

# FRATURA EM ESTRUTURA DE FIXAÇÃO DE TORRE DE LINHA DE TRANSMISSÃO<sup>1</sup>

Maurício Barreto Lisboa<sup>2</sup>  
Heloísa Cunha Furtado<sup>3</sup>  
Eduardo Torres Serra<sup>4</sup>

## Resumo

A escolha equivocada de materiais para as solicitações de construção mecânica motivada pelo desconhecimento dos efeitos da fragilização promovida por procedimentos de soldagem inadequados ou por uma análise incompleta da norma especificada, geralmente se configura em uma armadilha. Como se verificou na fratura de uma estrutura de fixação de uma torre de transmissão de energia elétrica, durante a etapa de posicionamento. Esta ruptura motivou um processo de análise de falha, que levantando as características originais do projeto revelou a inadequação do material empregado e do procedimento de soldagem. A análise identificou o mecanismo de fratura devido a presença de trinca fria (trincamento por hidrogênio) a partir de uma região da estrutura de fixação da torre onde se verificou a transformação martensítica na zona termicamente afetada.

**Palavras-chave:** Fratura; Soldagem; Hidrogênio

## FRACTURE IN TRANSMISSION LINE TOWER FIXING STRUCTURE

### Abstract

A wrong material choice motivated by unfamiliarity with the effect of embrittlement promoted by inadequate welding procedures, or an incomplete reading of the specified standard, generally is configured as a trap. The rupture of a transmission line fixing structure during the positioning stage could be an example of that situation. That rupture motivated the present failure analysis work showing that the original project specifications were not followed resulting in both wrong material utilization and welding procedure. The study identified that the failure mechanism was cold cracking (hydrogen assisted cracking) from a region of the transmission line fixing structure where it was verified the martensite transformation in the heat affected zone.

**Key words:** Fracture; Welding; Hydrogen

---

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Pesquisador – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Departamento de Tecnologias Especiais, [mbi@cepel.br](mailto:mbi@cepel.br)

<sup>3</sup> Pesquisador – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Departamento de Tecnologias Especiais

<sup>4</sup> Pesquisador – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento

## **INTRODUÇÃO**

Alguns dos problemas ainda comuns na indústria, que levam a ocorrência de falhas estruturais são: o desconhecimento sobre os efeitos desastrosos da alteração de uma especificação de projeto e a falta de atenção sobre todos os aspectos previstos em uma norma.

Durante a etapa de posicionamento de uma torre de transmissão de energia elétrica verificou-se a ruptura de dois estojos, de aço carbono, que compunham a armadura de fixação. Esta falha motivou a solicitação de uma investigação, junto ao CEPEL, das causas da ruptura.

Segundo informações da empresa responsável pela montagem da estrutura, o material rompido deveria apenas atender as especificações da norma ASTM A307 (Carbon Steel and Studs, 60,000 PSI Tensile Strength) Grade B.<sup>[1]</sup> Entretanto, uma análise da norma revelou que parafusos ou estojos submetidos à soldagem deveriam atender a requisitos suplementares (S1) previstos na mesma norma.<sup>[1]</sup> Estes requisitos têm por base a limitação dos efeitos de fragilização promovidos por processos de soldagem, estabelecendo parâmetros mais rígidos de controle da composição química e limitações de carbono equivalente e ainda a obrigatoriedade do uso de barras trabalhadas a quente ou barras trabalhadas a frio submetidas a tratamentos térmicos de normalização.

Segundo informações da empresa, a soldagem de montagem da estrutura foi conduzida pelo processo de arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), provavelmente celulósico ou rutilico, sem a execução de tratamentos térmicos pré e pós-soldagem.

O objetivo do presente trabalho foi identificar as causas da ruptura da estrutura de fixação da torre.

## **ENSAIOS REALIZADOS**

### **Inspeção Visual**

A Figura 1 permite a identificação das características de montagem da estrutura de fixação, a qual é composta por estojos e perfis de aço unidos por soldagem a arco elétrico, empregando eletrodo revestido.

Após a montagem, a estrutura era afixada ao solo mediante aplicação de concreto, ficando apenas os estojos e a superfície externa da armadura visíveis, Figura 2, onde se pode observar o local de ruptura dos estojos.

Pode-se identificar, ainda, na Figura 2, que a ruptura ocorreu na região do estajo mais próxima aos cordões de solda de montagem.

A observação em laboratório revelou um aspecto de fratura frágil, caracterizada pela ausência de sinais de deformação plástica e pequeno relevo na superfície de fratura, a qual encontrava-se livre de produtos de corrosão, Figura 3.



**Figura 1.** Detalhes de montagem da estrutura de fixação da torre de transmissão de energia elétrica.



**Figura 2.** (a) Fixação da estrutura ao solo e (b) detalhe da superfície inferior de fratura (após exposição de quatro dias ao ambiente).



**Figura 3.** (a) Detalhe da ausência de deformação plástica do estojo fraturado na comparação com uma seção de uma barra nova do mesmo material e (b) aspecto da superfície de fratura, sem a execução de qualquer limpeza química.

## Análise Química

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise química na peça falhada, além dos valores de especificação da norma ASTM A 307 para materiais sujeitos a operações de soldagem.

As análises dos teores de carbono e enxofre foram realizadas por combustão direta e detecção por absorção na região do infravermelho, utilizando um analisador Leco CS 300. A determinação de silício foi gravimétrica, a de fósforo volumétrica e a de manganês foi por espectrofotometria e absorção atômica, utilizando um equipamento Varian FS-220.

**Tabela 1.** Composição Química

| Elemento (%) | Amostra falhada | ASTM A 307 |           |
|--------------|-----------------|------------|-----------|
|              |                 | Grau A     | Grau B(*) |
| C            | 0,47            | -          | 0,30 máx  |
| S            | 0,022           | 0,06 máx   | 0,05 máx  |
| P            | 0,033           | 0,15 máx   | 0,04 máx  |
| Mn           | 0,93            | -          | 1,0 máx   |
| Si           | 0,16            | -          | 0,50 máx  |

(\*) Especificação suplementar para material sujeito a operações de soldagem.

Conforme previsto na especificação suplementar da norma ASTM A 307, materiais sujeitos a processos de soldagem devem possuir carbono equivalente (CE) máximo de 0,55%, calculado com base na composição química (C, Mn, Cu, Ni, Cr, Mo e V) pela fórmula:

$$CE = \%C + \%Mn/6 + \%Cu/40 + \%Ni/20 + \%Cr/10 - \%Mo/50 - \%V/10$$

O CE do material fraturado foi de 0,63.

A liga utilizada, segundo a composição química, pode ser enquadrada como AISI 1045.

## Análise Metalográfica

Foi executada a observação micrográfica, em microscópio de luz visível Olympus GX71, de uma amostra do estojo fraturado.

O corte da amostra teve por base o seccionamento transversal da superfície de fratura na região de iniciação da trinca.

A observação desta área revelou a existência de vestígios visualmente não perceptíveis de metal de solda, da existência de uma ZTA com uma indesejável estrutura martensítica e da estrutura metalográfica do metal de base composta por ferrita e perlita, Figuras 4 a 6.



**Figura 4.** Micrografia da região de início de fratura, onde se observa: a) ZTA e o metal de base. Ampliação:25x, ataque: Nital 2% e b) ZTA e vestígio do metal de solda, imperceptível com baixa ampliação. Ampliação: 100x, ataque: Nital2%.



**Figura 5.** Micrografia da ZTA composta por estrutura martensítica acicular e carbetos. Ampliação:500x, ataque: Nital 2%.



**Figura 6.** Micrografia do metal base composta por ferrita e perlita. Ampliação:500x, ataque: Nital 2%.

## Ensaio Mecânicos

A Tabela 2 apresenta os valores limites de dureza para a especificação ASTM A 307 graus A e B e os resultados do ensaio de dureza Brinell, durímetro Wolpert GMBH Testor 930, executados na amostra fraturada.

**Tabela 2.** Ensaio de dureza Brinell

|           | Amostra falhada | ASTM A 307 |           |
|-----------|-----------------|------------|-----------|
|           |                 | Grau A     | Grau B    |
| Dureza HB | 246 ± 2         | 121 - 241  | 121 - 212 |

Na Tabela 3 observam-se os resultados dos ensaios de tração, máquina universal Instron 1125, e os limites previstos na norma ASTM A 307.

**Tabela 3.** Ensaio de Tração (ASTM E8)

|                                    | Amostra falhada CP1 | Amostra falhada CP2 | ASTM A 307 |           |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------|
|                                    |                     |                     | Grau A     | Grau B    |
| Tensão de Escoamento (MPa)         | 852                 | 750                 | -          | -         |
| Tensão Limite de Resistência (MPa) | 866                 | 842                 | 415 min    | (415-690) |
| Alongamento (%)                    | 16                  | 18                  | 18         | 18        |

A partir da análise metalográfica foram executados ensaios de dureza Vickers, 10kg, durímetro Buehler Micromet 5103, nas regiões de solda, ZTA e metal base, Tabela 4.

**Tabela 4.** Ensaio de dureza Vickers

| Região         | HV/10*     | $\sigma_{n-1}$ ** | HR <sub>c</sub> *** |
|----------------|------------|-------------------|---------------------|
| Metal de Solda | 338        | 27                | 34                  |
| <b>ZTA</b>     | <b>714</b> | <b>49</b>         | <b>61</b>           |
| Metal Base     | 277        | 12                | 27                  |

\* HV/10 - Dureza Vickers – carga de 10 kgf

\*\*  $\sigma_{n-1}$  - Desvio Padrão

\*\*\* HR<sub>c</sub> - Dureza Rockwell – escala C (valores convertidos a partir de HV/10)

## Análise Fratógráica

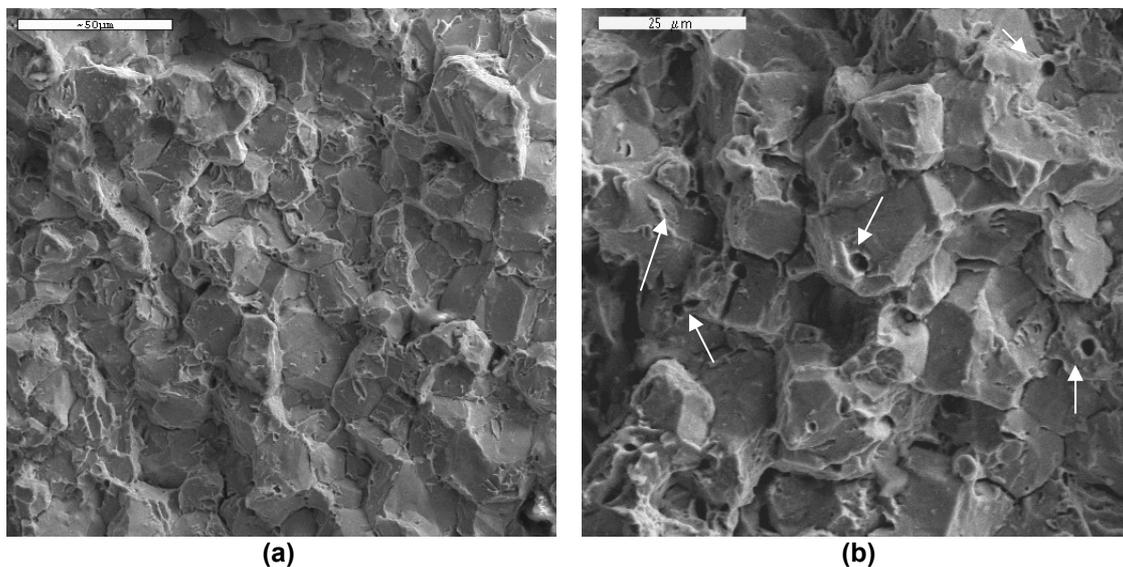
A análise fratógráica conduzida no microscópio estéreo e no microscópio eletrônico de varredura LEO 940A acoplado a uma microsonda EDS Isis, revelou a ocorrência de um processo de ruptura frágil, iniciado por uma trinca localizada no final do cordão da solda de montagem da estrutura de fixação da torre.

Não foram detectados filmes ou depósitos de óxidos de ferro na superfície de fratura.

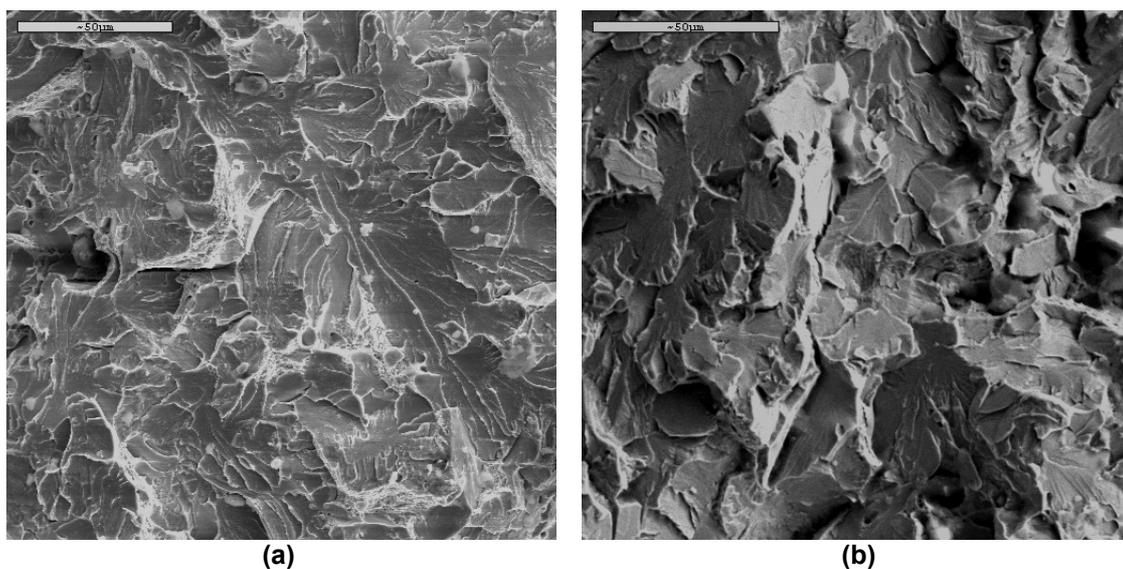
A observação no MEV revelou que a trinca inicial era de natureza intergranular, Figura 7a. Outro detalhe importante foi a existência de vazios nas superfícies dos grãos, Figura 7b. A propagação da trinca alternava entre modos intergranulares e transgranulares com aspecto de clivagem e quase-clivagem, Figura 8, os quais eram predominantes ao longo da zona de propagação.

De forma a avaliar a presença de elementos contaminantes na superfície de fratura, como o fósforo por exemplo, foram executadas análises por EDS ao longo da amostra, não sendo detectado nenhum elemento de composição ou concentração anormal.

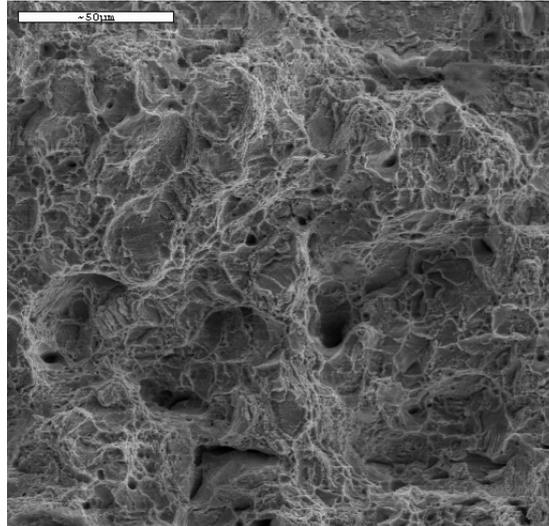
Na observação da superfície de fratura de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração, executada a título de comparação, verifica-se o aspecto de ruptura dúctil, com a presença característica de microcavidades (dimples), conforme pode ser observado na Figura 9.



**Figura 7.** Imagem de MEV (elétrons secundários) da região de início de fratura (a) aspecto intergranular, ampliação: 500x. (b) detalhe da presença de vazios na superfície dos grãos (setas), ampliação: 1000x.



**Figura 8.** (a) e (b) Imagens de MEV (elétrons secundários) da região de propagação da trinca indicando aspecto transgranular de fratura frágil (clivagem e quase-clivagem). Ampliação: 500x.



**Figura 9.** Imagem de MEV (elétrons secundários) da superfície de fratura de um dos corpos de prova rompidos no ensaio de tração, observa-se o aspecto do micromecanismo de fratura dúctil, caracterizado pela presença de microcavidades (dimples). Ampliação: 500x.

## DISCUSSÃO

Através da execução de um procedimento usual de análise de falhas identificou-se um mecanismo de fratura frágil não compatível com o esperado para um aço AISI 1045. A trinca que levou a ruptura do componente originou-se na ZTA de uma solda de montagem, se propagando para uma região de estrutura martensítica originada pela soldagem de baixo aporte térmico.

Os resultados dos ensaios demonstram de forma clara a inadequação da liga AISI 1045, empregada em substituição, à especificação contida nos requisitos suplementares S1 da norma ASTM A 307 Grau B (estojos e parafusos de aço carbono, com resistência à tração mínima de 60 ksi). Estes requisitos relacionam-se a componentes que serão submetidos a soldagem, tendo em vista os efeitos de fragilização ocasionados por tal processo.

A razão da utilização negligente da liga AISI 1045 não ficou clara, se foi decorrência de uma análise simples dos valores superiores de resistência mecânica ou por uma observação incompleta da norma ASTM A307.

Os valores de carbono equivalente da ordem de 0,63 demonstram a susceptibilidade da liga à ocorrência de transformação martensítica na ZTA quando não executados tratamentos térmicos pré e pós-soldagem, que promovam um resfriamento mais lento das juntas soldadas.

Esta susceptibilidade se torna real quando observada na análise metalográfica a transformação martensítica na ZTA. Esta região apresentou valores de dureza da ordem de 714 HV/10. A título de comparação, o IIW (International Institute of Welding) sugere como máxima dureza permitida na ZTA de aços C-Mn valores de 350 HV.<sup>[2]</sup>

A transformação martensítica nestas regiões promove uma acentuada redução da tenacidade e formam-se sítios propícios para o aprisionamento do hidrogênio. Isto ocorre porque a difusibilidade do hidrogênio é alta na austenita mas extremamente baixa na martensita e durante a rápida transformação o hidrogênio não consegue deixar o material.

A observação metalográfica sozinha não fornece indícios conclusivos sobre o mecanismo de fragilização pelo hidrogênio. Entretanto, tal mecanismo apresenta

algumas características próprias como a presença de uma única trinca levando a ruptura do componente, sendo que tal trinca está associada a um processo de soldagem inadequado. Além deste fato é bastante comum a ocorrência da alternância entre modos de propagação intergranular e transgranular por clivagem e quase-clivagem, tal como foi observado no estojo rompido.<sup>[3-5]</sup>

Os vazios detectados na superfície de fratura, na região intergranular, provavelmente estão associados à formação de bolhas de CH<sub>4</sub>.

Finalmente, com relação à superfície de fratura, ela se apresentou livre de óxidos e não foram observados sinais de elementos contaminantes, comumente associados a fraturas intergranulares, nem a existência de condições que possibilitassem a ocorrência do mecanismo de corrosão sob tensão.

Ao longo do tempo diversas teorias de fragilização pelo hidrogênio foram desenvolvidas, sendo as mais importantes as teorias da pressão, da energia superficial e da decoesão, além de outros modelos de interação do hidrogênio com as discordâncias.<sup>[5-7]</sup>

A teoria da pressão assume que a fragilização é causada pela pressão do hidrogênio gasoso numa trinca de Griffith. Quando o aço saturado com o hidrogênio a elevadas temperaturas é resfriado, o hidrogênio gasoso irá se precipitar nos microvazios e uma alta pressão de hidrogênio poderá se formar. Aplicando a Lei de Silverst, estima-se que um aço contendo 5 ppm de hidrogênio teria, nos vazios, uma pressão de 17.000 atmosferas a 20 °C.<sup>[5]</sup>

A teoria da redução da energia superficial estabelece que a absorção de hidrogênio decresce a energia superficial livre do metal e amplia a propagação da trinca de Griffith.<sup>[6,7]</sup>

A teoria da decoesão indica que o hidrogênio dissolvido migra para regiões triaxiais de tensão e fragiliza a rede através da diminuição da resistência de coesão dos átomos do metal.<sup>[6,7]</sup>

Apesar de na maioria das ocorrências de fragilização mais de uma teoria poder ser aplicada, o fato é que uma só teoria não consegue explicar todos os aspectos do fenômeno.

Para a ocorrência do mecanismo de trinca fria promovida pela fragilização pelo hidrogênio são necessários alguns fatores intrínsecos, tais como carbono equivalente alto, microestrutura susceptível, elevada dureza na ZTA, teor de hidrogênio na solda e na ZTA e tensões trativas.

Os três primeiros fatores já foram explorados nesta discussão. Com relação ao teor de hidrogênio na solda e na ZTA, o mesmo é facilmente explicável, na montagem da estrutura de fixação da torre, pela utilização de um procedimento inadequado de soldagem, o qual incluiu o emprego de eletrodos do tipo celulósico ou rutilico ao invés de um eletrodo do tipo E7018 de baixo hidrogênio e a não previsão de tratamentos térmicos pré e pós-soldagem que promovessem a redução da velocidade de resfriamento do material, permitindo a fuga do hidrogênio e uma transformação bainítica ao invés da observada, ou seja, martensítica.

A natureza de construção da estrutura de fixação da torre somada às tensões locais geradas na transformação martensítica propiciou as condições que juntamente com os demais fatores levaram à ruptura do estojo pelo mecanismo de trinca fria.

## CONCLUSÕES

- O material empregado na fabricação da estrutura de fixação da torre de linha de transmissão, que falhou durante a etapa de posicionamento, encontrava-se fora da especificação de projeto. Ao invés de um aço que atendesse as especificações da ASTM A307 Grau B (requisitos suplementares - S1), foi empregado um aço AISI 1045, o qual não atendia basicamente aos requisitos de composição química e limite de resistência à tração.
- O procedimento de soldagem adotado não contemplou a realização de tratamentos térmicos pré e pós-soldagem que teriam por objetivo promover a formação de bainita na ZTA e permitir a eliminação do hidrogênio residual.
- A natureza da falha foi identificada como trinca fria, originada pela fragilização pelo hidrogênio aprisionado durante a soldagem. Este efeito deletério foi potencializado pela transformação martensítica acarretada por um procedimento inadequado de soldagem que promoveu o surgimento de uma ZTA com dureza de 714 HV/10.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASTM A 307, "Standard Specification for Carbon Steel Bolts and Studs, 60.000 PSI Tensile Strength, 1993.
- 2 Guide to the Welding and Weldability of C-Mn Steels and C-Mn Microalloyed Steels, International Institute of Welding, 1<sup>st</sup> Edition, 1976, pp.31-47.
- 3 Metals Handbook, American Society for Metals, Vol.11 – Failure Analysis and Prevention, 9<sup>th</sup> Edition, 1992, pp. 245-251, 422-423.
- 4 Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys, Proceedings of the International Corrosion Conference Series NACE-5, Unieux-Firminy, France, June 12-16, 1973.
- 5 Gedeon, S. A. and Eagar, T.W., "Assessing Hydrogen Assisted Cracking Fracture Modes in High Strength Steel Weldments", Welding Research Supplement, June 1990.
- 6 Oliveira, S. P. e Miranda, P.E.V., "Concentração Crítica de Hidrogênio para a Fragilização pelo Hidrogênio em Aços",
- 7 <http://146.164.26.9/mirror/sarra/artigos/artigo10111/index.html> .
- 8 Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking, American Society for Metals, Edited By Gibala, R. and Hehemann, R.F., 1<sup>st</sup> Ed., 1984.