



## **AVALIAÇÃO DA SENSITIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI439 UTILIZADO NO SISTEMA DE EXAUSTÃO VEICULAR**

**Gabriel Garcia Silva<sup>1</sup>, Fabio dos Santos Silva<sup>2</sup>, Jose Agustin Castillo Lara<sup>3</sup>, Viviane Tavares de Moraes<sup>1\*</sup>, Guilherme Wolf Lebrão<sup>1</sup> e Susana Marraccini Giampietri Lebrão<sup>1</sup>**

*1- Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. Praça Mauá, n1 – São Caetano do Sul – SP, CEP 09580-900*

*2- General Motors do Brasil - Av. do Estado, 2880 -, São Caetano do Sul - SP, 09550-400*

*3- Departamento de Materiais – Fundação Santo André, Av. Príncipe de Gales, 821, Santo André - SP CEP: 09060-650*

*Autor viviane.moraes@maua.br*

### **RESUMO**

*Com o objetivo de melhorar o desenvolvimento dos aços inoxidáveis nos sistemas de exaustão de veículos e nos principais meios de união de materiais metálicos na indústria automotiva, este estudo foi realizado para avaliar os fatores que influenciam a ocorrência e o grau de sensibilização no AISI. 409. e AISI 439 utilizando o método Double Loop Dynamic Potential Test (DL-EPR), seguindo a norma ASTM G108 para geração de curvas de polarização. Observou-se que na avaliação do grau de sensitização das peças o melhor desempenho do aço 439 em relação ao 409 e do arame tubular em relação ao arame sólido, verificou-se também que as peças depois de passarem por um ciclo de fadiga térmico e mecânico não tendem a aumentar sua tendência à sensitização.*

**Palavras-chave:** *polarização, aço inox, sistema de exaustão.*

### **INTRODUÇÃO**

Os aços inoxidáveis têm sido mais comumente utilizados na indústria automotiva 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.

Porém, 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; 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. 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 (HEMMINGSEN, et. Al, 2002; LEBRAO, 2022).

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 ( $i_r$ ),  $i_r/i_a$ .

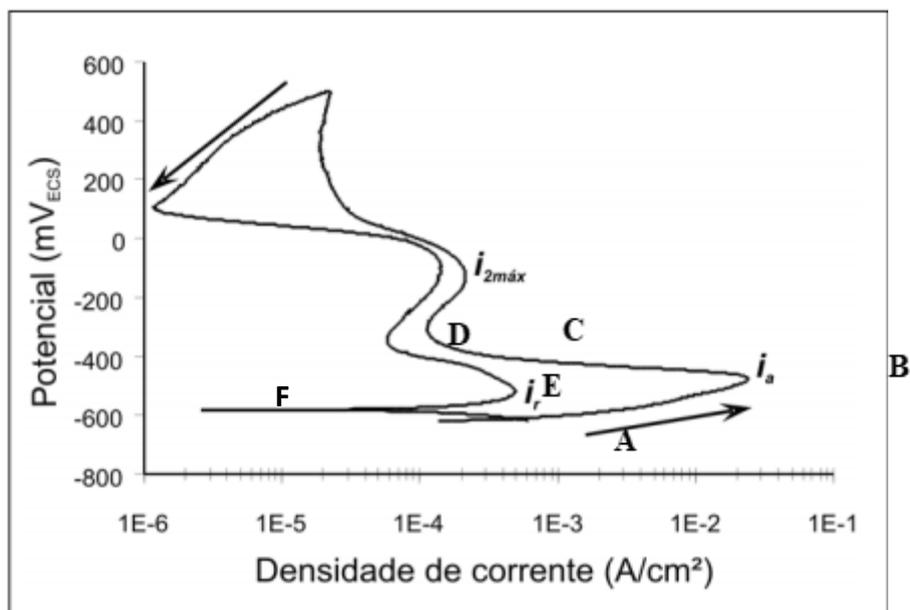


Figura 1. Curva clássica DL-EPR de um aço inox. (SERNA-GIRALDO, 2007)

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 material 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

Os corpos de prova avaliados foram recebidos de estudo anterior (Silva, 2019) na condição de tubos de aço inox (AISI 409 e AISI 439) soldados à flange de baixo carbono (AISI 1018) e ensaiadas à fadiga térmica e mecânica, os parâmetros de solda utilizados são arame tubular (AISI 439Ti) e sólido (AISI 307Si) e a posição de solda interna ou externa.

A composição química dos aços estudados e os parâmetros de soldagem utilizados nos corpos de prova desse trabalho encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Composição química dos aços ferríticos AISI 409 e AISI 439, dos arames de solda AISI 439Ti e AISI 307Si e do flange AISI 1018.

<b>Material</b>	<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Si</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Ni</b>	<b>%Mo</b>	<b>%Ti</b>
AISI 409	0,03	1	1	0,04	0,02	10,5 11,7	- 0,5	--	--
AISI 439	0,03	1	1	0,04	0,03	17 - 19	0,5	--	--
AISI 307Si	0,08	7	0,9	--	--	18	8	--	--
AISI 439Ti	0,02	0,5	0,5	--	--	17,5	0	--	0,5
AISI 1018	0,18	0,75	--	0,04	0,03	--	--	--	--

A fadiga térmica foi realizada em um queimador industrial aquecido a 700°C e depois resfriado à 25°C totalizando 200 ciclos de 4,5 minutos de duração. Após a ciclagem térmica, os corpos de provas foram submetidos à fadiga mecânica de amplitude de 1200N (tração e compressão), tensão média nula e frequência de 8Hz (Silva, 2019). Para este ensaio cada corpo de prova suportou número de ciclos diferentes até a ruptura, como exposto na TABELA 3.

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

<b>Parâmetros</b>	<b>Arame tubular (externa)</b>	<b>Arame tubular (interna)</b>	<b>Arame sólido (interno e externo)</b>
Programa	10 (CrNi => 18 - 8 - 6)	10 (CrNi => 18 - 8 - 6)	9 (CrNi => 18 - 8 - 6)
Arame	1,2 mm => MC439Ti	1,2 mm => MC439Ti	1,0 mm => 307Si
Corrente (A)	325 A	295 A	202 A
Tensão (V)	27,3 V	21,3 V	37,3 V
Indutância	-5	-5	-5
Comprimento do arco	-18	-15	-18
Velocidade (mm/s)	25	25	25
Gás	AG12	AG12	AG12

Tabela 3. Número de ciclos de fadiga para cada corpo de prova.

Corpo de prova	Número de ciclos
AISI 409 arame tubular solda interna	188.872
AISI 409 arame tubular solda externa	213.489
AISI 409 arame sólido solda interna	151.327
AISI 409 arame sólido solda externa	53.956
AISI 439 arame tubular solda interna	120.389
AISI 439 arame tubular solda externa	280.182
AISI 439 arame sólido solda interna	246.941
AISI 439 arame sólido solda externa	92.271

As amostras foram cortadas em baixa velocidade para obter apenas a região de interesse, zona termicamente afetada pela soldagem, como mostrado na Figura 2:



Figura 2. Seção retirada dos corpos de provas recebidos.

As seções obtidas foram embutidas em baquelite, identificadas e furadas para obter o contato elétrico entre o corpo de prova e a haste metálica do potenciostato, em seguida lixadas até lixa #600 e aplicada resina Araldite LY1316-2 BR com o catalisador Aradur 42 sobre a região do flange e do cordão de solda para isolar a região do inox estudado, ao final da preparação obteve-se o corpo de prova como apresentado na Figura 3.



Figura 3. Amostra após a preparação.

Os ensaios DL-EPR foram realizados no potenciostato/galvanostato Autolab, de acordo com a norma ASTM G108, utilizando os parâmetros velocidade de varredura de 1,67 mV/s, faixa de polarização partindo do potencial de corrosão (OCP), medido por 60 segundos, até 300 mV, solução aquosa de 0,5 M de Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), eletrodo de calomelano como referência, eletrodo de Platina (Pt) como contra eletrodo e o eletrodo de trabalho é acoplado à haste metálica presa pelo furo roscado no corpo de prova como mostrado na Figura 4.

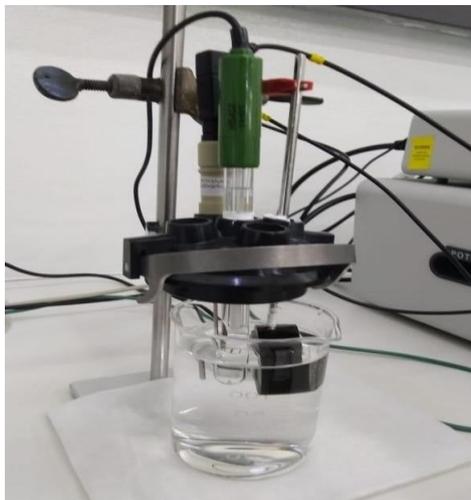


Figura 4. Configuração dos Eletrodos de ensaio.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 são apresentados os graus de sensitização (GS) para as amostras ensaiadas. Pode-se observar que a fadiga térmica tende a diminuir o grau de sensitização (GS) para o as amostras de aço AISI 409. No entanto, para o aço AISI 439, por se tratar de variações muito pequenas, não se pode dizer que houve impacto nos resultados.

Os dados da tabela 4 também indicam que o uso do arame sólido para a união das peças tendem a aumentar o grau de sensitização quando comparado com o arame tubular, um dos fatores que podem ocorrer é a diferença de aporte térmico entre os dois métodos de soldagem que impactam diretamente na sensitização como visto em trabalhos anteriores (Silva, Machado, et al, 2015).

A partir dos resultados do ensaio DL-EPR obtém-se as curvas de polarização dos corpos de prova dos aços 409 e 439 sem soldagem, observa-se que o 409 tende a apresentar corrosão intergranular mesmo antes de ser soldado, enquanto o 439 apresenta-se isento de corrosão, conforme Figura 5.

Tabela 4. Grau de sensitização médio de cada amostra.

<b>Aço</b>	<b>Arame</b>	<b>Posição de solda</b>	<b>Fadiga</b>	<b>GS</b>	
AISI 409	Sólido	interna	sim	0,228	
			não	0,496	
		externa	sim	0,459	
			não	0,328	
	Tubular	interna	sim	0,127	
			não	0,477	
		externa	sim	0,15	
			não	0,21	
	Sem solda				0,27
	AISI 439	Sólido	interna	sim	0,016
não				0,009	
externa			sim	----	
			não	0,006	
Tubular		interna	sim	0,046	
			não	0	
		externa	sim	0,01	
			não	0,002	
Sem solda				0,001	

Como observado em trabalhos anteriores (Serna-Giraldo, 2007), quando os aços inoxidáveis são expostos a temperaturas acima de 500°C tendem a sofrer alteração no GS devido a ocorrência da solubilização do cromo na microestrutura. Como a fadiga térmica foi

realizada a 700°C pode-se esperar que haja alteração no GS das amostras que sofreram fadiga térmica. As curvas abaixo são um comparativo entre as amostras com e sem fadiga, observa-se que as amostras fadigadas tendem a sensibilizar menos que suas correspondentes sem fadiga como mostrados nas Figuras 6 e 7.

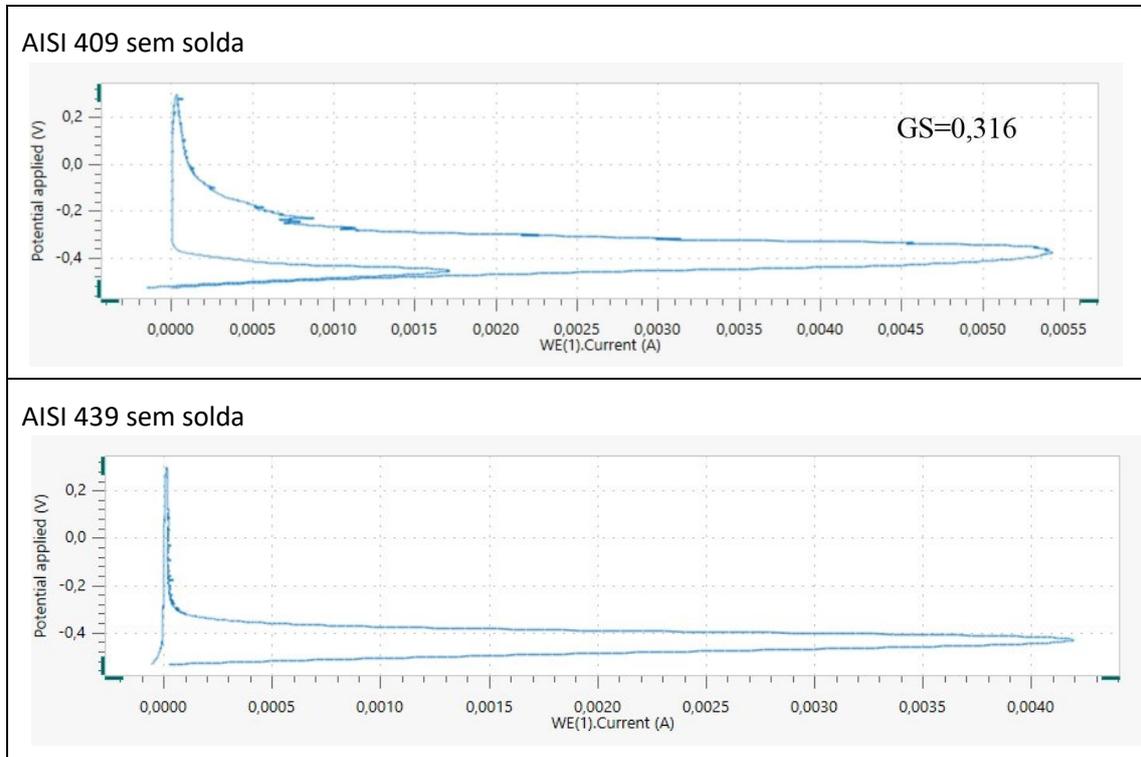


Figura 5. Curva de polarização das amostras sem soldagem: a-) AISI 409; b-) AISI 439

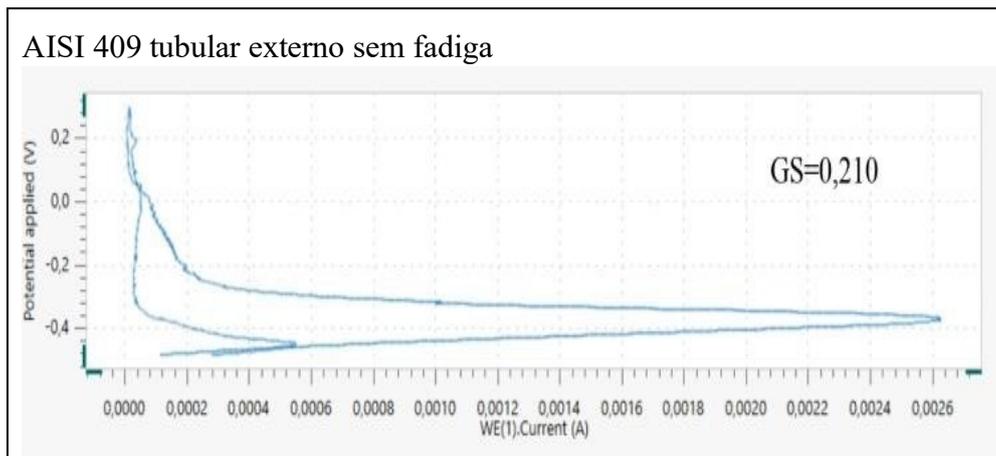




Figura 6. Curva de polarização das amostras AISI 409 arame tubular solda externa: a-) sem fadiga; b-) com fadiga.

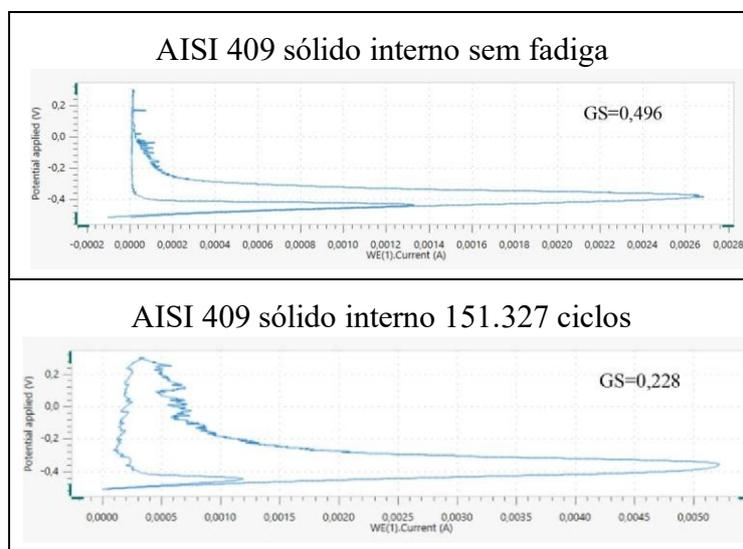
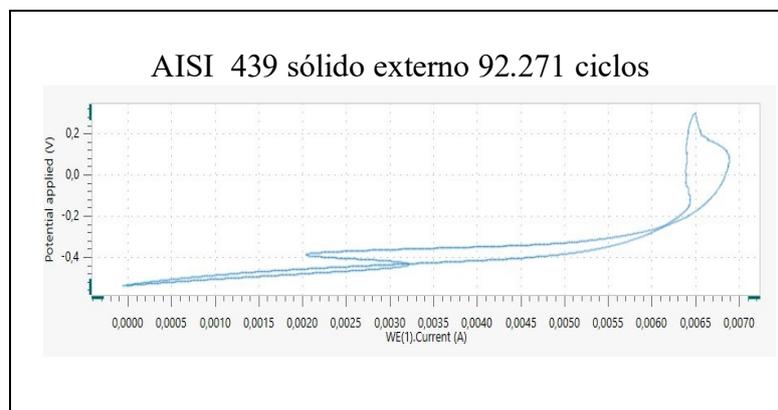


Figura 7. Curva de polarização das amostras AISI 439 arame sólido solda externa: a-) Sem fadiga; b-) Com fadiga.

Em contrapartida, nos ensaios apresentados na Figura 8, observa-se que o formato da curva gerado fugiu do padrão obtido para as demais amostras, isso possivelmente ocorra devido à não formação da camada passiva e somente com os resultados do potenciostato não foi possível identificar a causa dessa alteração.



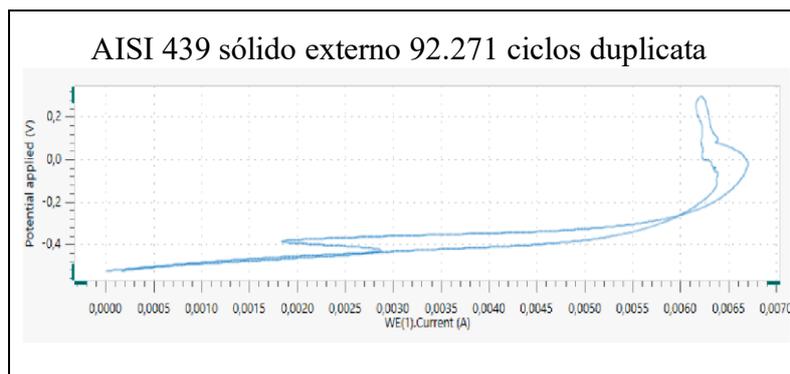


Figura 8. Curvas de polarização da amostra AISI 439 arame sólido solda externa com fadiga

Mesmo sendo possível observar a corrente “Ia” e a corrente “Ir”, devido à curva apresentar um comportamento diferente do esperado não é possível determinar o GS neste caso da Figura 8.

## CONCLUSÕES

Conclui-se que, em regra geral, a fadiga térmica não é um parâmetro impactante para a ocorrência de corrosão intergranular, mas a escolha do aço utilizado e os parâmetros de soldagem estão diretamente ligados à taxa de corrosão.

Entre os aços observa-se melhor resistência a corrosão intergranular do aço AISI 439 em relação ao aço AISI 409 e também melhor desempenho do arame tubular em relação ao arame sólido.

## Agradecimentos

Ao Instituto Mauá de Tecnologia; General Motors do Brasil e Fapesp Processo n 2020/09163-3

## REFERÊNCIAS

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*. Volume 8, Issue 2, April 2019, Pages 1878-1887.

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.

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.

LEBRAO, S.M.; LARA, J.C.; COLOSIO, M.A.; SCALA, G.; SERIACOPI, V. Avaliação da sensitização de juntas soldadas em aço inoxidável ferrítico AISI 409 e AISI 439 por Reativação Eletroquímica Potenciodinâmica (DL-EPR) para sistema de exaustão veicular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 24., 6-10 de novembro, 2022, Águas de Lindóia.

LIMA L.I.L.(2007) Metodologia Para Avaliação Da Corrosão Da Zona Termicamente Afetada De Aço Inoxidável Ferrítico AISI 439 Soldado. Dissertação de mestrado, UFMJ, 2007.

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.

SILVA C.C.; MACHADO J.P.S.E.; SANT'ANA H.B.; FARIAS J.P.(2005) Estudo da Sensitização Causada pelo Ciclo Térmico de Soldagem no Aço Inoxidável Superferrítico AISI 444. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, Salvador

## **EVALUATION OF SENSITIZATION OF WELDED STEEL JOINTS FERRITIC STAINLESS STEEL AISI439 USED IN VEHICLE EXHAUST SYSTEM**

### **ABSTRACT**

*In order to improve the important development of stainless steels in vehicle exhaust systems and in the main means of joining metallic materials in the automotive industry, this study was carried out to evaluate the factors that influence the occurrence and degree of sensitization in the AISI 409. and AISI 439 stainless steels using the Double Loop Dynamic Potential Test(DL-EPR) method, following the ASTM G108 standard for generating polarization curves. It was observed that when evaluating the degree of sensitization of the parts, the better performance of steel 439 in relation to 409 and of tubular wire in relation to solid wire, it was also found that the parts after going through a cycle of thermal and mechanical fatigue do not tend to increase your tendency to sensitization.*

**Keywords:** *polarization, stainless steel, exhaust system.*