

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

Felipe Krug

**ESTUDO DOS FENÔMENOS QUE OCASIONAM QUEBRAS DO  
ARAME CULTURA AÉREA DERIVADOS DO AÇO SAE 1057B  
TREFILADO E GALVANIZADO**

Porto Alegre

2013

Felipe Krug

ESTUDO DOS FENÔMENOS QUE OCASIONAM QUEBRAS DO ARAME CULTURA  
AÉREA DERIVADOS DO AÇO SAE 1057B TREFILADO E GALVANIZADO

Trabalho realizado na Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Orientador: Professor Doutor Afonso Reguly

Porto Alegre

2013

FELIPE KRUG

**ESTUDO DOS FENÔMENOS QUE OCASIONAM QUEBRAS DO  
ARAME CULTURA AÉREA DERIVADOS DO AÇO SAE 1057B  
TREFILADO E GALVANIZADO**

Trabalho realizado na Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.  
Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

---

Professora Doutora MARIANE CHLUDZINSKI

---

Professor Doutor WAGNER VIANA BIELEFELDT

---

Professor Doutor THOMAS G.R. CLARKE

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, que acredita que a educação continuada estimula no indivíduo a perseverança de tornar nosso mundo um lugar melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor Afonso Reguly, pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal oferecido.

Aos Professores Doutores Arno e Dircema Krug, pelas valiosas contribuições.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, pela oportunidade de aprofundamento acadêmico.

À Gerdau, que está sempre estimulando e capacitando seus colaboradores em busca da melhoria contínua de seus processos, principalmente, por meio das pessoas.

## RESUMO

Na busca contínua de atender as exigências de um mercado cada vez mais competitivo, as empresas devem buscar diminuir todas as suas perdas em seus processos produtivos, reduzindo custos e ganhando margem em seus produtos. Este trabalho teve como objetivo investigar os fenômenos presentes na ocorrência de quebras dos produtos derivados do aço SAE 1057B trefilado e galvanizado utilizado em culturas aéreas. O estudo utilizou bibliografia documental, pesquisa de laboratório e uma amostra composta por trinta e seis relatórios de análises sobre o desempenho do produto intermediário trefilado, ou do produto final galvanizado. Os dados referem-se à eventos de falhas do produto em quaisquer etapas do processo produtivo e mesmo de aplicação em campo. Juntamente com ensaios efetuados especificamente para amparar as conclusões destes relatórios, efetuou-se pesquisa bibliográfica para dar suporte às conclusões. Identificaram-se similaridades entre estudos de alguns autores e análises amostrais de testes padronizados de tração e enrolamento sobre o próprio eixo de outubro 2010 a setembro de 2011. Os resultados mostraram que o fenômeno que induz a um elevado índice de quebra do arame Cultura Aérea é o envelhecimento que ocorre posteriormente à sua passagem por elevadas reduções percentuais de área no processo de trefilação, que encrua o material, e em função de elevadas temperaturas encontradas no processo de galvanização, tendo, ainda, suas consequências amplificadas por pontos de concentração de tensões. Algumas soluções para amenizar a ocorrência do envelhecimento foram propostas, como o aumento do número de passes, o que reduz o encruamento, e a substituição do material por outro menos suscetível ao fenômeno, como um com menor percentual de carbono.

Palavras-Chave: Trefilação, Galvanização a fogo, Encruamento e Envelhecimento.

## ABSTRACT

In the ongoing pursuit to meet demands of an increasingly competitive market, companies have to reduce all their losses in the production process, therefore reducing costs and adding margin to their products. The main goal of this study was to investigate the phenomena present in the occurrence of ruptures of products originated from drawn and galvanized SAE 1057B steel, used in aerial cultivation. The study uses literature and laboratory research and a sample of thirty-six report concerning galvanized final and drawn intermediate product behavior. The data reference to product failure in any stage of the productive process or in field application. Along with testing a bibliographical research was made for conclusion support . Similarities were found between some authors studies and sample analysis of standardized tensile tests and winding over own axis tests from October 2010 to September 2011. The results shown that the primary phenomenon inducing wire failure in aerial cultivation wire is alignment of the hardening due to the high percentage area reductions in the drawing process that allows the development of the strain aging phenomenon after the hot dip galvanizing process witch has it's effects enhanced by stress concentration points. Some solutions to mitigate the strain aging were proposed, like increasing the number of reduction passes for hardening reduction and the use of less susceptible material to the phenomena as a lower percentage carbon steel.

**Keywords:** Wire Drawing, Hot Dip Galvanizing, Strain-aging

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trefilação em Tandem.....	15
Figura 2. Quebra característica por tração.....	17
Figura 3. Regiões de uma feira.....	19
Figura 4. Quebra característica de defeitos internos.....	20
Figura 5. Formato característico de defeitos internos após a trefilação. ....	21
Figura 6. Propagação de trinca superficial em trefilação. ....	25
Figura 7. Quebra final da trinca tipo Pé de Corvo.....	26
Figura 8. Solda por falha de lubrificação. ....	27
Figura 9. Penetração de lubrificante em fratura. ....	28
Figura 10. Envelhecimento após deformação.....	37
Figura 11. Máquina de ensaio de tração EMIC DL 10.000,.....	42
Figura 12. Célula de carga 263-FMET-001/01 .....	42
Figura 13. Escala de medição de comprimento.....	43
Figura 14. Estereoscópio ZEISS, modelo SR, e iluminador SCHOOTT .....	44
Figura 15. Exemplo de amostra endireitada. ....	45
Figura 16. Dispositivo de ensaio de enrolamento. ....	45
Figura 17. Corpo de prova com dobra em U pronto para ensaio.....	45
Figura 18. Fixação do corpo de prova na morsa. ....	46
Figura 19. Detalhe da preparação do corpo de prova na morsa. ....	46
Figura 20. Encaixe do corpo de prova no dispositivo de ensaio de enrolamento.....	47
Figura 21. Detalhe do encaixe da amostra no rasgo do dispositivo .....	47
Figura 22. Diferentes etapas da realização do ensaio de enrolamento. ....	47
Figura 23. Retirada do dispositivo de ensaio após término do ensaio.....	48
Figura 24. Arame apresentando forma correta após ensaio.....	48
Figura 25. Análise de rupturas. Ref. Diferentes formas de fraturas .....	51
Figura 26. Quadro de Resumo dos Relatórios.....	53
Figura 27. Gráfico comparativo do limite de escoamento .....	56
Figura 28. Gráfico comparativo do limite de ruptura.....	56
Figura 29. Análises metalográficas do fio-máquina 5,50mm.....	57
Figura 30. Arame trefilado 2,02mm – Amostra 2. ....	59
Figura 31. Amostra do arame galvanizado – Fora da cuba de chumbo. ....	60
Figura 32. Amostra do arame galvanizado – Dentro da cuba de chumbo.....	61



Figura 33. Fotografia 32X da amostra do Arame Trefilado no “ponto 1”. .....	62
Figura 34. Fotografia 32X da amostra do arame trefilado no “ponto 2” .....	62
Figura 35. Fotografia 32X da amostra da quebra de enrolamento. ....	63
Figura 36. Fotografia da amostra da quebra de enrolamento. ....	63
Figura 37. Fotografia 32X da superfície da amostra quebrada no ensaio de enrolamento.....	64
Figura 38. Fotografia 32X da superfície da amostra quebrada no ensaio de enrolamento.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Sequência de reduções no processo de trefilação.....	40
Tabela 2. Especificação de Composição Química.....	54
Tabela 3. Ensaio de tração de arame galvanizado e trefilado. ....	55
Tabela 4. Ensaio de tração de fio-máquina. ....	57
Tabela 5. Amostra do material trefilado e galvanizado.....	58
Tabela 6. Ensaio de tração do Arame Culturas Aéreas produzido na máquina H71 .....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS

A1 - Área inicial da seção transversal

A2 - Área final da seção transversal

C.A. - Cultura Aérea

C.E. - Cerca Elétrica

$D_f^2$  - Diâmetro final

$F_{tref}$  - Força de trefilação

K - Coeficiente de condutibilidade

k - Constante de trefilação

l - Comprimento

$L_e$  - Limite de escoamento

$L_f$  - Comprimento da distância riscada após a ruptura

$L_o$  - Comprimento da distância riscada para determinação do % de alongamento

$L_r$  - Limite de resistência

M.E.T. - Máquina de ensaio de tração

P - Pressão termodinâmica.

$S_o$  - Área da seção transversal do corpo de prova

t - Tonelada

Tandem - complementares

$T_i$  - Valor da temperatura

Y - Tensão de cedência

$\sigma_{ti}$  - Limite Inicial de Resistência à Tração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 PROBLEMA.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 PROCESSO DE TREFILAÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. QUEBRAS DO MATERIAL .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 TENSÃO DE TREFILAÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 SOLDA.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 PROBLEMAS METALÚRGICOS .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6 ENVELHECIMENTO .....</b>	<b>36</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1 MATERIAL.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2 INSTRUMENTOS .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 COLETA DOS DADOS .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5 ANÁLISE DOS DADOS .....</b>	<b>49</b>
<b>3.6 LIMITAÇÕES.....</b>	<b>49</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
<b>6 SUGESTÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Estudos em processos de trefilação não têm mostrado muitas soluções para a eliminação de problemas de quebras recorrentes na confecção dos produtos Cultura Aérea (C.A.) e Cerca Elétrica (C.E.) com 2,02 mm de diâmetro, utilizados intensamente na agropecuária brasileira.

É necessário o desenvolvimento de um aprendizado focado no processo de manufatura deste produto, que apresenta um comportamento de falha sem causas aparentes explícitas que trazem implicações significativas em seu comportamento mecânico e em sua qualidade em geral.

Essas manifestações de falha que inevitavelmente geram reprovações em análises amostrais ou mesmo na aplicabilidade em campo, apontaram, dentre outros produtos, o Cultura Aérea 2,02 mm de diâmetro como um ponto de atenção. Este, além de um elevado índice de reprovações nos ensaios amostrais mecânicos, um significativo histórico de ocorrências de manifestações negativas em relação a sua aplicabilidade.

Uma síntese comparativa da análise do desempenho histórico (outubro 2010 até setembro 2011) coletado em relatórios e em testes realizados em produtos deste arame galvanizado mostra um padrão de resultados que indica possíveis causas comuns para as ocorrências de quebra em ensaios de qualidade e em sua aplicação em campo.

Os resultados foram confrontados com diversos artigos especializados publicados a respeito do tema por ANIL K. SACHDEV (1982), NESTERENKO (2009); SYCHKOV A.B.; SUKHOLMLIN V.I. & ZHUKOVA, S.YU (2009), HAMMERLE, J.R.; ALMEIDA, L.H. de & MONTEIRO, S.N, (2004), e também com referências buscadas na literatura como no ASM Handbook (1998) e Dieter, G. E. (1988), entre outros, na busca de respostas que poderiam explicar o comportamento observado.

As hipóteses mais plausíveis para o cenário encontrado no roteiro de fabricação do produto são localizadas na base teórica. No decorrer deste trabalho, algumas possíveis hipóteses foram exploradas para explicar tal comportamento na busca de um alinhamento dos conceitos considerados na sua caracterização.

A compreensão dos fenômenos que agem no processo é a primeira, e, também, a principal etapa que deve ser concluída com êxito. Assim, pode-se, posteriormente, atuar sobre as causas dos sintomas identificados no produto, permitindo ações direcionadas aos parâmetros

de processo ou às matérias-primas utilizadas em sua fabricação, de forma a eliminar causas de desvios e atingir a plena satisfação dos clientes.

Na busca de soluções para a melhoria do produto, este estudo estabeleceu como problema e objetivos:

## 1.2 PROBLEMA

Quais as principais causas comuns para as ocorrências de quebra em ensaios de qualidade do arame galvanizado para Culturas Aéreas (C.A./C.E) 2,02 mm de diâmetro, utilizado na agropecuária?

## 1.3. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi investigar fenômenos presentes e causas de ocorrências da quebra dos produtos derivados do aço SAE 1057B trefilado e galvanizado por meio da análise de estudos já efetuados, de relatórios de outubro de 2010 a setembro de 2011 e de ensaios de qualidade do arame galvanizado para Culturas Aéreas (C.A./C.E) 2,02 mm de diâmetro, utilizados na agropecuária.

## 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar estudos tangentes ao tema estudado;
2. Comparar os resultados das análises dos relatórios com os artigos especializados e a literatura pesquisada, destacando as similaridades e diferenças apresentadas nas análises amostrais e testes realizados;
3. Analisar, de forma descritiva, os relatórios quanto às variáveis, problemas relatados, aspectos dimensionais, composição química, defeitos superficiais, formato da fratura e resistência mecânica;
4. Compreender os fenômenos que agem no processo de fabricação do arame Culturas Aéreas (C.A./C.E.) 2,02 mm de diâmetro;
5. Sugerir ou levantar novas hipóteses.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 PROCESSO DE TREFILAÇÃO

O processo de trefilação do arame, foco deste trabalho, é composto por uma sequência de sete passes por orifícios calibrados, chamados fieiras, onde o material é tracionado por blocos (Fig 1.), trabalhando em tandem.

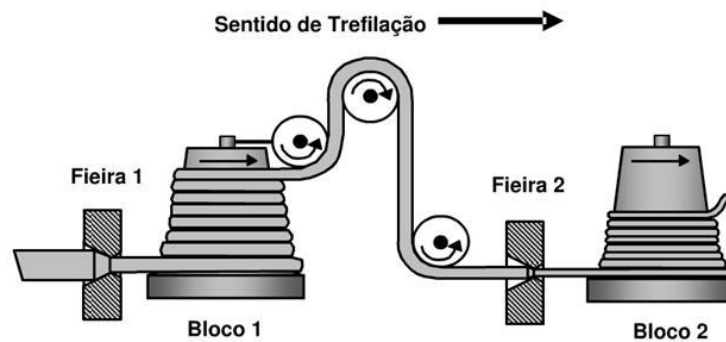


Figura 1 - Trefilação em Tandem

Fonte: TRE-501.

Segundo Campbell (1961), o arame, por definição, nada mais é que uma forma estirada e alongada de uma barra, que pode ser flexível e nem sempre rígida ou reta. Nas indústrias metal mecânicas, seções contínuas com diâmetro equivalente ou menor que 3/8 de polegada são classificados como arame e, acima disso, como barras, embora essa definição não seja uma unanimidade. A deformação máxima permissível em uma única operação de trefila está limitada pela condição de que a tensão de tração ( $Y$ ) que puxa o fio deve ser inferior à tensão de ruptura do fio emergente ( $S$ ). Portanto, de acordo com Cottrell (1953), essa deformação respeitará a equação 1.

$$Y \leq S \equiv Y \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (1)$$

Aplicada aos conceitos de alongamento simples na equação 2, temos que  $A_1/A_2 \leq 2,7$ , ou seja, existe a possibilidade de uma redução máxima de área de 63 por cento em uma trefilação em condições ideais. Na prática, contudo, esse valor é afetado por diversos fatores,

como a deformação redundante e o atrito que pode afetar o rendimento do processo. Esse rendimento “n” é, normalmente, cerca de 0,5, mas o seu efeito na redução máxima de área que se pode obter é, até certo ponto, compensado pelo encruamento que, em geral, ocorre à medida que o metal passa através da fiação, o que faz com que o metal emergente possa suportar uma maior tensão de tração. A redução de área possível em cada passagem é, em regra, limitada a cerca de 30 por cento, o que cria a necessidade de que a conversão de um varão cilíndrico em um fio fino tenha de ocorrer em uma série de operações de trefila.

$$w_i = Y \ln \left( \frac{l_2}{l_1} \right) = Y \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (2)$$

Honeycombe (1982) aponta que o endurecimento por deformação ou encruamento permite que os aços de baixo carbono, especialmente os trefilados, aumentem a resistência sem adição de ligas especiais, sendo ainda mais ampla essa possibilidade de aumento quanto maior o teor de carbono.

Dois tipos de tensões residuais são encontrados em trefilação (deformações a frio), dependendo da quantidade de redução aplicada. Para reduções menores de 1%, a tensão residual longitudinal será compressiva na superfície e trativa no centro. As tensões radiais são trativas no centro e caem para zero na superfície, enquanto as tensões circunferenciais seguem a mesma regra que as longitudinais. Nas reduções maiores, tem-se uma inversão do padrão citado anteriormente e, independentemente do ângulo de ferramenta utilizado, a maior quantidade de tensão residual será encontrada em reduções de 10 a 15% (DIETER, 1988).

A deformação a frio causa a migração dos átomos de carbono da estrutura cristalina do ferro e a segregação destes átomos nas discordâncias no aço, ocasionando uma redução na ductilidade do aço.

## 2.2. QUEBRAS DO MATERIAL

No processo de trefilação, as quebras do material representam um grande problema operacional, pois a interrupção para a correção de uma quebra representa um período elevado de parada do equipamento.



Para o retorno da operação, faz-se necessária uma correção do ponto rompido retirando a porção avariada do arame e refazendo o apontamento (redução do arame até o diâmetro do passe seguinte feita em uma laminadora manual de vários diâmetros). Assim, o arame pode passar nas fieiras, ser puxado, soldado e novamente tracionado para que o processo de redução de secção volte a ocorrer continuamente nas fieiras ou cassetes laminadores quando for o caso.

Segundo a TRE-501 (2010), essas quebras no processo de trefilação podem ser de quatro tipos diferentes: quebras por tração, quebras internas, quebras na solda e quebras iniciadas na superfície do material.

Uma das formas do material quebrar, a quebra por tração, ocorre sempre que, por qualquer motivo, o material for tracionado na frente da fieira por uma força superior ao seu limite de ruptura, o que, em seguida, acarretará uma estrição e conseqüente fratura com comportamento similar ao observado em um ensaio de tração (Figura 2).

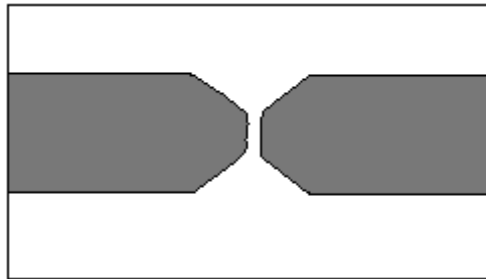


Figura 2. Quebra característica por tração.

Fonte: TRE-501.

Desta forma, quando o arame quebra, as duas pontas apresentam formatos idênticos muito similares a dois cones (os dois lados simétricos). A ocorrência deste problema pode ser relacionada à perda de controle no processo de trefilação. Falhas na lubrificação do material, como a utilização de um lubrificante inadequado, contaminado, a disposição inadequada do lubrificante ou mesmo o preenchimento insuficiente da caixa de sabão, vedação insuficiente, vazamento de água ou formação de túnel (processo de tunelamento) geram um aumento do atrito que causa uma maior aderência do material às fieiras.

A TRE 501 (2010) cita que outra forma de quebra do arame ocorre com a quebra do núcleo da fieira, o que promove um travamento do material. O núcleo é composto de um material diferente da carcaça, normalmente carboneto de tungstênio (WC) e de cobalto (Co), e pode ser de diversos materiais especiais, até mesmo diamante, apresentando, ainda que em pequena quantidade, a presença de poros. Quanto menor a quantidade de poros e menores os

tamanhos de grãos, mais duro o núcleo será (podendo chegar a 1800 Vickers – HV), mas, conseqüentemente, mais frágil.

A carcaça da fieira não necessita ser extremamente resistente ao desgaste, pois tem como principal função proteger o núcleo de choques mecânicos, e pode ser fabricada com materiais mais baratos e macios. O desgaste natural da fieira promove apenas a saída do diâmetro do arame para fora da especificação, evento que não ocasiona diretamente o problema da ocorrência de quebras estudado aqui, mas, indiretamente, poderia estar relacionado com a abertura excessiva em algum dos passes, o que originaria alguns dos problemas que serão abordados no tema de reduções mais adiante.

Já a quebra do núcleo se dá pelas forças aplicadas na abertura pelo material que tenta aumentar o seu diâmetro. A compressão da carcaça sobre o núcleo na montagem, quando feita com aquecimento, tem um efeito positivo para evitar que isso venha a acontecer, pois também suporta a pressão interna do material, embora não elimine a possibilidade da quebra.

A quebra de uma fieira, no caso do arame Culturas Aéreas, seria imediatamente percebida pela ruptura do arame em um dos passes, de forma que o processo não teria como prosseguir. Sendo assim, esta opção está eliminada para este caso.

Cada uma das regiões das fieiras possui uma função específica, necessária ao correto processamento do material trefilado. O raio de entrada (Figura 3 – Região 1), por exemplo, tem como função principal dar um acabamento na fieira, eliminando cantos vivos e protegendo o material do núcleo do chicoteamento do arame, o qual poderia danificá-lo, principalmente no primeiro passe.

Já o cone de entrada auxilia na entrada do lubrificante na região do cone de trabalho, que é onde efetivamente ocorre a redução do material e precisa ser extremamente bem polido para reduzir o atrito entre a fieira e o material. Caso o comprimento do cone (Figura 3 – Região 2) seja muito grande, isso acarretará uma maior dificuldade na entrada de lubrificante, o que gera danos na superfície e, possivelmente, a quebra da fieira.

Já se o paralelo (Figura 3 – Região 4), que é o responsável pela manutenção do diâmetro de saída e por diminuir o desgaste da fieira, for excessivamente grande, a força para trefilar aumentará significativamente, podendo chegar ao limite de resistência e romper o material. O paralelo é a região onde o material inicialmente toca a fieira e a que estará mais sujeita a danos, pois, comumente, são arrancados grãos de Carboneto de Tungstênio (WC) os quais aderem a outros pontos do cone de trabalho (Figura 3 – Região 3) e começam a arranhar o material. Esse fenômeno é chamado de “anel de desgaste”, e, após um certo grau de desgaste deverá ser retirado por retífica para não danificar o arame. Outros tipos de danos podem ocorrer por

desalinhamento do material na saída, o que traria efeitos diretos ao paralelo e, por conseguinte, ao processo de trefilação. Para minimizá-los, existe ainda o paralelo do cone de saída (Figura 3 – Região 5).

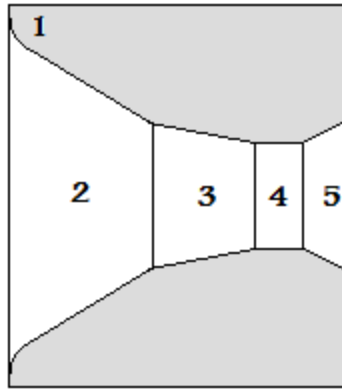


Figura 3. Regiões de uma fieira.

Fonte: Cetlin, 1994.

### 2.3 TENSÃO DE TREFILAÇÃO

Durante o funcionamento do equipamento, problemas no enrolamento do arame trefilado, por posicionamento inadequado ou mesmo por problemas de manutenção, ocasionam choques mecânicos nos blocos, o que aumenta instantaneamente a tensão à qual o material está submetido em diversos pontos ao longo do caminho do arame (entre a entrada do fio-máquina e a saída do arame trefilado). Outra possibilidade a ser considerada é a de haver pouco material entre os passes (no caso de máquinas cumulativas) quando, na montagem do jogo de reduções, houver quantidades inadequadas de diminuição da secção transversal entre os passes, tanto para menos (pouca redução), quanto para mais (muita redução).

De acordo com TRE 501 (2010), para o processo de trefilação ocorrer, é necessário que se aplique uma força para trefilar o material. Essa força de tração pode ser calculada por meio da equação 3.

$$F_{tref} = kd_f^2 \sigma_{ti} \quad (3)$$

Nesta equação, há três componentes: o primeiro, constante de trefilação ( $k$ ), depende da redução de área no passe, do ângulo de entrada, do comprimento do paralelo e do tipo de lubrificante; o segundo, diâmetro final ( $d_f$ ) da bitola de saída do material; e o terceiro, o limite inicial de resistência à tração ( $\sigma_{ti}$ ) do material (antes do passe).

Esta tensão de trefilação é a tensão suficiente aplicada no material de forma a conseguir trefilá-lo. Assim como existe a tensão mínima, pode-se, para o caso de ruptura por excesso de tensão, determinar-se a tensão máxima para que a trefilação seja possível. Conhecendo-se o limite de resistência do material, que é a habilidade do material de resistir a forças aplicadas externamente (YOUSSEF et al, 2011), entende-se que este limite deva ser apenas pouco menor que o limite de resistência do material depois da fieira (lembrando que, na conformação mecânica a frio, o material encrua alterando as propriedades mecânicas ao longo de todos os passes do processo). Se a tensão de trefilação à frente da fieira for muito próxima à tensão limite de resistência do material, o mesmo será tracionado e não será trefilado.

Experimentalmente, recomenda-se, na indústria, que a tensão de trefilação seja menor que três quartos da tensão limite de resistência do material.

Portanto, existe uma redução de área máxima que um arame pode sofrer em um passe e, segundo Youssef et al (2011), a deformação teórica máxima permitida por passe seria de 63,2%, o que limitaria a redução de área máxima por passe a cerca de 20 a 30 %.

Essa quebra por tração caracteriza, sobretudo, as quebras ocorridas durante o processo de trefilação ou no de condução do arame Cultura Aérea.

Outra forma de quebra que pode ocorrer durante o processo de trefilação, de acordo com TRE 501 (2010), é a chamada quebra interna. Essa quebra inicia-se na região central do material trefilado ainda no processo de passagem pelas fieiras e também é conhecida por “ponta de lápis” ou mesmo “taça cone” pela geometria apresentada nas extremidades da região rompida (Figura 4).

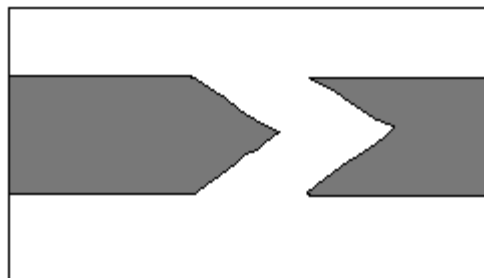


Figura 4. Quebra característica de defeitos internos.  
Fonte: Cetlin, 1994.

O mecanismo que dá início ao processo é uma combinação de fatores que, inevitavelmente, levará à redução do limite de resistência do material trefilado e a sua consequente ruptura em serviço ou durante o processo de fabricação.

Dentro do processo de trefilação, fica claro que o material está submetido a um estado de tensões trativas na região interna da fieira. Se, durante o processo de fabricação do aço até o fio-máquina, que é a matéria-prima do arame trefilado, ocorrer algum tipo de problema metalúrgico, este poderá ser detectado visualmente em inspeções de rotina antes da sua aplicação (abastecimento) em processos subsequentes, desde que se encontrem na superfície. Entretanto, quando esses desvios manifestam-se ao longo do centro do arame, isso não será percebido, a menos que a ruptura ocorra ou que se apliquem outros métodos de inspeção.

Quando esses defeitos internos manifestam-se, o material não consegue alongar-se no centro sem se romper. Logo começam a aparecer poros na região, que aumentam de tamanho durante a trefilação e tomam formatos característicos, conhecidos como chevrons (Figura 5), que nada mais são do que as quebras internas ao longo do centro do material.

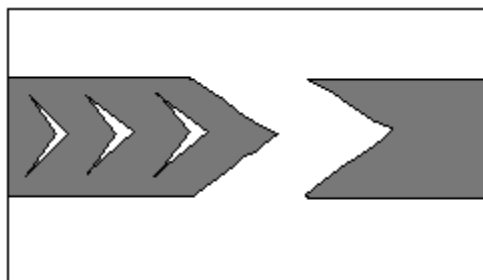


Figura 5. Formato característico de defeitos internos após a trefilação.

Fonte: Cetlin, 1994.

Para cada passe de trefilação, essas quebras internas aumentam de tamanho, ocupando uma porção cada vez maior da seção transversal do arame. Quando as quebras internas chegam a um determinado tamanho, a própria tração de trefilação do processo causará a fratura do material.

Citando TRE 501 (2010),

Normalmente é necessário um certo número de passes para que as quebras internas cheguem a um tamanho tal que as quebras completas comecem a acontecer. Assim é muito mais frequente que esse tipo de ruptura ocorra nos passes finais de uma máquina de trefilar e não nos primeiros passes.

Um dos agravantes presentes nesse processo é que, dependendo de onde ele inicia, pode passar pelo processo de trefilação sem ser detectado, pois não ocorreu a efetiva ruptura do material e, visualmente, não se percebem suas manifestações.

Entre os problemas metalúrgicos que provocam a fragilização do arame trefilado em função da formação de trincas ou mesmo da sua ruptura ao longo do centro do material, os mais comuns são as inclusões de partículas de escória, refratários, sulfetos, sílica e alumina, entre outros. A presença de perlita grosseira, principalmente nos aços com quantidades de carbono mais elevadas (acima de 0,4% de carbono), e também a existência de regiões com maiores concentrações de carbono ao longo do centro com a presença de muita cementita para os aços com quantidades de carbono acima de 0,6% são pontos que tendem a se quebrar com maior facilidade.

As próprias condições do processo de trefilação também podem gerar essa forma de trinca, quando se observa a influência da pressão da fieira sobre o material no processo de trefilação. O material dentro da fieira está submetido a forças de tração, mas também a forças de compressão que ocorrem simultaneamente.

As tensões de tração encontradas no processo dentro da fieira são causadas pela força que o equipamento deve submeter o material para que possa trefilá-lo e são longitudinais, ou seja, estão alinhadas com o eixo de entrada e saída do material. Já as forças de compressão, que atuam na transversal (a 90°) do eixo de entrada e saída do material e são concêntricas, são aplicadas pela fieira no material e decrescem de sua superfície até o centro.

Resumindo, têm-se tensões trativas, inerentes à tração do material, e tensões compressivas, decorrentes do contato do material com a estrutura da fieira. A pressão que a fieira aplica no centro do material vai diminuindo quando a redução de área do passe cai.

A TRE 501 (2010) aponta que, nos casos de reduções de área no passe abaixo de 10%, a pressão da fieira não atinge mais o centro do material. Isso significa que o processo de trefilação, pelo menos naquele ponto, ocorre como se a fieira não existisse, e a deformação se daria somente pela própria tração do material.

De certa forma, ao analisar as forças atuantes no processo, pode-se concluir que a compressão da fieira tem a tendência a não fechar os poros na superfície do material, localizando-se, principalmente, na região central (onde também estariam presentes problemas metalúrgicos do material) ou no início de abertura dos poros que desencadeiam o processo de trincas internas.

Também se observa que essa manifestação de abertura de poros acontece ao longo de uma grande parte do material, o que pode ser explicado pela ocorrência do seguinte fenômeno: quando um poro se abre, a tração no ponto seguinte imediatamente diminui, sendo necessário que um pouco mais de material seja trefilado para que a tensão suba novamente e seja aberto outro poro. Assim, o processo segue até que não haja mais a presença dos defeitos metalúrgicos ou ao longo de todo o material, o qual apresenta um espaçamento mais ou menos regular entre os poros formados. A evolução dos poros nos passes seguintes é que vai formar as trincas, apresentando o espaçamento como uma característica comum. Sendo assim, entende-se que o material irá romper somente na maior trinca. Também se compreende, como citado anteriormente, que isso pode não ocorrer dentro do processo de trefilação.

Para evitar esse tipo de defeito, é fundamental que se aplique uma redução que permita que a pressão exercida pela fieira chegue ao centro do material. Logo, se existe uma redução máxima que possa evitar a quebra do material por excesso de tração, também existe uma redução mínima para evitar que ocorram as quebras internas.

## 2.4 SOLDA

Dentro do processo de trefilação, a execução de uma solda faz parte da rotina de produção de qualquer material trefilado, seja ele fabricado por fieiras ou por cassetes.

A principal função da solda dos materiais é permitir que o processo ocorra com a menor quantidade de interrupções possíveis, aumentando, assim, o tempo durante o qual os equipamentos trabalham, o que reduz de forma significativa o período de retorno do ativo imobilizado por garantir a plena utilização dos recursos disponíveis. Contudo, a solda também pode ocorrer em qualquer ponto dos equipamentos quando, por algum motivo, o arame trefilado tenha se rompido e sua realização é necessária tão logo se queira retomar o processo produtivo.

Atualmente, esta solda é feita pelo processo de soldagem de topo, por resistência: as duas pontas são cortadas, perpendicularmente ao eixo do arame, esmerilhadas e presas com duas garras com molas que as pressionam uma frente à outra. Uma corrente elevada, então, é passada pelas garras e pelos os arames. A região de contato é o ponto de maior resistência elétrica e, portanto, de maior aquecimento, ocorrendo, na prática, uma operação de forjamento pela elevada temperatura atingida (1250 – 1350°C), segundo Cetlin (1994).

Segundo a TRE 501 (2010), as quebras por solda, quando ocorrem, geralmente não apresentam grandes quantidades de deformação na região fraturada. Elas concentram-se, mais especificamente, nas pontas, sendo relativamente fácil o reconhecimento da ocorrência. Além dessa característica das pontas quebradas, comumente observa-se a presença de riscos na região próxima à quebra. Esses riscos não fazem parte de nenhum defeito metalúrgico, mas sim de uma etapa necessária logo após a solda, o esmerilhamento da rebarba. A rebarba é formada no processo de solda e se faz necessária, sendo que a qualidade da solda também é controlada pela relação de seu diâmetro com o do arame base em que está sendo executada.

Na prática, deve-se executar um procedimento de solda que, no resultado final, apresente um diâmetro de três vezes o diâmetro do arame onde é feita, além de que não deverá apresentar rachaduras no pé e ser contínua para ser considerada uma boa solda. Quando executado o esmerilhamento desta sobra de material, o movimento do esmeril deve ser contínuo e na mesma direção do arame até que o mesmo fique com o diâmetro original.

Caso seja feita de outra forma, o diâmetro do produto final do esmerilhamento poderá ser inferior ou superior ao do arame em si. Isso poderá interferir no processo de deposição de sabão na superfície, aumentar ou reduzir o contato com a fieira ou mesmo gerar um choque mecânico que venha a danificá-lo, além de possivelmente ter pontos de concentração de tensão, reduzindo a resistência e aumentando a tensão naquele ponto.

Segundo a TRE 501 (2010), na grande parte de ocorrências de quebras de material trefilado, a quebra de soldas acontece em decorrência da sua qualidade e da maneira com que são executadas, sendo geralmente causadas durante a operação por um balanceamento ruim entre o aquecimento do material e a pressão das molas que fazem parte do equipamento e prendem o arame à máquina de soldar.

A manutenção periódica dos equipamentos, o treinamento adequado e a revisão de procedimentos evitam a ocorrência desse tipo de quebra, que dificilmente passa pelo processo e é, como citado anteriormente, de fácil caracterização e detecção.



## 2.5 PROBLEMAS METALÚRGICOS

Tendo sido discutido que, em alguns casos, a origem de quebras em arames trefilados está no interior da matéria-prima e é inerente aos processos anteriores à trefilação, em função de problemas metalúrgicos ou de parâmetros e de condições encontradas no processamento em si, a atenção volta-se para a superfície dos materiais, que também precisa de uma análise dos defeitos responsáveis pela ocorrência de quebras.

De acordo com Cetlin (1994), as rupturas iniciadas a partir da superfície do arame começam quando, por alguma razão, abre-se uma pequena fratura na superfície no processo de trefilação. Quando essa pequena fratura ocorre, ela abre um espaço para que o lubrificante utilizado no processo instale-se no momento em que o material passar pela fieira, o que faz com que se levante um pouco a parte de trás da fratura, e o material seja forçado para trás (Figura 6).

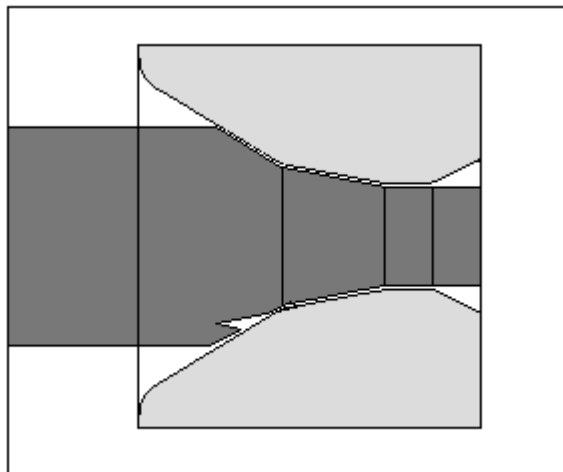


Figura 6. Propagação de trinca superficial em trefilação.

Fonte: Cetlin, 1994.

A lubrificação é garantida pela passagem do material através do sabão (neste caso, apresentando-se como um pó) colocado imediatamente antes da fieira. Esse sabão torna-se pastoso com o aquecimento gerado no processo de trefilação e penetra na região de entrada do material na fieira e na camada entre a fieira e o material. O primeiro passe da trefilação é um dos pontos mais críticos na aplicação do lubrificante, pois, caso isso não ocorra, o material sairá imediatamente danificado.

Como resultado, tem-se que, a cada passagem por cada uma das fieiras, levanta-se um pouco mais esse material, forçando-o para trás e deixando a fratura da superfície cada vez maior e mais funda pelo próprio atrito com a fieira. No processamento deste defeito, depois de alguns passes, a fratura superficial já será tão grande que o arame irá romper ou na frente da fieira, em alguma polia ou mesmo durante seu enrolamento no bloco tracionador.

O aspecto dessa fratura (Figura 7) tem forma de linhas pontilhadas, apresentando, em um corte, um buraco na superfície do arame e as pontas quebradas com um aspecto bastante característico na sua ruptura final, e mesmo em pontos que não tenham se rompido. Assim como as trincas, esse tipo de fratura se dá nos últimos passes de uma máquina de trefilar, pois ela vai crescendo continuamente de um passe para outro e não acontece isoladamente, mas em uma sequência facilmente identificada. Novamente, o tamanho desse tipo de defeito é variado, e somente o maior deles causará a quebra final do arame.

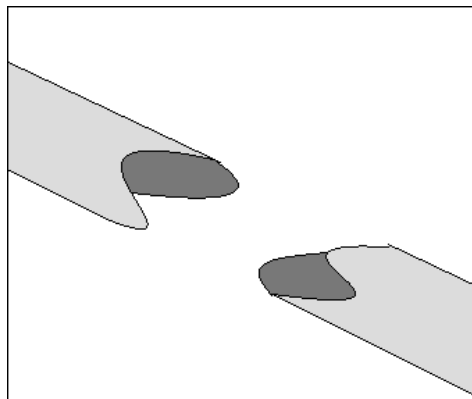


Figura 7. Quebra final da trinca tipo Pé de Corvo.

Fonte: Cetlin,1994.

Ainda dentre as principais causas para a presença destas fraturas iniciadas na superfície tem-se, de acordo com Cetlin (1994), que as mais importantes são os defeitos já existentes no tarugo e fio máquina. Tais defeitos podem ter sido causados antes de laminar, desde a sua passagem pelo lingotamento, como na armazenagem, transporte e processo de resfriamento e, no fio-máquina, causados pela laminação em si, seja nas gaiolas de laminação ou nos blocos formadores de espiras, assim como no transporte e armazenamento.

Falhas na lubrificação durante a trefilação, seja por ângulos incorretos de fieiras, por utilização de sabão inapropriado ou mesmo por problemas na aplicação do sabão antes das

caixas de fieiras e defeitos na manipulação do fio-máquina até a entrada das máquinas de trefilar também se enquadram como possíveis geradores deste tipo de defeito.

Os sabões utilizados na trefilação podem ser à base de sódio (feitos com soda cáustica), com cálcio (feitos com cal) e uma mistura mecânica de ambos, como no caso do sabão utilizado no processamento do arame Cultura Aérea.

Quanto maior a redução de área nos passes, maior será o limite de resistência antes dos passes, maior a velocidade de trefilação e maior será o aquecimento na lubrificação. Essas falhas de lubrificação geram, em algum ponto da fieira, uma espécie de solda que, com a trefilação contínua, trará, na sequência, uma fratura. Se esta solda for muito resistente, o material quebra e não trefila; porém, se não for suficientemente resistente, ela irá soltar, formando um defeito na superfície que poderá ocasionar uma quebra no processo ou depois dele (Figura 8).

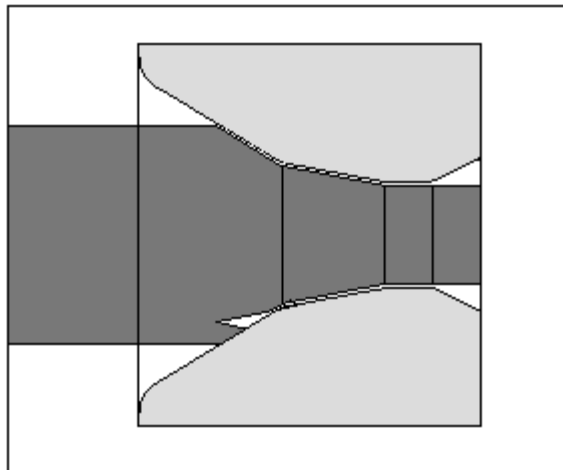


Figura 8. Solda por falha de lubrificação.

Fonte: Cetlin,1994.

Os defeitos do tarugo e do fio-máquina ocorrem, principalmente, no lingotamento contínuo, e conforme TRE 501 (2010), podem ser provenientes de diversas origens. Uma das origens mais comuns é a ocorrência da “pele dupla”.

Já a laminação do fio-máquina pode provocar a ocorrência de dobras ou escamas na superfície do mesmo. A dobra é um material que foi dobrado sobre a superfície do fio-máquina durante a laminação e não se soltou desta superfície.

Durante a trefilação de um material com essas características, ocorrerá a entrada do lubrificante embaixo destas dobras ou peles duplas e será iniciado o processo de fratura

superficial. Esse mesmo fenômeno pode ter sua origem no lingotamento contínuo quando o tarugo fica com a superfície muito porosa.

Dessa forma, o lubrificante não precisa entrar sob o material e, mesmo assim, começará a abri-lo, iniciando o processo de fratura superficial. Tanto no lingotamento contínuo como na laminação, ainda poderá ocorrer incrustação de materiais muito duros, como a carepa, que ficam presos ao tarugo entre as guias e o fio-máquina e, ao passar pelas mesmas, aderem-se, sendo transferidos ao material. Da mesma forma, o lubrificante entrará embaixo das incrustações e iniciará o processo de fratura superficial (Figura 9).

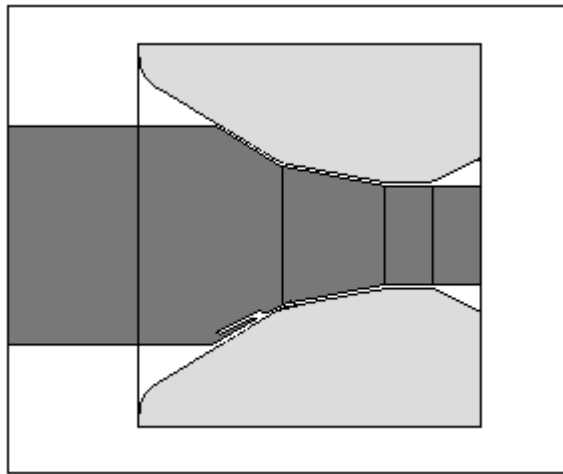


Figura 9. Penetração de lubrificante em fratura.

Fonte: TRE-501.

A manipulação, a armazenagem e o processamento do fio-máquina após a saída do laminador se dá por uma série de operações como o próprio transporte, a prensagem para acomodação das espiras, a compactação do material, o cintamento para manter o formato uniforme, o transporte para decapagem química ou para os estocadores de máquinas com decapagem mecânica (como no caso do C.A./C.E. 2,02 mm). Ademais, a simples retirada do material para a entrada da máquina pode gerar danos à superfície criando arranhões, dobramentos ou desgaste por fricção, iniciando os defeitos de superfície.

A necessária preparação do fio-máquina para a remoção dos óxidos formados no processo de laminação, assim como o recobrimento da superfície do arame com um carreador salino (ou porta lubrificante), para melhorar o nível de lubrificação, são pontos críticos na prevenção de ocorrência dos defeitos superficiais citados.

No caso do arame trefilado para Culturas Aéreas, maior será a chance deste tipo de quebra ocorrer quanto maior for o número de passes e pontos de contato do arame com a máquina, pois são reduções significativas entre passes que exigem, ao invés de máquinas trefiladoras de tambor ou bloco (que são mais simples e aplicadas principalmente a barras finas e arames grossos ou máquinas duplas para arames médias), máquinas de múltiplos passes que permitam a redução até o arame no diâmetro desejado.

Esse processamento também exige cuidados adicionais quanto à refrigeração das fieiras e do próprio material, pois, a cada passe no bloco seguinte, o material encontra-se com diâmetro menor, mas com velocidade maior. Nesta etapa, roldanas fletoras desgastadas ou marcadas, lixas de granulometria irregular, ajustes do processo de lixamento, como excesso de tensão, podem marcar o arame, assim como na trefilação em si e na própria condução do arame por roldanas, roletes e guias, fieiras danificadas ou excessivamente desgastadas.

A preparação superficial do arame, essencial para minimizar uma condição extrema de atrito entre o material e a fieira, é essencial, pois, se além de suas próprias imperfeições, o material ainda possuir carepa (película de óxido de ferro) ao longo de sua superfície, a execução do processo pode se tornar inviável. Neste caso, a carepa precisa ser removida.

Segundo Cetlin (2010), todos os três tipos de óxidos (Wustita = FeO; Magnetita = Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> e Hematita = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que compõem a carepa são mais duros que o aço (270 a 1000 - HV) e, conseqüentemente, quebradiços, sendo interessante, do ponto de abrasão da fieira, que a camada seja o máximo possível formada por FeO (menor dureza).

Na eventualidade desse óxido passar em uma fieira, ele se quebraria em muitos fragmentos, causando desgaste e marca no arame. Neste processo de preparação do fio-máquina para o Cultura Aérea, utiliza-se decapagem por flexão, que é a passagem do mesmo por polias que dobram o material em diferentes planos a fim de quebrar a carepa. De maneira alguma, o arame poderá estar molhado ao ir para o decapador por flexão, pois isso inviabiliza a retirada da carepa.

Existe também, neste processo de decapagem, um alongamento do material efetuado pela força necessária para trefilar na primeira fieira (que é usada também para a trefilação) e puxar o material através do decapador, o que causa uma tensão anterior a de trefilação, causando o alongamento. Esse alongamento é benéfico para a retirada de carepa.

A passagem do fio-máquina, no início do processo, pelas polias decapadoras para a remoção de carepa, segundo TRE 501 (2010), deve ser feito em diferentes planos para que nenhuma parte da superfície fique sem ter as fibras alongadas ou retraídas de forma a eliminar a maior quantidade de carepa possível. Esse efeito faz com que a resistência ao escoamento

seja mais afetada do que a resistência à ruptura, além de alterar o alongamento. A prevalência de um ou outro fenômeno dependerá do tipo de material e da severidade da decapagem. Aços de maior resistência (alto carbono) são mais sujeitos ao efeito Bauschinger (1886) que aços de menor resistência (baixo carbono) pelo fato das tensões assimétricas consequentes serem maiores nos mais resistentes.

Como o aço utilizado no arame Cultura Aérea é um SAE 1057B, ele se enquadra na possibilidade de ocorrência do efeito. Efetivamente, a possibilidade é descartada quando se observa que o mesmo ocorre antes do processo de trefilação sem ter consequências significativas, pois apenas acarretará uma resistência ao escoamento um pouco menor e, por conseguinte, um maior alongamento, não sendo a origem dos problemas analisados.

Outra implicação da decapagem mecânica é que, na sua ausência, o material entra na caixa de sabão agitando o mesmo, e essa agitação provoca a formação de túneis no lubrificante, piorando a lubrificação. No caso do C.A./C.E. 2,02 mm, as caixas de sabão possuem grampos instalados para que girem à medida que o arame passar pelas roldanas, agitando o sabão por palhetas que acompanham este movimento, impedindo a ocorrência deste fenômeno.

Uma característica que diferencia a superfície do arame após a decapagem química e a mecânica, como no caso avaliado, é que a química ataca a superfície do aço formando um enorme número de pequenas crateras arredondadas, enquanto a mecânica, presente no processo, deixa expostos longos sulcos alinhados longitudinalmente, formados no processo de laminação pelos cilindros. Isto ocasiona um escorrimento do sabão pelo material, não sendo tão eficiente quanto as crateras da decapagem química, que armazenam e distribuem o sabão pela superfície, retendo mais lubrificante. Logo, conclui-se que, para que os lubrificantes sólidos sejam arrastados pelo material, é necessário que o arame ou fio-máquina possuam certa rugosidade.

Depois de trefilado, o arame é processado na galvanização e recebe como cobertura uma camada de zinco protetora a fim de aumentar a resistência à corrosão do substrato. Reavaliando-se os cenários de forma mais ampla, começa-se a entender que devem ser considerados outros aspectos, não só mecânicos, que possam influenciar a ocorrência de quebras também pelo processo de galvanização a fogo.

Normalmente, na utilização de aços convencionais no processo de galvanização a fogo, espera-se que o material resultante desse processamento não apresente efeitos significativos nas propriedades mecânicas, além de ter aumentada a durabilidade do substrato pela adição da camada protetora, reduzida a dureza e aumentada a ductilidade pela passagem

na temperatura do processo de recozimento da galvanização (quando aplicável pela necessidade do produto a ser obtido). Teoricamente, esse aumento de ductilidade deveria reduzir a incidência de quebras nos ensaios de enrolamento, comparativamente ao arame trefilado.

Para uma análise detalhada do processo, é necessário, inicialmente, seccionar toda a galvanização em etapas, observando os possíveis efeitos em cada uma delas e sua possível contribuição no efeito da quebra do arame Cultura Aérea no ensaio de enrolamento.

A linha de galvanização de arames é uma sequência de processos contínuos pelos quais o arame passa de forma ininterrupta, sendo que a galvanização propriamente dita é uma das últimas etapas. Há dois processos fundamentais em toda a linha: o recozimento, utilizado para adequar a resistência do arame, e a galvanização, que é o recobrimento com zinco propriamente dito para proteger o material da corrosão. De acordo com TRE 505 (2008), como antes do processo de galvanização o arame é trefilado, sempre existem em sua superfície resíduos de lubrificantes, assim como óxidos decorrentes do contato com o ar e da alta temperatura de recozimento. Para um produto de melhor qualidade, uma limpeza superficial é necessária para a adesão da camada de zinco no substrato.

Entre os processos, ainda serão necessárias outras etapas para buscar garantir uma aparência melhor ao arame: o resfriamento, a decapagem, a lavagem, a fluxagem e a secagem, havendo ainda, após a galvanização, um pós-tratamento para uma melhor aparência do arame.

O bobinamento e o desbobinamento são as etapas nas quais o arame é desenrolado em uma ponta e enrolado em outra, sendo conduzido ao interior de tanques, fornos, cubas e bandejas. Da mesma forma que na trefilação, antes de um rolo ser desenrolado, ele deve ser soldado ao rolo posterior para que não haja a interrupção do processo e, assim, quando o rolo posterior acabar, ele o substituirá. Embora o desbobinamento seja a primeira etapa, todo o movimento do arame é efetuado pelo acionamento do bobinamento no final da linha. Assim, um sistema de comunicação entre as duas pontas da linha permite o desligamento do acionamento antes que o arame rompa-se caso ocorram problemas, o que geraria uma quebra por excesso de tração.

Para isso, uma verificação superficial da qualidade das espiras (procurando identificar enleios entre as voltas ou danos no arame) é suficiente para evitar quebras no desbobinamento. As características do processo de desbobinamento tangencial utilizado no arame Cultura Aérea 2,02 mm trazem vantagens, como a de não causar a torção sobre o próprio corpo, o que o torna obrigatório para arames com altos teores de carbono, como é o

caso do SAE 1057 B. Em um desbobinamento vertical, a torção do arame poderia levar à ruptura do mesmo, ou então à geração de pontos de concentração de tensão.

O tensionamento, que é a etapa seguinte ao desbobinamento, é feito para manter os arames alinhados ao longo da linha impedindo trocas, contatos que possam reduzir a troca térmica no recozimento ou a entrada no ângulo correto dos arames nos banhos. Outra consequência de tensionamento inadequado é trazer a vibração na condução do arame pela linha, o que compromete a qualidade da camada galvanizada.

De acordo com TRE 505 (2008), diferentemente do endireitamento, no tensionamento, o arame não se move, nem é induzido a deformações, sendo necessárias aplicações de força bem menores. Este tensionamento se dá pela força de atrito, que aumenta a força necessária para puxar o arame na linha, o que, em arames menos resistentes e com maior massa (maior que 3,5 mm de diâmetro), ocasiona uma redução de bitola pelo uso de força de tração superior à resistência de escoamento. Esse fato, como descrito, não se enquadra no material do estudo em questão, pois, por ter bitola inferior a 3,5 mm de diâmetro, é caracterizado como arame de média a alta resistência.

Dentre os vários equipamentos da linha, uma série deles tem como função única a condução dos arames. Para isso, utilizam-se guias feitas de tubos, postes com fieiras, pentes, rolos e roletes e pedras ou rolos de imersão para que o arame mergulhe em tanques e cubas. Com o tempo, esses equipamentos desgastam-se e necessitam de reparos a fim de evitar o trancamento do arame nos pontos mais críticos e a consequente quebra dos mesmos.

Na etapa de pré-formatação das espiras, junto ao bobinamento, existem conjuntos de roletes com o objetivo de pré-formatar a espira e, assim, permitir a formatação adequada dos rolos nos estocadores e carretéis. Esses conjuntos de roletes podem ser ajustados para endireitar ou pré-formatar a espira, mudando-se, basicamente, a regulagem da pressão aplicada. Uma pressão menor será usada para tensionar. Para endireitar, deve-se aumentar a pressão nos primeiros roletes e reduzi-la nos roletes finais. Já para pré-formatar, todos os roletes devem estar bem pressionados.

Conforme TRE 505 (2008), para que o conjunto de roletes possa conformar o arame formando as espiras na galvanização, é fundamental que esteja colocado no plano de deformação que se quer introduzir. A aplicação consecutiva e alternada destas tensões de tração e compressão em uma mesma fibra do material pode alterar a resistência do mesmo pelo mesmo princípio observado no decapador de flexão pelo efeito Bauschinger (1866) que, de acordo com ASM Metals Handbook v. 19, tem o limite elástico, após a deformação plástica em uma direção, reduzido se a direção da carga for invertida. Em geral, o efeito



Bauschinger (1866) irá afetar mais a resistência ao escoamento do que a resistência à ruptura, principalmente em materiais como o analisado neste estudo, que é um arame de maior resistência (maior percentual de carbono) e mais sensível a este tipo de fenômeno.

No bobinamento final, o arame Cultura Aérea 2,02 mm utiliza um sistema de bobinamento vertical conhecido como Live Block, o qual possui uma cabeça giratória. Este é, de acordo com TRE 505 (2008), um dos principais motivos por que neste sistema também não ocorre torção do arame, o que é obrigatório para arames de médio e alto carbono de resistência maior que  $140 \text{ kgf/mm}^2$  ou bitolas maiores que 6,00 mm.

Algumas deformações do arame são provenientes dos processos anteriores à galvanização; outras são criadas na própria linha, como quando se formam dobras de preparação pelo engate do arame na fieira guia durante a soldagem ou flexões decorrentes da atuação de outros dispositivos utilizados para os desvios de rota necessários com os pentes e pedras. Estes desvios devem ser minimizados ao máximo, mas não são responsáveis pelas características das quebras identificadas no material analisado, da mesma forma que se concluiu na análise da etapa de trefilação.

Para garantir a passagem do arame pela linha de galvanização com um mínimo de quebras, devem ser considerados os esforços aos quais o arame está submetido, como o seu peso próprio, a ação do freio de desbobinamento e atritos entre as partes fixas e móveis da linha. Sempre que o esforço for superior à resistência do arame, este ou se romperá ou sofrerá um estiramento com uma diminuição (estricção) de sua bitola, o que inviabiliza a continuidade do processo ou reprova o material nas amostras dimensionais antes mesmo do ensaio de tração ou enrolamento.

A resistência do arame é principalmente definida pela composição química na aciaria e pelos processos termomecânicos posteriores. Na galvanização, um dos principais cuidados é o de não trocar os materiais empregados na fabricação do arame galvanizado ou seja, os matérias não devem ser misturados.

No recozimento, o tratamento térmico tem como principal função remover o encruamento decorrente do processo de trefilação. Após esse recozimento, a resistência baixa, mas há um aumento de ductilidade, o que permite uma posterior conformação e facilita o manuseio do produto, além de sua aplicação e o próprio teste de enrolamento sobre o próprio eixo. O recozimento é efetuado nas cubas de chumbo pela imersão do arame em chumbo fundido ou em fornos. Para que o recozimento completo ocorra, é necessário que o arame seja mantido a uma determinada temperatura por certo tempo.

No caso do recozimento efetuado na linha de galvanização, ele é conhecido como recozimento subcrítico ou mesmo um recozimento para alívio de tensões. Estes parâmetros são definidos em função da composição química, do grau de redução na trefilação e da necessidade de aplicação posterior, sendo pouco influenciados pela rotina operacional desde que sejam avaliados e mantidos. Os cuidados com a solda devem obedecer aos parâmetros já abordados na etapa de trefilação, não sendo necessária nova discussão do tema.

Um tratamento térmico pode ser definido como um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento em que se controlam o tempo e a temperatura buscando alterar a estrutura e as propriedades do material. Na galvanização, o tratamento térmico de interesse é o do recozimento para recristalização, também conhecido como subcrítico. Este recozimento tem por objetivo remover o encruamento decorrente da trefilação do arame adequando-o às exigências de resistência e ductilidade, mas tem também um objetivo secundário que é a queima de eventuais resíduos do lubrificante utilizado no processo de trefilação.

Como o arame Cultura Aérea é um arame de formato ovalado de alta resistência, não se faz necessária a sua passagem pelo recozimento a fim de remover o encruamento. Ele é feito unicamente para garantir a remoção do sabão.

De acordo com TRE 020 (2002), o encruamento ocorre quando um aço é deformado a frio. Quando se olha a microestrutura de um aço, veem-se basicamente grãos, que são um conjunto de átomos que seguem uma determinada regra de empilhamento. Entre esses átomos, temos uma região de fronteira, conhecida como contorno de grão, que existe em função de uma desordem decorrente da diferença de orientação cristalográfica entre um grão e outro. Nesta região é que estão localizados os defeitos e as impurezas expulsas pelos grãos, com características diferentes destes grãos.

Na trefilação de arames, os planos atômicos dentro de cada grão são deslocados por escorregamento, de tal forma que a deformação passa a ser permanente (plástica), e os grãos, que inicialmente eram equiaxiais, passam a ser alongados pela deformação, caracterizando o encruamento. O mesmo não pode perdurar.

Resumindo, o encruamento aumenta a resistência à tração, o limite de escoamento e a resistência elétrica, bem como diminui a ductilidade (capacidade de o material ser deformado) e a resistência à corrosão.

O recozimento é um tratamento térmico efetuado para refazer as microestruturas dos processos anteriores, como conformação mecânica, solidificação ou mesmo outros tratamentos térmicos. Quando um aço é conformado a quente (acima da zona crítica – campo austenítico), recristaliza-se imediatamente, mas quando é conformado a frio (campo ferrítico)

isso não ocorre. Neste caso de recozimento para recristalização, o aço encontra-se termicamente em um alto estado de instabilidade devido ao encruamento, pois os cristais deformados plasticamente possuem uma maior quantidade de energia do que aqueles que não deformados por possuírem muitas discordâncias e outras imperfeições. Esses cristais, encontrando uma condição oportuna, se acomodarão de forma a apresentar um arranjo mais ordenado e com menor energia.

Essa condição é oportunizada quando os cristais são aquecidos acima de uma dada temperatura, que é a temperatura de recristalização. Como a agitação térmica do reticulado é maior em temperaturas mais elevadas, há o rearranjo dos átomos em grãos menos deformados sem que tenha havido a transformação para austenita. Esse processo é conhecido como recristalização, e o tratamento em si é denominado recozimento para recristalização. Esse recozimento difere-se de outros recozimentos por não haver a necessidade do aquecimento do aço a uma temperatura superior à da zona crítica.

As três fases da recristalização, de acordo com TRE 020 (2002), são (1) o alívio de tensões, na qual o aspecto cristalográfico do aço permanece encruado, ou seja, com os grãos alongados; (2) a recristalização em que surgem os grãos equiaxiais; e por fim, (3) o crescimento de grãos fase em que se dá a reorganização total.

O aço tem, normalmente, seus átomos em posições mais instáveis. Ao ser progressivamente aquecido, por conta da maior mobilidade atômica em função da maior temperatura, atinge uma posição de maior equilíbrio, não havendo alterações perceptíveis na microestrutura. Com o contínuo aumento da temperatura e do tempo nestas temperaturas, estes mesmos átomos começam a se reorganizar de forma a restaurar o reticulado, derivando dos núcleos iniciais de sua reorganização, desenvolvendo novos grãos. E finalmente, para temperaturas superiores e tempos maiores, os grãos maiores crescem, absorvem os menores e originam um crescimento de grão. Esse mecanismo, pela redução do número de contornos de grãos por unidade de área, é responsável pela restauração da ductilidade do aço e pela queda de resistência e de tenacidade.

Para que ocorra a recristalização, uma deformação mínima é necessária, abaixo da qual a recristalização ferrítica não irá acontecer, independentemente da temperatura que se use. Para aços de baixo carbono, a deformação é de cerca de 3%. Para deformações superiores à crítica, mas ainda pequenas, são necessárias temperaturas muito superiores do que as aplicadas para grandes deformações. Isso acontece porque um material fortemente encruado, como é o caso do CA 2,02, possui uma grande quantidade de energia armazenada e está muito

instável termodinamicamente, esperando a condição para retornar a uma posição de menor energia livre. Para que isso ocorra, pequenas temperaturas são suficientes.

Deve-se considerar que as temperaturas às quais os fenômenos são relacionados são do arame e não do forno e que as mesmas dependerão, basicamente, de várias outras variáveis como, por exemplo, o tipo de forno de tratamento térmico, a temperatura do mesmo, o seu comprimento, a forma de transferência de calor e a velocidade com a qual o material passará pelo mesmo.

## 2.6 ENVELHECIMENTO

O envelhecimento é um processo no qual átomos intersticiais dissolvidos de carbono e nitrogênio migram dos interstícios em direção ao núcleo das discordâncias ancorando-as pela formação de atmosferas de Cottrell (1953) em sua volta. O processo tem relação direta com a função temperatura, ocorrendo muito lentamente em temperaturas ambientes e muito rapidamente em temperaturas elevadas.

Cottrell (1953) ainda complementa que o envelhecimento por deformação, através da ancoragem e da imobilização das discordâncias, é um processo eficaz de aumentar a resistência à fadiga, que deve ser, basicamente, também uma forma de dificultar a deformação plástica. O envelhecimento após deformação está ilustrado pela Figura 10.

Em um aço macio, o envelhecimento após a deformação demora, normalmente, alguns dias em temperatura ambiente e cerca de 30 minutos a 100 °C para acontecer, sendo sua velocidade controlada pela difusão dos átomos de nitrogênio e carbono, ou seja, a energia de ativação é de 0,8 a 0,9 eV. Se o tratamento de envelhecimento for mais prolongado, pode também haver um endurecimento geral devido à precipitação de carbonetos e nitretos.

Dieter (1988) diz que o envelhecimento é um comportamento no qual a resistência de um metal aumenta e a ductilidade diminui em aquecimentos em relativas baixas temperaturas após conformação a frio.

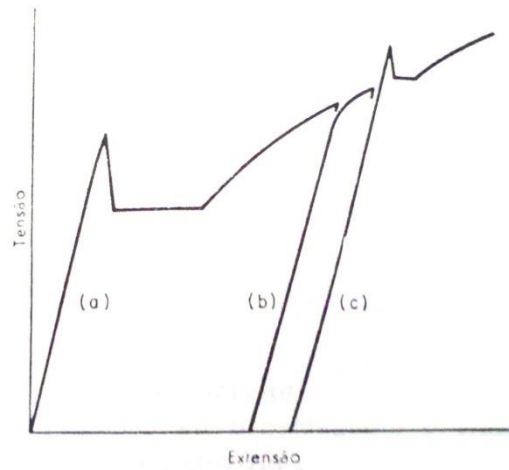


Figura 10. Envelhecimento após deformação.

Fonte: Dieter, 1988.

Em aquecimentos do arame em temperaturas como a de recozimento, ocorre a dissolução da cementita na ferrita, que tem sua solubilidade aumentada exponencialmente com o aumento de temperatura. Ao ser resfriado rapidamente, o carbono dissolvido não tem tempo de se reorganizar por difusão na forma de cementita e se mantém em forma de solução sólida supersaturada e instável.

Encerrado o resfriamento, e já em temperatura ambiente, o carbono encontra-se em uma forma muito instável, fazendo com que sua precipitação em cementita seja espontânea e extremamente lenta, pois depende da difusão que será facilitada pela temperatura. No caso da temperatura ambiente, o processo ocorrerá muito lentamente. Inclui-se aí também o fato de que a fase precipitada não será originada com a sua estrutura final ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), mas apresentará uma estrutura intermediária chamada carboneto épsilon, que é  $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ , diferindo-se da cementita por ser menor, mais duro e localizar-se ao longo dos planos de deslizamentos das discordâncias.

Essa estrutura também é instável e se transformará lentamente em cementita, mesmo em temperatura ambiente. Isto, na prática, mostrará que o arame terá, ao longo dos dias, suas propriedades alteradas, como o aumento da resistência e da dureza, durante a formação do carboneto épsilon, vindo a cair posteriormente, durante a passagem do carboneto épsilon a cementita.

Dessa forma, constata-se que a cuba de galvanização (zincagem) também funciona como um tratamento térmico, pois a temperatura acelera a formação do carboneto épsilon em cementita além de permitir uma nova dissolução do carbono. Com seu resfriamento imediato,

repete, de forma mais amena, o processo anteriormente descrito, sendo que o aumento da resistência depende principalmente do teor de carbono do aço.

O envelhecimento está associado com tensões resultantes da deformação plástica no trabalho a frio, no caso específico deste processo de trefilação abordado, deformação por conformação a frio em feiras com diâmetros pré-definidos em que o material tem seus grãos deformados. O processo de trefilação nada mais é do que um processo de conformação em temperatura ambiente em que ocorrerá o fenômeno de encruamento. Alguns tipos de aço, quando utilizados em métodos de fabricação que envolvam quantidades significativas de deformação a frio anterior ao processo de galvanização, podem, no processamento subsequente, apresentar alterações nas características mecânicas que afetem seu desempenho no uso.

A deformação severa a frio causa a migração dos átomos de carbono dos cristais de ferro e a segregação destes átomos nas discordâncias no aço, ocasionando uma redução na ductilidade do aço.

Como na cuba de chumbo o material é aquecido a 450° C antes de mergulhar na etapa de decapagem química, o pequeno diâmetro do material em questão, junto com uma alta taxa de transferência de calor do chumbo garantem uma homogeneidade da temperatura mesmo com a passagem do arame trefilado na velocidade de 0,75 m/s encontrada no processo. Os resultados encontrados nos ensaios enquadram-se perfeitamente na hipótese do envelhecimento.

Não há uma constância nos argumentos analisados nos artigos pesquisados, pois os resultados dos mesmos estão intrinsecamente ligados ao tipo de aço especificamente estudado em cada caso, mas as conclusões obtidas sempre convergem para o mesmo tópico: o envelhecimento. O artigo de Sachdev (1982), que aborda o envelhecimento de diversos tipos de aços, traz que aços de alta resistência têm menores aumentos de dureza pelo envelhecimento estático que aços mais macios devido a um processo cinético mais lento e que em um aço SAE 1008 a ductilidade é severamente afetada (reduzida) entre 100 e 250°C. Novamente, as conclusões desse artigo são descartadas pelo processo de quebra apresentar-se após a trefilação, em que seria possível encontrar o processo de envelhecimento dinâmico.

Segundo Yamada (1975), no primeiro estágio do envelhecimento, que ocorre em temperaturas abaixo de 150°C, carbono e nitrogênio, supersaturados na ferrita, ancoram discordâncias, resultando em aumento de dureza. Entretanto, não há uma contribuição significativa ao primeiro estágio pelo carbono.

O segundo estágio aparece apenas em materiais altamente encruados a temperaturas de 150 a 250°C, em que tanto a resistividade como a dureza aumentam, mas a fricção interna diminui. Neste estágio, pequenas quantidades de energia dissolvem a porção lamelar da cementita, e o ancoramento das discordâncias pelo carbono passa a ocorrer.

O terceiro estágio corresponde ao contínuo envelhecimento no ponto de vista de resistência à tração.

Segundo Nesterenko et al (2009), que estudaram as mudanças nas características mecânicas pelo envelhecimento do fio-máquina feito de aço Sv-08G2S microligado com Boro, os efeitos do envelhecimento podem ser vistos após o material ter sido deformado em temperatura ambiente ou durante uma ativação térmica usualmente na faixa de 100°C a 500°C, onde passa a ser referenciada como envelhecimento estático. Também podem se manifestar durante a deformação em si, referenciadas como envelhecimento dinâmico, tópico que não será abordado aqui, sendo que os mecanismos responsáveis pelo envelhecimento são baseados nas leis que governam as interações entre átomos impuros, especialmente átomos de carbono (C) e de nitrogênio (N).

Como não há deformação no processo de galvanização avaliado, e as amostras comparadas são coletadas sempre após o processo de trefilação para a realização dos ensaios, descarta-se para esta interpretação a influência do envelhecimento dinâmico e caracteriza-se o envelhecimento estático dentro da faixa de temperatura citada pelos autores. Os mesmos consideram que existem consequências positivas do envelhecimento de aços e ligas, como é caso do endurecimento, mas também negativas, como uma redução na ductilidade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

No processo atual, o arame é trefilado de acordo com a sequência de reduções da tabela 1 e, antes de finalizado, passa pelos processos de recozimento em imersão em chumbo a 450 °C, decapagem química em ácido clorídrico com concentração de 180 a 200 g/l e com temperatura de 60 a 70 °C. Depois, passa também pela fluxagem, a zincagem a 450°C (imersão em zinco líquido), raspagem por gaxetas e cromatização.

Tabela 1. Sequência de reduções no processo de trefilação.

	Entrada	1° Passe	2° Passe	3° Passe	4° Passe	5° Passe	6° Passe	7° Passe
Diâmetro (mm)	5,50	4,60	3,90	3,34	2,88	2,52	2,22	1,88x 2,02
Redução de área por passe (%)	0,00	30,05	28,11	26,65	25,65	23,43	22,39	28,28

No estudo realizado, foram considerados relatos de ocorrências associadas ao processo de galvanização a fogo que resultam na alteração de propriedades mecânicas, como a fragilização por metal líquido, associado principalmente à galvanização de aços inoxidáveis, embora isto não tenha sido objeto deste trabalho. A fragilização por hidrogênio, principalmente em aços de alta dureza, causada pela presença de átomos de hidrogênio na estrutura cristalina de metal ou liga, que durante o processo de galvanização foram absorvidos no contato com íons de hidrogênio presentes no ácido clorídrico, também não caracteriza o aço em estudo. Por fim, a hipótese que melhor se enquadra nas características do material em estudo: o envelhecimento.

A amostragem desse estudo foi constituída de trinta e seis relatórios de análises gerados, de outubro de 2010 a setembro de 2011, sobre o desempenho do produto Cultura Aérea 2,02 mm de diâmetro, aço SAE 1057B intermediário trefilado, ou do produto final galvanizado. Os dados referem-se às falhas do mesmo em quaisquer etapas do processo produtivo, como no desbobinamento, na decapagem, na trefilação, no bobinamento, na galvanização e mesmo na aplicação em campo.



Buscando assegurar a assertividade das conclusões, para análise laboratorial, foram coletadas amostras do produto partindo-se de um lote de fio-máquina identificado e rastreado, sobre o qual se procedeu a transformação mecânica e tratamento de superfície e de onde foram colhidas amostras nas etapas de entrada de material laminado, de entrada de material trefilado e de saída de material galvanizado para avaliação.

Ainda de forma a buscar garantir a repetibilidade dos resultados obtidos nos relatórios e na análise laboratorial, foram coletadas amostras em um teste efetuado em outro equipamento de trefila em que foram mantidos os mesmos percentuais de redução encontrados no processo analisado.

### 3.2 INSTRUMENTOS

Para melhor visualização do trabalho, a partir das análises descritivas efetuadas, elaborou-se um quadro com as principais ocorrências das variáveis analisadas. Amostras de materiais foram coletadas e analisadas em uma máquina de ensaio de tração modelo EMIC DL10.000, uma Célula de carga 263-FMET-001/01, um Estereoscópio Zeiss modelo SR e um iluminador Schoott modelo KL-1500-Z do Laboratório de Desenvolvimento de Qualidade da Gerdau.

### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o recebimento de amostras dos arames, sempre que as mesmas estavam em espiras, as pontas estavam presas com fita ou qualquer outro meio que impedia que ficassem expostas, facilitando o manuseio e o acondicionamento seguro.

Para a realização dos ensaios de tração, as amostras foram cortadas com um tamanho mínimo de 300 mm, permitindo sua utilização na máquina EMIC DL-10.000 (Figura 11). O corte das amostras para o ensaio de tração era feito com uma tesoura manual utilizada para bitolas finas.



Figura 11. Máquina de ensaio de tração EMIC DL 10.000, Laboratório de Desenvolvimento da Qualidade.

Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma célula de carga 263-FMET-001/01 recomendada para corpos de prova com cargas máximas até 4,5 t (Figura 12).



Figura 12. Célula de carga 263-FMET-001/01 Laboratório de Desenvolvimento da Qualidade.

Para os ensaios em que o limite de escoamento foi determinado, as amostras apresentavam-se o mais linear possível, para evitar distorções de resultados. Caso as amostras apresentassem tortuosidade, realizava-se o endireitamento: dobrava-se o corpo de prova em sentido contrário à tortuosidade, deixando-o o mais reto possível, tentando evitar que a amostra alterasse suas propriedades mecânicas por encruamentos pontuais.

Para a realização do endireitamento, como eram amostras de pequeno diâmetro pôde-se utilizar as mãos. Caso as amostras apresentassem dificuldade para serem endireitadas, utilizava-se o dispositivo de endireitamento de amostras após sua fixação na morsa. Em amostras em que a verificação do escoamento não for solicitada, não é aconselhável o endireitamento.

Ao endireitar as amostras, evitou-se que o corpo de prova fosse dobrado em excesso e passasse do ponto ideal. Isso poderia provocar encruamentos pontuais que interfeririam nos resultados finais.

Para obter a área de seção transversal ( $S_o$ ) para os arames, determinou-se a ovalização e o diâmetro médio do corpo de prova utilizando micrômetro para se obter valores de 0.01mm de precisão, e assim calcular seu valor (equação 1).

$$S_o = \frac{\pi D^2}{4} S_o \quad (1)$$

Antes do início do ensaio de tração, marcou-se o “Lo” sempre que se objetivava a verificação do alongamento dos CP’s. O Lo varia de acordo com o diâmetro de cada amostra e é determinado sempre multiplicando o diâmetro da amostra por 10. A escala de medição está representada na figura 13.

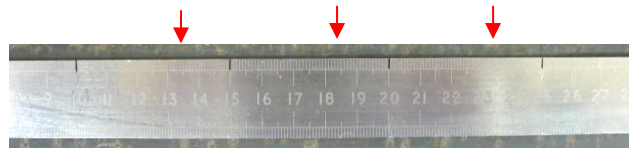


Figura 13. Escala de medição de comprimento.

Depois de marcadas na escala as distâncias de “Lo”, deve-se colocar a amostra ao lado da escala e, com um riscador de ponta fina, marcar o corpo de prova obedecendo às marcas pré-estabelecidas na escala. Quando o objetivo é somente a verificação da força máxima, não é necessária a marcação do “Lo”. Deve-se deixar um comprimento mínimo de 50 mm em ambas as extremidades do corpo de prova para a fixação nas garras da máquina de tração.

Para determinar o valor do alongamento, deve-se unir da melhor maneira possível as faces de ruptura e, com paquímetro de precisão 0.01mm, medir o intervalo de marcação “Lo”, obtendo-se, assim, o valor de  $L_f$ . Determina-se, então, o percentual de alongamento. A incorreta união das faces de ruptura para a medição do alongamento acarretará uma incorreta medição do alongamento no CP.

Para a estrição, deve-se medir o menor diâmetro do corpo de prova, com paquímetro de precisão 0.01mm após ensaio, pois ela, geralmente, localiza-se na região de fratura. Então, calcula-se o percentual de redução da seção pela equação 2.

$$\%redução = \frac{\text{diâmetro médio na estrição} \times 100}{\text{diâmetro médio inicial}} \quad (2)$$

Os resultados dos ensaios, que devem ser realizados com uma quantidade mínima de três por condição, devem apresentar estabilidade para serem considerados. Se ocorrerem variações de resultados em uma mesma condição de amostra, devem ser repassados todos os passos do procedimento e ensaiado um maior número de corpos de prova novamente.

Nas análises superficiais das amostras, foi utilizado um Estereoscópio ZEISS, modelo SR e um iluminador SCHOOTT, modelo KL-1500-Z (Figura 14).



Figura 14. Estereoscópio ZEISS, modelo SR, e iluminador SCHOOTT modelo KL-1500-Z Laboratório de Desenvolvimento da Qualidade.

Para a simulação da utilização do produto em campo, da mesma forma que se realizam os ensaios de qualidade dos arames C.A. C.E., realizam-se os ensaios de enrolamento. O principal resultado do ensaio de enrolamento tem como objetivo verificar a aderência da camada de Zn na superfície do arame.

Para a realização do ensaio, devem-se cortar as amostras com um tamanho de 400 mm com auxílio de uma tesoura manual. Com a mão, realizar um leve endireitamento da amostra a ser ensaiada, se esta se apresentar com uma elevada tortuosidade (Figura 15).



Figura 15. Exemplo de amostra endireitada.

Na escolha do dispositivo de enrolamento, composto por um braço de alavanca de 400 mm (Figura 16a) com um furo na ponta de diâmetro equivalente (Figura 16b); neste caso o ova 2,02 mm de diâmetro.



Figura 16. Dispositivo de ensaio de enrolamento. a) Visão geral b) Detalhe do dispositivo.

Antes de iniciar o ensaio, deve-se dobrar em formato “U” a amostra de arame que será submetida ao ensaio (Figura 17), sendo uma das pontas com comprimento de 80 a 100 mm e a outra com o restante da amostra.



Figura 17. Corpo de prova com dobra em U pronto para ensaio.

A amostra deverá ser fixada na morsa de bancada com as duas pontas para cima, conforme a Figura 18.



Figura 18. Fixação do corpo de prova na morsa.

Para o preparo da amostra para o encaixe no dispositivo, após fixa-la na morsa, é preciso entortar o maior lado de modo que os arames se cruzem a  $90^\circ$  (Figura 19).

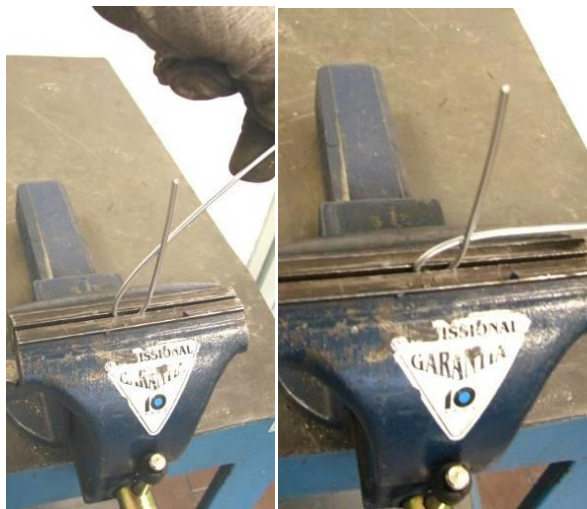


Figura 19. Detalhe da preparação do corpo de prova na morsa.

No encaixe do dispositivo, a menor ponta do arame deve ser encaixada no furo do dispositivo, e o mesmo deve descer até que se encoste na ponta maior do arame próximo à base da morsa (Figura 20).

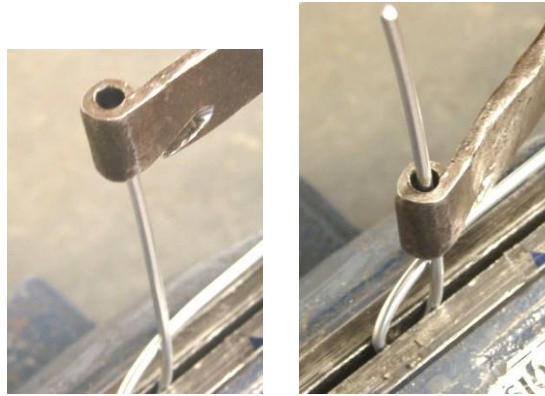


Figura 20. Encaixe do corpo de prova no dispositivo de ensaio de enrolamento.

Depois, encaixar o rasgo lateral do dispositivo na amostra (Figura 21).

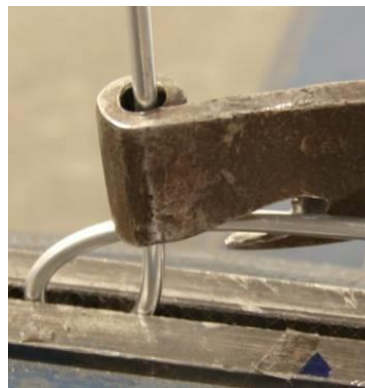


Figura 21. Detalhe do encaixe da amostra no rasgo do dispositivo de ensaio de enrolamento.

Respeitados os passos anteriores, pode-se executar o ensaio. Com o dispositivo encaixado na amostra, realizar movimento rotativo de forma contínua, enrolando o arame em seu próprio corpo (Figura 22).

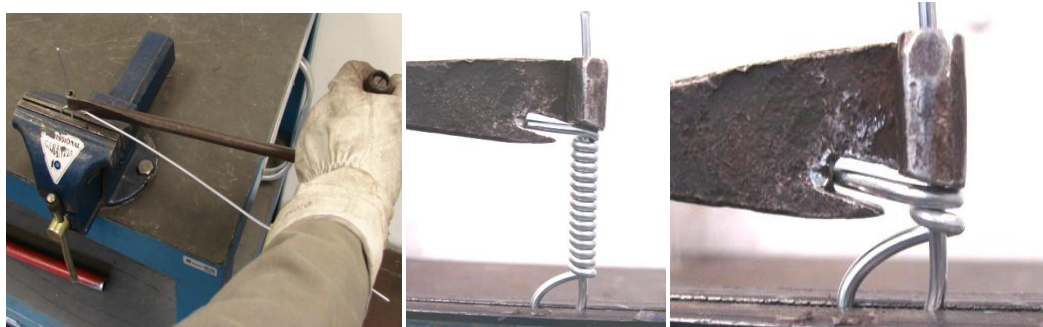


Figura 22. Diferentes etapas da realização do ensaio de enrolamento.

Após a realização de um mínimo de oito voltas, puxar o dispositivo para cima, desencaixando o rasgo da amostra (Figura 23).



Figura 23. Retirada do dispositivo de ensaio após término do ensaio.

Solta-se a amostra da morsa para posterior avaliação. Conforme descrito na Norma ABNT NBR 6756 (2007) item: 4.11, a camada de zinco não deve apresentar rachaduras, a ponto de ser removida esfregando-se o dedo sobre ela.

Alguns cuidados adicionais devem ser observados: controlar que as espiras não apresentem folga entre si e que o arame central e as voltas sobre o próprio corpo se apresentem a  $\pm 90^\circ$  do corpo (Figura 24).



Figura 24. Arame apresentando forma correta após ensaio.



### 3.4 COLETA DOS DADOS

Os dados analisados dos relatórios foram coletados entre o período de outubro de 2010 a setembro de 2011, excluindo-se aqueles nos quais foram alterados parâmetros de processo (diferenciando-se do Padrão de Fabricação) para investigação de causa e efeito, e sintetizados no quadro de relatórios analisados para facilitar a ilustração do problema. Os dados dos testes de assertividade foram retirados do relatório OS1335 MF, emitido em 15 de dezembro de 2011, e são parcialmente apresentados neste trabalho. Os dados do segundo teste (de repetibilidade), em equipamento alternativo, foram retirados do relatório OS 0647, emitido em 20 de julho de 2012, sendo estes também parcialmente apresentados.

### 3.5 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram analisados de forma descritiva, utilizando percentual de contribuição dentro do universo total do problema no período analisado, e os desvios consideram a diferença entre a média aritmética simples dos resultados.

### 3.6 LIMITAÇÕES

Os dados considerados na análise foram colhidos dentre os relatórios emitidos, considerados relevantes e disponíveis no período.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No processo estudado, a matéria-prima do processo de trefilação, o fio-máquina composto pelo aço SAE 1057B, é, no roteiro de fabricação do arame, primeiramente trefilado e, depois, galvanizado. O processo tem início com o fio-máquina passando por uma decagem mecânica por flexão em roldanas metálicas posicionadas em eixos alternados em planos de 90° e passa, em seguida, mecanicamente, por um sistema de lixas rotativas, de granulometria padronizada pela abrasão na superfície. Não foram evidenciados, nos relatórios do quadro da Fig.25, danos provenientes deste processo específico.

Durante a passagem do arame trefilado no processo de galvanização, alguns pontos que geram concentração de tensões ao longo do caminho do arame (guias, roldanas, pedras ou roletes danificados) são capazes de reduzir a aplicabilidade do produto, o que explicaria a ocorrência de eventuais rupturas do arame nos ensaios e em campo, como no exemplo ilustrado das análises (Figura 9). Neste caso, a quebra do arame na linha de produção foi ocasionada pela presença pontual de defeitos de baixo relevo, que estão presentes em toda a circunferência do arame no ponto de quebra.

Outra possibilidade abordada leva em consideração o não atendimento da composição química do aço utilizado no processo de fabricação do F.M. 5,50 mm. Há poucos registros no universo pesquisado de desvios de qualquer um dos componentes para fora das faixas especificadas, o que elimina essa possibilidade como o principal fator contribuinte para a ocorrência de quebras até então. Também não foram evidenciados materiais misturados no processo de solda do arame trefilado (o que caracteriza também um não atendimento da composição).

Já analisados aspectos superficiais e também a composição química, em que quaisquer fatores poderiam contribuir para os fenômenos encontrados, volta-se a atenção, especificamente, para o processo mecânico da trefilação, no qual o material sofre sete passes de redução antes de atingir o diâmetro final, quando passa a ser referenciado como arame 2,02 mm a galvanizar.

Neste ponto específico, observa-se a ocorrência de um severo encruamento do material no elevado percentual de redução de seção (diâmetro) necessário para se obter os diâmetros objetivados em cada um dos passes.

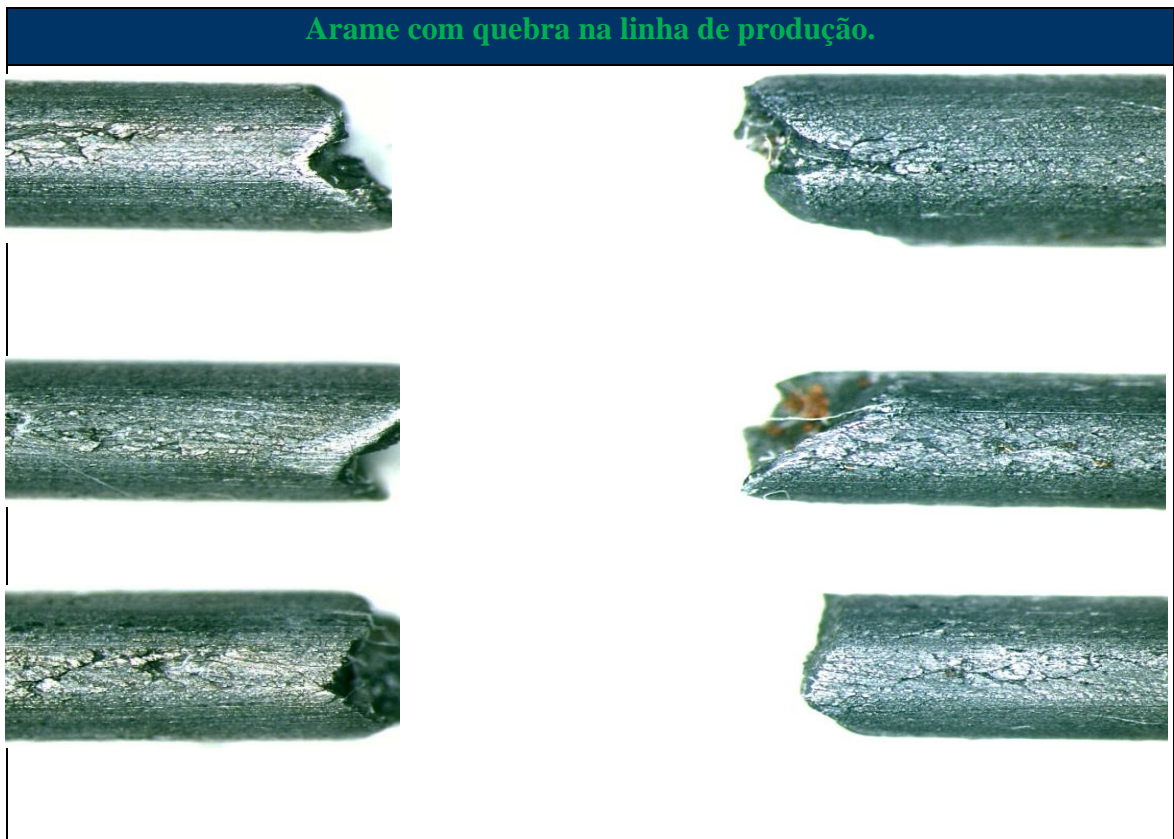


Figura 25. Análise de rupturas. Ref. Diferentes formas de fraturas observadas em arames na linha de produção.

Fonte: Relatório OS 0803

Outro ponto a ser considerado como contribuinte nesta direção é que as feiras intermediárias, apesar de possuírem valores padronizados para a montagem do jogo de passes, não possuem definição de limites de tolerância de desgaste entre os passes, sendo esses controlados apenas na entrada do fio-máquina (primeiro passe) e na saída do arame trefilado (último passe e acabador) podendo, assim, o percentual de redução potencializar ainda mais os efeitos do encruamento.

Um dos principais problemas encontrados na fabricação do arame Cultura Aérea que utiliza o material SAE 1057B é que o ciclo térmico foi determinado para uma pequena diminuição de resistência, que não é característica de uma recristalização plena para o aço com esse grau de encruamento. Como consequência, há uma dispersão significativa de resultados, o que, de certa forma, explica o comportamento aleatório de quebras do C.A./C.E. 2,02 mm.

O resultado poderia ser melhor utilizando-se, por exemplo, um aço com um teor ainda maior de carbono e que fosse totalmente recristalizado. Na temperatura do forno de pré-

aquecimento a 450°C, um arame altamente encruado como o Cultura Aérea 2,02 mm encontra uma recristalização parcial no recozimento isotérmico no banho de chumbo. Outro ponto a ser observado é que a continuação do recozimento não é exclusiva do período em que o material se encontra dentro do forno, e sim do período no qual se encontra em temperatura de recozimento. Um melhor controle na qualidade superficial do material trefilado, a utilização de um maior número de passes ou a troca do material por um de menor percentual de carbono reduziria a incidência de quebras.

Os resultados de referência utilizados na análise histórica, agrupados na Figura 25, correspondem a um quadro resumo que sintetiza os 36 relatórios, que totalizam mais de 100 páginas de análises químicas, ensaios de tração e metalografias efetuadas em cada evento tido como problemático nos ensaios de enrolamento do arame C.A/C.E. 2,02 mm.

Nas 36 amostras, o problema relatado que apareceu com maior frequência, em 24 amostras (66,7%), foi quebra em ensaio/aplicação, seguido por: sem quebra, com 3 (8,3%) ocorrências; com 2 ocorrências cada (5,6%), quebra na trefilação, oxidação e falha na camada de zinco; e uma ocorrência (2,78%), descascamento camada zinco.

Em uma análise descritiva, pode-se perceber que, quanto à variável dimensional, todas as 36 amostras atendem ao padrão dimensional.

Quanto aos defeitos superficiais, em 11 amostras (30,6%) foram ausentes; 9 amostras (25,0%) apresentaram rugosidades; 8 amostras (22,2%), defeitos superficiais; 2 amostras (5,6%) tiveram oxidação, falha na camada e não avaliadas; em uma amostra, trinca e, em outra, riscos longitudinais (2,78%).

No formato de fratura, 18 amostras (50%) não foram avaliadas; em 14 amostras (38,9%), o formato foi de “unha de gato”; em 2 amostras (5,6%) de cada, foi de “pé de corvo” e de “reta”.

Os resumos das avaliações das amostras indicaram que os fenômenos que apresentaram o maior número de ocorrências (22,2%, ou 8 amostras) foram marcas dispersas na superfície. Estas caracterizam o defeito na fratura, o qual, efetivamente, deixava claro que o início da ruptura se deu por concentração de tensão em um ponto de falha que poderia ser identificado visualmente. Sete amostras (19,4%) apresentaram-se sem marcas na superfície, característica do defeito da fratura.

Apenas outros dois tipos de ocorrência foram observados: um por excesso de tensão no enrolamento e outro sem conclusão em um total de vinte e quatro análises (66,5%) da origem ou do porquê da ruptura do material.

Nº	Relatório	Problema Relatado	Dimensional	Composição Química	Defeitos Superficiais	Formato Fratura	Resumo
1	OS1544Mq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Trinca	Pé de Corvo	Sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
2	OS1579MFq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Ausentes	NA	Pequenas marcas na superfície sem caracterizar defeito
3	OS1566MFq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Ausentes	Unha de Gato	Pequenas marcas na superfície sem caracterizar defeito
4	OS1903F	NA	Atende	Atende	Ausentes	NA	Caracterização de Força x Tensão
5	OS1906F	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Ausentes	Unha de Gato	Sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
6	OS0079q	Quebra na Trefilação	Atende	Não Atende	Ausentes	NA	Material quebrou na trefilação por apresentar fósforo, cobre e nitrogênio acima do limite
7	OS0090Fq	Quebra na Trefilação	Atende	Atende	Ausentes	NA	Material quebrando na trefilação e galvanização, sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
8	OS0212Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Ausentes	NA	Sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
9	OS0288MF	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Riscos Longitudinais e Marcas Transversais	Pé de Corvo	Material sem a passagem pelo chumbo com LR Menor
10	OS0359F	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Ausentes	Reta	Sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
11	OS405MFq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Ausentes	Reta	Fraturas por Excesso de tensão no enrolamento
12	OS0423MFq	NA	Atende	Atende	Rugosidade	NA	Comparativo entre material da CSG e URS , sendo LR maior no CSG mas LE bem mais próximo
13	OS0575F	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Rugosidade	Unha de Gato	Sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
14	OS0699Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Defeitos Superficiais	Unha de Gato	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
15	OS0766Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Defeitos Superficiais	Unha de Gato	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
16	OS0811F	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Defeitos Superficiais	Unha de Gato	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
17	OS0812F	Sem Quebras	Atende	Atende	Rugosidade	NA	Material com suspeita de quebra mas sem apresentar defeito nos testes
18	OS937Fqz	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Não Atende	Defeitos Superficiais	NA	Grande porosidade e defeitos no sentido longitudinal
19	OS0946Fqz	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Rugosidade	NA	Grande porosidade dispersa ao longo de toda superfície
20	OS1016Fz	Descascamento Camada de Zinco	Atende	Atende	Ausentes	NA	Desplacamento camada de zinco
21	OS1251Fz	Oxidação	Atende	Atende	Oxidação	NA	Oxidação Camada de Zinco
22	OS1273M	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Rugosidade	Unha de Gato	Rugosidade superficial em meia circunferência linear ao longo da superfície
23	OS1293Fz	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Não Atende	Ausentes	NA	Material não correspondente
24	OS1340Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Defeitos Superficiais	NA	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
25	OS1374Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Defeitos Superficiais	Unha de Gato	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
26	OS1398Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Defeitos Superficiais	Unha de Gato	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
27	OS1408Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Defeitos Superficiais	Unha de Gato	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
28	OS0241F	Sem Quebras	Atende	Atende	NA	NA	Carepa no FM
29	OS0264F	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Rugosidade	Unha de Gato	Rugosidade superficial em meia circunferência linear ao longo da superfície
30	OS0427F	Falha na Camada de Zinco	Atende	Atende	Falha na Camada	NA	Ausência de Deposição de Zinco
31	OS0635F	Falha na Camada de Zinco	Atende	Atende	Falha na Camada	NA	Ausência de Deposição de Zinco
32	OS0633F	Sem Quebras	Atende	Atende	NA	NA	Ensaio de Tração
33	OS0727Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Rugosidade	Unha de Gato	Sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
34	OS0762Fq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Rugosidade	Unha de Gato	Sem marcas na superfície que caracterizem o defeito na fratura
35	OS0803MFq	Quebra Ensaio/ Aplicação	Atende	Atende	Rugosidade	Unha de Gato	Com marcas dispesas na superfície que caracterizam o defeito na fratura
36	OS0920Fz	Oxidação	Atende	Atende	Oxidação	NA	Oxidação Camada de Zinco

Figura 26. Quadro de Resumo dos Relatórios

Ainda assim, alguns dos 12 (33,3%) ensaios que apresentaram conclusões claras sobre a origem das quebras (14, 15, 16, 18, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 29 e 35) podem ter tido a participação do fenômeno de envelhecimento como aditivo ao resultado encontrado.

Quanto à variável composição química, das 36 amostras, 33 (91,7%) apresentaram o padrão estabelecido. Em 3 amostras (8,3%), a análise química do aço utilizado na fabricação do produto detectou um não atendimento do padrão estabelecido para o mesmo (Tabela 2), seja por mistura de materiais intermediários ou mesmo não atendimento da composição química prevista para o material, o que não foi foco do presente trabalho.

Tabela 2. Especificação de Composição Química

**Especificação Química GACO 1057B (revisão jul/ 2009)\***

C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	N <sub>2</sub> [ppm]
0,55	0,60	0,15	-	-	-	-	-	-	-
0,60	0,80	0,25	0,020	0,020	0,030	0,050	0,050	0,050	70

\* Conforme Protocolo Técnico FM034/06 – REV 03

Já analisados os aspectos superficiais e também a composição química, em que apenas um dos fatores poderia contribuir para os fenômenos encontrados, volta-se a atenção especificamente para o processo de trefilação, no qual o material sofre sete passes de redução antes de atingir o diâmetro final, quando passa a ser referenciado como arame 2,02 a galvanizar. Neste ponto específico, observa-se a possibilidade da ocorrência do encruamento do material pela redução de seção, como ilustrado (Tabela 1), em que, para se obter os diâmetros objetivados em cada um dos passes, um elevado percentual de redução é necessário.

Como não há deformação considerável no processo de galvanização avaliado, e as amostras comparadas são coletadas sempre após o processo de trefilação para a realização dos ensaios, descarta-se para esta interpretação a influência do envelhecimento dinâmico. Caracteriza-se, então, o envelhecimento estático na faixa de temperatura de 100°C a 500°C (NESTERENKO et al. 2009) ou menor que 150°C, entre 150 e 250°C e maior que 250°C, (YAMADA, 1975).

Os mesmos autores consideram que existem consequências positivas do envelhecimento de aços e ligas, como o endurecimento, mas também negativas, como redução na ductilidade.

Cetlin (1994) afirma que, no processo produtivo ideal de arames de alto teor de carbono é importante que esses sejam decapados quimicamente e cobertos com cal e haja baixas velocidades de trefilação com reduções não muito severas. Na prática, isso não se encontra de forma plena no processo atual.

Ao analisarem-se outras amostras coletadas após a trefilação, e antes do processo de galvanização, como exemplo abaixo, retirado do relatório OS 0803MFq de 28 de julho de 2011, o material, proveniente do mesmo fio-máquina, carretel e estocador, que originou os materiais utilizados nos ensaios de enrolamento em um ensaio de tração simples, obtêm-se os resultados (Tabela 3) que confirmam as hipóteses consideradas ao longo do trabalho, pois se observa uma nítida aproximação de  $Le$  e  $Lr$  (Figura 26 e Figura 27) após o processo de galvanização, indicando que o processo de envelhecimento está presente.

Tabela 3. Ensaio de tração de arame galvanizado e trefilado.

AMOSTRA	ENSAIO	Ø MIN. [mm]	Ø MÁX. [mm]	Ø MÉD. OVALIZ. [mm]	So [mm <sup>2</sup> ]	Fe [Kgf]	Le [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	Fr [Kgf]	Lr [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	Lo [mm]	Lf [mm]	A [%]	
22/07 Galvanizado	1	1,95	2,29	2,12	0,34	3,53	471	133	519	147	21	22,58	7,52
	2	1,93	2,29	2,11	0,36	3,50	464	133	519	148	21	22,34	6,38
	3	1,95	2,28	2,12	0,33	3,51	462	132	508	145	21	22,21	5,76
	4	1,94	2,28	2,11	0,34	3,50	461	132	516	148	21	22,44	6,86
	5	1,95	2,28	2,12	0,33	3,51	470	134	517	147	21	22,48	7,05
22/07 Trefilado	1	1,89	2,21	2,05	0,32	3,30	408	124	501	152	21	22,45	6,90
	2	1,89	2,21	2,05	0,32	3,30	395	120	498	151	21	22,42	6,76
	3	1,89	2,21	2,05	0,32	3,30	410	124	503	152	21	22,22	5,81
	4	1,89	2,21	2,05	0,32	3,30	406	123	500	151	21	22,33	6,33
	5	1,89	2,21	2,05	0,32	3,30	410	124	510	155	21	22,27	6,05

**OBSERVAÇÕES:**

**So** = Seção transversal (mm<sup>2</sup>).

**Fe** = (Força de escoamento) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até o início da deformação plástica.

**Fr** = (Força de resistência) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até a ruptura.

**Le** = (Limite de escoamento) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (Kgf/mm<sup>2</sup>) no início da deformação plástica.

**Lr** = (Limite de resistência) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (Kgf/mm<sup>2</sup>).

**A** = Alongamento após ruptura.

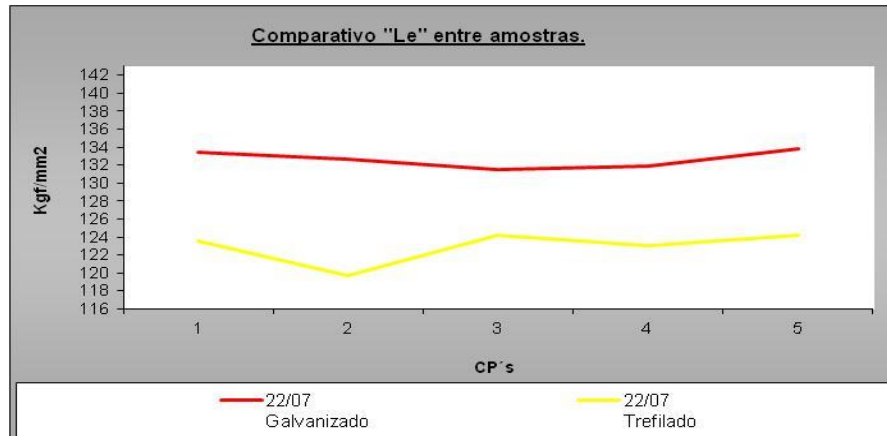


Figura 27. Gráfico comparativo do limite de escoamento

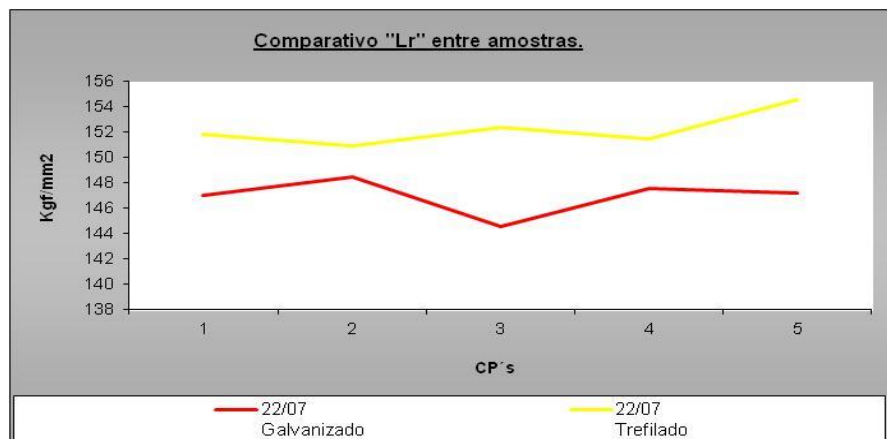


Figura 28. Gráfico comparativo do limite de ruptura.

Outras avaliações foram efetuadas a partir de amostras retiradas de um mesmo fardo de fio-máquina 5,50 mm, contemplando análises dimensionais de ensaio de tração (Tabela 4) e metalográficas (Figura 29).



Tabela 4. Ensaios de tração de fio-máquina.

AMOSTRA	ENSAIO	Ø MÍN. [mm]	Ø MAX. [mm]	Ø MÉD. OVALIZ. [mm]	So [mm <sup>2</sup> ]	Fe [N]	Le [MPa]	Fr [N]	Lr [MPa]	Lo [mm]	Lf [mm]	A [%]	Ø FINAL [mm]	Z [%]	
FM	1	5,44	5,65	5,55	0,21	24,15	12455	516	20974	869	55	64,49	17,25	3,30	64,58
	2	5,47	5,63	5,55	0,16	24,19	12380	512	20755	858	55	64,6	17,45	3,26	65,50
	3	5,43	5,61	5,52	0,18	23,93	12082	505	20373	851	55	64,05	16,45	3,23	65,76
	4	5,47	5,62	5,55	0,15	24,15	12697	526	20946	867	55	63,5	15,45	3,28	65,01
	5	5,45	5,67	5,56	0,22	24,28	12710	523	21001	865	55	64,01	16,38	3,29	64,99
	6	5,43	5,63	5,53	0,20	24,02	12639	526	20946	872	55	64,29	16,89	3,23	65,88
	7	5,43	5,62	5,53	0,19	23,97	12546	523	20345	849	55	62,67	13,95	3,36	63,02
	8	5,48	5,63	5,56	0,15	24,24	12397	512	20864	861	55	64,59	17,44	3,24	65,98
	9	5,47	5,67	5,57	0,20	24,37	12479	512	20865	856	55	64,76	17,75	3,28	65,32
	10	5,45	5,64	5,55	0,19	24,15	12363	512	20864	864	55	64,3	16,91	3,27	65,22

**OBSERVAÇÕES:**

So = Seção transversal da barra (mm<sup>2</sup>).

Fe = (Força de escoamento) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até o início da deformação plástica.

Fr = (Força de resistência) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até a ruptura.

Le = (Limite de escoamento) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (N/mm<sup>2</sup>) no início da deformação plástica..

Lr = (Limite de resistência) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (N/mm<sup>2</sup>).

A = Alongamento após ruptura da barra.



Figura 29. Análises metalográficas do fio-máquina 5,50mm.

Deste material, foi retirada uma amostra posterior ao processo de trefilação (já como arame trefilado 2,02 mm) e repetidas as análises dimensionais do ensaio de tração (Tabela 5) e metalográficas (Figura 30), nas quais já é possível visualizar o alongamento dos grãos.

Tabela 5. Amostra do material trefilado e galvanizado.

AMOSTRA	ENSAIO	Ø MIN. [mm]	Ø MAX. [mm]	Ø MÉD. [mm]	OVALIZ. [mm]	So [mm <sup>2</sup> ]	Fe [Kgf]	Le [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	Fr [Kgf]	Lr [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	Lo [mm]	Lf [mm]	A [%]
Arame Trefilado	1	1,9	2,2	2,05	0,30	3,30	403	122	503	152	20	21,53	7,65
	2	1,90	2,19	2,05	0,29	3,28	413	126	507	154	20	21,35	6,75
	3	1,89	2,19	2,04	0,30	3,27	419	128	508	155	20	21,44	7,20
	4	1,89	2,19	2,04	0,30	3,27	409	125	506	155	20	21,10	5,50
	5	1,89	2,20	2,05	0,31	3,28	419	128	508	155	20	21,33	6,65
	6	1,90	2,19	2,05	0,29	3,28	419	128	505	154	20	21,29	6,45
	7	1,90	2,20	2,05	0,30	3,30	415	126	507	154	20	21,24	6,20
	8	1,89	2,20	2,05	0,31	3,28	414	126	505	154	20	21,15	5,75
	9	1,89	2,19	2,04	0,30	3,27	415	127	504	154	20	21,21	6,05
	10	1,90	2,20	2,05	0,30	3,30	421	128	507	154	20	21,46	7,30
Arame Galv. Sem imersão em do Chumbo	1	2,04	2,22	2,13	0,18	3,56	458	129	520	146	20	21,36	6,80
	2	2,05	2,23	2,14	0,18	3,60	456	127	518	144	20	21,53	7,65
	3	2,06	2,24	2,15	0,18	3,63	453	125	521	144	20	21,47	7,35
	4	2,03	2,23	2,13	0,20	3,56	455	128	520	146	20	21,41	7,05
	5	2,05	2,23	2,14	0,18	3,60	452	126	519	144	20	21,40	7,00
	6	2,04	2,22	2,13	0,18	3,56	458	129	520	146	20	21,39	6,95
	7	2,04	2,23	2,14	0,19	3,58	453	127	516	144	20	21,37	6,85
	8	2,03	2,22	2,13	0,19	3,55	457	129	519	146	20	21,76	8,80
	9	2,04	2,23	2,14	0,19	3,58	455	127	519	145	20	21,38	6,90
	10	2,02	2,23	2,13	0,21	3,55	453	128	518	146	20	21,40	7,00
Arame Galv. Com imersão no Chumbo	1	2,05	2,24	2,15	0,19	3,61	450	125	515	143	20	21,69	8,45
	2	2,00	2,25	2,13	0,25	3,55	451	127	516	145	20	21,53	7,65
	3	2,04	2,23	2,14	0,19	3,58	455	127	514	144	20	21,38	6,90
	4	2,02	2,24	2,13	0,22	3,56	455	128	518	145	20	21,39	6,95
	5	2,12	2,24	2,18	0,12	3,73	444	119	516	138	20	21,50	7,50
	6	2,02	2,25	2,14	0,23	3,58	453	127	515	144	20	21,51	7,55
	7	2,05	2,23	2,14	0,18	3,60	459	128	515	143	20	21,65	8,25
	8	2,02	2,24	2,13	0,22	3,56	452	127	517	145	20	21,30	6,50
	9	2,04	2,23	2,14	0,19	3,58	454	127	514	144	20	21,66	8,30
	10	2,02	2,24	2,13	0,22	3,56	450	126	513	144	20	21,50	7,50

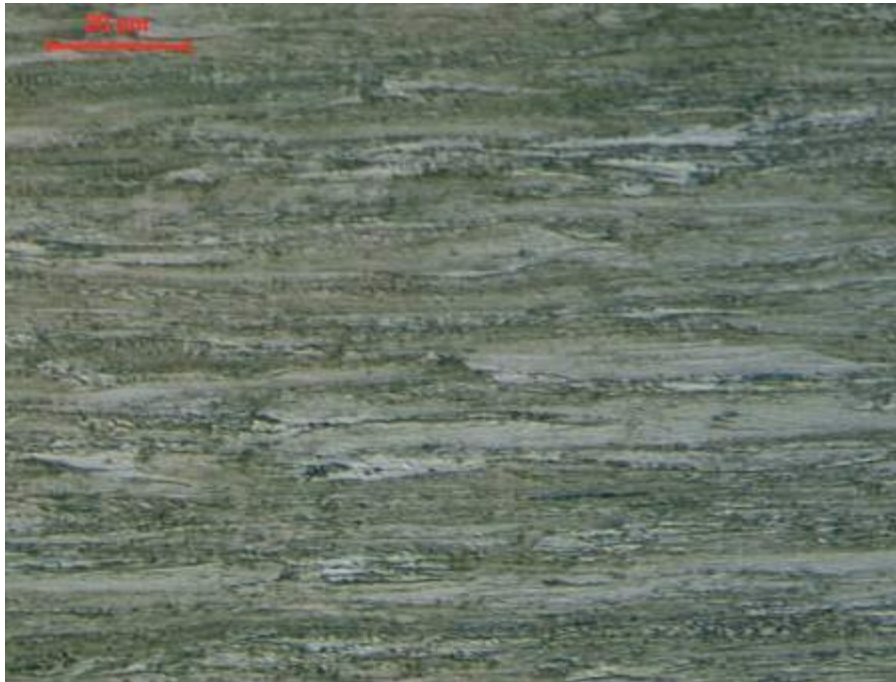
**OBSERVAÇÕES:**So = Seção transversal (mm<sup>2</sup>).

Fe = (Força de escoamento) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até o início da deformação plástica.

Fr = (Força de resistência) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até a ruptura.

Le = (Limite de escoamento) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (Kgf/mm<sup>2</sup>) no início da deformação plástica.Lr = (Limite de resistência) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (Kgf/mm<sup>2</sup>).

A = Alongamento após ruptura.



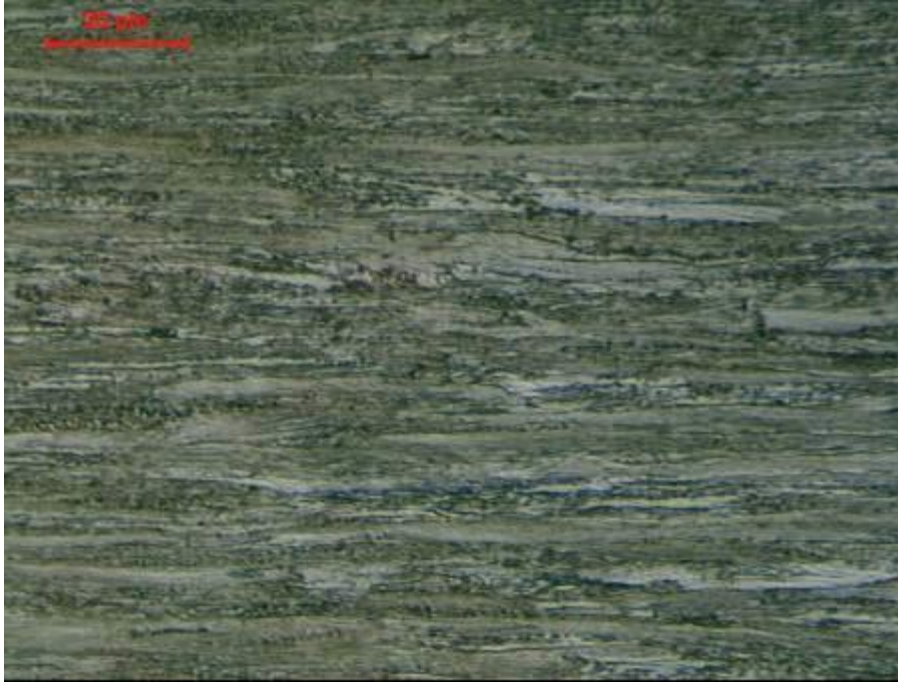


Figura 30. Arame trefilado 2,02mm – Amostra 2.

Do material trefilado, parte dele foi galvanizado com uma imersão pela primeira cuba de chumbo (450°C), conforme solicita o padrão de fabricação, e foram repetidas as análises dimensionais de ensaio de tração (Tabela 5) e metalográficas (Figura 30).

Nas metalografias do material padrão (Figura 31) e da amostra passada por fora da cuba (Figura 30), não se percebem diferenças significativas.

Apesar de ser uma análise pontual, sem compromisso estatístico, em que se efetuou apenas parte dos ensaios (tração), fica claro que a passagem pela primeira cuba influencia pouco o resultado, pois a redução de Lr encontrada nos resultados do arame passado dentro e fora da cuba apresentaram variações não conclusivas. Logo, entende-se que a temperatura encontrada na cuba de zinco (que também se encontra a 450 °C) já é suficiente para que o fenômeno de envelhecimento apresente-se neste produto. Tanto o limite de escoamento quanto o limite de ruptura apresentaram resultados similares comparativamente ao do arame trefilado, ou seja, apresentaram maior influência no limite de ruptura e menor no limite de escoamento.

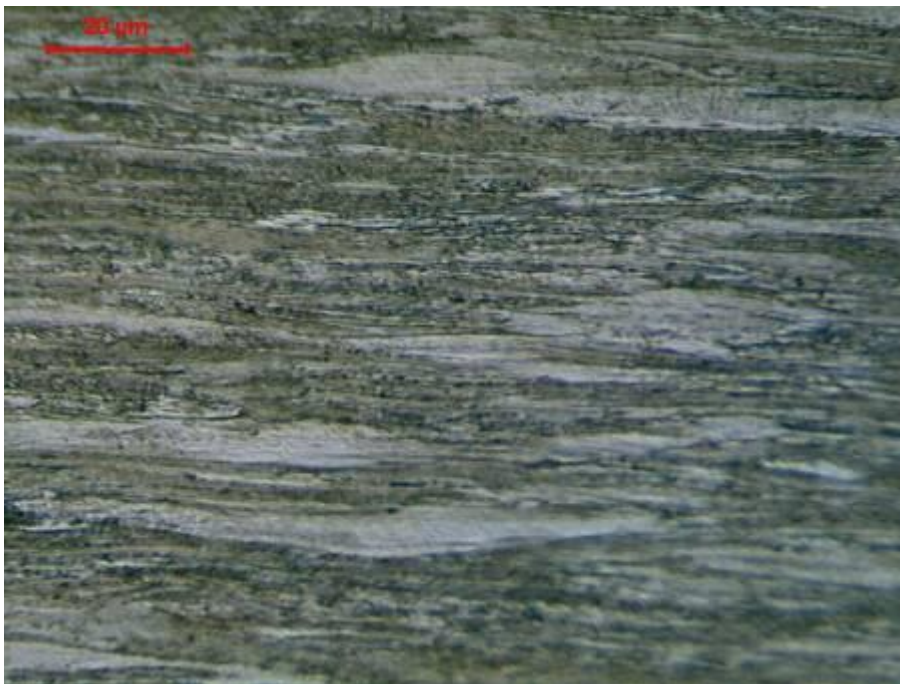
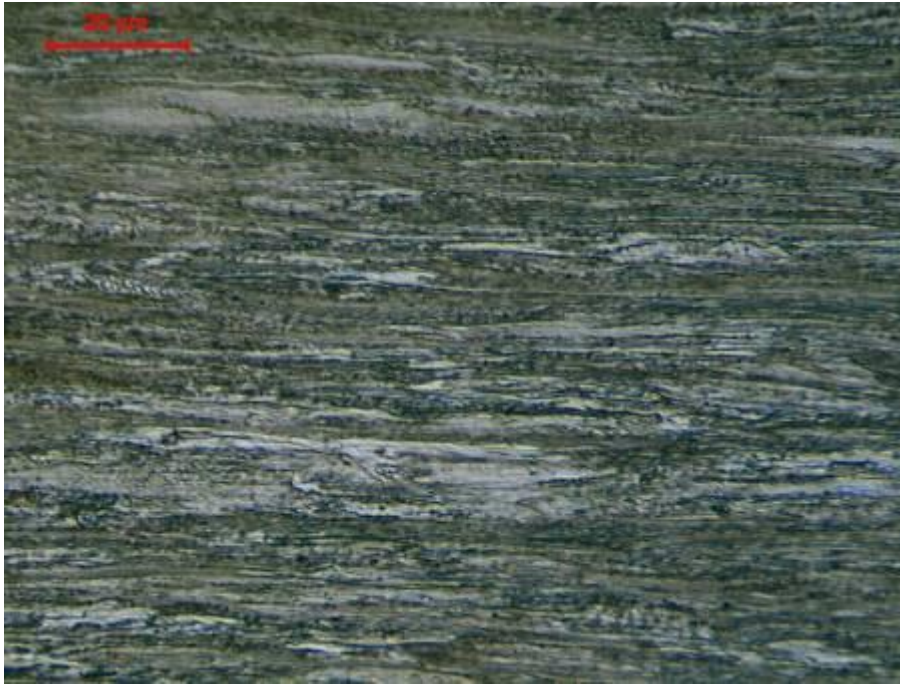


Figura 31. Amostra do arame galvanizado – Fora da cuba de chumbo.

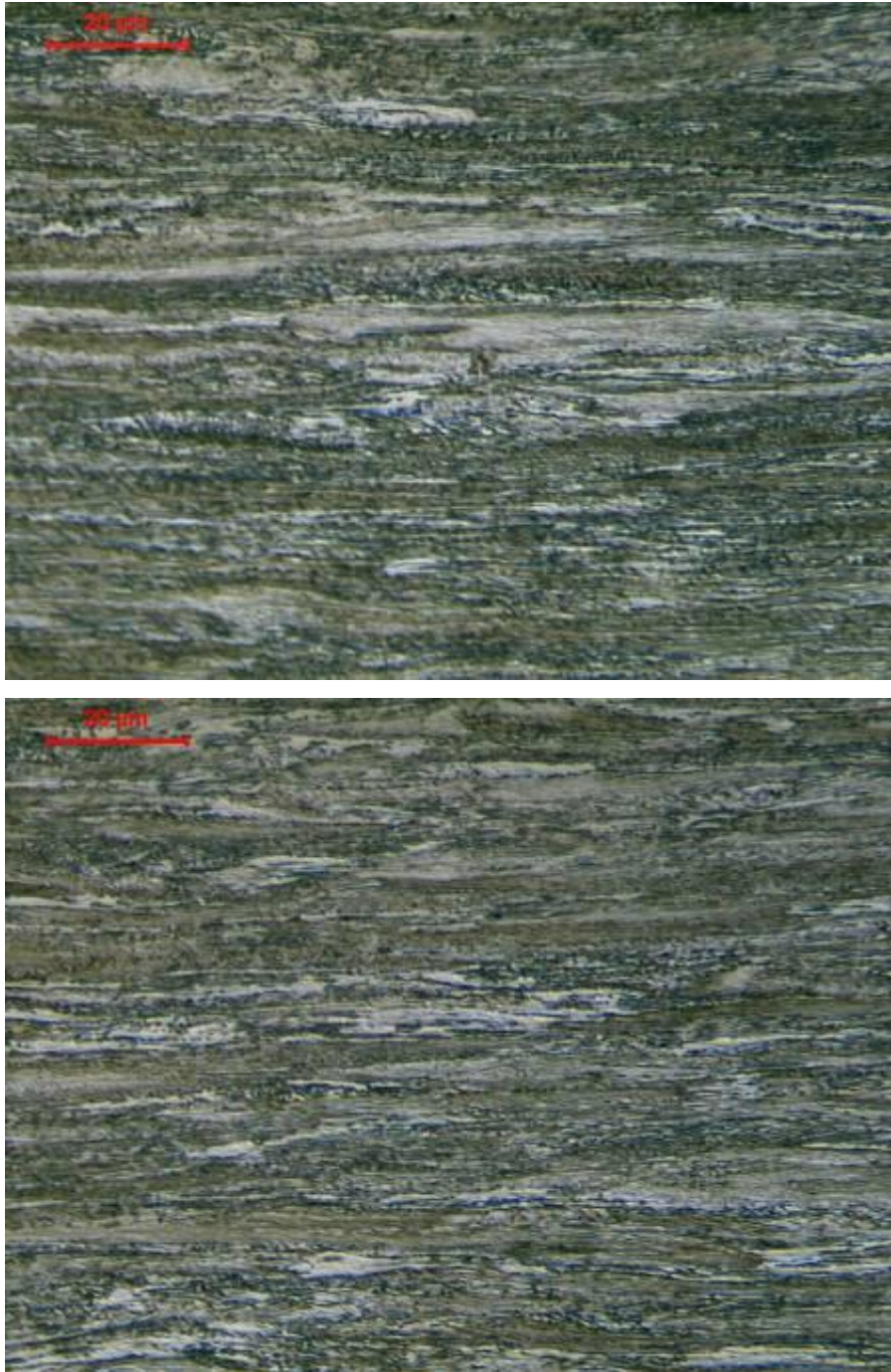


Figura 32. Amostra do arame galvanizado – Dentro da cuba de chumbo.

O teste de repetibilidade em diferente equipamento de trefilação, na máquina H71, utilizando-se as mesmas reduções, mas com um sistema de decapagem Cheng (escovas rotativas), também não apresentou resultados diferentes dos já abordados nesta dissertação, mantendo, inclusive, o mesmo nível de reprovação nas análises internas de liberação de qualidade. É possível verificar a condição superficial do “Arame Trefilado” (tabela 6) nas Figuras 33 e 34 como isenta de defeitos.

Tabela 6. Ensaio de tração do Arame Culturas Aéreas produzido na máquina H71

AMOSTRA	ENSAIO	Ø MIN. [mm]	Ø MAX. [mm]	Ø MED. [mm]	OVALIZ. [mm]	So [mm <sup>2</sup> ]	Fr [kgf]	Lr [kgf/mm <sup>2</sup> ]
Arame Trefilado	1	1,91	2,21	2,06	0,30	3,33	521	156
	2	1,91	2,21	2,06	0,30	3,33	524	157
	3	1,91	2,21	2,06	0,30	3,33	521	156
Amostra - L:04605478 S:41960430045132 (Quebra no enrolamento)	1	2,01	2,24	2,13	0,23	3,55	528	149
	2	2,00	2,24	2,12	0,24	3,53	532	151
	3	2,00	2,24	2,12	0,24	3,53	528	150
Amostra - L:04605478 S:41960430045132 (Quebra - Arame do início do carretel)	1	2,03	2,27	2,15	0,24	3,63	528	145
	2	2,03	2,26	2,15	0,23	3,61	529	146
	3	2,01	2,26	2,14	0,25	3,58	531	148
Amostra - 2º Teste	1	2,03	2,24	2,14	0,21	3,58	498	139
	2	2,04	2,24	2,14	0,20	3,60	501	139
	3	2,04	2,24	2,14	0,20	3,60	501	139
Amostra - L:04605478 S:41960430048133 P:1283Kg	1	2,00	2,22	2,11	0,22	3,50	525	150
	2	2,00	2,22	2,11	0,22	3,50	524	150
	3	1,99	2,22	2,11	0,23	3,48	520	149

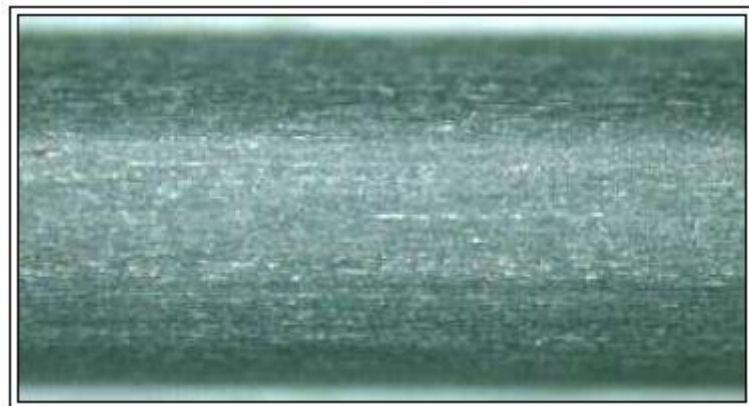
**OBSERVAÇÃO:****So** = Seção transversal (mm<sup>2</sup>).**Fr** = (Força de resistência) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até a ruptura.**Lr** = (Limite de resistência) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (Kgf/mm<sup>2</sup>).

Figura 33. Fotografia 32X da amostra do Arame Trefilado no “ponto 1”.

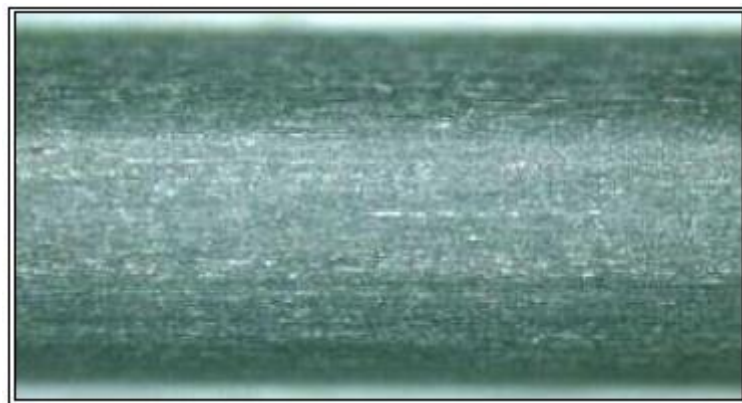


Figura 34. Fotografia 32X da amostra do arame trefilado no “ponto 2”.

Na ocorrência de defeitos, há também o mesmo formato de ponta de quebra (fig 33), material ensaiado e detalhes da superfície (Figura 35) da amostra L:04605478 S:41960430045132 (Tabela 6).



Figura 35. Fotografia 32X da amostra da quebra de enrolamento.

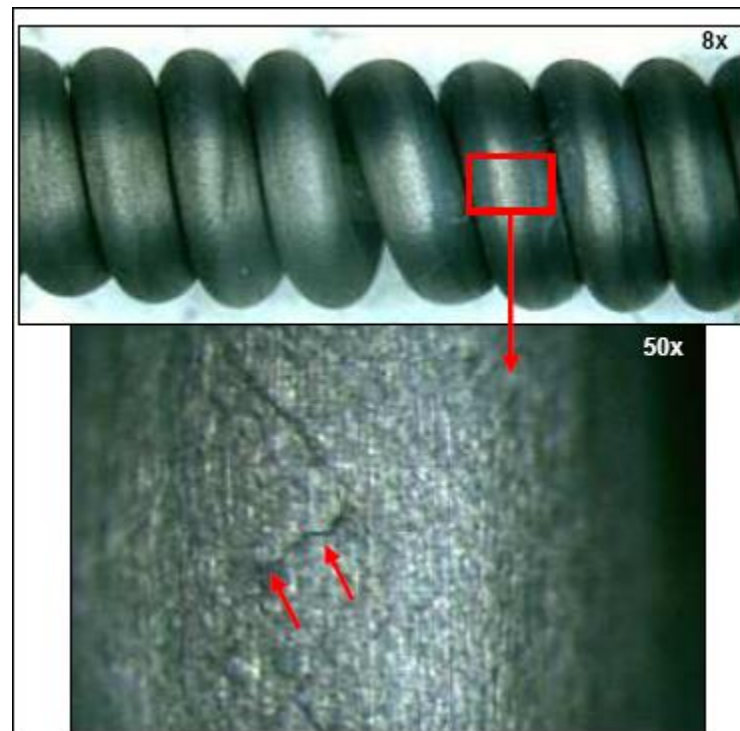


Figura 36. Fotografia da amostra da quebra de enrolamento.

Ao analisar-se a imagem do material quebrado amostra L:04605478 S:41960430045132 “Quebra no Enrolamento” (Figura 36), foi observada a presença de um defeito de baixo relevo e localização pontual na superfície do arame, estando o restante do material isento de defeitos, assim como na amostra L:04605478 S:41960430048133. Na amostra L:04605478 S:41960430045132 “Quebra – Arame do Início do Carretel” (Tabela 6)

há a presença de riscos superficiais, assim como nas amostras do segundo teste (Tabela 6 e figuras 37 e 38).

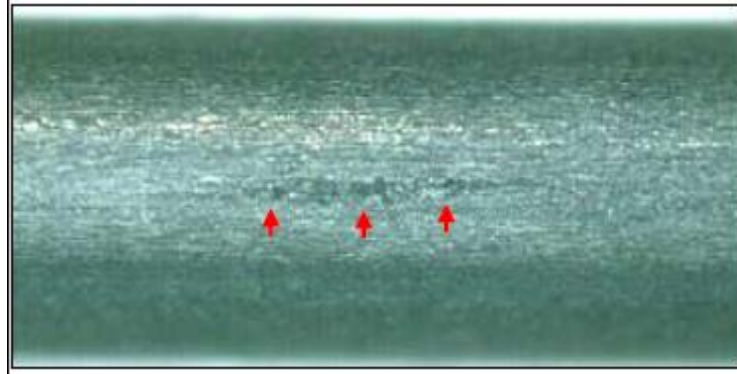


Figura 37. Fotografia 32X da superfície da amostra quebrada no ensaio de enrolamento.

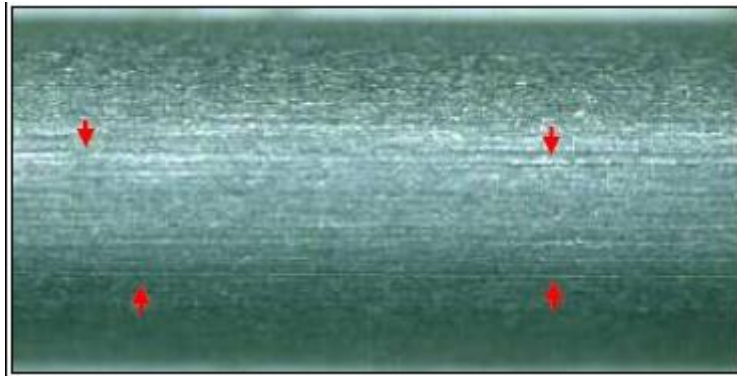


Figura 38. Fotografia 32X da superfície da amostra quebrada no ensaio de enrolamento.



## 5 CONCLUSÕES

A investigação de fenômenos presentes e causas de ocorrências da quebra de produtos derivados do aço SAE 1057B trefilado e galvanizado para Cultura Aéreas mostrou que a presença do envelhecimento estático é constante no processamento do arame C.A./C.E. 2,02 mm e é o principal responsável pelo elevado número de quebras nos ensaios depois de galvanizado.

Comparando-se os resultados dos relatórios de quebras do produto C.A./C.E. 2,02 mm galvanizado, no universo das 36 análises avaliadas e nos ensaios efetuados, ficou evidente que o processo como um todo é influenciado não apenas por defeitos superficiais de origem mecânica, mas também por outros fatores que afetam as propriedades mecânicas do aço, fato reforçado pela falta de registros de quebras do mesmo arame quando sujeito ao ensaio de enrolamento no mesmo eixo do material somente trefilado.

A ocorrência desse fenômeno deve-se às elevadas reduções percentuais de área no processo de trefilação, o que gera um elevado encruamento do material, o qual, processado nas cubas de chumbo e zinco, encontra condições para a ocorrência do fenômeno de envelhecimento após a galvanização. Tem ainda seus efeitos amplificados por pontos de concentração de tensões nas porosidades e marcas oriundas de descontroles no processo de trefilação.

Quebras internas, possivelmente, podem ser também ser a origem das manifestações encontradas no produto Cultura Aérea 2,02 mm.

Por fim, entende-se que as alternativas para reduzir a incidência de quebras passam, inicialmente, por uma melhoria no controle da qualidade superficial do arame trefilado em principalmente, pela adequação de parâmetros em equipamentos como seu processamento em um maior número de passes, ou a utilização de materiais com menor suscetibilidade ao processo de envelhecimento, como um aço com menor percentual de carbono. Essas condições no processo de fabricação poderiam reduzir significativamente as perdas por desclassificação de material.

## 6 SUGESTÕES

Sugere-se que, em outros estudos sobre o tema, os materiais sejam avaliados em ensaios de torção, com a região de quebra avaliada por um microscópio eletrônico de transmissão (MEV) para amparar as conclusões obtidas neste trabalho. Também se sugere que sejam efetuados testes com amostras processadas em equipamento com maior número de passes de redução para contrastar comparativamente com o processo de reduções atual.

Avaliar a alternativa de se utilizar um aço não envelhecível, que contenha pequenas adições de alumínio ou vanádio, os quais fixam o nitrogênio sob a forma de precipitados de nitreto.

## 7 REFERÊNCIAS

ANIL K. SACHDEV. Dynamic Strain Aging of Various Steels. **American Society For Metals And The Metallurgical Society of AIME**. v.13A, p. 1793-1797, October 1982.

ASM Handbook. **ASM International Handbook Committee**. v.19: Fatigue and Fracture, 1998.

BAUSCHINGER, J. Mechanisch-Technischen laboratorium. **Material Fórum**, 1886.

CAMPBELL, J .S. **Principles of Manufacturing Materials and Processes International Studies**. New York: McGraw-Hill, 1961.

CETLIN, P.R. **Tecnologia de Trefilação de Arames de Aço**, Apostila de Supervisores, UFMG, 1994

COTTRELL, A. H. **Dislocations and plastic flow in crystals**. Oxford: University Press. p.111-132, 1953.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. London: McGraw-Hill Book, 1988, 648p.

GERDAU. **Trefilação TRE-501**: Fundamentos da Trefilação. Porto Alegre, 2010

----- **Trefilação TRE-505**: Preparação para Galvanização. Porto Alegre, 2008

----- **Trefilação TRE-020**: Tratamento Térmico na Galvanização. Porto Alegre, 2002

GOEST. B.; MEIZORO. J. & GIL S J. Fragmentation of as drawn perlitic steel wires during torsion tests. **Engineering Fracture Mechanics**, v.60, n.3 p. 255-272, 1998.

GORKUNOV. E.S; GRACHEV. S.V.; SMIRNOV. S.V.; SOMOVA. V.M.; ZADVORKIN. S.M, & KAR'KINA. Relation of physical-mechanical properties to the structural condition of severely deformed patented carbon steels at drawing. **Russian Journal of Nondestructive Testing**. v.41, n.3, p.65-79, 2005.

HAMMERLE, J.R.; ALMEIDA, L.H. de & MONTEIRO, S.N. Lower Temperatures Mechanism Of Strain Aging in Carbon Steels for Drawn Wires. **Scripta Materialia** 50, p.1289-1292, 2004.

HAUS, S. A. **Influência do Efeito Bauschinger no retorno elástico em aços avançados de elevada resistência**. 92f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HONEYCOMBE, R.W.K. **Aços microestrutura e propriedades**. Tradução Edward Arnold. London: Fundação Calouste Gulbenkian,1982. 27p.

JING, Y.; HU, L.; WANG, L. & HAN, J. Study on rolling process optimization of carbon steel wire. **Journal of University of Science and Technology**. Beijing, v.14, n.5, p.431. out. 2007.

MULLER, I. L. **Termodinâmica** Metalúrgica II. Apostila, UFRGS, sd. 46p.

NAM, W.J.; BAE, C.M.; SEI J. OH, S.J. & KWON, S.J. Effect of Interlamellar Spacing On Cementite Dissolution During Wire Drawing of Perlitic Steel Wires. **Acta Metallurgica Inc.** Elsevier Science, 2000.

NESTERENKO A.M.; SYCHKOV A.B.; SUKHOLMLIN V.I. & ZHUKOVA, S.YU. Changes mechanical characteristics during the strain-aging of wire rod made of steel Sv-08G2S. **Metallurgica**, n.6, p.61-64, June 2009.

SACHDEV K. A. Dynamic strain aging of various steels. **American Society for Metals and The Metallurgical Society of Aime**, v.13A, p.1973-1797, out 1982.

SCHAEFFER, L. **Conformação dos Metais: Metalurgia e Mecânica**. Porto Alegre: Rigel, 1995.

WATTE. P.; HUMBEECK, J. V.; AERNOUDT, E. & LEFEVER, I. Strain Ageing in Heavily Drawn Eutectoid Steel Wires. **Scripta Materialia**, n.34(1), p.89-95, 1996.

YAMADA Y. **Static Strain Aging of Eutectoid carbon steel wires**. Tetsu-to-hajane in Japanese. English version, nov. 1975.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. A. e AHMED, M. H. **Manufacturing Technology: Materials, Process and Equipment**. Boca Raton: CRC Press, 2011. 913p.