

AÇÃO DO HIDROGÊNIO NA PERDA DE DUCTILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 409*

Marcelo Tadeu Tomazela Lima ¹

Resumo

Os aços inoxidáveis são largamente utilizados nos mais diversos segmentos da sociedade, tendo como principal característica a resistência à corrosão. Existem muitos estudos sobre o comportamento destes aços, que se apresentam com diferentes composições, estruturas e propriedades, mas algumas características ainda precisam de muito estudo, como exemplo a interação do metal com o hidrogênio. O hidrogênio nos metais é estudado há muitas décadas pela sua alta capacidade de mobilidade intersticial, todavia seus mecanismos de fragilização são pouco compreendidos e propostos em algumas teorias. O presente trabalho busca caracterizar os efeitos do hidrogênio em um aço inoxidável ferrítico tipo AISI 409 quando tensionado em ensaios de achatamento comparativamente entre amostras hidrogenadas e não hidrogenadas. Os testes no material de base evidenciaram que o hidrogênio age na perda de ductilidade deste aço inoxidável, apresentando facetas de clivagem ao ser tensionado. Os resultados obtidos sugerem que a fragilização por hidrogênio representa um risco e um desafio à Indústria, reforçando a necessidade de desenvolvimento de pesquisas e estudos para minimização dos efeitos do hidrogênio nos metais.

Palavras-chave: Hidrogênio nos metais; fragilização por hidrogênio; aços inoxidáveis; aços inoxidáveis ferríticos.

HYDROGEN ACTION ON DUCTILITY LOSS IN STAINLESS STEEL AISI 409

Abstract

Stainless steels are widely used in various segments of society, with corrosion resistance as their main characteristic. There are many studies on the behavior of steels, which present themselves with different compositions, structures and properties, during a manufacturing but some characteristics still require much study, such as the interaction of the metals with the hydrogen. Hydrogen in metals has been studied in many decades by its capacity for interstitial mobility, but still its mechanisms of embrittlement are poorly understood and proposed in some theories. The present work seeks to characterize the effects of hydrogen in a ferritic stainless steel type AISI 409 when stressed in flattening, comparing between hydrogenated samples and no hydrogenated. The tests in basic material evidenced that the hydrogen act in the ductility loss of this stainless steel, presenting cleavage facets to be tensioned. The results suggest that hydrogen embrittlement poses a risk and a challenge to the industry, reinforcing a need to development of researches and studies to minimize the effects of hydrogen on metals.

Keywords: Hydrogen in metals; Hydrogen embrittlement; Stainless steel; Welding ferritic stainless steels.

¹ Engenheiro de Produção, Coordenador de produção na Nalton Mecânica, Pereiras, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Caracterizado por ser um componente fundamental na vida humana, presente no ambiente, o hidrogênio é um poderoso causador de diversos mecanismos de fragilização de muitos materiais, sendo neste trabalho abordado exclusivamente em metais.

Os danos de uma falha causada por hidrogênio em uma estrutura metálica podem ser catastróficos, podendo gerar prejuízos imensuráveis à sociedade. Devido à sua natureza e mobilidade nos metais o hidrogênio, que pode estar presente na estrutura do material desde sua fabricação, pode ter diferentes ações, dependendo da quantidade de hidrogênio e do nível de tensões existente no material. Assim alguns cuidados na fabricação, e especialmente na soldagem, são necessários a fim de prevenir os riscos de fragilização.

Como é um assunto de grande discussão, mas pouco entendimento sobre os mecanismos de fragilização será abordado o efeito do hidrogênio na microestrutura de um tubo de aço inoxidável ferrítico AISI 409 com costura, em ensaio de achatamento do metal de base com costura e da imposição de um ciclo térmico de soldagem, autógeno ou com consumível austenítico, ambos realizados com amostras hidrogenadas e não hidrogenadas.

Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos provocados pelo carregamento com hidrogênio em um aço inoxidável ferrítico, avaliando seu comportamento à fratura.

2 INTERAÇÃO DO HIDROGÊNIO COM OS METAIS

O hidrogênio é o elemento mais abundante no Universo, encontrado nas estrelas como plasma ionizado a altas temperaturas e na Terra geralmente em moléculas como água e hidrocarbonetos. O gás hidrogênio foi descoberto por Henry Cavendish, no século XVIII e nomeado por Antoine Lavoisier como “*hydor*”, do grego que significa “formador de água”. Em temperatura e pressão normal, o hidrogênio caracteriza-se por ser incolor, inodoro e altamente inflamável. (TENG, 2010)

Muitas técnicas siderúrgicas foram desenvolvidas ao longo dos anos para reduzir o teor de hidrogênio durante a produção dos metais, pois alguns fenômenos de fragilização são associados ao hidrogênio. As inúmeras fontes de hidrogênio contribuem para agravar e acelerar os processos de fragilização (LIPPOLD, 2015).

Descrita como Fragilização por Hidrogênio (Hydrogen Embrittlement) ou Trincas Induzidas pelo Hidrogênio (Hydrogen-Induce Cracking) é o fenômeno associado com a perda de ductilidade na presença de hidrogênio. Muito ocorrida em aços, os fenômenos de fragilização por hidrogênio podem acontecer em outros materiais, com diferentes estruturas cristalinas, microdurezas e características de difusão.

Embora não haja um mecanismo único, são requeridas as presenças de três fatores simultâneos para ocorrência de uma trinca, que são: microestrutura susceptível, tensão e presença de hidrogênio.

3 FRATURA NOS METAIS

Dá-se o nome de fratura a separação de uma estrutura em duas ou mais partes devido ao rompimento de ligações atômicas de mesmo plano cristalográfico à aplicação de uma carga estática à temperatura relativamente baixa em relação ao ponto de fusão do material.

As causas para falhas geralmente estão associadas a problemas como negligência durante projeto, fabricação ou operação da estrutura e aplicação de um novo projeto ou material que vem a produzir um resultado inesperado.

Os materiais podem fraturar de forma dúctil ou frágil, dependendo de sua capacidade de tolerar deformação plástica. (SANFORD, 2003)

3.1 Fratura Dúctil

A fratura dúctil tem como característica uma alta capacidade de absorção de energia e grande deformação plástica através da grande mobilidade de discordâncias e consequente flexibilidade de deslizamento da rede cristalina. Sanford, (2003) destaca que neste tipo de fratura a região central interior da superfície apresenta uma aparência fibrosa, indicando a deformação plástica, além de apresentar aspecto fosco e formação de microvazios na região da fratura.

Na região da fratura dúctil, o início e propagação da trinca apresenta um aspecto fibroso e uma zona de cisalhamento é formada em consequência da do alívio de triaxialidade de tensões. (SANFORD, 2003)

3.2 Fratura Frágil

É a fratura que ocorre sem deformação plástica, gerando um processo de rápida propagação instável das trincas sob tensões inferiores ao seu escoamento.

Denominada clivagem, é caracterizada por uma ruptura de ligações atômicas onde há a separação direta ao longo dos planos cristalográficos. Suas análises metalográficas descrevem um alto grau de perfeição geométrica, alta refletividade, “marcas de rios”, resultantes do crescimento simultâneo de trincas em dois ou mais planos cristalográficos paralelos, formando-se degraus e fratura transgranular, onde a trinca propaga-se pelo interior de cada grão.

A clivagem apresenta planos preferenciais onde existem ligações mais fracas e conforme o caminho transgranular da fratura, a propagação da trinca muda de direção a cada vez que ela cruzar com o contorno de grão (ANDERSON, 1995).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho, uma amostra de tubo de aço inoxidável ferrítico AISI 409 com 217 mm de comprimento, diâmetro externo de 57,20mm e espessura de 1,65mm, que foi seccionado em amostras AT (não hidrogenadas) e AHT (hidrogenadas).

O tubo com costura foi soldado por fusão autógena e automática no sentido longitudinal, enquadrando-se na norma ASTM A-268 para aplicação em trabalhos com altas e baixas temperaturas.

O tubo de aço inoxidável AISI 409, por ser da segunda geração dos ferríticos, apresenta em sua composição química a adição de titânio como elemento estabilizador da ferrita, reduzindo o campo de existência da austenita, mantendo sua microestrutura 100% ferrita. A figura 1 mostra a seção transversal da costura, mostrando grãos colunares na zona fundida.



Figura 1: Análise metalográfica da seção Transversal do tubo, mostrando o aspecto da costura e a microestrutura ferrítica com grãos alongados na região soldada. Ataque Kalling. Fonte: o autor, 2016.

A composição química do tubo foi caracterizada através de análise química por espectroscopia de emissão ótica através do espectrômetro SPECTROMAXX, do laboratório da TECMETAL.

A tabela 1 apresenta a composição química do tubo comparando com a composição química do AISI 409 padronizada na norma ASTM A-240.

Tabela 1 - Composição Química (% em peso)

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Ti
Tubo	0,04	0,22	0,018	0,005	0,61	11,55	0,22	0,02	0,54
<i>AISI 409</i>	0,08 máx	1,00 máx	0,045 máx	0,045 máx	1,00 máx	10,5 a 11,75	0,50 máx	-	6x%C a 0,75

4.1 Hidrogenação

A hidrogenação eletrolítica das amostras foi realizada pela diferença de potencial gerada através de uma fonte, utilizando um fio de platina como anodo da célula eletrolítica em solução de 0,1M de NaOH em 1 litro de solução e uma corrente catódica de 20mA/cm² por 72 horas à temperatura ambiente.

A tabela 2 apresenta as condições de de carregamento realizadas na amostra AHT.

Tabela 2: Condições de carregamento eletrolítico de hidrogênio nas amostras.

Amostra	Condição	Eletrólito	J (mA/cm ²)	Tempo carregamento (h)	Tempo espera (min)
AHT	Hidrogenada	0,1M NaOH	20	72	4

4.2 Achatamento

O ensaio de achatamento propôs ao trabalho a identificação do hidrogênio na microestrutura do tubo de aço inoxidável AISI 409 e sua ação na propriedade mecânica do material.

Realizado dentro dos padrões da norma ASTM A370, utilizando a máquina de compressão EMIC DL 20000 do Laboratório de Ensaios Mecânicos da TECMETAL/RJ.

As amostras foram posicionadas para a costura ficar na extremidade do tubo, onde ocorreram tensões trativas e de compressão do material, caracterizando sua ductibilidade.

Após o achatamento, para análise metalográfica, as amostras foram cortadas e tratadas. A figura 2 destaca a posição dos cortes para os ensaios.



Figura 2: Amostras após achatamento e corte para caracterização microestrutural. Fonte: o autor, 2016.

5 RESULTADOS

5.1 Amostra AT – Achatamento não hidrogenado

A figura 3 apresenta as análises realizadas na amostra AT (não hidrogenada), onde é possível ver a deformação plástica, forças de tração e compressão do grão ferrítico e fraturas dúcteis em sobrecarga de aproximadamente 190kgf.

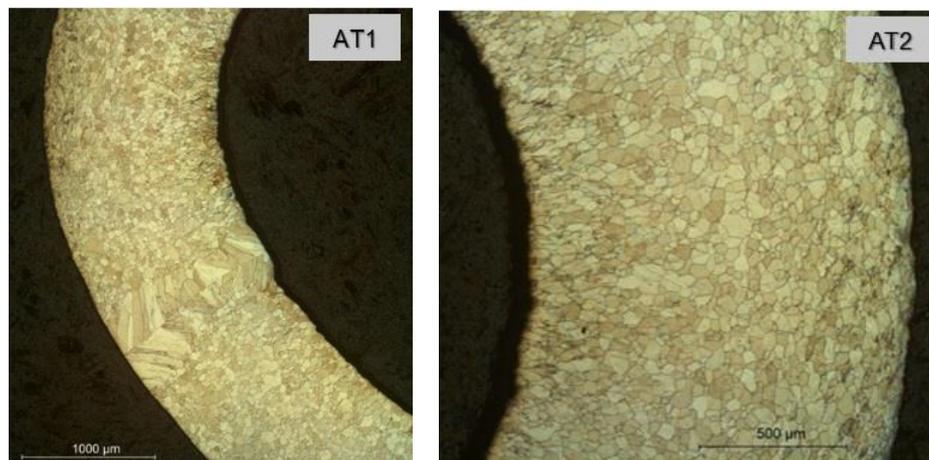


Figura 3: Micrografia da região fraturada da amostra AT1 e AT2. Ataque Kalling. Fonte: o autor, 2016.

No microscópio eletrônico de varredura, apresentado da figura 4, é possível observar as fraturas dúcteis com a formação de microcavidades e aspecto fosco, conforme mencionado por SANFORD, 1965.

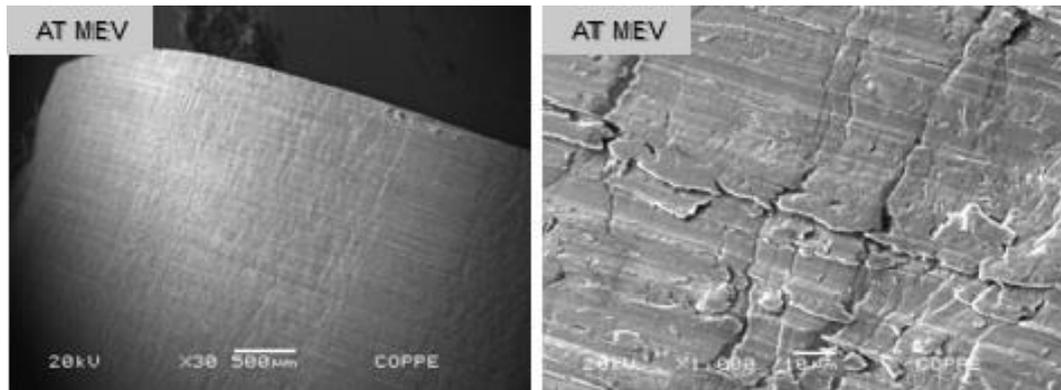


Figura 4: Sequência do MEV identificando microcavidades e aspecto fosco da região deformada. Fonte: o autor, 2016.

5.2 Amostra AHT – Achatamento Hidrogenado

As figuras 5, identificam a fragilização pelo hidrogênio causando à amostra AHT (hidrogenada) mediante sobrecarga de aproximadamente 190kgf, trincas caracterizadas por quasi-clivagem ou clivagem, rompendo as ligações atômicas de modo transgranular, correspondente ao mecanismo de fratura frágil.



Figura 5: Micrografia da região fraturada da amostra AHT1 e AHT2. Ataque Kalling. Fonte: o autor, 2016.

Observa-se na figura 6 através do microscópio eletrônico de varredura, o sequenciamento para detalhamento, notando-se as características de “marcas de rios”, que ANDERSON (1995) descreve como os degraus entre clivagem em planos paralelos convergindo na direção da propagação da trinca.

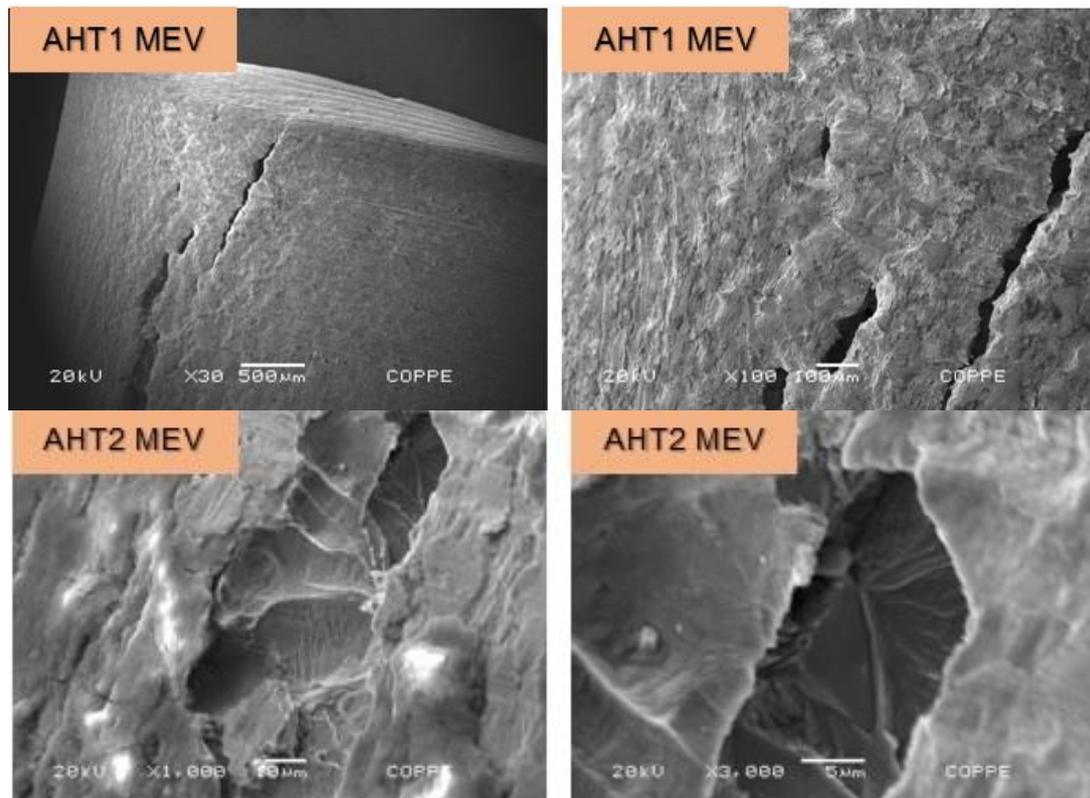


Figura 6: Sequência do MEV identificando e detalhando fraturas frágeis na superfície da amostra AHT. Fonte: o autor, 2016.

6 DISCUSSÃO

Nos ensaios de achatamento do tubo com amostras com e sem carregamento de hidrogênio, verificou-se que enquanto o material não hidrogenado tem um comportamento dúctil e evidencia trincas dúcteis na região de máxima deformação; o material hidrogenado apresentou trinca nas regiões de máxima tensão com um comportamento frágil revelando facetas de clivagem e quasi-clivagem.

É importante observar que o trincamento não ocorreu associado à região da costura (figura 5) e sim à região de máxima deformação, mostrando que mesmo sendo a solda uma região com tensões residuais (pois a costura não recebe tratamento térmico) o hidrogênio buscou a região mais tensionada e lá promoveu a fragilização.

7 CONCLUSÕES

Os ensaios realizados apontam o hidrogênio como principal agente nos processos de fragilização e perda de ductilidade do aço inoxidável ferrítico AISI 409. Foi possível concluir que o aço utilizado neste trabalho sofre fragilização da estrutura do metal de base, após carregamento catódico de hidrogênio e tensionamento no achatamento, com rupturas fraturas frágeis por quasi-clivagem ou clivagem nas regiões de máxima deformação.

Agradecimento

Agradeço a Eng^a Annelise Zeemann, pela oportunidade e interesse em contribuir tecnicamente para a realização deste trabalho.

À empresa TECMETAL Consultoria em Materiais Ltda, através do programa de responsabilidade social “Apoio à Geração de Conhecimento”, nas pessoas de Annelise Zeemann, Paulo Emygdio, Guilherme Zeemann e Carlos Henrique proporcionaram uma imensurável contribuição técnica, além de ceder horas de trabalho e fornecer as condições para conclusão da parte experimental.

Ao Engº Bianco Gallazzi, da empresa LABTESTE - Análises e Ensaios de Materiais Metálicos Ltda, pela amizade, disposição e fornecimento da amostra de tubo de aço inoxidável.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, T.L.; **Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications**. CRC Press, Boca Raton, 1995.

ASM HANDBOOK, Vol 19. **Fatigue and Fracture**. ASM International, 1996.

ASTM A370 (**Método de Teste Padrão e Definições de teste mecânico para produtos de Aço**), 2016.

ASTM E340-13 (**Método de Teste Padrão Para Macrografia de Metais e Ligas**), 2013.

ASTM E381-01 (R2012) (**Método de Teste Padrão para Macrografia de barras de aço, tarugos, peças forjadas**), 2012.

LAMPMAN, S. **Fracture Appearance and Mechanisms of Deformation and Fracture**. In: Failure Analysis and Prevention ASM Handbook. 1.ed. EUA: ASM International, v.11, p. 1349-1366, 2002.

LIPPOLD, J. C. **Welding Metallurgy and Weldability**. First Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2015.

LIPPOLD, J.C. **Welding Metallurgy and weldability of stainless steels** / John C. Lippold, Damian J. Kotechi. P. cm. “A Willey-Interscience publication”. 2005.

MIRANDA, P.E.V. **Concentração Crítica de Hidrogênio para a Fragilização pelo Hidrogênio em Aços**, Revista Matéria, v. 5, n. 1, 2001.

SANFORD, R. J. ed., “**Selected Papers on Foundations of Linear Elastic Fracture Mechanics ... Mechanics**,” Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 422 pages, 2003.

TENG, A. **Hydrogen Energy**. Solid State II. Department of Physics – University of Tennessee. 2010.