

# AVALIAÇÃO DA SENSITIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 409 E AISI 439 POR REATIVAÇÃO ELETROQUÍMICA POTENCIODINÂMICA (DL-EPR)

Giovanna Scala <sup>1</sup>; Susana Marraccini Giampietri Lebrão <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

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

**Resumo.** *Visto que 80% das falhas no sistema de exaustão veicular ocorrem devida a corrosão, avaliou-se a suscetibilidade quanto à corrosão intergranular na zona termicamente afetada das juntas soldadas dos aços AISI 409 e AISI 439 aplicadas na fabricação de sistemas de exaustão veicular. As juntas foram confeccionadas utilizando o mesmo processo de fabricação do coletor de escape. A sensitização da ZTA foi avaliada a partir dos ensaios de Reativação Potenciodinâmica de Duplo Loop (DL-EPR) com solução 0,5M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a velocidade de 1,67 mV/s em um Potenciostato Autolab. Observou-se maior grau de sensitização no aço AISI 409 quando comparado ao AISI 439. Além de notar que houve redução na sensitização de ambos materiais após o aumento do tempo e temperatura de tratamento térmico.*

## Introdução

O mercado está em constante mudança em busca de melhores resultados e processos mais eficientes. O ramo automotivo não é diferente, nos últimos 30 anos, este ramo estuda maneiras de tornar seus ciclos mais eficazes e com menos falhas. Visto que entre os danos mais ocorrentes no sistema de exaustão de veículos automotores 80% são atribuídos à corrosão e 20% restantes à fadiga (LIEWELLYN, 1994), o entendimento sobre a corrosão torna-se muito importante. A corrosão é um fenômeno químico que se baseia na dissolução de uma espécie química no meio corrosivo.

Frente a essas mudanças, a utilização de aços inoxidáveis tem sido mais comumente devido a sua capacidade de gerar uma película superficial que é responsável pela proteção do material quanto à corrosão, chamada de camada passiva. Os aços inoxidáveis ferríticos são recomendados no coletor de escape, uma vez que apresentam coeficiente de expansão térmica inferior aos aços inoxidáveis austeníticos e deformam-se menos em altas temperaturas, fato que permite serem mais propícios a aplicações onde há ciclagem térmica, por ocasionar menos desprendimento de óxido, sendo este o caso do sistema de exaustão e principalmente do coletor de escape (DI CUNTO, 2005). Além disso, seu custo é mais baixo comparado aos demais aços inoxidáveis; reunindo todas essas características, o aço inoxidável ferrítico se mostra um material que possibilitaria trazer melhores e mais eficientes resultados nessa aplicação.

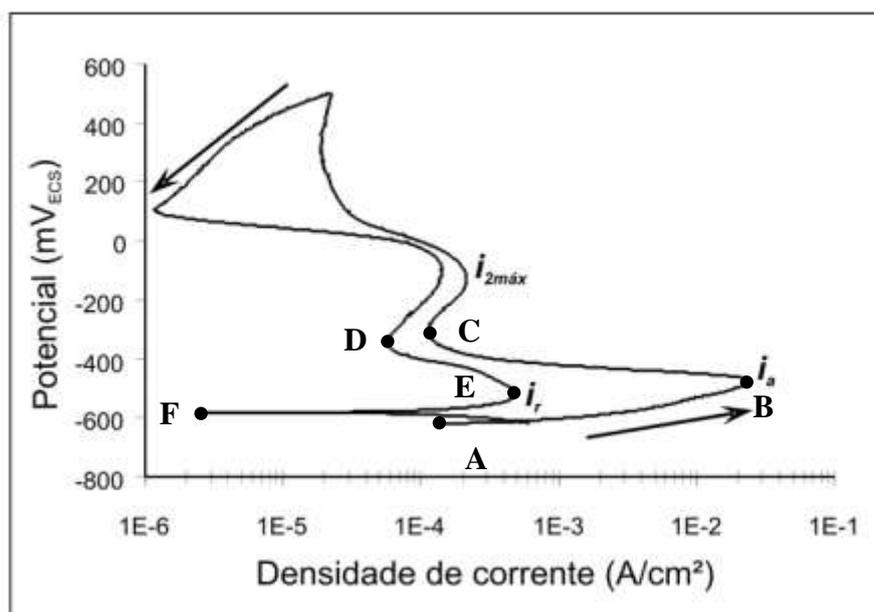
Os aços inoxidáveis, quando soldados, são suscetíveis à corrosão intergranular, devido a elevada temperatura do processo. Tal fenômeno se baseia na formação de precipitados ricos em cromo nos contornos de grão, o que resulta em um empobrecimento do teor de cromo nas regiões adjacentes a esses precipitados. A redução a menos de 10,5% em peso do teor de cromo é prejudicial para a formação de filme passivo e a resistência à sensitização dos materiais (SERNA-GIRALDO, 2006). Embora a precipitação de carbonetos de cromo seja a causa mais destacada dessa diminuição das concentrações de cromo na matriz, outros precipitados como a fase sigma (Fe-Cr) e a fase chi (Fe-Cr-Mo)

também contribuem na sensitização dos aços inoxidáveis (KIM, 2011; SEDRIKS,1996; HUANG,2015; GHORBANIA, 2019).

A fim de avaliar a suscetibilidade à corrosão intergranular podem ser feitos testes de imersão e testes eletroquímicos. Os testes imersivos são normatizados pelas ASTM A763 para ferríticos; já o eletroquímico, também normatizado pela norma ASTM G108 para austeníticos, tem sido desenvolvida durante os últimos anos para quantificar o grau de sensitização do aço inoxidável (IACOVIELLO, 2017; CAETANO, 2019). As vantagens do método chamado de reativação eletroquímica potenciodinâmica, em relação com os de imersão, são basicamente menor tempo de execução, maior precisão e menor custo (SEDRICKS, 1996). Para realizar esse teste, é necessária a separação das zonas soldadas (metal base, zona termicamente aquecida e metal de solda) porque suas diferentes composições e microestruturas podem causar um potencial eletroquímico entre as zonas e serem atacadas pela corrosão galvânica (HEMMINGSSEN, et. Al, 2002).

Neste trabalho foi utilizado o método de duplo loop (DL-EPR), que é a polarização cíclica em que sua curva consiste em uma ativação seguida de reversão, começando pelo potencial ativo de circuito aberto (OCP) e revertendo antes da transpassivação. Para este teste, o grau de sensitização pode ser avaliado pela relação entre a corrente de ativação ( $i_a$ ) e a corrente reversa ( $i_r$ ),  $i_r/i_a$ .

**Figura 1.** Curva clássica DL-EPR de um aço inox. (SERNA-GIRALDO, 2007)



Através da figura 1, é possível analisar a curva característica do DL-EPR, na qual, os pontos A, B e C formam a ativação da curva, e os pontos restantes formam a reversão. No percurso do ponto A ao B está ocorrendo a corrosão do material, do ponto B ao C, o material forma sua camada passiva. O pico formado entre A, B e C é caracterizado como a corrente de ativação. Após a reversão, o matéria volta a corroer, o que é visto pelo percurso dos pontos D ao E, formando camada passiva e retornando ao potencial de corrosão simbolizado pelo ponto F. O pico formado entre D, E e F é caracterizado como a corrente de reversão.

## Materiais e Métodos

As juntas estudadas foram doadas pelo Tenneco Automotive Brasil, as quais foram confeccionadas utilizando o mesmo processo de fabricação do coletor de escape, mas contendo somente as partes de interesse que são a região de solda do tubo de aço inoxidável dos materiais AISI 409 soldado com arame sólido 308 LSI e AISI 439 soldado com arame sólido 430 Ti LSi ambos com flange de aço ASTM A36.

A composição química dos materiais estudados e os parâmetros de soldagem utilizados nesse trabalho encontram-se, respectivamente, 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	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Ti	% outros
<b>AISI 409</b>	0,030	1,00	0,040	0,020	1,00	10,50 –	---	---	0,030	---	0,030
<b>AISI 439</b>	0,030	1,00	0,040	0,030	1,00	17,00 – 19,0	0,50	---	0,030	---	Ti [0,2+4(C+N)]
<b>308 LSI</b>	0,030	1,80	---	---	0,80	20,3	10,0	---	---	---	---
<b>A.T.430Ti</b>	0,021	0,75	0,021	0,001	0,74	17,74	0,25	0,030	0,030	0,38	0,080
<b>ASTM A36</b>	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,035	0,10	---	---	---	---	---	0,20 (%Cu mín)

Fontes: Norma ASTM A240 – 2018 (AISI 409, AISI 439 e A.T.430Ti); Catálogo do APERAM (ASTM A36); (JUNIOR, BRAGA, et al, 2011).

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

PARÂMETROS TUBULAR (EXTERNO)	PARÂMETROS TUBULAR (INTERNO)
Programa = 10	Programa = 10
CrNi => 18 – 8 – 6	CrNi => 18 – 8 – 6
ARAME = 1,2 => MC439Ti	ARAME = 1,2 => MC439Ti
Amperagem = 325A	Amperagem = 295A
Voltagem = 27,3V	Voltagem = 21,3V
Indutância = -5	Indutância = -5
Comprimento do Arco -18	Comprimento do Arco -15
Velocidade = 25	Velocidade = 25
Gás = AG12	Gás = AG12

Fonte: Tenneco Automotive Brasil

Em trabalho anterior (FAGGIAN, 2018) foi determinada a faixa de temperatura do tratamento térmico das amostras, para isso, realizaram-se ensaios em um dinamômetro presente na divisão de motores do Instituto Mauá de Tecnologia. Neste ensaio foi acoplado o escape com um termopar a uma moto fiat dire 1.4 tetrafuel tendo como combustível gasolina e etanol. A maior temperatura encontrada foi de 750°C, portanto foram escolhidas as temperaturas de 650 °C e 750 °C, com o objetivo de avaliar o efeito da temperatura. Os corpos de prova foram inseridos no forno Mufla fabricado pela Quimis, permanecendo 50h e 100h em ambas as temperaturas. As amostras já se encontravam tratadas e embutidas quando do início deste trabalho.

Os ensaios potenciodinâmicos DL-EPR foram conduzidos em uma célula eletroquímica com montagem de três eletrodos onde utilizou-se o eletrodo de calomelano como referência, eletrodo de platina (Pt) como contra eletrodo e o eletrodo de trabalho conectado por uma haste rosqueada no corpo de prova preparado com baquelite. Foram realizados por meio de um potenciostato/ galvanostato Autolab.

As amostras ensaiadas tinham as seguintes condições:

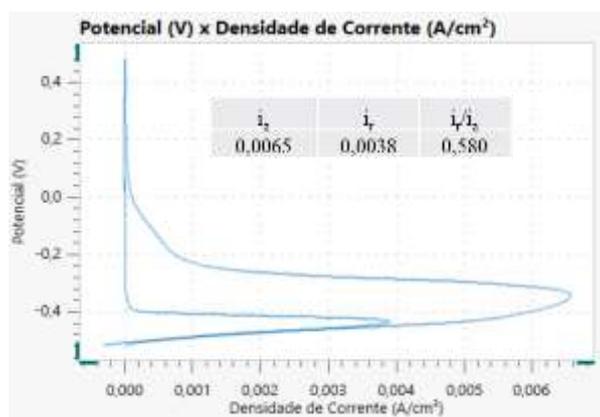
- AISI 409 e AISI 439 somente o metal base (sem solda);
- AISI 409 e AISI 439 soldados sem tratamento térmico;
- AISI 409 e AISI 439 soldados com tratamento térmico de 650°C por 50h;
- AISI 409 e AISI 439 soldados com tratamento térmico de 650°C por 100h;
- AISI 409 e AISI 439 soldados com tratamento térmico de 750°C por 50h;
- AISI 409 e AISI 439 soldados com tratamento térmico de 750°C por 100h;

Os ensaios foram realizados em solução aquosa de 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Ácido Sulfúrico), de acordo com a norma G108, com velocidade de varredura de 1,67 mV/s, sendo o acabamento superficial de lixa #600 imediatamente antes da imersão no eletrólito. A faixa de polarização foi do potencial de corrosão (OCP) medido por 60 segundos até 300 mV e a área exposta da amostra na solução variou de 0,2 – 0,3 cm<sup>2</sup>. Foram realizados três ensaios para cada amostra.

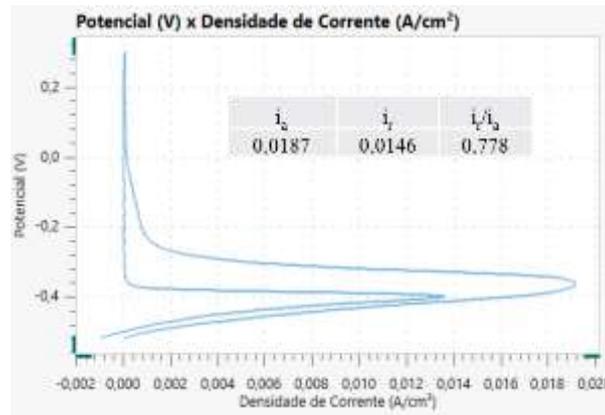
## Resultados e Discussão

As figuras 2 a 5 apresentam os resultados das curvas do DL – EPR do AISI 409. Nota-se que o metal base antes de ser soldado já apresenta corrosão intergranular, isto porque sua porcentagem de cromo é reduzida comparada aos demais aços inoxidáveis.

**Figura 2.** Curva de polarização do metal base AISI 409.

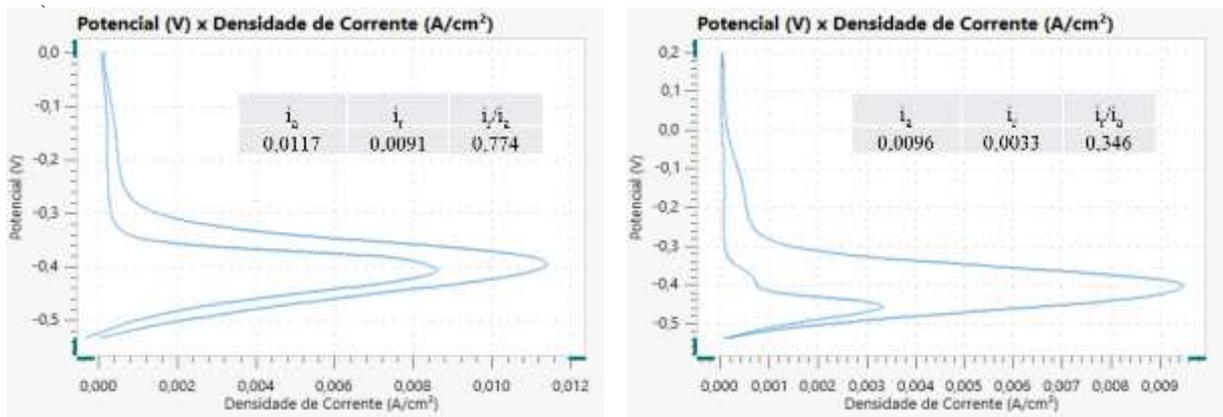


**Figura 3.** Curva de polarização do AISI 409 soldado sem tratamento térmico.



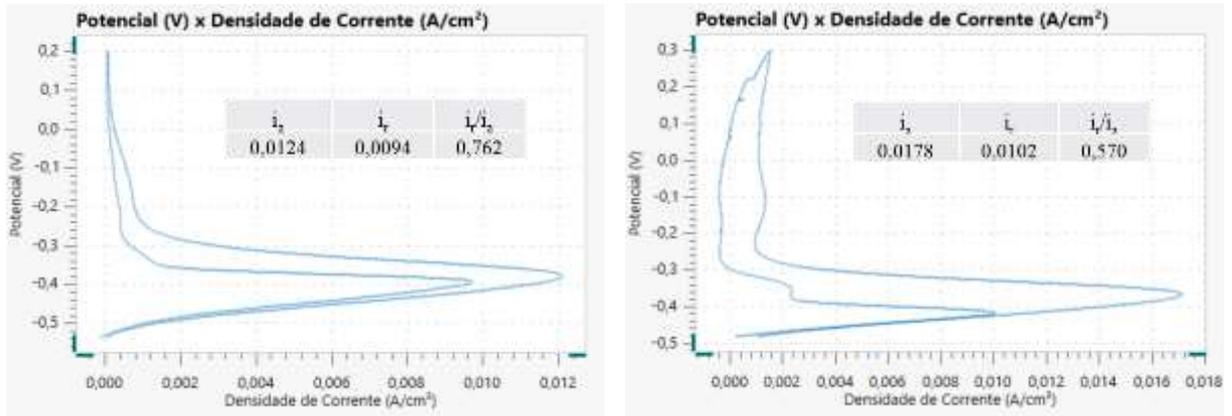
A partir das figuras 2 e 3 observa-se que o processo de soldagem elevou consideravelmente o grau de sensitização do material.

**Figura 4.** Curvas de polarização do AISI 409 soldado com tratamento térmico de 650°C por: a) 50h; b) 100h.



As curvas da figura 4 mostram que houve uma queda no grau de sensitização com o aumento do tempo de tratamento térmico em mesma temperatura. Supõe-se que, com maior tempo tenha ocorrido o início da solubilização de parte dos carbonetos de cromo, diminuindo o volume de cromo nas fronteiras e conseqüentemente diminuindo a corrosão.

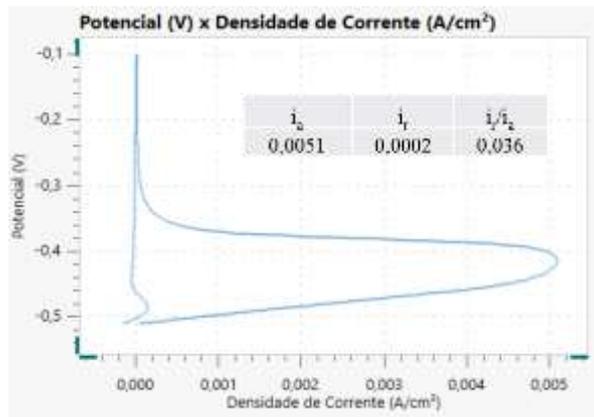
**Figura 5.** Curvas de polarização do AISI 409 soldado com tratamento térmico de 750°C por: 50h e 100h.



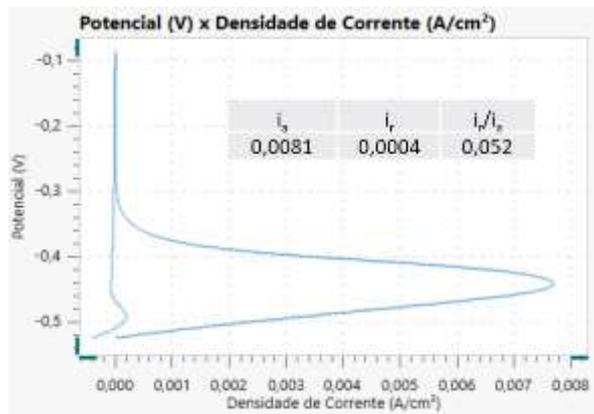
Pela figura 5 pode-se analisar que há uma diminuição da corrosão intergranular com o aumento do tempo, mas de forma mais suave comparado com os ensaios de 650°C.

As figuras 6 a 9 apresentam os resultados das curvas do DL – EPR do AISI 439. Nota-se que este material possui um grau de sensitização inferior ao aço AISI409, isso ocorre porque o AISI 439 possui maior porcentagem de cromo em sua composição, sendo assim menos suscetível a corrosão intergranular.

**Figura 6.** Curva de polarização do metal base AISI 439.

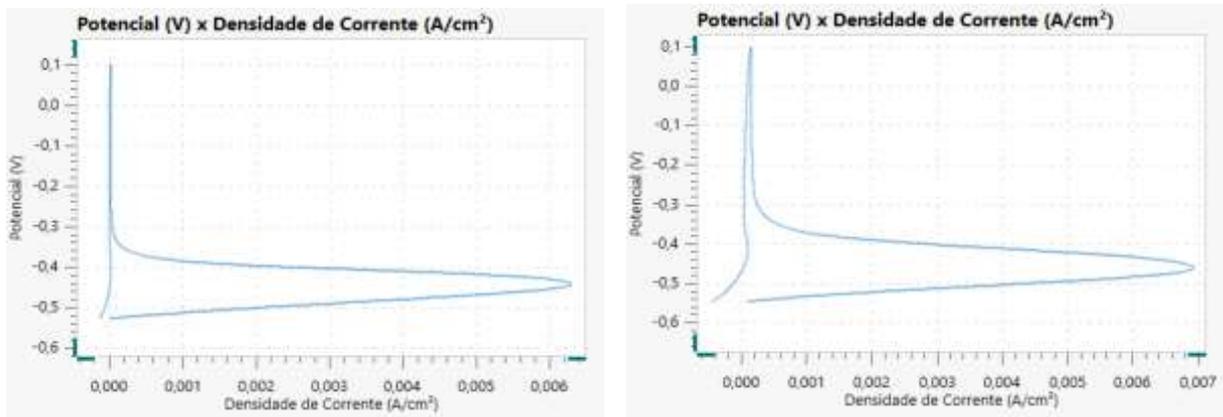


**Figura 7.** Curva de polarização do AISI 439 soldado sem tratamento térmico.

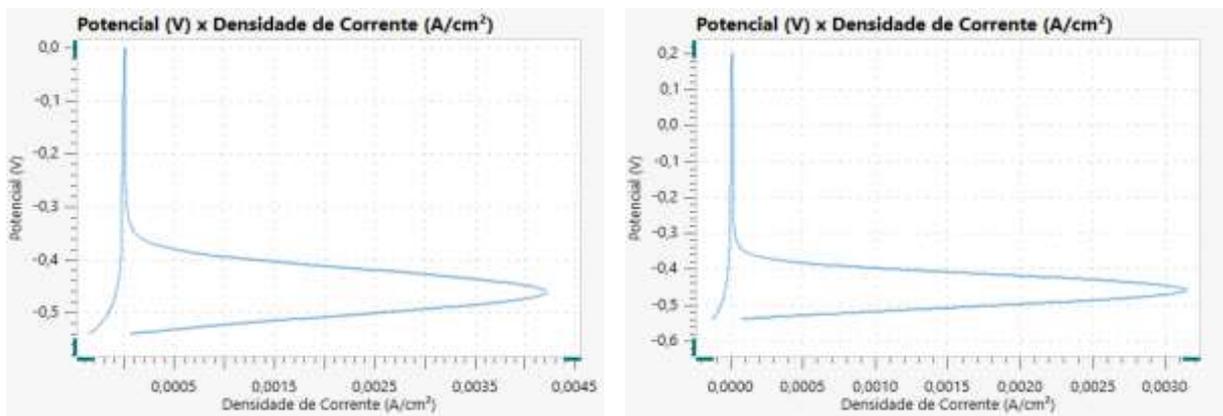


Analisando as figuras 6 e 7 pode-se concluir que o processo da soldagem não interferiu no grau de sensitização deste aço inoxidável, pois o valor do grau de sensitização tem uma mudança pouco expressiva.

**Figura 8.** Curvas de polarização do AISI 439 soldado com tratamento térmico de 650°C por: a) 50h; b)100h.



**Figura 9.** Curvas de polarização do AISI 439 soldado com tratamento térmico de 750°C por: a) 50h; b)100h



Observa-se pelas figura 8 e 9 que o tratamento térmico, independente da temperatura de tratamento, anulou o grau de sensitização do material em estudo. Assim como nos casos anteriores, supõe-se que tenha ocorrido a solubilização dos precipitados de cromo, retornando a região de origem.

Na tabela 3 são apresentadas as médias obtidas dos valores de corrente,  $i_a$ ,  $i_r$  e consequentemente o valor do grau de sensitização ( $i_a/i_r$ ) de cada aço em condições específicas.

**Tabela 3.** Resultados das correntes de ativação, reversão e do grau de sensitização obtidos pelo ensaio de DL-EPR.

Amostra	$i_a$	$i_r$	$i_r/i_a$
AISI 409 metal base	0,0065	0,0038	0,580
AISI 409 soldado sem tratamento	0,0187	0,0146	0,778
AISI 409 650°C 50h	0,0117	0,0091	0,774
AISI 409 650°C 100h	0,0096	0,0033	0,346
AISI 409 750°C 50h	0,0124	0,0094	0,762
AISI 409 750°C 100h	0,0178	0,0102	0,570
AISI 439 metal base	0,0051	0,0002	0,036
AISI 439 soldado sem tratamento	0,0081	0,0004	0,052
AISI 439 650°C 50h	0,0067	0,00002	0,003
AISI 439 650°C 100h	0,0066	0,0001	0,019
AISI 439 750°C 50h	0,0043	0,0000	0,000
AISI 439 750°C 100h	0,0031	0,0000	0,000

Fonte: A autora.

GIRALDO et al. (2005) fizeram um estudo para o aço UNS43000 correlacionando o ensaio de imersão com o ensaio de reativação eletroquímica DL-EPR, e observaram maior grau de sensitização na faixa de temperatura entre 500 e 650 °C. Acima de 700°C notaram também que o aço recuperou a resistência à corrosão intergranular, devido provavelmente, à recuperação do material, onde a redifusão do cromo para a matriz do grão do material. Confirmando os resultados discutidos nesse trabalho, que podem ser analisados resumidamente na tabela 4, em que temos menores graus de sensitização em maiores temperaturas.

## Conclusão

Conclui-se que, em termos gerais, o aço AISI 439 mostrou-se mais resistente à sensitização e conseqüentemente a corrosão intergranular, apresentando corrosão apenas antes de tratado, e com valores mínimos.

Além disso, observou-se que, com o aumento de tempo e temperatura de tratamento térmico, obteve-se redução do valor da corrente reversiva, conseqüentemente redução do grau de sensitização do material.

## 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.

BARBOSA, ADRIANA D. Avaliação da Sensitização em Aços Inoxidáveis Ferríticos Estabilizados e Não Estabilizados usando-se a Técnica Reativação Eletroquímica Potenciocinética em meio sulfúrico. Tese de Mestrado. UFOP – CETEC – UEMG. 2006

CAETANO GQ, SILVA CC, MOTTA MF, MIRANDA HC, FARIAS JP, BERGMANN LA, SANTOS JF. Intergranular corrosion evaluation of friction stir welded AISI 410S ferritic stainless steel. *Journal of Material Research and Technology*. 2019, article in press.

DI CUNTO J. Estudo da resistência a corrosão de aços inoxidáveis para uso na parte fria dos sistemas de exaustão de veículos. Tese de doutorado apresentada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

FAGGIAN F.N., RODRIGUEZ F.A., ROLLO G.V.R, ASCÊNCIO V.L.G.. Avaliação das juntas soldadas dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 409 e AISI 439 aplicadas ao coletor de exaustão de veículos automotores. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Mecânica, Instituto Mauá de Tecnologia. 2018.

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

GHORBANIA S, GHASEMIB R, EBRAHIMI-KAHRIZSANGIA R, HOJJATI-NAJAFABADID A. Effect of post weld heat treatment (PWHT) on the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of dissimilar stainless steels. *Materials Science & Engineering A*. 2017; (688): 470–479

HUANG X, WANG D, YANG Y. Effect of Precipitation on Intergranular Corrosion Resistance of 430 Ferritic Stainless Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(11): 1062-1068.

IACOVIELLO F, DI COCCO V, D'AGOSTINO L. Analysis of the intergranular corrosion susceptibility in stainless steel by means of potentiostatic tests. *Procedia Structural Integrity*, 2017; (3): 269-275.

KIM JK, KIM YH, LEE BH, KIM KY. New finding on intergranular corrosion mechanism of stabilized stainless steels. *Electrochemical Acta*, 2011, (56): 1701-1710.

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.

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.