

DESENVOLVIMENTO DE CANTONEIRAS A572 PARA ATENDER SOLICITAÇÃO DE MERCADO DE TORRES DE TRANSMISSÃO*

Denise Freire Duarte¹
Izabelle Lannes Salgueiro Ferreira²
Livia Lopes de Oliveira Goulart³
Rafael do Nascimento Santos⁴
Taciana Rezende Pereira⁵

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo adequar às características superficiais e mecânicas dos perfis ASTM A572 G60 para atender uma solicitação específica das indústrias de fabricação de torres de transmissão. A solicitação consiste em um ensaio do “achatamento”, que proporciona ao produto um tensionamento e uma deformação com um ângulo de aproximadamente 150°. A metodologia utilizada neste trabalho foi DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar). Esta ferramenta é utilizada para melhoria de processos. Através desta ferramenta foi possível identificar as principais variáveis de processo de Aciaria e Laminação, o que possibilitou a determinação de um plano de ação direcionado às causas raízes. Com a implementação do plano de ação, obteve-se melhorias significativas na qualidade superficial e interna do material, como por exemplo a redução no nível inclusionário da classe 4 para a classe 3.

Palavras-chave: ASTM A572 G60; DMAIC; torres de transmissão

CORNER A572 DEVELOPMENT TO SERVE TRANSMISSION TOWERS MARKET REQUEST

Abstract

This study aimed to suit the surface and mechanical properties of ASTM A572 G60 profiles to meet a specific request of manufacturing transmission towers industries. The request consists of a test of the "flattening", which gives the product a tensioning and deformation at an angle of approximately 150°. The methodology used was DMAIC (define, measure, analyze, improve and control). This tool is used to improve processes. Through this tool it was possible to identify the main Steelmaking and Rolling Mill process variables, which allowed the determination of an action plan aimed at root causes. With the implementation of the plan it was gave significant improvements in material quality such as reduction in inclusion level of 3 to 4.

Keywords: ASTM A572 G60; DMAIC; transmission towers

- ¹ Engenharia de Produção, Bacharel, Jovem Engenheira, Gerência de Aciaria, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.
- ² Engenharia Metalúrgica Bacharel, Engenheira de Processo, Gerência de Laminação a Quente, Universidade Federal Fluminense, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.
- ³ Engenharia Metalúrgica, Bacharel, Engenheira de Processo, Gerência de Aciaria, Universidade Federal Fluminense, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.
- ⁴ Engenharia Metalúrgica, Engenheiro de Processo, Gerência de Qualidade e Gestão, Universidade Federal Fluminense, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil.
- ⁵ Engenharia Metalúrgica, Engenheira de Produto, Gerência de Qualidade e Gestão, Universidade Federal Minas Gerais, Votorantim Siderurgia, Resende, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as principais razões para a utilização de torres de aço são a crescente demanda do sistema de telecomunicação e a expansão das linhas de transmissão de energia. Visando atender este atraente mercado de torres, a Votorantim Siderurgia desenvolveu uma linha de perfis (cantoneiras) de acordo com a Norma ASTM A572 G50 e G60 (2007). [1]

O desenvolvimento deste trabalho se fez necessário devido à dificuldade em atender a um novo requisito solicitado por um cliente do mercado de torres de transmissão. O principal requisito solicitado foi a execução de um teste de “achatamento” das cantoneiras à um ângulo de 150° para simular a presença de defeitos superficiais e internos ao produto.

O presente trabalho teve por objetivo adequar os processos de aciaria elétrica e laminação a quente para atender esta solicitação.

A metodologia utilizada neste projeto foi o DMAIC, esta ferramenta vem sendo muito utilizada nas empresas, na área de melhoria de processos. Através desta ferramenta foi possível identificar as principais variáveis de Aciaria e Laminação, o que possibilitou a determinação de um plano de ação direcionado às causas raízes. O principal desafio deste projeto era suprir a necessidade dos clientes de torres de transmissão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Devido aos inúmeros problemas com reclamações de clientes e alto índice de devolução de produtos, a empresa inseriu este projeto no planejamento estratégico para o ano de 2015.

A metodologia utilizada neste projeto foi o DMAIC conforme etapas evidenciadas a seguir:



Na etapa de definição, ficou evidenciado a necessidade de ter uma equipe multidisciplinar, composta por técnicos e engenheiros das áreas de Aciaria, Laminação e Qualidade.

O desenvolvimento deste projeto foi considerado importante para organização devido seu impacto ao negócio por tratar de um cliente estratégico com alto volume de compra.

Na fase de análise de dados, foi realizado um levantamento histórico das reclamações de clientes e número de devoluções de produtos não conformes. No ano de 2014 foram recebidas 59 reclamações do produto cantoneira por diversos tipos de problemas, com incidência maior em incrustação de escória e metálica. O gráfico a seguir evidencia o histórico de reclamações formalizadas pelo cliente estratégico.

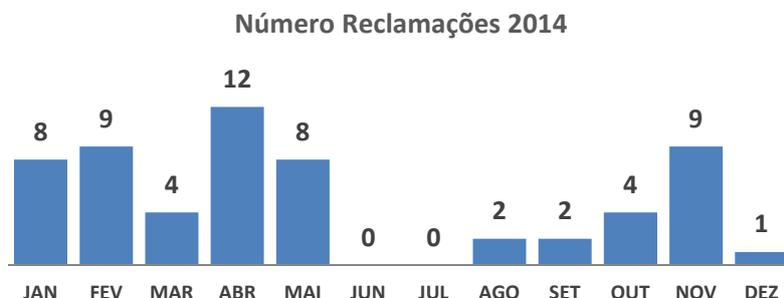


Figura 1 – Histórico de reclamação de clientes

Foram recebidos 20 lotes (1445t) de devolução de produto em 2015.

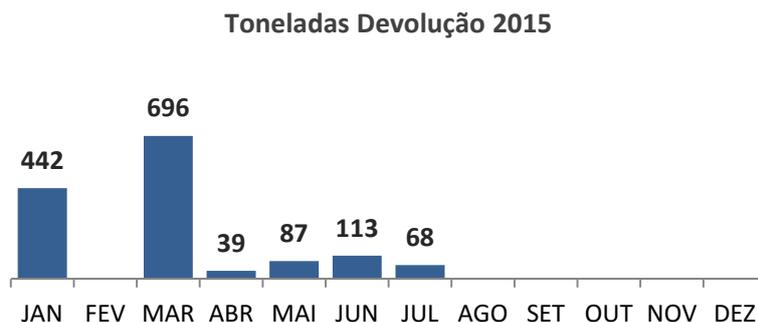


Figura 2 – Histórico de toneladas devolvidas

A seguir, são evidenciadas duas reclamações de defeito superficial encontradas pelo cliente em seu processo de fabricação causado por incrustações de escória e metálica, de acordo com análise metalográfica realizada no laboratório de metalografia da Votorantim Siderurgia.

RELATÓRIO METALOGRAFICO Nº 473 -14		
Solicitante - Josiane de Lourdes / Eder Caldeira Responsável - Salvador Mafra Filho Metalógrafos - Giuliane Casali / Gustavo Sena		DATA DE ENTRADA 24/09/2014
		DATA DE EMISSÃO 25/09/2014
ASSUNTO / CLIENTE	Análise RC 201369526]	
PRODUTO / CÓDIGO	CANT 90 X 8 A572 G60/NBR 7007 AR415 12M	6079871
CORRIDA(S)	1000056089	
OBJETIVO	Analisar causa e origens dos defeitos.	
TON. FORNECIDA / RECLAMADA	23,989 t	11,965 t
PARECER		
Com base na amostra recebida a reclamação e procedente, porque foram constatados defeitos originados devido a presença de escória na região do defeito.		



RELATÓRIO METALOGRAFICO Nº 472 -14		
Solicitante - Josiane de Lourdes / Eder Marquezeni Responsável - Salvador Mafra Filho Metalógrafo (a) - Giuliane Casali / Gustavo Sena		DATA DE ENTRADA 24/09/2014
		DATA DE EMISSÃO 25/09/2014
ASSUNTO / CLIENTE	Análise da RC 201369481	
PRODUTO / CÓDIGO	CANT 100X10 A572 G50/NBR 7007 AR350 12M	6000236
CORRIDA (S)	2000043524	
OBJETIVO	Analisar causas e origens de defeitos reclamados pela cliente.	
TON. RECEBIDA / TON. RECLAMADA	20,209 t	7,053 t
PARECER		
Com base na amostra recebida a reclamação é procedente, porque foram constatados defeitos superficiais do tipo incrustação metálica originada por resíduos de oxicoarte.		



Figura 3 – Análise metalográfica de amostras do produto reclamado

Após recebimento destes materiais com defeitos o cliente solicitou a execução de um teste de “achatamento” das cantoneiras a um ângulo de 150° para simular a presença de defeitos superficiais e internos devido a falha do material em seu processo durante abertura de abas.

De acordo com solicitação, este ensaio simularia através da ocorrência de fissuras e trincas à existência de defeitos intrínsecos ao material, evitando falhar em seu processo de fabricação de torres de transmissão.

A solicitação do ensaio de achatamento foi realiza-lo por uma prensa hidráulica e uma amostra de 20cm comprimento retirada do produto após laminação. As amostras deveriam ser comprimidas até que se obtivesse um ângulo de 150° de abertura de abas sem surgimento de trincas, conforme a seguir, simulando assim o processo industrial do cliente de abertura de abas.



Figura 4 – Teste de achatamento de amostras de cantoneiras

Após a identificação do problema, foi realizado brainstorming conforme a seguir, para listar possíveis variáveis de processo com influência nos defeitos encontrados no produto que pudessem levar a falhas do material no processo industrial de abertura de abas realizado pelo cliente.

BRAINSTORMING	
Número	Variável
X ₁	Flotação de inclusões
X ₂	Reoxidação do aço
X ₃	Injeção de Al
X ₄	Presença de óleo nos moldes
X ₅	Relação Mn/S
X ₆	Relação Mn/Si
X ₇	Presença de PPM H ₂ O no óleo
X ₈	Tempo de rinsagem
X ₉	Solidificação aço
X ₁₀	Mix de sucata
X ₁₁	Vida útil de lingoteira
X ₁₂	Defeito de corte
X ₁₃	Escória de FEA, FP e Molde
X ₁₄	Inspeção final
X ₁₅	Raio interno do passe acabador
X ₁₆	Resfriamento forçado do leito de resfriamento
X ₁₇	Marcas de endireitamento

Figura 5 – Levantamento de causas

Levantadas as possíveis causas, foram realizadas análises de *esforço x impacto* pela equipe de trabalho a fim de definir as variáveis críticas e elaboração das ações para mitigar o problema.

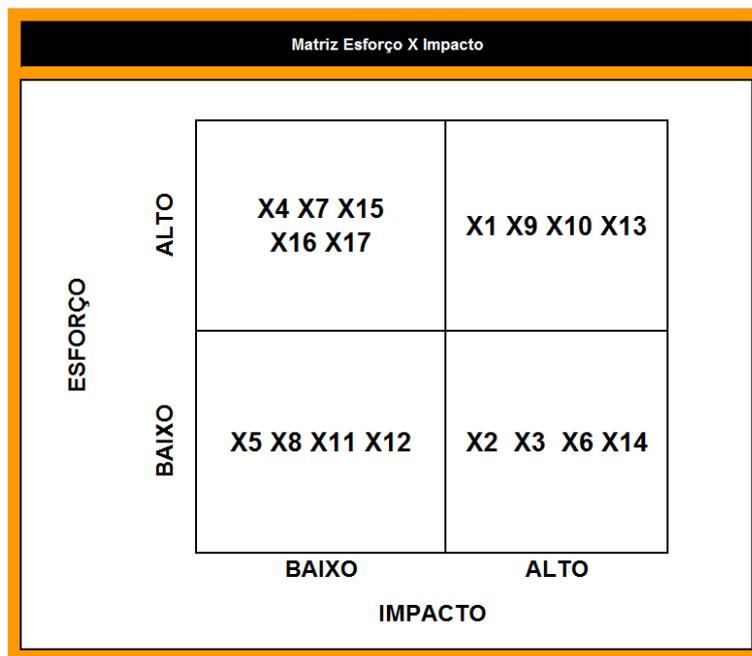


Figura 6 – Matriz esforço x Impacto

As variáveis definidas como críticas foram as que apresentaram maior impacto no processo e menor esforço na sua eliminação:

- X₂ – Reoxidação do aço
- X₃ – Injeção de alumínio
- X₆ – Relação Manganês/Silício
- X₁₄ – Inspeção final

Após identificação das variáveis críticas ao processo, foram evidenciados problemas relacionados e definidas as ações.

X₂ – Reoxidação do aço:

Foi implantado o sistema de selagem por Argônio do jato de aço para protegê-los de reoxidação durante o processo de lingotamento contínuo a fim de reduzir o nível de inclusões - o que pode gerar defeitos no produto laminado. O sistema consistia em uma estrutura chamada “caneco” na qual recebia através de mangueiras injeção de Argônio e formava-se em suas paredes uma cortina protetora no jato de aço desde a válvula do distribuidor ao molde.



Figura 7 – Sistema de proteção contra reoxidação do aço no lingotamento contínuo

X₃ – Injeção de Alumínio

Foram instalados suportes para a centralização da injeção de Alumínio no jato de aço para melhorar a eficiência da desoxidação, desta forma reduzindo a

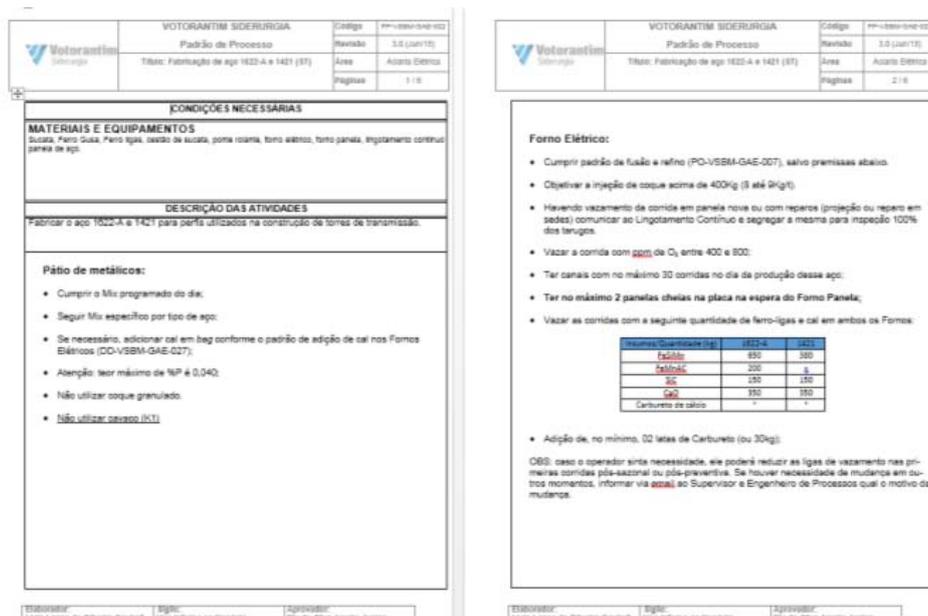
probabilidade de ocorrência de poros. Foram também recalculados e reestabelecidos os parâmetros dos valores setados para injeção de Alumínio.

X₆ e X₅ – Relação Manganês/Silício e Manganês/enxofre

Foram recalculados e inseridos nos padrões de processo fabricação do aço parâmetro de relação Mn/Si > 3,3 pois quando esta relação é menor que este valor temos uma probabilidade maior de formação de escória dentro do molde, com isto a geração de defeitos superficiais no tarugo e produto laminado. Para valor de relação manganês/enxofre foi estabelecido valor maior que 25, a fim de minimizar a formação de sulfetos de baixo ponto de fusão que pudessem gerar trincas e aberturas nos laminadores.

X₁₄ – Inspeção final tarugo

Foram estabelecidos critérios de inspeção para segregação de tarugos com possíveis defeitos físicos originados de lingotamento. Os padrões operacionais foram revisados no que diz respeito à corridas com ocorrência de eventos não desejáveis, eventos esses que foram: corridas que lingotaram com nível de aço baixo no distribuidor; falha na injeção de Alumínio; formação de escória no molde e corrida viscosa. Também foram estabelecidos critérios de inspeção para corridas com e sem eventos, sendo feita inspeção em 100% (4 faces do tarugo) nas corridas com eventos e 25% (1 face) nas demais corridas. Além disso, foi estabelecida rotinas de auditorias de processos de fabricação do aço.



Elemento	Quantidade (kg)	1622-A	1421
Alumínio	400	300	
Si	150	150	
CaO	150	150	
Carbureto de cálcio	-	-	-

Figura 8 – Padrão operacional

Além das ações com foco nas variáveis críticas de processo com maior impacto e menor esforço, verificamos a necessidade de atuar em um segundo momento nas outras variáveis de processo, definidas durante o brainstorming:

X₁ – Flotação de inclusões

Foi inserido nos padrões de processo a utilização de agitador eletromagnético “Stirrer” para uma melhor flotação de inclusões e conseqüente limpidez do aço, padronizando seu uso sempre nos minutos finais antes do envio da panela para o lingotamento contínuo.

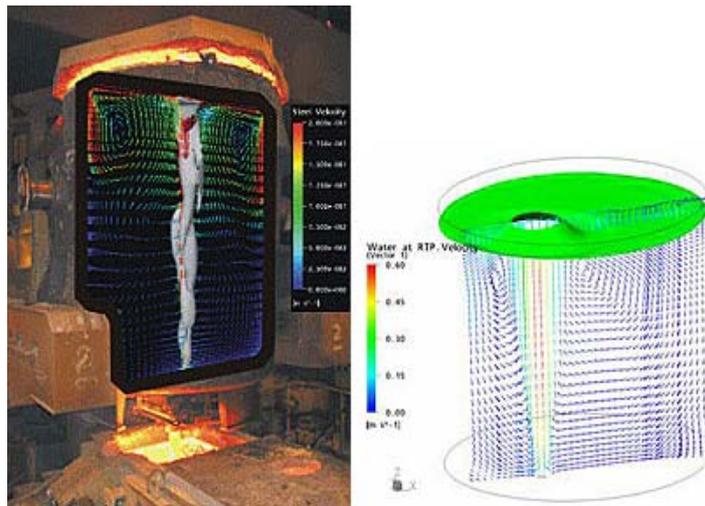


Figura 9 – Agitador eletromagnético

X₉ – Processo de solidificação aço

Foi inserido padrão de processo de lingotamento com utilização de válvula CNC de 17mm máximo para se ter um melhor controle de velocidade de lingotamento, desta forma equilibrando a refrigeração e solidificação do aço, reduzindo a segregação do soluto e possível geração de defeito nos laminadores.

X₁₀ – Mix de sucata

O mix de sucata para o aço deste material foi completamente modificado, aumentando o percentual de carga com maior qualidade e retirando e/ou reduzindo os tipos de sucata com alto teor de contaminantes e impurezas, a fim de melhorar a qualidade do material. A principal mudança foi estabelecer limites técnicos para sucatas com % elevado de residuais para os quais a aciaria possui ou não processos de refino, são eles: P, S, Cu, Sn, Cr.

X₁₃ – Escória de Forno Elétrico, Forno Panela e Molde

Foram instalados novos flanges nos moldes, padronizado a preparação de tampas com maior área livre de massa refratária a fim de evitar a soltura de material não metálico e seu deslocamento para o interior do molde. Também foram padronizadas trocas periódicas dos canais de vazamento dos FEA's através da avaliação de seu diâmetro, a fim de evitar passagem excessiva de escória do FEA para a panela e conseqüente redução das inclusões no banho metálico.

X₈ – Tempo de rinsagem

Após a última adição de ligas no forno panela foi padronizado tempo de rinsagem de 2(dois) minutos em vazão baixa (150Nm³/l), a fim de garantir uma flotação de inclusões mais eficiente e assim, reduzir o nível inclusionário do material.

X₁₁ – Vida útil de lingoteira

Foi padronizada a troca de lingoteiras com o máximo de 400 corridas de vida útil a fim de reduzir o aparecimento de defeitos físicos tais como pele dupla e trincas longitudinais, defeitos esses que poderiam causar defeitos quando na laminação das cantoneiras.



Figura 10 – Lingoteira

Além das ações implantadas para as variáveis críticas de processo com influência em defeitos que pudessem comprometer as características físicas do material, foram realizadas análises críticas do teste de achatamento do ponto de vista mecânico, bem como o processo industrial aplicado à abertura de abas para aplicação em torres de transmissão.

2.1 Considerações

O produto atende a norma ASTM A 572 – 15 em conformidade com a composição química e propriedades mecânicas.

Em algumas peças testadas apareceram trincas na direção longitudinal, perto do raio de adoçamento, na região de junção das duas abas.

2.2 Regime de trabalho

Num componente estrutural, assim como nos materiais em geral, os esforços aplicados geram tensões que podem ser relacionadas com uma resposta em deformações. De acordo com os valores dessas tensões e deformações, deve-se separar o processo de aplicação de uma carga – comportamento mecânico – em três regiões bem distintas: regime elástico, regime elasto-plástico e colapso plástico.

2.2.1 Regime elástico

O elemento trabalha em uma faixa de tensões abaixo do limite de escoamento – LE. Assim, as tensões e deformações podem ser relacionadas através de uma proporcionalidade linear – lei de Hooke – e do módulo de elasticidade do material. Ao ser retirado o carregamento, as tensões voltam a zero, não aparecendo tensões residuais nem deformações permanentes (deformações plásticas).

As deformações máximas nesse regime, correspondentes ao limite de resistência ao escoamento, encontram-se em torno de 0,25% de deformação.

Pequenos acréscimos na tensão são acompanhados de pequenos acréscimos na deformação, mantendo-se sempre uma mesma proporção.

Em componentes que trabalham somente em tração ou compressão, a distribuição das tensões e das deformações é uniforme ao longo de uma seção transversal com respeito à direção de aplicação da carga e do eixo longitudinal do componente, como no caso do ensaio de tração.

Por sua vez, em componentes que trabalham submetidos a flexão, a deformação aplicada pelo momento varia linearmente ao longo da altura e, conseqüentemente, a tensão também segue uma variação linear. É baseada nessas premissas que se desenvolve a teoria de flexão de vigas.

Neste campo de valores, os componentes estruturais trabalham com seu respectivo fator de segurança, dependendo de sua aplicação e norma utilizada.

2.2.2 Regime elasto-plástico

Ao ser ultrapassado o limite de resistência ao escoamento, o material apresenta encruamento e não existe mais uma relação linear entre tensão e deformação.

O material ainda tem capacidade de resistir ao carregamento aplicado, porém não segue a relação linear dada pelo módulo de elasticidade.

Ao se descarregar, o componente pode apresentar tensões residuais e aparecem deformações plásticas permanentes.

Um dado incremento de tensões corresponde a um incremento de deformação maior que o apresentado no regime elástico conforme figura abaixo.



Figura 11 – Regimes elástico e elasto-plástico

A distribuição de deformações numa situação de flexão ainda é linear e proporcional à altura considerada, porém as tensões não obedecem mais uma distribuição linear. Assim, tem que existir uma redistribuição das tensões de modo a garantir o equilíbrio com o momento aplicado.

2.2.3 Comportamento após colapso plástico

A redistribuição de tensões que ocorre no regime elasto-plástico tem um limite, que ocorre quando a seção inteira não pode mais aumentar seu nível de tensão. Nesse instante, um aumento mínimo do momento aplicado irá ocasionar deformações elevadas e, conseqüentemente, uma rotação da seção sem controle.

Isso se chama rótula plástica. Nessa condição, o componente não tem mais capacidade de suportar momentos maiores. Podem ser obtidas rotações bem grandes, sem esforço, porém causando deformações elevadas que acabam por produzir a ruptura do material.

Por fim, deve-se entender a rótula plástica como uma condição de instabilidade do material, a semelhança do fenômeno de instabilidade estrutural – flambagem.

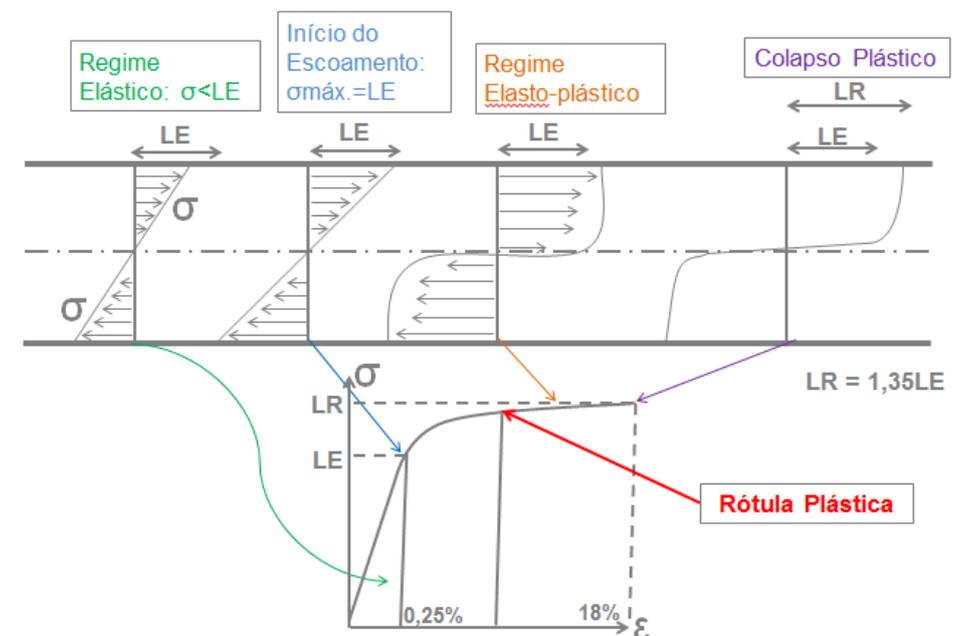


Figura 11 – Regime de Trabalho

2.3. Teste de achatamento

O teste de achatamento, como proposto pelo cliente, promove a abertura de um trecho da cantoneira chegando-se a um ângulo de abertura entre as abas. O teste é realizado em uma máquina hidráulica, onde uma força compressiva é aplicada no vértice da cantoneira devidamente apoiada em suas abas, ou seja, as abas estão a 45° da superfície da matriz inferior da máquina. Em resposta à força aplicada no seu vértice, surgem duas reações verticais nas extremidades das abas, promovendo um momento de flexão nas seções adjacentes à região de ligação entre as abas – raio interno de adoçamento.

Deve ser observado que esse momento é transversal à direção da maior dimensão da cantoneira – direção longitudinal – e o processo pode ser interpretado como a flexão de vigas engastadas.

O efeito do atrito é mínimo e o trecho da cantoneira apresenta a abertura de suas abas, ou pelo menos uma delas, provocando um abaixamento de sua aresta central. O fato que em um grande número de vezes apenas uma aba apresenta essa rotação acentuada comprova a condição de instabilidade do material, conforme descrito anteriormente na análise do comportamento após rótula plástica.

Como sofre deformação plástica acentuada, o perfil obtido apresenta rotações elevadas e, em alguns casos, trincas surgem na direção longitudinal, junto ao raio de adoçamento interno da cantoneira.

Ao se analisar com mais atenção o teste e acompanhando o valor da força aplicada, percebe-se que inicialmente a força aumenta, porém sem apresentar abaixamento significativo do corpo de prova e consequente abertura das abas.

Ao se continuar o teste, o valor da força aplicada atinge um valor máximo e se estabiliza. Em seguida é verificado um abaixamento da cantoneira sem alterar essa força e, num dado ponto, uma ou as duas abas apresentam uma grande rotação.

Essa força máxima corresponde a um momento que provoca o colapso plástico da seção. Deste modo, ao se continuar submetendo o corpo de prova ao abaixamento, existirá um giro dessa seção.

Os valores dos ângulos medidos são localizados nessas regiões, e as deformações encontradas ultrapassam o valor do alongamento obtido no ensaio de tração.

Para melhor esclarecer a análise anterior, a seguir são determinados: o momento que inicia o escoamento, uma estimativa do momento correspondente ao colapso plástico, o ângulo de giro localizado e a deformação máxima.

2.4 Determinação do momento referente ao colapso plástico

É conhecida a expressão que fornece a tensão longitudinal σ de uma seção quando submetida a um momento fletor M:

$$\sigma = My/I$$

Onde,

y = distância do eixo neutro ao ponto de estudo (centro da espessura da cantoneira).

I = momento de inércia.

Para uma aba do corpo de prova, pode-se considerar como uma retangular:

$$I = b t^3 / 12$$

Onde,

t é a espessura da cantoneira e b é o comprimento do corpo de prova (largura da viga engastada).

Para as superfícies, $y = t/2$, assim:

$$\sigma = 6M/bt^2$$

Igualando-se essa tensão ao limite de resistência ao escoamento, chega-se a uma expressão que fornece o valor do momento que inicia o escoamento nas fibras mais externas:

$$M_E = (bt^2/6). LE$$

Ao se considerar o material como perfeitamente plástico, sem encruamento, e se é aplicado um fletor maior que esse valor, as tensões nas superfícies se mantêm iguais ao LE e a distribuição interna permanece linear.

Esse momento fletor pode ser aumentado até que toda a seção apresente tensões iguais a LE , uma metade positiva e a outra metade negativa. A partir desse ponto, não se pode mais aumentar o momento aplicado e temos a situação de colapso plástico. O valor momento é dado por:

$$M_{CP} = (bt^2/4). LE$$

Porém, os materiais utilizados possuem encruamento e isso significa que esse limite de escoamento pode ser ultrapassado. A determinação da distribuição de tensões nessa situação é muito difícil e pouco prática. Adota-se uma estratégia em se

considerar um limite superior onde o limite de escoamento é substituído pelo limite de ruptura:

$$M_{CP} = (bt^2/4). LR$$

O valor real do momento que provoca o colapso plástico da peça está situado entre esses dois limites.

2.5 Determinação da força máxima relativa ao colapso plástico

O momento calculado no item anterior é causado pelas reações aplicadas verticalmente nas extremidades das abas e a seção de engastamento pode ser considerada como sendo adjacente ao final do raio de arredondamento interno da cantoneira. O braço de alavanca a ser considerado deve ser calculado a partir do perfil L, da espessura t , e dos raios de arredondamento da extremidade r_1 e do adoçamento r_2 e é dado por:

$$e = 0,707 (L - 0,293 r_1 - r_2 - t)$$

Na figura abaixo, é explicado como se chega a essa expressão.

O momento é dado pela reação vertical R e pelo braço de alavanca e . Assim, pode-se calcular a reação correspondente a esse valor de momento:

$$R = M_{CP}/e$$

A força aplicada na aresta da cantoneira pela matriz superior é duas vezes o valor da reação:

$$P_{m\acute{a}x} = 2R = 2 M_{CP}/e$$

Relacionando-se com o valor limite superior do momento de colapso plástico:

$$P_{m\acute{a}x} = (bt^2/2e). LR$$

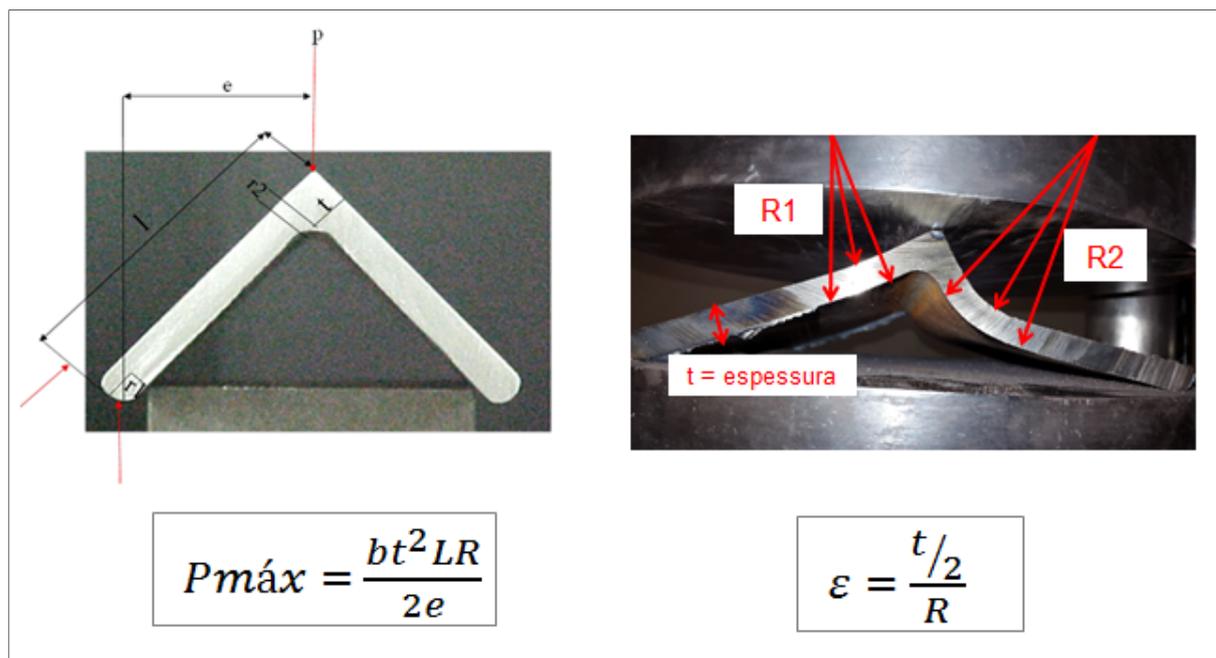


Figura 12 – Cálculo da força máxima e deformações

2.6 Análise e cálculo do ângulo de abertura – Rótula plástica

Foi analisado o ângulo de abertura e observado que a maior parte de cada aba permanece reta desde sua extremidade. Isso sugere que essa parte foi submetida a tensões na região elástica, sem promover deformações plásticas e, após o descarregamento, não houve empenamento nem rotação desta parte da aba.

Na região de rótula plástica existe uma rotação pronunciada e localizada. Os valores de tensões e deformações alcançadas indicam que uma rótula plástica se formou e o valor do ângulo a partir de considerações de mecânica dos sólidos.

Foi possível medir esse ângulo graficamente a partir do perfil obtido no teste de achatamento. Uma maneira simples foi traçar esse perfil em uma folha de papel. Por inspeção das abas desde sua extremidade, pode-se perceber a partir de que ponto a seção sofreu rotação permanente. Marcando-se uma reta define a seção transversal.

Da mesma maneira, a partir da aresta da cantoneira, pôde-se identificar a seção de rotação. Traçando-se perpendiculares às abas nessas duas seções e definindo-se o ponto de cruzamento das duas linhas.

O setor obtido permitiu determinar o ângulo de giro em cada aba, como também serviu para calcular as deformações plásticas obtidas na região de rótula plástica conforme figura abaixo.

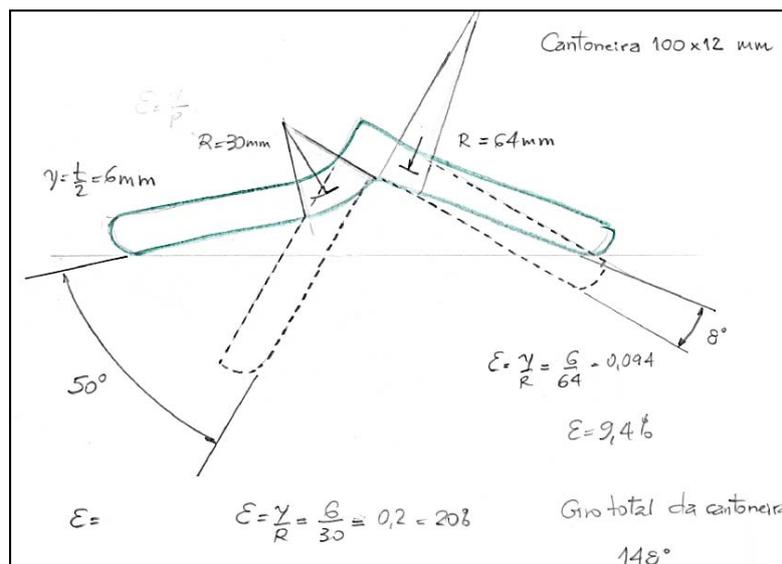


Figura 13 – Determinação ângulo de giro e deformações plásticas na região de rótula plástica

2.7 Determinação da deformação da rótula plástica

O procedimento descrito no item anterior também serviu para determinar a deformação máxima atingida pela rótula plástica.

A partir do ponto de encontro das duas retas perpendiculares às abas, que separam a rótula plástica das partes sem deformações plásticas, determinou-se a deformação máxima obtida.

Para a determinação da deformação em uma fibra distante “y” da linha neutra, existe um perfil que representa a distribuição das deformações variando linearmente de um valor máximo em uma das superfícies da aba até um valor mínimo na outra superfície, passando por um valor nulo, correspondente à linha neutra. A

deformação máxima foi determinada pela razão entre y máximo, $y=t/2$, e o raio de curvatura da linha média da região que apresenta a rotação, $\varepsilon = y/R$.

2.8 Análise qualitativa do processo industrial de abertura de abas

No processo industrial de abertura de abas, realizado para facilitar a montagem das estruturas de torres de transmissão, o estado de tensões e deformações mostrou-se diferente do induzido pelo teste de achatamento.

Apesar dos processos (achatamento e abertura de abas) serem similares, a distribuição da aplicação das cargas são diferentes. No processo industrial, o trecho deformado está inserido ou preso no restante da cantoneira, o afastamento da aba provoca uma flexão na direção longitudinal. Além disso, surge na região central (junção das abas) um estado plano de deformações. Ou seja, mesmo no caso de surgimento de uma rótula plástica, as abas estarão apoiadas para aplicação de carga uniforme ao longo da aba, gerando tensões trativas e de flexão na direção longitudinal durante a aplicação de carga. Ao se descarregar surgem tensões residuais compressivas nas superfícies interna e externamente das abas. Em resumo, o modo de falha do teste de achatamento revela-se diferente de um eventual modo de falha durante o processo industrial de abertura de abas. Para uma análise mais quantitativa, isto é, determinação das tensões e deformações induzidas no processo industrial, seria necessário o estudo de um trecho recortado da parte que experimentou a abertura, em semelhança da análise realizada para o teste de achatamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão do plano de ação, foi possível evidenciar melhorias que auxiliaram no teste de “achatamento” das cantoneiras, proporcionando maior estabilidade de atendimento ao requisito suplementar do cliente.

As ações realizadas na fabricação do aço e do produto resultaram em uma melhoria da sanidade interna e superficial do produto, reduzindo ocorrências de falhas durante o processo de abertura de abas e reclamação do cliente.

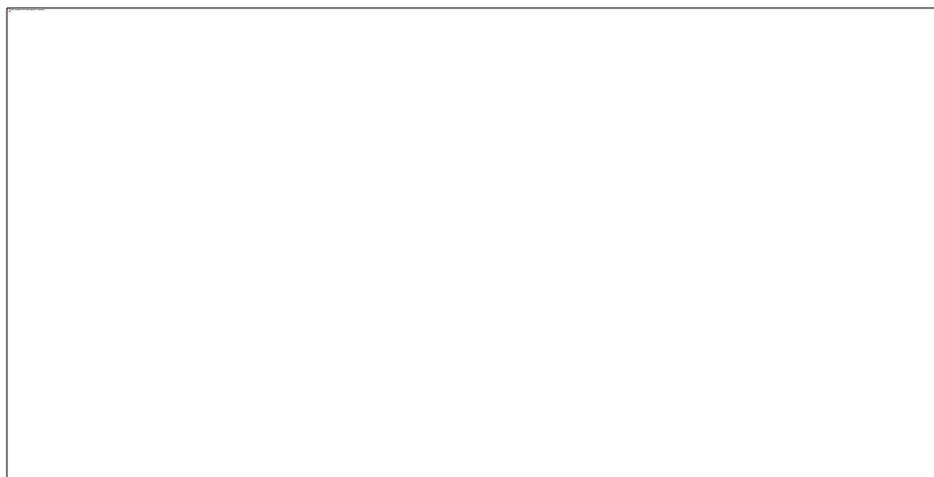


Figura 14 – Reclamação cliente

Foi possível identificar através da análise crítica do teste de achatamento que o processo industrial de abertura de abas, realizado para facilitar a montagem das estruturas de torres de transmissão, o estado de tensões e deformações revelou-se

diferente do induzido pelo teste de achatamento. Mesmo que inicialmente os dois processos (achatamento e abertura de abas) possam parecer idênticos, a distribuição da aplicação das cargas é diferente. No processo industrial, o trecho deformado está inserido ou preso no restante da cantoneira, o afastamento da aba provoca uma flexão na direção longitudinal. Além disso, surge na região central (junção das abas) um estado plano de deformações. Ou seja, mesmo no caso de surgimento de uma rótula plástica, as abas estarão apoiadas para aplicação de carga uniforme ao longo da aba, gerando tensões trativas e de flexão na direção longitudinal durante a aplicação de carga. Ao se descarregar surgem tensões residuais compressivas nas superfícies interna e externamente das abas. Em resumo, o modo de falha do teste de achatamento revela-se diferente de um eventual modo de falha durante o processo industrial de abertura de abas. Para uma análise mais quantitativa, isto é, determinação das tensões e deformações induzidas no processo industrial, seria necessário o estudo de um trecho recortado da parte que experimentou a abertura, em semelhança da análise realizada para o teste de achatamento.

4 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido pela equipe multidisciplinar utilizando a metodologia DMAIC proporcionou o direcionamento das ações de melhorias para as variáveis críticas de processo na busca do resultado. O objetivo inicial do trabalho foi alcançado, gerando uma redução significativa do número de reclamações de clientes, geração de produto não conforme e reclassificações. É importante destacar a busca pela satisfação do cliente atendendo aos seus anseios e requisitos suplementares bem como a confiabilidade adquirida após a realização do trabalho e resultados alcançados.

Apesar do teste de achatamento não simular de maneira efetiva o processo do cliente de abertura de abas, o desafio foi importante para evolução dos processos internos e possibilitou melhorias que resultaram na satisfação do cliente e segurança em seu processo.

Agradecimentos

- Aos supervisores de turno, colaboradores das operações de aciaria e laminação;
- À gerência de laminação a quente
- À gerência de aciaria elétrica
- À gerência de produto e processo

REFERÊNCIAS

- 1 Andre Luiz V. da Costa e Silva, Paulo Roberto Mei, Aços e Ligas Especiais, 2010 – 3ª Edição'
- 2 ASTM A572 Grade 50 and 60 - Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. American Society for Testing and Materials, 2007.