

## Análise mecânica da conformação de amostras dobradas em U usadas em teste de corrosão sob tensão

*Mechanical analysis of U-bend samples' forming used in stress corrosion cracking testing*

Anderson Závoli Habib<sup>1</sup>, Lucas Venancio Pires de Carvalho Lima<sup>2</sup>, Ivan Napoleão Bastos<sup>3</sup>

### RESUMO

A suscetibilidade à corrosão sob tensão pode ser avaliada em corpos de prova produzidos segundo a norma ASTM G30-97 (2016), onde um corpo de prova inicialmente plano é conformado para assumir um formato em U. Neste artigo, as tensões e deformações foram estimadas por simulação utilizando o método de elementos finitos. O corpo de prova de aço API 5L X70 passou por três fases de conformação: dobramento, recuperação elástica e aparafusamento. A recuperação elástica foi analisada pela distância de abertura e pelas tensões atuantes. O atrito entre o corpo de prova e a ferramenta alterou o estado de tensão para as duas primeiras fases, mas não foi influente após o aperto final por parafuso. O aumento do coeficiente de atrito dificulta o deslizamento do corpo de prova sobre a ferramenta, o que proporciona tensões mais concentradas na região central da superfície convexa. Para a conformação simulada, o coeficiente de atrito praticamente não modificou o estado final de tensão do corpo de prova após aperto do parafuso.

**Palavras-chave:** Modelagem computacional. Dobramento. Tensão residual. Atrito.

### ABSTRACT

The susceptibility to stress corrosion cracking can be evaluated in specimens produced according to the ASTM G30-97 (2016) standard, where an initially flat blank is formed to assume a U-shape. The stresses and strains were evaluated by simulation using the finite element method. The API 5L X70 steel test specimen underwent three forming phases: bending, elastic recovery, and screwing. The elastic recovery was analyzed by the opening distance and the stress. The friction between the specimen and the tool changed the stress state for the first two phases, but it was not influential after the final tightening by screw. The increase in this coefficient hindered the specimen from slipping on the tool, which provides more concentrated stress in the center of the convex region. For the simulated forming, the coefficient of friction virtually did not interfere in the specimens' final stress state after tightening the screw.

**Keywords:** Computational modeling. Bending. Residual stress. Friction.

<sup>1</sup> Mestrando em Modelagem Computacional, Engenheiro Mecânico pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Politécnico (IPRJ)

E-mail:

andersonzavoli@gmail.com

<sup>2</sup> D.Sc. em Engenharia Biomédica pelo Arts et Métiers ParisTech, França. Prof. Adjunto do IPRJ/UERJ

E-mail: lucaslima@iprj.uerj.br

<sup>3</sup> D.Sc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ. Prof. Titular do IPRJ/UERJ

E-mail: inbastos@iprj.uerj.br

## 1. INTRODUÇÃO

Muitas ligas metálicas interagem com o meio envolvente resultando no fenômeno da corrosão metálica. Na presença de esforços mecânicos, alguns pares liga-meio corrosivo podem resultar em trincamento por corrosão sob tensão (CST). Esta forma de corrosão tem uma grande dependência com o esforço mecânico trativo atuante sobre a estrutura (COSTA-MATTOS et al., 2008) e pode levar estruturas de engenharia ao colapso. O dano devido ao surgimento de trincas que leva à fratura ocorre quando se atinge o valor tenacidade crítica. Assim, até materiais tenazes como aço inoxidável austenítico e o aço-carbono podem fraturar por CST. Portanto, avaliar a suscetibilidade à CST de ligas metálicas no meio corrosivo desperta enorme interesse tecnológico.

Os aços-carbono estruturais são muito utilizados em aplicações industriais devido às propriedades mecânicas e ao custo relativamente baixo. Entretanto, o ambiente da indústria de óleo e gás representa ameaças à integridade estrutural, pois é muito corrosivo. Assim, a *American Petroleum Institute* (API) especificou classes de aço-carbono cujas propriedades mecânicas, composição química e microestrutura as tornam mais resistentes à fragilização pelo hidrogênio que os aços de resistência mecânica equivalente usados em ambientes menos agressivos. As especificações da norma de aço da API são identificadas por API 5L Xnn, onde 5L representa especificação de fabricação para aplicação de dutos (*linepipe*) e nn corresponde ao limite de escoamento em ksi desta classe de aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL). Com sua vasta utilização em construções navais (LINK et al., 2009) e dutos para transporte de combustíveis fósseis (MOHTADI-BONAB et al., 2015), a suscetibilidade à corrosão induzida pelo ambiente deve ser analisada para que não ocorra falha decorrente da corrosão sob tensão ou fragilização pelo hidrogênio. Porém, o tensionamento presente na amostra afeta a determinação da suscetibilidade. A utilização da norma ASTM G30-97 (2016) permite produzir corpos de prova, porém, sem descrever o comportamento em termos de carga, tensão e deformação durante o dobramento nas diversas regiões.

A norma ASTM G30-97 (2016) recomenda um processo de dobramento de uma placa em formato em U, conformados em uma ou duas etapas. Aqui é analisado o dobramento em duas etapas, em que há o aparafusamento final para reter o estado de tensão trativa na face convexa. Esse dobramento em duas etapas pode ser dividido em três fases, sendo a primeira o dobramento, seguido pela segunda fase que seria a

recuperação elástica do metal ao ser retirado o contato com a ferramenta e por último, a terceira fase que é o aparafusamento final da peça.

A recuperação elástica, após a retirada da ferramenta, é o retorno das deformações recuperáveis, também conhecido como efeito mola. Porém, nem sempre todas as deformações elásticas são recuperáveis, visto que algumas delas ficam restritas pelas regiões de deformações plásticas. Estas retenções podem causar tensões residuais que podem comprometer a utilização do aço.

As tensões residuais estão presentes na estrutura feita de diversos materiais, sem que haja carga externa aplicada. Sua origem pode ser proveniente de diversos processos, como transformação de fase, aplicação de gradientes térmicos acentuados, fluxo plástico não-uniforme (WITHERS, 2007) ou tratamento de superfície (SILVA et al., 2020). O fluxo plástico relaciona-se com o processo de dobramento, pois proporciona altas deformações plásticas não-uniformes no corpo de prova. As tensões são influenciadas pela recuperação elástica e por outros parâmetros, como o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o corpo de prova.

O coeficiente de atrito é um parâmetro importante a ser analisado pois influencia várias respostas mecânicas. O contato metal-metal é reportado como tendo faixa de valores entre 0,0 a 1,6 (LIM et al., 1989). Assim, é importante testar para vários coeficientes e analisar em relação às tensões e aos carregamentos. A norma ASTM G30-97 (2016) prevê que o carregamento pode ser aplicado de dois modos. Num deles, aplica-se o dobramento do corpo de prova e depois um aparafusamento para assegurar o formato final e as tensões necessárias à nucleação e propagação das trincas induzidas pelo ambiente. Assim, com base na norma ASTM G30-97 (2016), o estudo consistiu em modelar o sistema de grandes deformações plásticas do aço API 5L X70 e comparar os resultados de carregamento da amostra ao dobramento e à aplicação do parafuso. Com esta modelagem foi possível estudar as tensões, deformações, recuperação elástica e tensões residuais, além da influência do coeficiente de atrito nos vários parâmetros.

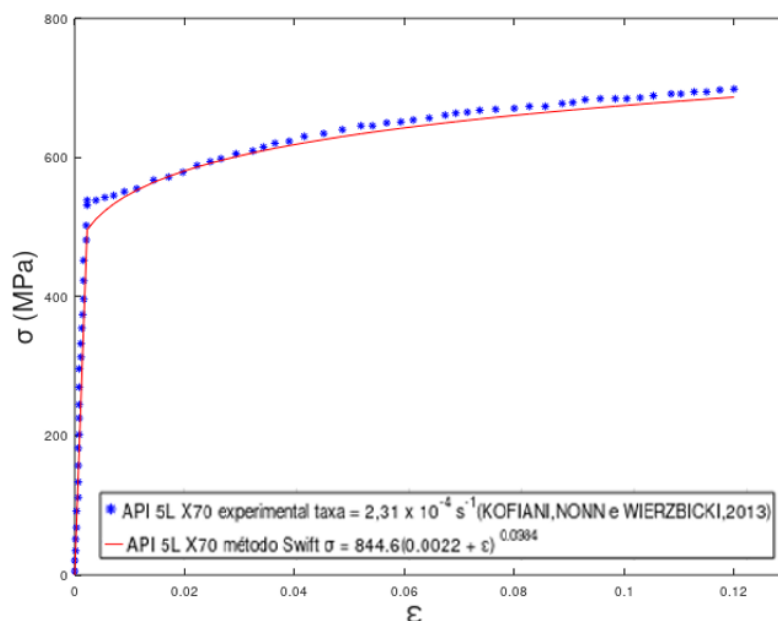
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem do sistema de dobramento e aplicação do parafuso foi feita no pacote *Ansys Mechanical* utilizando linguagem APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Para a criação da rotina computacional, inicialmente foi feito o estudo do aço API 5L X70 e de suas propriedades. Após isto, a geometria do corpo de prova foi modelada tomando como referência à norma ASTM G30-97 (2016) e a malha implementada. Com o corpo de prova

modelado, modela-se a ferramenta de dobramento, dividindo-a em partes que durante o carregamento se movimentam e outras que permanecem fixas. Após os modelos de corpo de prova e ferramenta implementados, é aplicado o carregamento, descarregamento e aparafusamento. Depois desta etapa, no pós-processamento, analisa-se as respostas do processo de dobramento e exportam-se os resultados de deslocamento, abertura, tensão e deformação para que sejam importadas no software Octave.

### Aço API 5L X70

O aço API 5L X70 foi escolhido devido à grande utilização no setor de óleo e gás, em especial na fabricação de dutos. As propriedades utilizadas são as tensões e deformações provenientes da curva tensão-deformação (Figura 1), admitindo-se um limite de escoamento de 496 MPa, módulo de elasticidade de 219,67 GPa e coeficiente de Poisson 0,29.



**Figura 1.** Curva tensão versus deformação do aço API 5L X70. Modificada de Kofiani et al. (2013).

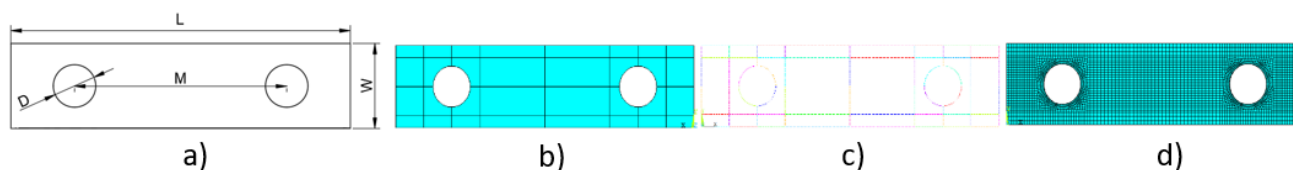
Os pontos experimentais da curva de Kofiani et al. (2013) foram importados na rotina do Octave e modificados conforme o método Swift. Este método consiste na modelagem do formato da curva tensão-deformação no regime plástico por meio da Equação 1. Nesta equação os parâmetros  $A$  e  $n$  representam os parâmetros de plasticidade antes da estrição. Após esta definição, foi importado ao Ansys as coordenadas dos pontos da

curva API 5L X70 com utilização do método de Swift (CAO et al., 2017). Os termos  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  e  $\varepsilon_0$  significam, respectivamente, tensão, deformação e deformação no escoamento. Para o aço usado, a equação de Swift ajustada é dada por  $\sigma = 844,6(0,0022 + \varepsilon)^{0,0384}$  com tensão em unidade de MPa.

$$\sigma = A(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (1)$$

### Modelagem do Corpo de Prova

A modelagem da geometria do corpo de prova foi implementada de maneira paramétrica, utilizando a linguagem APDL, visto que existem oito formatos descritos na norma ASTM G30-97 (2016). A malha foi feita de forma que a divisão das linhas tivesse tamanhos pré-determinados, e estas divisões expandidas para áreas e volumes, criando elementos finitos tridimensionais (Figura 2) com oito nós cada e três graus de liberdade por nó. As cotas L, M, W, D e T valem respectivamente 80, 50, 20, 10 e 2,5 mm. A espessura é representada pela cota T.

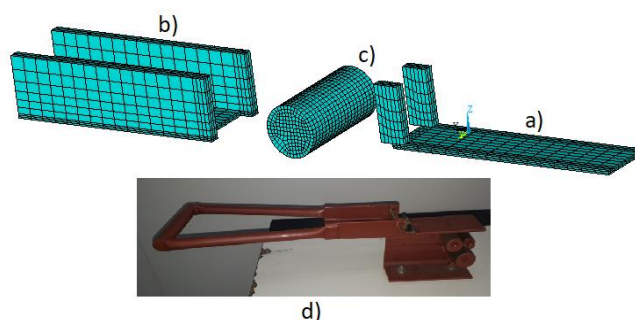


**Figura 2.** Geometria e malha do corpo de prova: a) medidas citadas pela norma ASTM G30-97 (2016), b) divisões em áreas para melhor definir região dos furos, c) divisão das linhas e d) divisão em elementos finitos da malha.

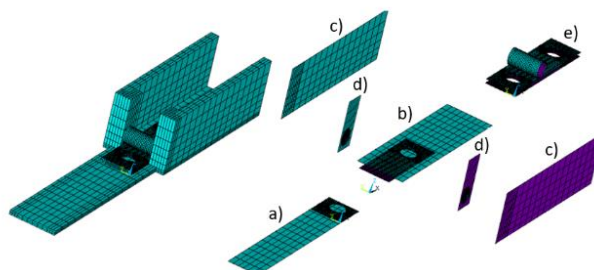
Em relação à discretização da malha em elementos finitos, estudou-se a convergência de malha. Pela teoria mecânica de vigas, que apresentam tensões residuais após aplicação de momentos fletores, a tensão neste tipo de carregamento varia com a posição ao longo da espessura da viga. De modo análogo, espera-se que o número de elementos ao longo da espessura da placa influencie a resposta mecânica de amostras dobradas em U. Para estudar o refinamento adequado para o cálculo do dobramento, avaliaram-se as variáveis de interesse para diversas configurações de discretização. Assim, simulamos o número de elementos na direção da espessura com valores 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 9.

O dobramento é realizado pela rotação do corpo de prova ao redor de um cilindro que o conforma até o formato de U. Existem três fases do dobramento: 1) conformação

até formar um U a 180°; 2) liberação do corpo de prova que relaxa elasticamente; 3) adaptação de um parafuso que comprime o corpo de prova até reestabelecer a forma final de U. Para a criação da ferramenta no *Ansys*, a modelagem foi baseada na ferramenta de dobramento do Laboratório de Corrosão do IPRJ/UERJ. O modelo da ferramenta foi dividido em três segmentos: parte fixa, parte rodante e o cilindro. A malha da ferramenta foi definida parametricamente pela linguagem APDL do *Ansys*, porém com menos refinamento, pois o interesse está no espécime (Figura 3). Para os elementos de contato foi necessário ajustar o funcionamento da ferramenta e as características do *Ansys* (Figura 4).

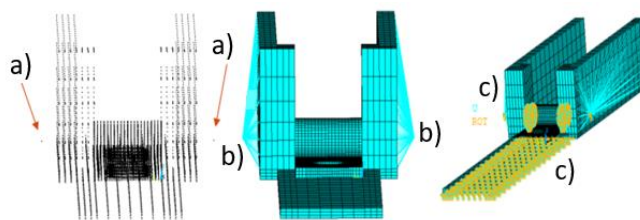


**Figura 3.** Ferramenta de dobramento em U. a) parte fixa, b) parte rodante, c) cilindro e d) semelhante à do Laboratório de Corrosão/IPRJ/UERJ.



**Figura 4.** Elementos de contato e condições de movimento: a) inicialmente fixo; b) comum; c) não separado, deslizamento permitido; d) fixo e e) comum.

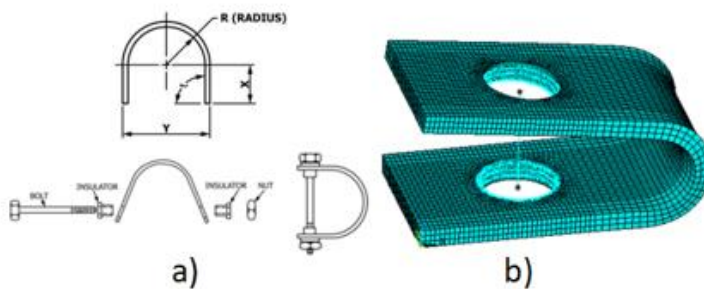
Com intuito de controlar a rotação da ferramenta sobre o corpo de prova, dois nós auxiliares próximos à superfície do rolo foram criados e conectados à ferramenta por elementos de viga, sendo assim a rotação aplicada a estes nós auxiliares controla o movimento da ferramenta como um todo. Além disto desta condição, os nós pertencentes às áreas transversais do rolo foram fixados assim como a base da ferramenta fixa, conforme mostradas na Figura 5.



### Modelagem do Carregamento do Parafuso

**Figura 5.** Condições de deslocamento: a) nós de controle de rotação; b) elementos de transmissão dos esforços e c) engaste.

onde se exportaram as coordenadas dos nós após sua conformação mecânica, assim como as tensões residuais resultantes das duas primeiras fases. A norma ASTM G30-97 apresenta a geometria final do corpo de prova (Figura 6). Para chegar a tal configuração e simular o efeito do aparafusamento, os centros dos furos do modelo foram conectados por um elemento que compreende de restrição cinemática que funciona como uma junta translacional, permitindo o deslocamento apenas no eixo de ligação do parafuso. Com isso, aplicou-se deslocamento no nó central superior em direção ao nó central inferior, que representam o parafuso, até a distância entre eles corresponder ao citado pela norma. Após a última fase, os resultados mais importantes são o comportamento trativo e compressivo das regiões e sua comparação com a fase do dobramento e na utilização dos coeficientes de atrito.



**Figura 6.** Simulação do carregamento do parafuso: a) descrição da norma e b) modelo de elementos finitos

### Coefficiente de atrito metal-metal

O coeficiente de atrito foi alterado nas simulações variando entre 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0. Os valores de coeficiente de atrito foram obtidos da referência (6) e atribuídos aos contatos a, b e e da Figura 5. Após a modelagem, os valores dos parâmetros abertura, tensão máxima, abertura e deformação foram correlacionados aos diferentes coeficientes de atrito.

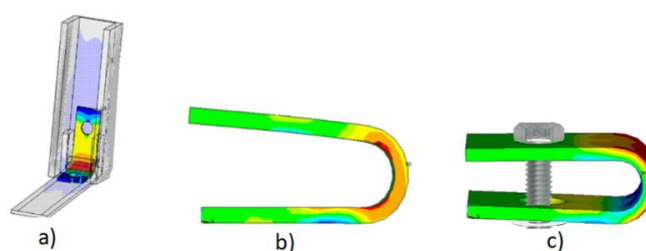
## Pós-Processamento

Após os carregamentos efetuados foi realizado o pós-processamento dos dados. Tensões aplicadas no carregamento, tensões residuais, abertura do corpo de prova, ângulo da abertura, carregamento no dobramento e no parafuso foram estudados nesta etapa. Foram representadas as tensões de von Mises e definidas as tensões  $\sigma_1\sigma_3$ . A análise foi criada a partir das tensões principais, representando-se aquela com maior módulo entre a tensão máxima principal e mínima principal descrita na Equação 2 (BERTI et al., 2018).

$$\sigma_{s1s3} = \begin{cases} \sigma_1 & \text{para } |\sigma_1| > |\sigma_3| \\ \sigma_3 & \text{para } |\sigma_1| < |\sigma_3| \end{cases} \quad (2)$$

## 3. RESULTADOS

O espécime foi submetido ao dobramento pela ação da ferramenta e a sequência pode ser dividida em três fases. A primeira delas refere-se à fase final de dobramento a 180°. Logo após o dobramento, inicia-se o processo de recuperação elástica, fase 2. Por fim, a fase 3 pode ser descrita como a etapa final de aperto com o parafuso (Figura 7). O efeito do refinamento de malha foi estudado e está apresentado na seção 4 - Discussão. Entretanto, todos os resultados aqui apresentados nesta seção foram realizados com a espessura discretizada em 6 elementos de malha, o que se mostrou suficiente para termos resultados numéricos convergentes.



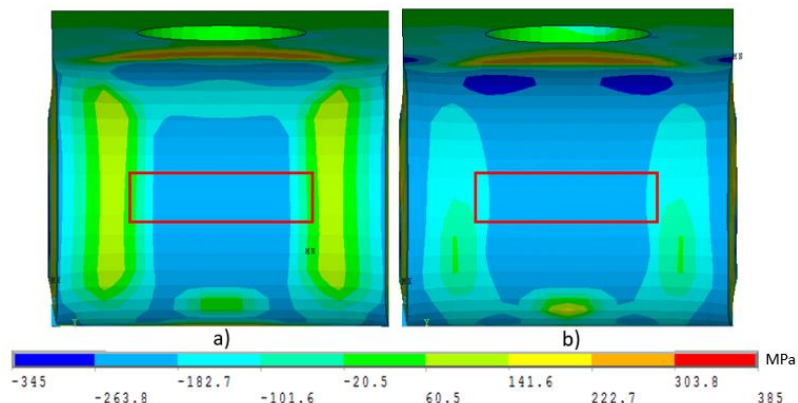
**Figura 7.** Três fases do processo de conformação: a) dobramento – Fase 1; b) recuperação elástica – Fase 2 e c) aperto final com o parafuso - Fase 3.

### Efeito do Coeficiente de Atrito na Tensão na Fase 2

Com os resultados simulados é possível perceber que maiores coeficientes de atrito metal-metal proporcionam tensões mais elevadas na região convexa. Este efeito pode estar relacionado com a maior aderência da ferramenta com a peça, pois são necessárias

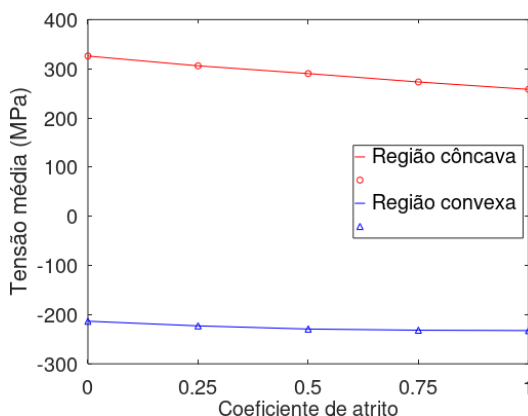


elevadas tensões para que ocorra a recuperação elástica. Além disso, como o atrito atua uniformemente em toda a interface, a tendência é que ocorra distribuição mais homogênea da tensão, conforme mostra a Figura 8, referente à fase 2.



**Figura 8.** Distribuição das tensões  $\sigma_1\sigma_3$  para coeficientes de atrito: 0,0 (a) e 1,0 (b) no final da fase 2. Face convexa.

As tensões no centro das superfícies côncava e convexa para a faixa de coeficiente de atrito são mostradas na Figura 9. As tensões foram calculadas de acordo com a média da região central, após a recuperação elástica, fase 2. Ou seja, uma área retangular de 8 mm x 12 mm (retângulo vermelho da Figura 8). Nota-se compressão na superfície convexa e tração na côncava. Além disto, o atrito reduz o módulo da tensão na superfície côncava.



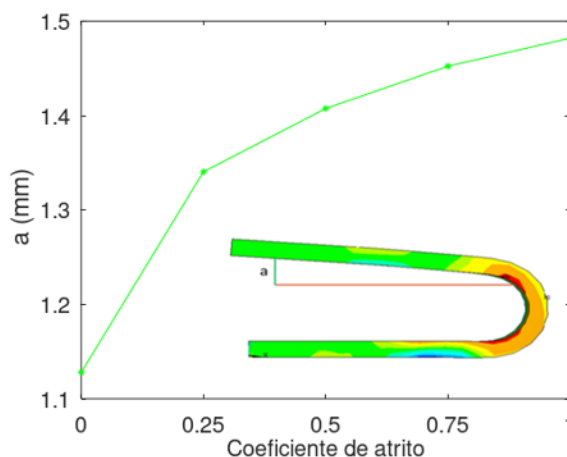
**Figura 9.** Tensão média versus coeficiente de atrito ao final da fase 2.

Para as superfícies côncava e convexa, a média das tensões apresentou uma redução do módulo da região côncava. As tensões dentro da área retangular escolhida (Figura 8) com o aumento do atrito apresentam uma tendência compressiva, queda da tensão trativa na região côncava e pequeno aumento das tensões na região convexa.

Provavelmente a maior aderência entre peça e rolo proporciona uma tendência a tensões compressivas ao recuperar elasticamente a placa. Além disso, o efeito do atrito pôde ser avaliado também na abertura do corpo de prova.

### Efeito do Coeficiente de Atrito na Abertura

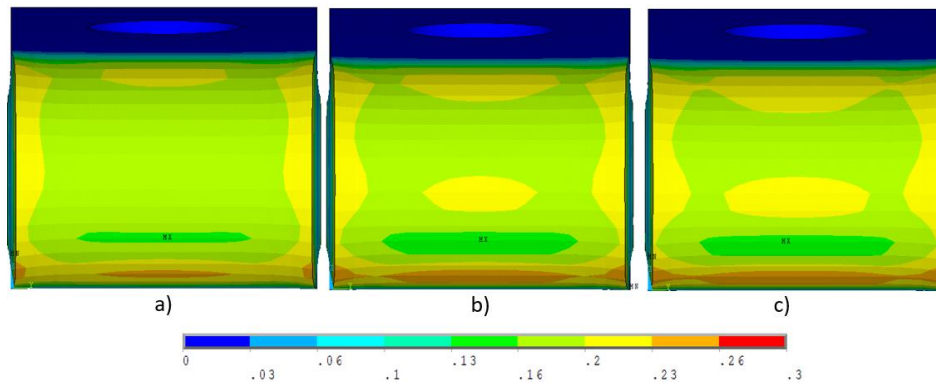
A abertura do corpo de prova, após a recuperação elástica, tende a ter valores maiores com coeficientes de atrito maiores (Figura 10). Este comportamento pôde ser caracterizado pelo aumento da recuperação elástica e aderência à ferramenta. Provavelmente a maior restrição ao deslizamento entre superfícies persiste com a recuperação elástica; assim, maior atrito, maior a recuperação, pois parte dele ocorre devido à restrição de deslizamento chapa-ferramenta.



**Figura 10.** Recuperação do corpo de prova após o dobramento versus coeficiente de atrito.

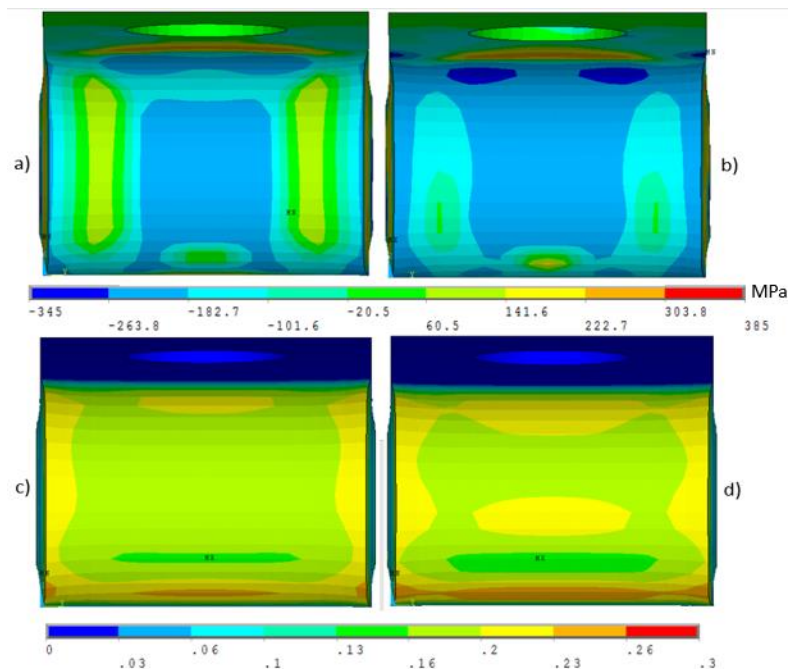
### Efeito do Coeficiente de Atrito na Deformação

As deformações do corpo de prova ao sofrer o dobramento apresentam diferenças para coeficiente de atrito não-nulo (Figura 11, fase 2). O resultado mostra deformações menores na região central do corpo de prova em relação à borda.



**Figura 11.** Deformação total do corpo de prova na região convexa na fase 2. Coeficiente de atrito a) 0,00; b) 0,50 e c) 1,00.

A deformação está fortemente relacionada com as tensões na mesma região. Deste modo, analisando-se localmente, o caso sem atrito apresenta tensões menores do que o caso que sofreu maiores deformações plásticas (coeficiente de atrito 1,0; Figura 12). Observa-se que não há uma simetria perfeita entre as abas, pois a aba fixa à ferramenta está menos tensionada que aquela que rotaciona.

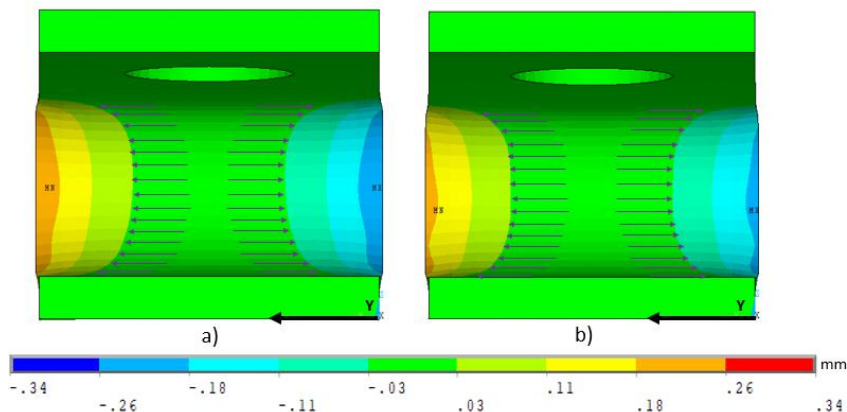


**Figura 12.** Tensão na região convexa na fase 2: coeficiente de atrito a) 0,0 e b) 1,0. Deformação da região convexa na fase 2: coeficiente de atrito: c) 0,0 e d) 1,0.

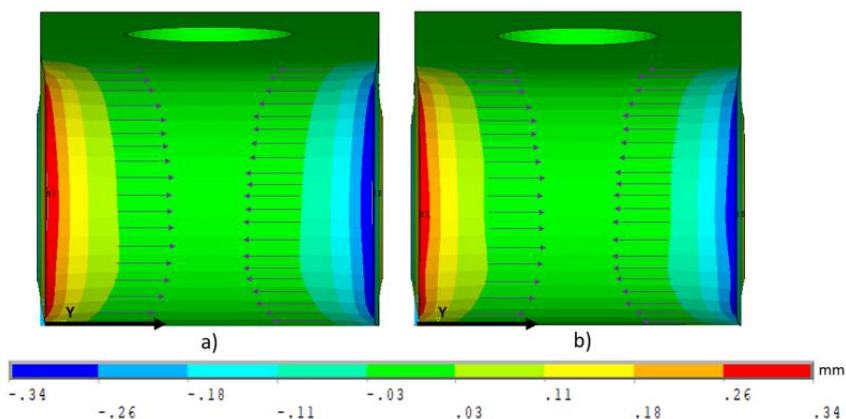
### Análise do Estreitamento das Bordas

Uma análise interessante do modelo de dobramento é o deslocamento lateral da borda do corpo de prova, ou seja, na cota W da Figura 2. O deslocamento representa uma expansão na face côncava (Figura 13) e um estreitamento na face convexa

(Figura 14), que ocorre devido à manutenção do volume em deformação plástica, sendo, entretanto, dependente do coeficiente de Poisson. Ressaltam-se que as cores são relativas ao sentido dos eixos y das Figuras 13 e 14.



**Figura 13.** Expansão da região côncava do corpo de prova na fase 2. Coeficiente de atrito: a) 0,0 e b) 1,0.



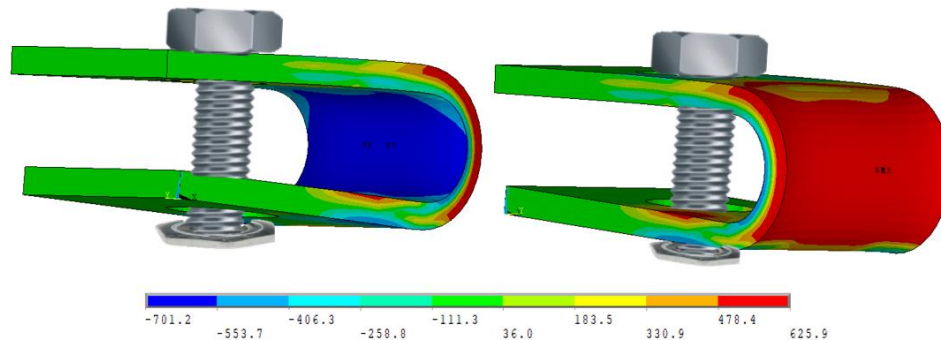
**Figura 14.** Estreitamento da região convexa na fase 2. Coeficiente de atrito: a) 0,0 e b) 1,0. Ressalta-se que o sinal depende da orientação do eixo.

No caso do estreitamento, a presença do coeficiente de atrito não apresenta diferenças significativas nos resultados, apenas na distribuição do deslocamento na região côncava. Haja vista que menores coeficientes de atrito, a ocorrência do deslocamento é mais livre.

### Tensões após o Aparafusamento

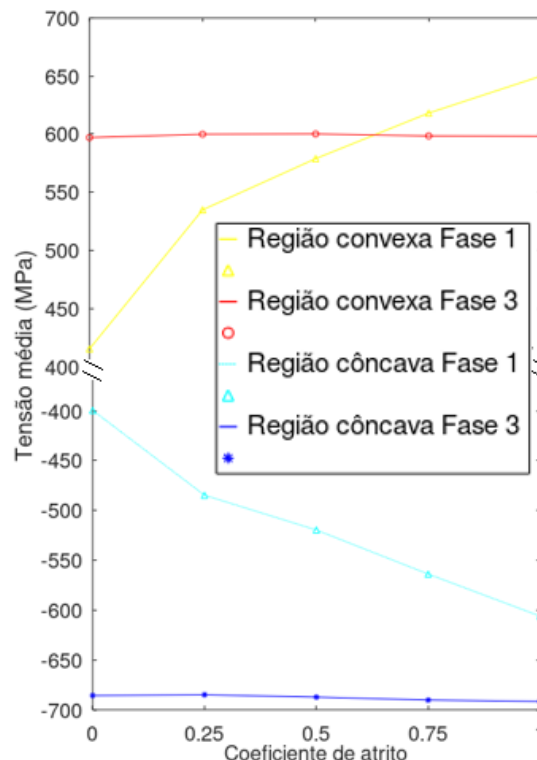
Com a aplicação do parafuso (fase 3), percebe-se que as tensões trativas concentram-se na região convexa, e compressão na região côncava (Figura 15). A alta tensão trativa favorece a nucleação e a propagação de trincas de corrosão sob tensão. Os aços inoxidáveis austenítico podem apresentar fluência em baixa temperatura,

favorecendo ainda mais o rompimento do filme passivo e permitindo a nucleação e a propagação da trinca de CST em meios aquosos com cloreto.



**Figura 15.** Tensões trativas na região convexa e compressivas na côncava. Fase 3.

Altos coeficientes de atrito provocam mais recuperação elástica avaliada pela abertura. Então, para manter a distância da região superior e inferior do corpo de prova e em conformidade com a norma ASTM G30-97 (2016) são necessárias cargas mais elevadas para atrito mais elevado. Assim, as tensões médias finais após o aparafusamento são praticamente constantes, independente do atrito (Figura 16, fase 3). As tensões médias da fase 1, entretanto, são muito dependentes do atrito. Para o caso de coeficiente de atrito 1,0; a diferença relativa da tensão em tração e em compressão, entre as fases 3 e 1, resulta respectivamente, em -8 % em tração e +12,3 % em compressão.



**Figura 16.** Tensão média versus coeficiente de atrito ao final das fases 1 e 3.

## 4. DISCUSSÃO

A simulação mecânica do dobramento de espécime do aço API 5L X70 segundo a norma ASTM G30-97 (2016) foi realizada. Além disto, foi dado destaque ao efeito do coeficiente de atrito entre o espécime sob deformação e a ferramenta, e como o atrito afeta as tensões e deformações mecânicas em cada fase do processo de dobramento. A norma permite que as amostras sejam conformadas em duas etapas. Em uma etapa, compreende apenas a fase 1, e a conformação em duas etapas engloba as fases 1, 2 e 3. A fase 1 refere-se ao dobramento a  $180^\circ$ , a fase 2 à relaxação da deformação elástica e a fase 3 corresponde ao aparafusamento.

Para a fase de relaxação elástica, percebe-se como o atrito influencia nas tensões médias. Quanto maior o coeficiente de atrito, menores são as tensões médias trativas e maiores são as tensões médias compressivas avaliadas na região de interesse. A explicação para esta situação está relacionada com a restrição ao deslizamento das superfícies. Com isto, as tensões simuladas encontram-se no centro do espécime, fazendo com que as tensões médias na região retangular se apresentem maiores nos casos com atrito, além da análise da aderência entre a placa e a ferramenta, proporcionando tensões maiores com maiores coeficientes de atrito.

Para a recuperação elástica, fase 2, a análise do atrito é relevante. Como as tensões médias são melhores distribuídas com altos coeficientes de atrito, há mais recuperação elástica para o caso com coeficiente 1,0 do que com os outros casos. Este efeito pode ser explicado pela distribuição das tensões e de deformações mais concentradas, menos região sob restrição de recuperação elástica e maior a abertura.

Os diferentes coeficientes de atrito utilizados influenciam na resposta das deformações da fase 2, após a recuperação elástica. Quanto maiores os coeficientes, maiores as deformações na região central do corpo de prova. Além disso, as deformações estão relacionadas com as tensões na mesma região, visto que com maiores tensões há maiores deformações.

A deformação total aproximada pode ser estimada pela Equação 3, onde  $T$  é a espessura e  $R$  o raio de dobramento. No presente caso, a deformação verdadeira calculada vale 0,25; mas as simulações para as áreas centrais da seção convexa atingem cerca de 80 % da deformação prevista. Um dos motivos é que a condição  $T \ll R$  não é obedecida, sendo a razão  $T/R$  de apenas 0,2.

$$\varepsilon = \frac{T}{2R} \quad \text{se } T \ll R \quad (3)$$

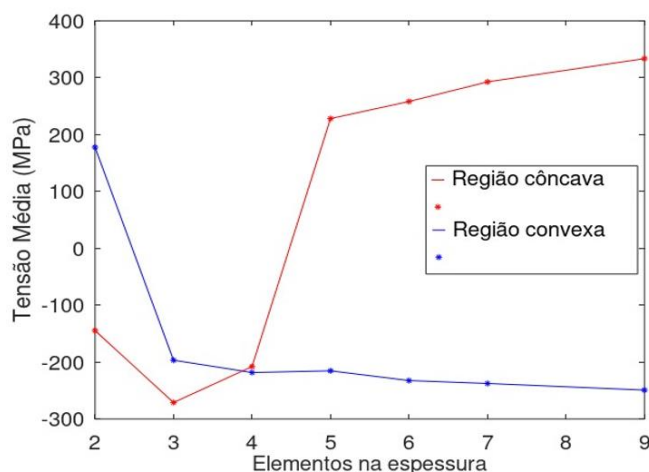
O estreitamento lateral apresenta uma pequena influência do coeficiente de atrito. Os valores obtidos, para o deslocamento na direção da largura do corpo de prova, não apresentam diferença significativa. A pequena diferença está apenas na distribuição do deslocamento, com mais atrito há distribuição mais desigual do deslocamento no centro da região, enquanto com menos atrito, o deslocamento é mais evidente. Outra análise importante está relacionada com o coeficiente de Poisson, visto que ao sofrer deformações ao longo do eixo do dobramento, há uma expansão e encurtamento na direção da largura, localizados respectivamente na região côncava e na convexa.

Após o aparafusamento, uma das questões mais importantes é garantir tensões trativas na superfície convexa. Como é reportado na norma ASTM G30-97 (2016) as tensões trativas encontram-se na região convexa, o que favorece a suscetibilidade ao trincamento induzido pelo meio corrosivo. Além disso, foram estudadas as tensões médias na fase 3, ao atribuir coeficientes de atritos 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0. Os resultados indicam que existe diferença entre os valores das tensões, devido à maior recuperação elástica para os casos com mais atrito. Portanto, quanto maior a recuperação elástica, maiores são os carregamentos aplicados para que a abertura se mantenha nos padrões da norma ASTM G30-97 (2016). Porém, as variações nas tensões médias foram pequenas na tensão final, que é da ordem de 598 MPa na superfície convexa e -687 MPa na superfície côncava, independente do atrito. Este trabalho mostrou que o atrito não altera significativamente a tensão final da amostra, embora a distribuição das tensões e a abertura intermediária foram afetadas pelo atrito.

Pode-se ainda estimar as tensões na região convexa para um coeficiente de atrito intermediário, de 0,5, comparando-se ao final das fases 1 com a 3. Este resultado indica o comportamento esperado caso se produza amostras em uma etapa (que corresponde à fase 1) ou em duas etapas (fase 3), ambas permitidas pela norma. Na fase 1, o corpo de prova produzido terá tensões de 578,9 MPa na região convexa. Para estes corpos de prova, não há recuperação elástica e as tensões, assim como as deformações elásticas e plásticas, se mantêm. Para os corpos de prova que sofreram as duas etapas, as tensões trativas apresentadas na região convexa têm valores de 600,1 MPa, elas representam as tensões residuais da fase 2, além das tensões envolvidas no processo de aparafusamento. Este resultado é bastante relevante, pois indica que características

como o coeficiente de atrito no processo de conformação das peças pode afetar o estado de tensão; com isso, realça-se a importância de estudos computacionais, principalmente, futuros estudos de simulação numérica da norma baseadas em uma ou duas etapas.

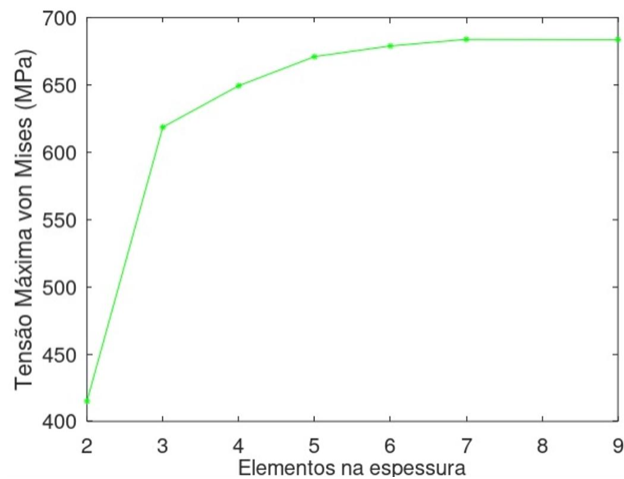
A Figura 17 mostra a influência do número de malhas na convergência das tensões. O refinamento da malha representada pelo número de elementos ao longo da espessura foi estudado para a faixa de 2 a 9 elementos. Ele indica que a tensão  $\sigma_1\sigma_3$  na região côncava começa a se estabilizar a partir de cinco elementos. A região convexa é a de maior interesse pois é onde se espera que haja a nucleação das trincas de corrosão sob tensão. A região convexa se estabiliza para seis elementos, com erro percentual de 2,18 %.



**Figura 17.** Convergência de malha sobre as tensões  $\sigma_1\sigma_3$  na fase 2.

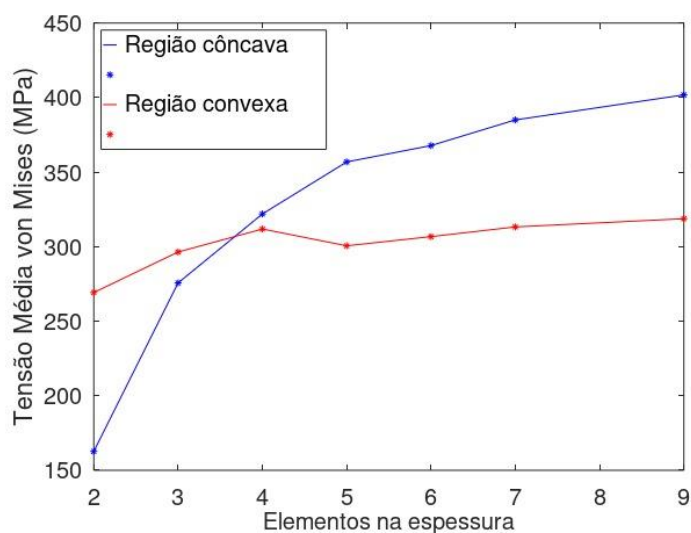
Para as tensões de von Mises foram avaliados os valores máximos e a média na região de interesse em relação ao número de elementos na espessura. Para a tensão máxima de von Mises (Figura 18), percebe-se que a partir dos 6 elementos na espessura, os valores das tensões têm a tendência de convergir, resultando em um erro percentual de 0,72 %.





**Figura 18.** Efeito da convergência de malha sobre as tensões von Mises máximas na fase 2.

Na Figura 19, avalia-se a média da tensão de von Mises na região côncava e convexa, percebe-se que a convergência nesta região é mais suave que o no caso da Figura 18. Porém, utilizando 6 elementos na espessura encontra-se erros para região côncava de 4,47 % e para região convexa de 2,07 %, bastante aceitáveis para este tipo de estudo.



**Figura 19.** Efeito da convergência de elementos de malha sobre as tensões von Mises média na fase 2.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação do dobramento de amostras em formato de U descritas na norma ASTM G30-97 (2016) e usadas em ensaios de corrosão sob tensão foi realizada

empregando-se o código *Ansys*. O aço-carbono API 5L X70 foi usado nesta simulação. Os resultados mostram que considerar o atrito pode ser importante, levando em conta que influencia na tensão média, na deformação e na recuperação elástica da região convexa. Com a análise do comportamento mecânico do API 5L X70 das tensões tratativas pôde-se compreender melhor o estado de tensão e deformação para este tipo de amostra. As simulações mostram que a produção do corpo de prova em uma ou duas etapas afetou o valor da tensão tratativa. O corpo de prova conformado em duas etapas apresenta tensão 3,53 % maior que aquele produzido em uma só etapa. Independente do atrito, na faixa 0,0 -1,0, as tensões médias na região convexa são praticamente constantes para amostras conformadas em três fases.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da FAPERJ e CNPq. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- ASTM G30-97(2016), **Standard practice for making and using U-bend stress-corrosion test specimens**. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.  
<https://doi.org/10.1520/G0030-97R16>
- BERTI, F.; LA BARBERA, L.; PIOVESAN, A.; ALLEGRETTI, D., OTTARDI, C.; VILLA, T., and PENNATI, G. **Residual stresses in titanium spinal rods: effects of two contouring methods and material plastic properties**. *Journal of Biomechanical Engineering*, v. 140, n. 11, 2018.  
<https://doi.org/10.1115/1.4040451>
- CAO, J.; LI, F.; MA, X.; and SUN, Z. **Tensile stress–strain behavior of metallic alloys**. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 27, n. 11, p. 2443-2453, 2017.  
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60271-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60271-1)
- COSTA-MATTOS, H. S.; BASTOS, I. N.; and GOMES, J. A. P. **A simple model for slow strain rate and constant load corrosion tests of austenitic stainless steel in acid aqueous solution containing sodium chloride**. *Corrosion Science*, v. 50, p. 2858-2866, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.07.020>
- KOFIANI, K.; NONN, A, and WIERZBICKI, T. **New calibration method for high and low triaxiality and validation on SENT specimens of API X70**. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 111, p. 187-201, 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.07.004>

LIM, S. C.; ASHBY, M. F.; and BRUNTON, J. H. **The effects of sliding conditions on the dry friction of metals.** Acta Metallurgica, v. 37, n. 3, p. 767-772, 1989.  
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(89\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90003-5)

LINK, R. E.; JOYCE, J. A.; ROE, C. **Crack arrest testing of high strength structural steels for naval applications.** Engineering Fracture Mechanics, v. 76, n. 3, p. 402-418, 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.11.006>

MOHTADI-BONAB, M. A., SZPUNAR, J. A., BASU, R., and ESKANDARI, M. **The mechanism of failure by hydrogen induced cracking in an acidic environment for API 5L X70 pipeline steel.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 40, n. 2, p. 1096-1107, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.057>

SILVA, D. P.; BASTOS, I. N.; CINDRA FONSECA, M. P. **Influence of surface quality on residual stress of API 5L X80 steel submitted to static load and its prediction by artificial neural networks.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 108, p. 3753-3764, 2020.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05621-2>

WITHERS, P. J. **Residual stress and its role in failure.** Reports on Progress in Physics, v. 70, n. 12, p. 2211, 2007.  
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/12/R04>