é adicionado à solução ácida para inibir ou diminuir o ataque ao próprio aço, permitindo preferencialmente o ataque aos óxidos de ferro. A decapagem da chapa é afetada por diversas variáveis, incluindo a composição química do aço, o tipo de aderência de óxidos de ferro, a concentração do ácido, a concentração de cloreto na solução, a temperatura solução ácida, a agitação do banho, o tempo de imersão da tira nos tanques com solução ácida, bem como a presença de inibidores¹⁹.

Para ajudar a controlar as concentrações de inibidor nas soluções da decapagem, os fabricantes de inibidores têm proposto a inclusão nas suas

formulações diversos materiais que podem ser utilizados como marcadores na determinação da concentração de inibidor. Um esquema envolveu o uso de corantes fluorescentes e análises colorimétricas. No entanto, devido a alterações na cor da tinta com o passar do tempo, esta abordagem não tenha sido satisfatória. Outra possibilidade é a inclusão de fosfatos ou ácido fosfórico, que pode ser detectado em qualquer solução decapante de ácido sulfúrico ou ácido clorídrico por procedimentos colorimétricos.

O valor de inibição de um inibidor é definido como se segue:

$$\% \text{ Inibição} = \frac{S-C}{S} \times 100$$

Eq. (2)

Onde:

S = Perda de massa por unidade de área (mg/cm^2) dos corpos-de-prova na solução sem inibidor;

C = Perda de massa por unidade de área (mg/cm^2) dos corpos de prova na solução com inibidor.

Geralmente, um bom inibidor deve ter eficiência superior a 92%.

É geralmente aceito que o primeiro passo para a ação de inibidores em soluções ácidas é a adsorção na superfície metálica. Assim a dissolução do óxido de ferro por camadas de ácido clorídrico não é significativamente reduzida, embora a capacidade de reação do ácido com a base do material metálico é fortemente diminuída. Quando as concentrações de inibidores estão muito abaixo dos níveis recomendados, a camada adsorvida de inibidor sobre a superfície do aço pode estar incompleta, o que pode resultar num ataque preferencial em áreas desprotegidas²¹.

Para ajudar a controlar as concentrações de inibidor nas soluções da decapagem, os fabricantes de inibidores têm proposto a inclusão nas suas formulações de diversos materiais que podem ser utilizados como marcadores na determinação da concentração de inibidor. Um esquema envolveu o uso de corantes fluorescentes e análises colorimétricas. No entanto, devido a alterações na cor da tinta com o passar do tempo, esta abordagem não foi comprovada de forma satisfatória. Outra possibilidade é a inclusão de fosfatos ou ácido fosfórico, que pode ser detectado em soluções de qualquer decapagem de ácido sulfúrico ou ácido clorídrico por procedimentos colorimétrico. A inclusão de sais de lítio com posterior análise por ativação neutrônica ou adsorção atômica também foi experimentada.

6.3.3 Temperatura

Quanto ao calor trocado com o meio externo as reações são classificadas em endotérmicas e exotérmicas.

A endotérmica precisa de calor para ocorrer e a exotérmica libera calor durante a ocorrência da reação.

Tanto este parâmetro, como os já citados, são tão importantes para o processo, que de acordo com o tipo de material que será processado, poderão ser alterados visando uma qualidade mais nobre no produto. As variáveis de temperatura são monitoradas nos tanques de processo, tanques de controle da água de lavagem da tira e tanques de secagem.

6.4 Variáveis Secundárias

6.4.1 Lavagem

A lavagem perfeita da tira, após a etapa de decapagem é de suma importância para evitar posterior oxidação. Por este motivo é que existe o sistema que geralmente é provido de sprays que borrifam água contra o fluxo da tira eliminando todo o resíduo ácido.

Com o intuito de garantir a limpeza da tira, são controlados o pH destas águas após a lavagem, evitando a degradação da qualidade do produto, bem como a contaminação dos equipamentos subsequentes como o sistema de emulsão do Laminador de Tiras a Frio.

É importante, ressaltar, que nesse setor, ocorrem vários itens rotineiros de manutenção que serão citados adiante, com o objetivo de evitar os defeitos causados por manchas na superfície da tira a qual possibilita desvio do material.

6.4.2 Secagem

A secagem após a lavagem é outro setor de fundamental importância. Consiste no sistema de sopro de ar isento de umidade a $\pm 90^{\circ}\text{C}$ sobre a tira para a secagem do produto. Os rolos do sistema de secagem não poderão ter cortes, desgastes ou furos, que possibilitem a passagem de água, evitando defeitos como mancha de secagem.

6.4.3 Oleamento

Este processo é o último antes do bobinamento da tira para a formação do rolo. O objetivo é a aplicação de óleo, através de *spray* sobre rolos que entram em contato com a tira, contribuindo para um oleamento uniforme da tira decapada para que a mesma fique protegida contra oxidação.

6.5 Variáveis Terciárias

O primeiro processo ocorrido na Decapagem é a preparação da bobina a ser decapada. Este processo consiste em dois sistemas distintos. São eles:

6.5.1 Descarte do Defeito Inerente ao Processo no Laminador de Tiras a Quente:

É o seccionamento das pontas defeituosas objetivando garantir uma condição ideal do material para a Laminação a Frio, evitando ruptura por irregularidade da matéria prima ao mesmo tempo em que prepara as pontas para garantir uma perfeita soldagem. Qualquer defeito que possa comprometer o processo, a qualidade da solda, as especificações do produto (espessura e largura) ou ainda que apresente intensidade e/ou localização (na borda ou próximo a ela), deve ser descartado, principalmente o que se localiza na região da solda

6.5.2 Soldagem entre bobinas

Tem por objetivo evitar a interrupção do processo de decapagem e aumentar a produtividade das linhas seguintes. A soldagem de topo é um processo por resistência elétrica que consiste basicamente de um ciclo de aquecimento chamado centelhamento seguido da aplicação de elevada pressão entre as partes das pontas a serem soldadas denominadas recalque no qual as partes a unir são progressivamente aproximadas, de modo que o fluxo de corrente elétrica ocorre de forma concentrada através dos pontos de contato, também denominadas de pontes metálicas formados entre as superfícies a soldar. A passagem localizada de corrente pelas diminutas pontas metálicas leva a uma elevada densidade de corrente nesses locais, o que causa uma rápida elevação da temperatura, seguida de fusão e ejeção da ponte na forma de gota do metal fundido. Subsequente à ejeção da ponte fundida, pode ocorrer a formação de pequenos arcos (descargas elétricas) entre as superfícies a unir, o que também contribui para o aquecimento das peças. Esses dois efeitos (ejeção de gotas de metal fundido e abertura de pequenos arcos, dão origem ao nome do processo centelhamento. Ao se atingir uma distribuição adequada de temperatura, é aplicada uma pressão elevada entre as partes a unir, denominada recalque. Através do recalque, obtém a eliminação da interface entre as peças, consolidando assim a operação de soldagem. Além disso, a ação do recalque promove a completa expulsão do metal fundido e das impurezas, acumulados nas superfícies de solda durante o centelhamento, resultando em juntas limpas e de elevada qualidade.

Após o processo de soldagem, a próxima etapa é a rebarbagem, que consiste na retirada do excesso do material, ocorrido durante a soldagem através de um conjunto de dois blocos de navalhas os quais raspam o cordão da solda concretizando o acabamento com uma penetração no metal em aproximadamente 0,08 mm.



Figura 10 – Processo de soldagem entre bobinas – a) soldagem, b) rebarbagem e c) bobinas com a solda rebarbada.

7. Utilidades

Os principais insumos para o processo das Decapagens são: ácido, vapor, água, óleos, etc. O ácido é o mais importante, pois sem ele não ocorreria a limpeza da tira. O consumo médio mensal nas Decapagens da Cosipa atualmente está em torno de 3,0 kg/t na Decapagem 1 e 2,9 kg/t na Decapagem 2. Isto equivale ao consumo médio de 268.000 kg/mês. Vale ressaltar que durante o processo de Decapagem 1 com ácido sulfúrico o consumo médio está na faixa de 8,4 kg/t.

O vapor é o segundo insumo de maior importância, pois para ocorrer a perfeita reação, conforme já foi citado anteriormente, é necessário o aquecimento da

solução. O consumo médio mensal das duas Decapagens da Cosipa gira em torno de 4.559 t/mês. Anteriormente à reforma da Decapagem 1 este consumo era de 6.643 t/mês, isto porque a injeção de vapor na Decapagem 1 era diretamente no banho ácido e com a reforma ficou semelhante a Decapagem 2, com aquecimento indireto através de trocador de calor.

A água utilizada como lavagem da tira, refrigeração em sistema de trocador de calor, lavagens de gases do sistema de exaustão também sofreu redução significativa após a reforma da Decapagem 1. Graças a desativação do processo de tratamento de solução ácida (Recuperação de Ácido Sulfúrico), pois hoje é feito através da Regeneração de Ácido Clorídrico, juntamente com a Decapagem 2. Este processo utiliza apenas 9.000 l/h no máximo de água com as duas Unidades funcionando para 180 m³/h do antigo processo.

Os insumos como óleo são consumidos indiretamente ao processo. No caso dos óleos, os mais utilizados são: óleo de laminação, óleo protetivo e óleo hidráulico.

- Óleo de Laminação – é utilizado para proteger o material após a decapagem até o processo seguinte que é a Laminação a Frio. São consumidos 25.000 kg/mês nas duas linhas, sendo 0,13kg/t aproximadamente na Decapagem 2 e 0,45 kg/t na Decapagem 1 em média. O maior consumo na Decapagem 1 dá-se pelo fato do sistema de bobinamento desta ser da forma de calandra, conforme já citado nas características de processo, não ocorrendo um bobinamento tensionado, exigindo mais lubricidade na tira para evitar deslizamento no laminador.
- Óleo Protetivo - é utilizado para proteger os produtos decapados direto para o cliente externo. O consumo médio mensal está em torno de 7.500 kg nas duas linhas, sendo 0,45 kg/t na Decapagem 1 e 0,45 kg/t na

Decapagem 2. O consumo é superior ao óleo de laminação por se tratar de materiais que vão direto para o mercado, e muitas vezes ficam estocados por vários meses consecutivos, até o processo no cliente.

- Óleo Hidráulico – este óleo não faz parte do processo, porém é de fundamental importância para que haja um bom desempenho das máquinas. O consumo médio mensal nas Decapagens 1 e 2 está na faixa de 3.000 litros.

A título de informação vale ressaltar que além da importância da redução para baixar custos, estão sendo elaborados trabalhos com o objetivo de colaborar com o meio ambiente que é uma das principais metas da Cosipa.

8. Regeneração de Ácido Clorídrico

No processo de Decapagem à medida que ocorrem as reações a solução ácida tende a perder o poder reativo devido a saturação por cloreto ferroso e a redução da concentração de ácido, conforme reação abaixo:



A concentração desta solução é constantemente corrigida com ácido, puro ou ácido regenerado fabricado neste processo através da matéria-prima “cloreto ferroso mais água” e mais uma concentração mínima de ácido clorídrico em torno de 2,5% em volume ($\text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{HCl}$).

A correção com ácido puro só é executada na falta do ácido regenerado, daí a importância, deste equipamento pois além de reduzir custo evita a contaminação do meio ambiente, utilizando o resíduo ácido da Decapagem para a fabricação do insumo principal deste processo.

A finalidade deste processo é o reaproveitamento da solução saturada com cloreto ferroso e desta fabricar o ácido clorídrico, como também como sub-produto o Fe_2O_3 (óxido férrico) que nada mais é que o minério de ferro a 99% de pureza. Este óxido é vendido pela Cosipa e parte deste volta para o processo metalúrgico para auxiliar na produção de aço.

9. Metodologia e resultados obtidos

Para se avaliar os dados obtidos durante o processo foram seguidas as seguintes etapas:

- Dividir a máquina por áreas.
- Identificar as áreas críticas.
- Análise das prioridades das anomalias
- Resultados e discussões.

9.1 Dividir a máquina por áreas

Em primeiro lugar analisaremos o equipamento no total e dividiremos a linha da decapagem em três áreas distintas: Entrada, centro e saída.

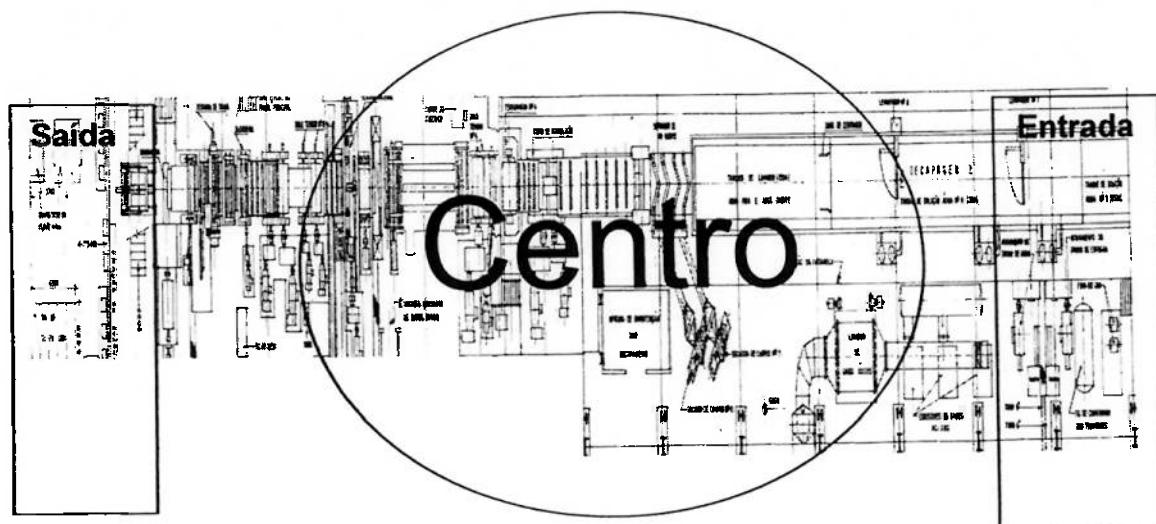


Figura 11 – Divisão da Linha de Decapagem por áreas

A região do centro será a referência para o desenvolvimento dos resultados e para cada tipo de material há uma limitação quanto a temperatura do banho, e acidez do banho, velocidade de processo em razão das suas características.

9.2 Identificar as áreas críticas

A área crítica da Decapagem localiza-se na região dos tanques ácidos onde se há uma necessidade de expor o material a um maior tempo no banho ácido, diminuindo a velocidade de processo para a remoção completa da carepa. As variáveis que influem para um processamento eficiente na decapagem são a temperatura do banho decapante e a concentração de ácido.



Figura 12 – Identificação do principal gargalo na linha de decapagem

9.3 Análise das prioridades das anomalias

Conforme o gráfico 1, foram levantados os dados de análise das anomalias do processamento do aço de grão não-orientado e as mesmas foram classificadas conforme as ocorrências causadas na decapagem conforme ordem de ociosidade.

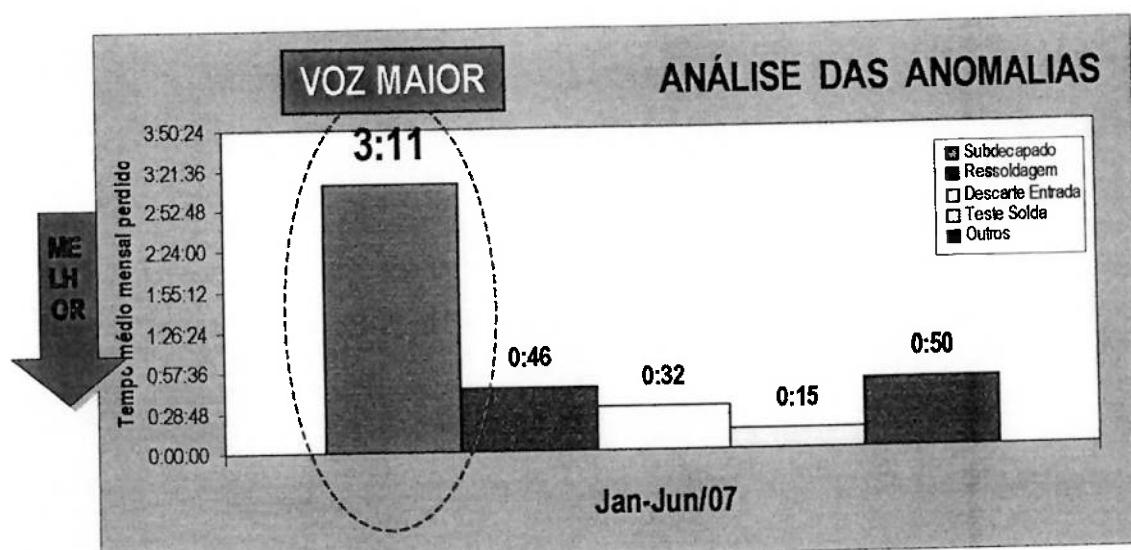


Gráfico 1 – Análise das prioridades das anomalias encontradas no processo da decapagem de aços elétricos de grãos não orientados.

Ao analisar as anomalias num determinado prazo para o processamento do aço de grão não – orientado na Decapagem foi montado o diagrama de causa e efeito em cima da voz maior com a função eliminar ou reduzir a ocorrência da anomalia.

Anomalia	5 Porquês					Ação
	01	02	03	04	05	
Defeito SUBDECAPADO	Tempo de permanência do material no banho ácido insuficiente (pouco tempo)	Para material fins elétrico há a necessidade de maior tempo de permanência (baixa velocidade)	Carepa é mais aderida ao metal base neste material	Características química do material (alto teor de silício) e física (TB alta)	Para atender as propriedades de fins elétricos solicitado pelo cliente	Aumentar a concentração ácida e temperatura para aumentar a velocidade de processo sem gerar o defeito de SUBDECAPADO

Tabela 2 – Diagrama de causa e efeito da prioridade da anomalia

9.4 Resultados e discussões

Em função dos problemas encontrados no processamento de aços elétricos de grãos não orientados, resolvemos aumentar os parâmetros de temperatura e acidez do banho para que haja uma melhora na velocidade da tira decapada em função de adequações feitas na temperatura de bobinamento e composição química do material.

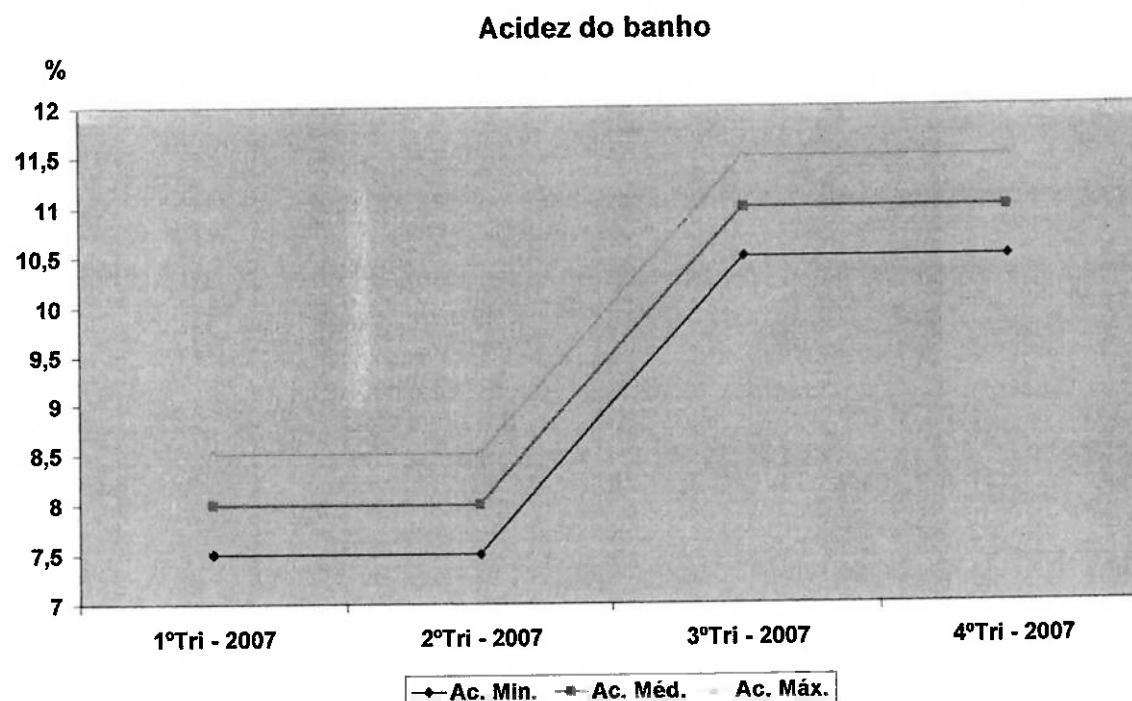


Gráfico 2 – Concentração de ácido no banho

A concentração de ácido clorídrico considerada em uma decapagem é chamada de ácido livre (HCl_{livre}). Este ácido é todo aquele que não está combinado, ou seja, disponível para reagir.

O aumento da concentração de ácido não levará a um aumento significativo na velocidade de decapagem, como pode ser visto na figura 13.

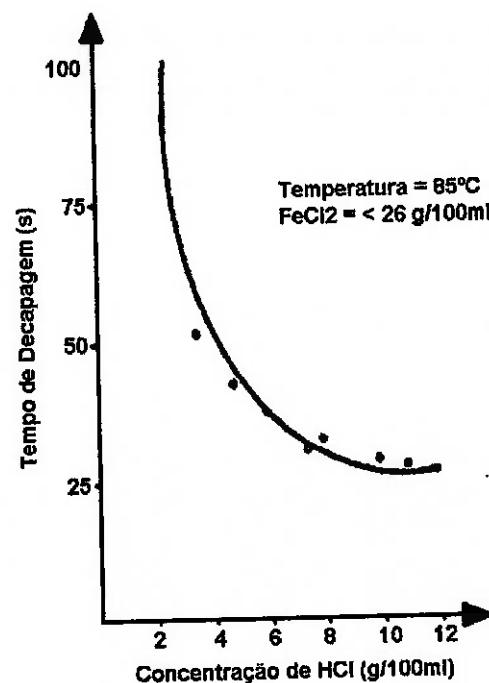


Figura 13 - Influência da concentração de HCl livre no tempo de decapagem²².

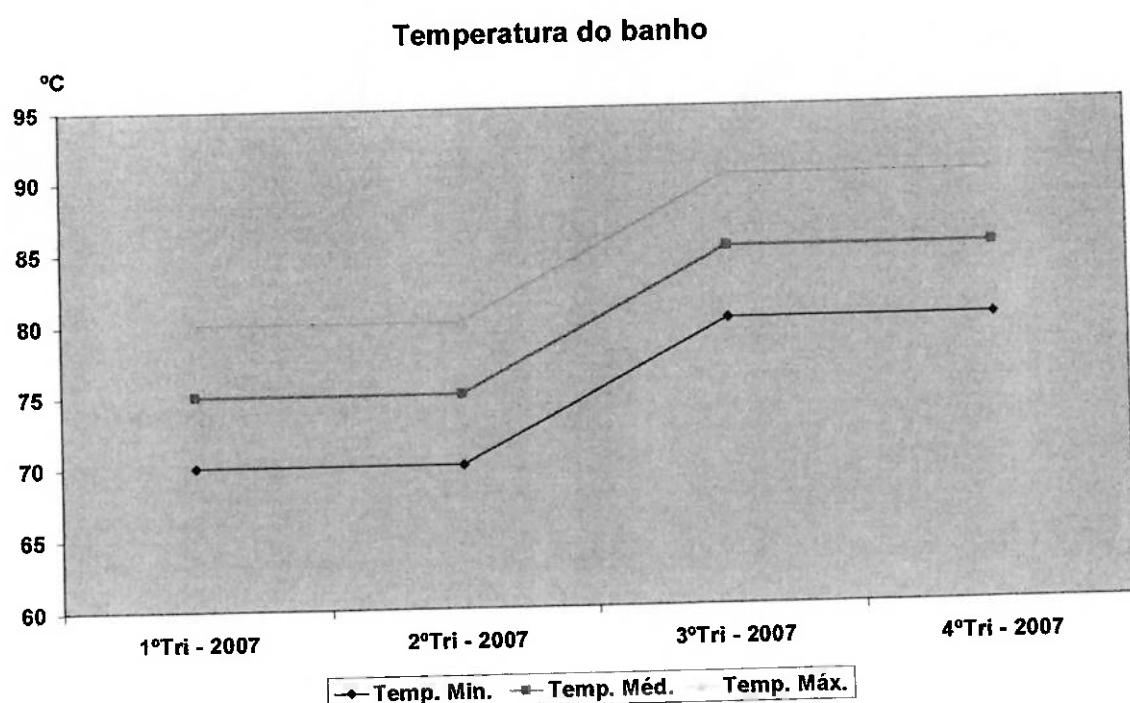


Gráfico 3– Variação na temperatura do banho da solução decapante

O maior inconveniente do aumento contínuo de temperatura é a quantidade de solução que se perde por evaporação, tornando inviável, ou muito dispendioso

manter o processo de decapagem a temperaturas muito próximas à da ebulação da água conforme figura 14.

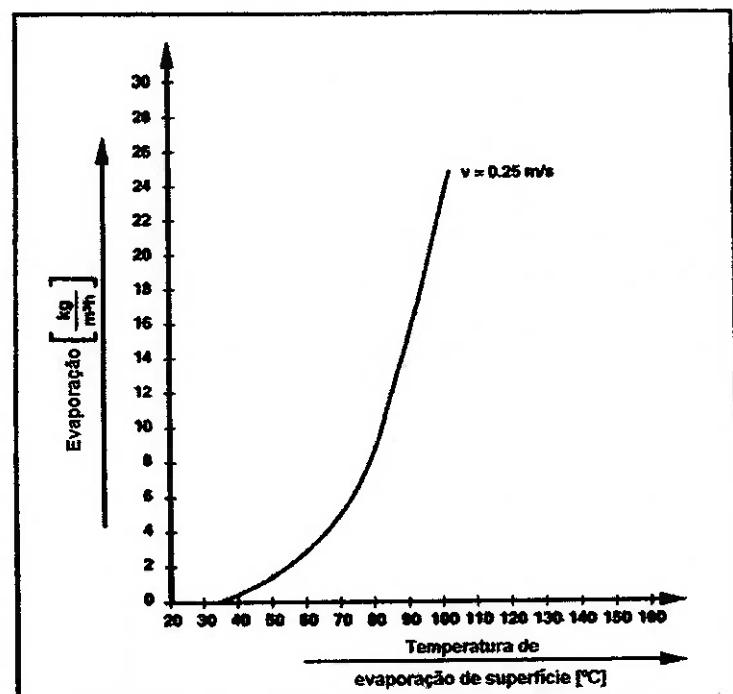


Figura 14- Evaporação do líquido como função da temperatura da superfície de evaporação e com velocidade do ar acima do líquido constante em 0,25m/s. Temperatura do ar, 20°C; umidade, 30%²³.

Percebe-se que qualquer aumento da temperatura da solução acima de aproximadamente 80°C implica em perdas acentuadas de solução. Quanto mais próxima a temperatura de evaporação da temperatura de ebulação da água, maior a perda.

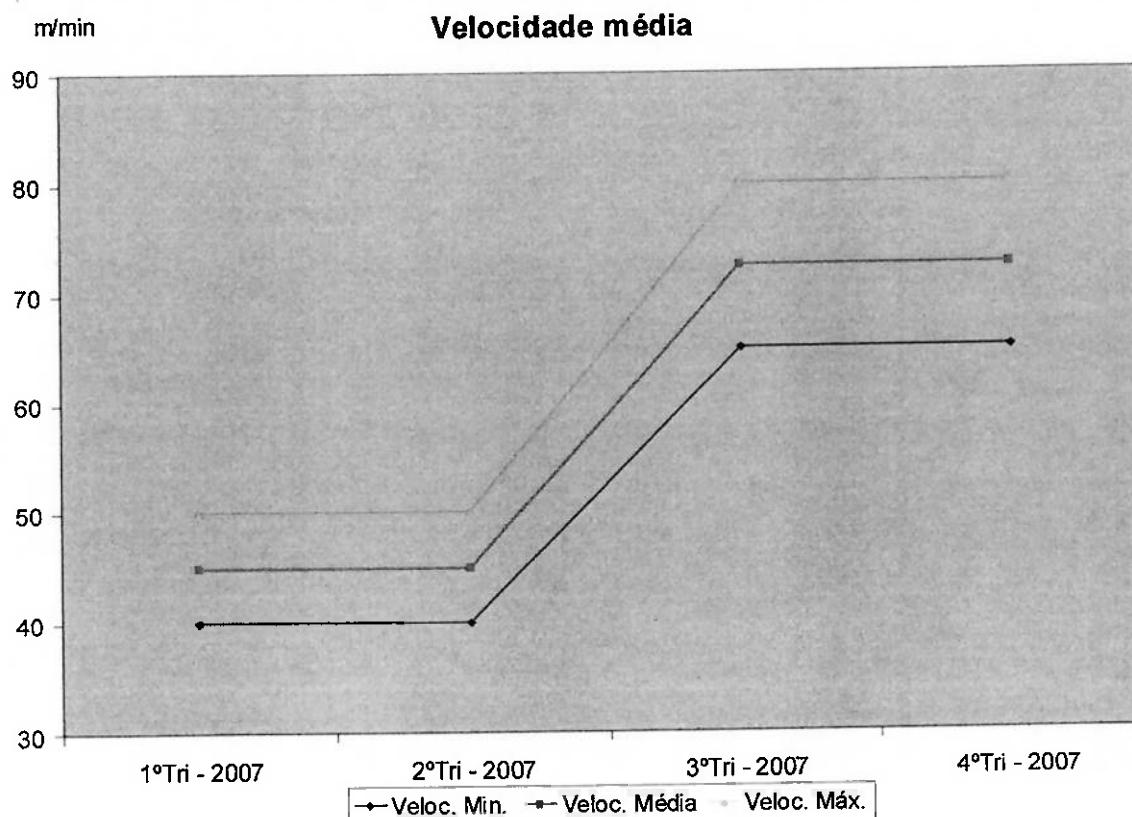


Gráfico 4 – Variação da velocidade média do processamento do aço elétrico de grão não orientado em função dos parâmetros de acidez e temperatura do banho.

A velocidade da tira dentro dos tanques contribui, até um determinado limite, para diminuir o tempo de decapagem. A figura , mostra curvas determinadas em laboratório, simulando uma linha contínua. A velocidade zero é para o banho parado. Nota-se que para a solução a determinada temperatura, por exemplo 66°C, o tempo de decapagem decresce rapidamente até a tira atingir uma velocidade de 75mpm. A partir daí o tempo permanece constante por mais que se aumente a velocidade. Para diminuí-lo é necessário aumentar a temperatura da solução.

Pelo gráfico, para as temperaturas de 66°C e 93°C, os tempos decrescem, respectivamente, de 1,7 e 2,7 vezes, em relação ao banho parado (velocidade zero). Baseado nessas informações, acredita-se que numa decapagem contínua que

processa aços baixo carbono, não se deve trabalhar com velocidades inferiores a 70mpm.

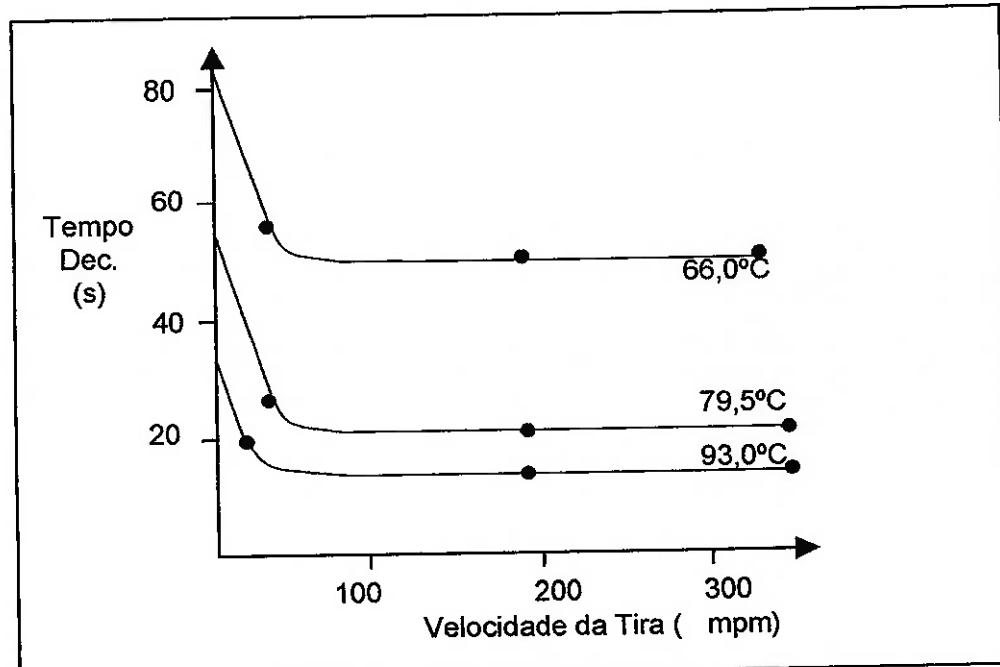


Figura 15 - Efeito da velocidade da tira no tempo de decapagem em solução de HCl de um aço baixo carbono laminado a quente ²².

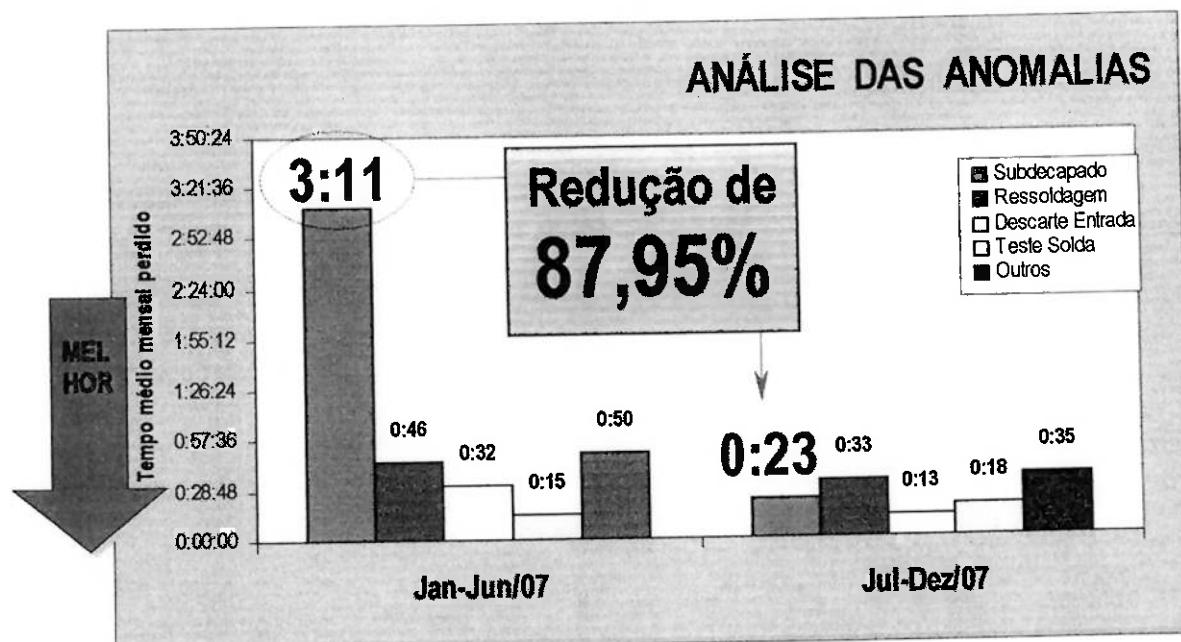


Gráfico 5 – Análise das anomalias antes e após os resultados encontrados no processo

Em razão dos estudos feitos com a parte teórica e prática, através com as mudanças dos parâmetros de temperatura e acidez do banho além de se obter uma melhora na velocidade de processo reduzimos de forma considerável a maior anomalia encontrada no processo que é o defeito subdecapado conforme mostra o gráfico 5. Isso nos mostra que tivemos melhor eficiência na decapagem para aços elétricos de grãos não orientados.

10. Conclusões

A seguir são apresentadas as seguintes conclusões do presente trabalho:

O processo melhorou de acordo com o aumento da temperatura do banho em 13% para se evitar uma perda por evaporação e concentrações de ácido no banho em 40% pois valores superiores a este implicam num alto consumo de ácido para um ganho desprezível da velocidade. Além disso a maior anomalia decorrente do processo foi reduzida em 87,95%.

A contribuição dada com a execução dos estudos dos parâmetros de banho na linha de decapagem foi um aumento na velocidade da linha em 25% contribuindo para um aumento na produtividade do aço elétrico de grão não orientado.

11. Sugestões para futuros trabalhos

A presente monografia permite relacionar alguns temas para pesquisas futuras, são elas:

- Caracterizar (composição, espessuras, morfologia e dissolução) do tipo de carepa que se forma durante a laminação a quente do aço de grão não orientado.
- Influencia do processo de resfriamento na formação da carepa
- Uma forma mais eficaz de correlação entre os parâmetros de acidez e temperatura do banho.

12. Referências Bibliográficas

- ¹ BATISTA, G.N.; Villegas, E.A.; Oliveira, I.T.. Influência de parâmetros de processo na Decapagem de Aços IF: Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e revestidos, Vitória, 2003.
- ² J. SCHENEIDER "Non Oriented Electrical Steels: Present Status And Trends": Soft Magnetic Materials, 98ed., Gorham / Intentech Consulting sem páginas 1998.
- ³ HUTCHINSON, W.B., Development and Control of Annealing textures in Low Carbon Steels: Int. Met. Re., 29 – 1984.
- ⁴ LANDGRAF, F.J.G.. A evolução do mercado dos materiais magnéticos no Brasil: In: Metalurgia & Materiais, v.55, n.483, p.624, jan.. 1999.
- ⁵ Werner, F. E. "Energy – Efficient Steels for Motor Laminations" Journal of Material Engineering and Performance: v.1, p227-234, 1992.
- ⁶ LANDGRAF, F.J.G.; TAKANOHASHI, R.; CAMPOS, M.F.. Tamanho de grão e textura dos aços elétricos de grão não-orientado: Textura e relações de orientação, v.2, p.211-246., 2003.

-
- ⁷ CUNHA, M. A. Paolinelli, S. C. Effect of the annealing temperature on the structure and magnetic properties of 2% Si steel: Apresentado no Congresso de Estruurologia, Tiradentes, 2001.
- ⁸ SANTOS, A. A., CHAGAS, C. F., RODRIGUES C. F., Análise e Projeto de Sistemas de Descarepação Hidráulica: XXXVI – Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM, Belo Horizonte, MG, 1999, p. 327-324.
- ⁹ GINZBURG, V. B. Metallurgical Design of Flt Rolled Steels: USA 2005, p. 490 – 492;
- ¹⁰ COOK, E. A and RASMUSSEN, K.E., "Scale-Free Heating of Slabs and Billets": AISE Yearly Proceedings, 1970, p. 175-181.
- ¹¹ CHEN, R.Y.,YUEN, W.Y.D. Effects of finishing and coilling temperatures on the scale structure and picklability of hot rolled strip: *Iron and Steelmaker*, v.27, n.4, p.47-53, apr. 2000
- ¹² BROWNE, K. N. "Modeling Scaling and Descaling in Hot Strip Mills": International Mechanical Engineering Conference and Exposition, p. 1-12; USA 1995.
- ¹³ FISHER, A. J., "Furnace Atmosphere": AISE Yearly Proceedings, 1937. p. 131 – 139.

¹⁴ SACHS, K. and Tuck, C. W. "Surface Oxidation of Steel in Industrial Furnaces," Reheating for Hot Working: Iron and Steel Institute, Publication nº111, London, 1968, pp. 1-17.

¹⁵ LULA, R. A . Stainless Steel: ASM International, Materials Park, OH, 1986, p. 129-130.

¹⁶ HAFFE, K., Oxidation of Metals: Plenum Press, New York, 1965.

¹⁷ MONTEIRO, B.O.; RENÓ, R.T.; FURTADO, E. Caracterização de regiões oxidadas em tiras Laminadas a Frio: Congresso Anual DA ABM, 55, 2000, Rio de Janeiro, 2000, p. 742-755.

¹⁸ KUEBLER, G., Pushing for Pickling Productivity, Metal Producing, Vol. 30 (nº9), 1992, p 28-31.

¹⁹ ASM Metals HandBook Volume 5 - Surface Engineering: 1994; p. 160-184

²⁰ CEOLIN, P.O.; Transformação da decapagem 1 de ácido sulfúrico para ácido clorídrico: XXXVIII Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba: ABM. 2001. p. 307-319.

²¹ FESER, R., FRIEDRICH, A . and SCHELDE, F., The influence of long term use of Inhibitors in Hydrochloric Acid Baths on Hydrogen induced stress corrosion cracking, p-1-9.

²² GONÇALVES, J. O., MACHADO, G. O. FERRAZ, A. J. Avaliação das condições operacionais das soluções de decapagem. Seminário sobre Laminação da ABM, 1985, São Paulo, p. 5-8.

²³ DELWIG, F.W., PEMPERA, F.G. Pickiling of strip using controlled turbulence. Steel Technology International, London, p. 220-224, 1994.