

ANÁLISE DA CORROSÃO INTERGRANULAR DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 409 E AISI 439 PARA USO EM SISTEMA DE EXAUSTÃO VEICULAR

Rafael Alves de Amorim ¹; Susana Marraccini Giampietri Lebrão ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a suscetibilidade quanto à corrosão intergranular de juntas soldadas dos aços AISI 409 e AISI 439 utilizados na fabricação de sistemas de exaustão veicular levando em consideração o método empregado na solda (manual ou automático). Para obtenção dos resultados foram realizados ensaios DL-EPR (Reativação Potenciodinâmica de Duplo Loop) com 0,5M de H₂SO₄ a temperatura de 25°C, também foram realizados ensaios de perda de massa segundo as normas ASTM A763 (prática X) para corrosão intergranular e ASTM G 48 (Método A) para corrosão por pite. A partir destes ensaios foi possível concluir que a corrosão depende dos elementos de liga presentes nos aços e também do aporte de calor gerado no metal base causado pela velocidade do arame de solda.*

Introdução

O aço inoxidável foi descoberto por Harry Brearley (1871-1948), em Sheffield (Inglaterra). Em 1912, a pedido dos fabricantes de armas, foi solicitado a Harry uma liga metálica que apresentasse maior resistência ao desgaste que ocorria no interior dos canos das armas de fogo. Mas, ao realizar o ataque químico para estudar a microestrutura dos novos aços, Brearley notou que o ácido nítrico não surtia efeito. Brearley, assim, não obteve uma liga metálica que resistia ao desgaste, mas sim, uma liga resistente à corrosão. (COBB, 2010)

Os aços inoxidáveis são aços de alta liga, geralmente contendo cromo, níquel, molibdênio em sua composição química. Estes elementos de liga, em particular o cromo, conferem uma excelente resistência à corrosão quando comparados com os aços carbono. Isto é, o cromo presente na liga oxida-se em contato com o oxigênio do ar, formando uma película, muito fina e estável, de óxido de cromo. Ela é chamada de camada passiva e tem a função de proteger a superfície do aço contra processos corrosivos. Para que a película de óxido seja efetiva, o teor mínimo de cromo no aço deve estar ao redor de 11%. Assim, deve-se tomar cuidado para não reduzir localmente o teor de cromo dos aços inoxidáveis durante o processamento. (FERREIRA, 2006)

Além de ser resistente à corrosão, o aço inox é 100% reciclável e possui baixo custo de manutenção, portanto utilizado em diversos itens domésticos (como talheres, panelas e itens da linha branca – geladeiras e fogões, por exemplo).

Os aços inoxidáveis são divididos em austeníticos (série 300), ferríticos e martensíticos (série 400). Os aços inoxidáveis austeníticos são não magnéticos, apresentam excelente ductilidade, resistência à corrosão, suportam uma ampla faixa de temperatura, porém são relativamente caros, possuem uma baixa resistência mecânica, elevado coeficiente de fusão, possuem estrutura cúbica de face centrada, basicamente composta de Fe, Cr e Ni, não endurecendo por tratamento térmico (MEI, 1988).

Os aços inoxidáveis ferríticos são magnéticos, apresentam boa ductilidade, resistência à corrosão, e apresentam baixo custo. Porém, suas propriedades mecânicas não suportam elevadas temperaturas, não podem ser utilizados para ações que necessitam de materiais com elevada resistência mecânica, e, geralmente, sua resistência a corrosão é menor do que a do austenítico. Possuem estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) formados pela liga de Fe e Cr.

A corrosão intergranular é um tipo de corrosão localizada que pode causar, algumas vezes, falhas catastróficas e inesperadas, enquanto o restante da estrutura permanece inalterada. O mecanismo de corrosão mais aceito é a teoria de empobrecimento no teor de cromo, ocasionado pela formação de precipitados ricos em cromo nos contornos de grão, os quais reduzem localmente o teor de cromo nas regiões adjacentes a estes precipitados, fenômeno denominado sensitização. Esta redução, geralmente a teores menores que 10,5% de cromo, impede a formação da película passiva e, por conseguinte, o estabelecimento da propriedade de resistência à corrosão dos aço inoxidáveis (SERNA-GIRALDO, 2006).

Modenesi (2001) comenta que em geral os aços inoxidáveis ferríticos apresentam uma baixa soldabilidade, particularmente se comparados com os austeníticos, pois a sua solda é caracterizada por ductilidade e tenacidade baixas além de sensibilidade à corrosão intergranular.

Trincas de solidificação também podem ocorrer na zona fundida. De maneira geral, a fragilização da solda é mais intensa em aços com maiores teores de cromo e elementos intersticiais e a suscetibilidade à corrosão intergranular é maior com maiores teores de elementos intersticiais e menores teores de cromo. (FERREIRA, 2006)

Aços inoxidáveis ferríticos com cerca de 12-13%Cr (AISI 409) podem, em geral, ser soldados de forma a se obter propriedades adequadas. Já aqueles com teor de cromo mais elevado (AISI 430, 442, 446, etc.) são mais sensíveis a problemas de fragilização durante a soldagem. Este efeito é mais pronunciado em aços com maiores teores de elementos intersticiais (MODENESI, 2001).

Materiais e Métodos

A composição química dos aços AISI 409, AISI 439 e do arame tubular 430 Ti, e bem como os parâmetros de soldagem utilizados, encontram-se nas tabelas 1 e 2:

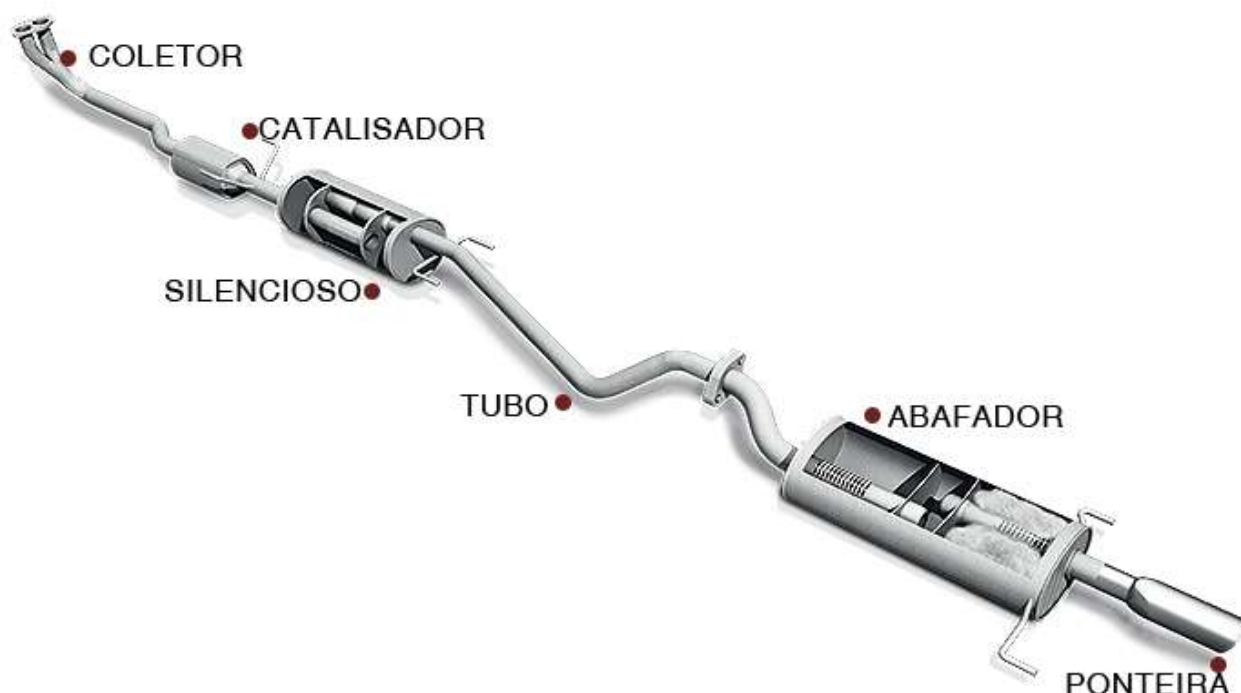
Tabela 1. Composição química dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 409 e AISI 439 e do arame tubular 430 Ti (A.T.430Ti)

Composição Química (%)									
	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Ti	%Mo
AISI 409	0,0080	0,4800	0,2700	0,0260	0,0004	10,81	0,2800	0,2300	0,0250
AISI 439	0,0080	0,4700	0,2400	0,0300	0,0004	17,23	0,2700	0,1320	0,0280
A.T.430Ti	0,0210	0,7400	0,7500	0,0210	0,0010	17,74	0,2500	0,3800	0,0300

Tabela 2. Parâmetros de soldagem dos aços AISI 409 e AISI 439

Parâmetros de soldagem dos aços AISI 409 e AISI 439					
Soldagem	Velocidade do arame (m.min ⁻¹)	Tamanho do arco voltaico	Vazão de gás (L/min)	Ø arame (mm)	Tipo de solda
manual	12	-15	10 a 15	1,0/ 430 Ti	Pulsado
automática	3,0 a 7,0	-22 a -5,0	10 a 15	1,0/ 430 Ti	Pulsado

Figura 1. Sistema de exaustão veicular



Fonte: <http://www.blog.connectparts.com.br/escapamento-esportivo-como-funciona/>

As amostras foram confeccionadas a partir das juntas soldadas fornecidas pela General Motors do Brasil.

Primeiramente, as amostras foram embutidas em baquelites e preparadas adequadamente para o ensaio DL-EPR. Para tal ensaio, foi necessário lixar as amostras com lixa d'água 600, fazer um furo roscado em cada amostra e colocar uma haste de metal para que houvesse contato elétrico entre a haste e o corpo de prova. Depois de colocada a haste de metal foi necessário vedar a rosca com fita TEFLON para que não entrasse solução no furo e isso acabasse interferindo nos resultados. Foi preparada uma solução de 0,5M de H_2SO_4 (Ácido Sulfúrico) separados em dois béqueres. No primeiro béquer foi colocada a amostra e junto dela um capilar de Luggin e no segundo béquer foi colocado um fio de platina e um eletrodo de prata. A amostra permaneceu na solução por 5 minutos antes de ser aplicada a corrente para estabilização do potencial de corrosão. O potenciostato usado foi o AUTOLAB PGSTAT302N.

Depois de realizado o ensaio DL-EPR foi necessário obter novas amostras, pois as antigas não tinham uma área mínima exigida pela norma. As novas amostras foram submetidas a prática X da norma ASTM A763. Segundo a norma o ensaio deve ser feito com a solução em ebulição, porém quando as amostras foram mergulhadas na solução sofreram intensa corrosão em 2 minutos. Neste caso a prática foi modificada e o ensaio feito com solução em temperatura ambiente. Para o ensaio foi determinada a área superficial de cada amostra e as mesmas foram pesadas antes de serem mergulhadas na solução de sulfato férrico. Após 24h foram retiradas da solução e pesadas novamente para determinar a massa ao final do processo.

As amostras também foram submetidas ao método A da norma ASTM G48. Para esse ensaio foi preparado 1000 mL de solução de cloreto férrico, as novas amostras tiveram novamente sua área e massa inicial medidas e foram mergulhadas na solução, após 72 horas foram retiradas da solução e pesadas para verificar sua massa final.

Para efeito do cálculo da perda de massa (taxa de corrosão) das amostras foram utilizados como parâmetros uma densidade de 7,8 g/cm³, a constante k de 87600 para taxa em mm/ano (constante obtida na norma ASTM G1). Segundo a norma G1 foi utilizada a seguinte equação para o cálculo a taxa de corrosão:

$$Taxa\ de\ corros\tilde{a}o = \frac{(K * W)}{(A * T * D)}$$

Onde k é uma constante de acordo com a unidade desejada, W é a perda de massa em gramas, A é sua área em cm², T é o tempo em horas que a amostra ficou exposta e D é sua densidade em g/cm³.

Resultados e Discussão

Segundo o ensaio potenciodinâmico de duplo loop (DL-EPR), não foi possível obter uma curva clássica dos aços inoxidáveis, conforme pode-se observar na figura 1. O ensaio foi feito seguindo os mesmos parâmetros do artigo (SERNA-GIRALDO et. all, 2007) e os resultados encontram-se na figura 2. No entanto, Serna-Giraldo (20077) realizaram os ensaios apenas na região da ZTA e, nesse trabalho, as amostras foram as juntas soldadas completas. Acredita-se que não foi possível obter uma curva clássica devido à junta soldada, pois com ela no sistema pode ter sido formado um par bi-metálico entre o aço inoxidável e a zona fundida impossibilitando o resultado esperado.

Figura 2. Curva clássica DL-EPR de um aço inox. (SERNA-GIRALDO, 2007)

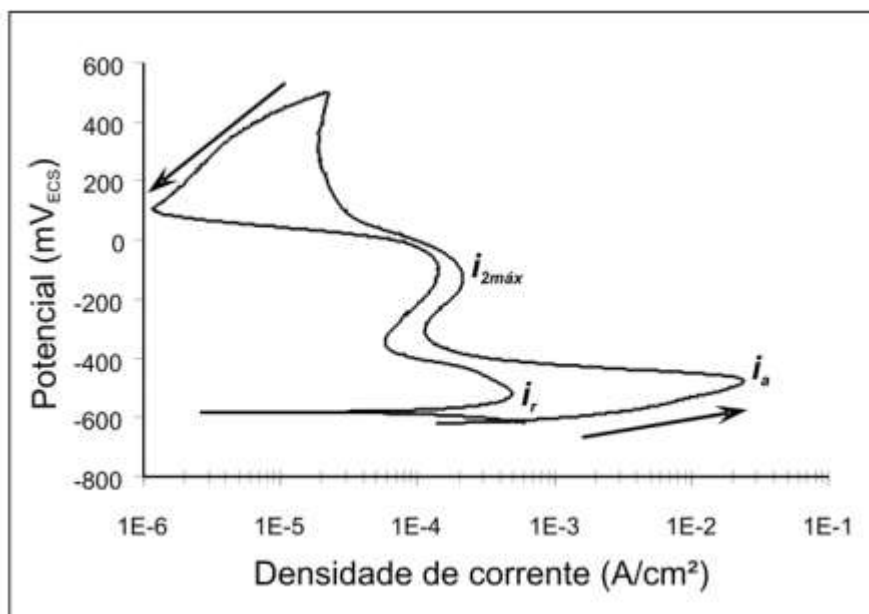
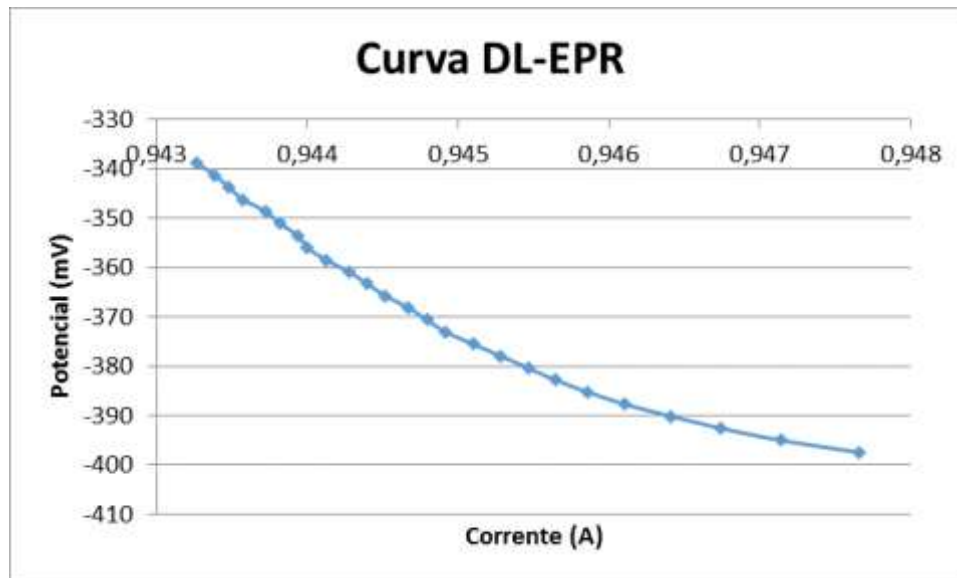


Figura 3. Curva obtida em ensaio DL-EPR



A tabela 3 apresenta a taxa de corrosão intergranular para os dois aços. Os dois aços foram mergulhados em solução de sulfato férrico, porém o aço 409 ficou 20h mergulhado em solução, já o aço 439 permaneceu em solução por 24h. Essa variação do tempo de ensaio ocorreu devido à intensa corrosão da amostra do aço 409.

Nota-se que o aço inox 409 possuiu uma taxa de corrosão muito maior quando comparado com o aço inox 439. Isso acontece devido aos elementos de liga presentes em quantidades maiores no aço inox 439, pode-se notar a partir da tabela 1 que a porcentagem de cromo (Cr) é muito maior no aço 439. O cromo é um elemento alfacênico que aumenta a estabilidade da fase ferrita.

Em relação aos processos de soldagem, para o mesmo aço, a soldagem feita manualmente obteve uma taxa maior de corrosão. Era de se esperar, no entanto, que a taxa de corrosão seria maior para o método automático, uma vez que a velocidade do método manual é quase o dobro do que o método automático, implicando num aporte menor de calor no metal base e, portanto, uma precipitação menos intensa.

Tabela 3. Cálculo da taxa de corrosão segundo norma ASTM A763 prática X

Taxa de Corrosão (mm/Ano)					
	Área (cm ²)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Massa Perdida (g)	Taxa de Corrosão (mm/Ano)
AISI 439 1,5 Soldador	6,280	5,990	4,960	1,030	25,63
AISI 439 1,5 FIP	4,060	4,460	3,890	0,5700	22,08
AISI 409 1,2 Soldador	5,070	3,140	2,010	1,130	34,78
AISI 409 1,2 FIP	7,660	5,270	3,980	1,290	26,22

A tabela 4 apresenta a taxa de corrosão por pite para os aços estudados nas mesmas condições de ensaio imersos em solução de cloreto férrico por 72h. É possível notar que o aço inoxidável 409 possuiu uma taxa de corrosão maior quando comparado com o aço inox 439. Novamente este fato se dá pela maior presença de elementos de liga como o cromo (Cr) e o molibdênio (Mo) que garante uma maior resistência a corrosão localizada por pite.

Pode-se comparar também o PRE (Pitting Resistance Equivalent) que nos mostra qual dos aços possui maior resistência a corrosão por pite. Com as composições dos aços é possível calcular o PRE que para o aço 409 apresentou um valor menor do que o aço 439 mostrando que o aço 409 possui maior facilidade a corrosão por pite.

Dentre os processos de soldagem, a solda feita manualmente alcançou uma taxa superior a da soldagem automática. Novamente, era de se esperar que a velocidade do arame, que no caso da soldagem manual é maior do que a automática, deveria gera um aporte menor de calor, menor precipitação e, portanto, menor taxa de corrosão. Segundo Agarelli (2017) quanto maior o tempo empregado na soldagem, maior o tempo de exposição à alta temperatura da zona termicamente afetada (ZTA), propiciando contornos de grão com maiores dimensões e assim, uma diminuição da resistência mecânica do material.

Tabela 4. Cálculo da taxa de corrosão segundo norma ASTM G48 método A

Taxa de Corrosão (mm/Ano)					
	Área (cm ²)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Massa Perdida (g)	Taxa de Corrosão (mm/Ano)
AISI 439 1,5 Soldador	6,930	6,332	6,329	0,002000	0,1490
AISI 439 1,5 FIP	11,80	5,683	5,682	0,001000	0,03600
AISI 409 1,2 Soldador	8,030	5,885	2,510	3,375	236,0
AISI 409 1,2 FIP	9,200	4,602	1,618	2,984	182,1

Conclusões

A partir dos ensaios realizados para os dois aços com os dois tipos de soldagem foi possível constatar que a quantidade de elementos de liga é um dos fatores determinantes para o aumento da corrosão dos aços.

No ensaio realizado para a corrosão intergranular também foi possível perceber que alguns elementos de liga específicos ajudam a conter esse tipo de corrosão, como o titânio (Ti). Este elemento ajuda a prevenir a corrosão intergranular, pode-se perceber a partir da tabela 1 que o aço 409 possui uma porcentagem um pouco maior deste elemento e na tabela 3 é possível perceber que a taxa de corrosão não foi tão discrepante comparado com o aço 439 que apresenta uma porcentagem muito maior de cromo (Cr).

Para o ensaio da norma ASTM G48 foi possível novamente perceber a atuação dos elementos de liga influenciando na corrosão por pite do metal base, onde a taxa de corrosão por pite do aço 409 foi muito grande comparado a taxa do aço 439. O aço 439 possui uma quantidade maior de molibdênio (Mo), elemento que ajuda a prevenção de corrosão por pite, além de possui maior quantidade de cromo e de níquel que garantem uma camada passiva mais estável e uma melhor proteção do metal a corrosão.

Em relação aos processos de soldagem, pode-se perceber que a soldagem manual obteve uma taxa maior de corrosão. Era de se esperar, no entanto, que a taxa de corrosão seria maior para o método automático, uma vez que a velocidade do método manual é quase o dobro do que o método automático, implicando num aporte menor de calor no metal base e, portanto, uma precipitação menos intensa. Segundo Lebrão (1998) os ensaios de perda de massa são menos precisos que os ensaios eletroquímicos, o que pode ter causado a discrepância.

Referências Bibliográficas

AGARELLI, G. ; LIMA, W. M. ; LEBRÃO, S. M. G. ; LARA, J. A. C. ; COLOSIO, M. A. . Análise da sensitização de juntas soldadas em aços inoxidáveis AISI 409 e AISI 439 para uso em sistema de exaustão veicular. In: 72o Congresso Internacional da ABM, 2017, São Paulo, 2017.

ASTM A763 – Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. 2015.

ASTM G1 – Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. 2011.

ASTM G48 – Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. 2015.

Cobb, Harold M. The History of Stainless Steel – ASM Handbook, ASM International, 2010.

Ferreira, Demostenes F., Soldabilidade do Aço Inoxidável Ferrítico. UFU (Universidade Federal de Uberlândia), Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2006.

Lebrão, S.M.G. Investigação sobre a resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável austenítico UNS S31254. Tese de doutorado, EPUSP, São Paulo, 1998.

Lima, Luciana I. L.. Metodologia para avaliação da corrosão da zona termicamente afetada de aço inoxidável ferrítico AISI 439 soldado. UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), Programa de pós- graduação em engenharia mecânica, 2007.

Mei, P. R.; Silva, A. L. C. Aços e ligas especiais. 2 ed. Sumaré, SP: Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988.

Modenesi, P. J., Apostila Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis, Volume 1, SENAI, 2001

Serna-Giraldo, C. A. Resistencia à Corrosão Intergranular UNS S43000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensitização. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006

SERNA-GIRALDO, Carlos Augusto et al. Investigação do efeito do teor de intersticiais sobre o grau de sensitização em aços inoxidáveis ferríticos a 600°C. Rev. Esc. Minas. 2007, vol.60, n.1, pp.49-54.