

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

Giovanna Scala<sup>1</sup>  
Gustavo Victor Relva Rollo<sup>2</sup>  
Fabio Noveli Faggian<sup>2</sup>  
Susana Marraccini Giampietri Lebrão<sup>3</sup>  
José Agustín Castillo Lara<sup>4</sup>  
Marco Antonio Colosio<sup>5</sup>

## Resumo

Avaliou-se a suscetibilidade quanto a corrosão intergranular na zona termicamente afetada da junta soldada do aço inoxidável ferrítico AISI 409, aplicado à parte quente do sistema de exaustão veicular. As juntas estudadas foram confeccionadas utilizando o mesmo processo de fabricação do coletor de escape. A sensitização na ZTA foi avaliada por reativação eletroquímica potenciodinâmica (DL-EPR) e com ataque eletrolítico em ácido oxálico 10%, segundo a norma ASTM763. O aço AISI 409 apresentou aumento do grau de sensitização após processo de soldagem, porém não houve aumento da sensitização do material soldado após tratamentos térmicos a 750°C.

**Palavras-chave:** Corrosão intergranular; Aços inoxidáveis; DL-EPR; Soldagem.

## SENSITIZATION ANALYSIS OF AISI 409 STAINLESS STEEL WELDED JOINTS BY POTENTIODYNAMIC ELECTROCHEMICAL REACTIVATION (DL-EPR)

### Abstract

The intergranular corrosion susceptibility was evaluated in the heat-affected zone of the welded joint of the AISI 409 ferritic stainless steel, applied to the hot part of the vehicle exhaust system. The joints were made using the same exhaust manifold manufacturing process. Sensitization in ZTA was evaluated by potentiodynamic electrochemical reactivation (DL-EPR) and electrolytic etching in 10% oxalic acid, according to ASTM 763. The AISI 409 steel showed an increase in the degree of sensitization after welding, but there was no increase in the sensitization of welded material after heat treatments at 750°C.

**Keywords:** Intergranular corrosion; Ferritic stainless steel; DL-EPR; Welded joints.

<sup>1</sup> Estudante Bacharel em Engenharia Mecânica, Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Prof.<sup>a</sup>-Dr.<sup>a</sup> em Engenharia de Materiais, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Prof. Me, Coordenador da Engenharia de Materiais e Soldagem, Centro Universitário Fundação Santo André, Santo André, SP, Brasil.

<sup>5</sup> Prof.Dr., Gerente Técnico da Engenharia de Materiais, General Motors Mercosul, São Caetano do Sul, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis ferríticos são amplamente utilizados em diversas aplicações na indústria, visto que oferecem boa resistência a corrosão e baixo custo comparado aos demais aços inoxidáveis.

Seu uso é recomendado em peças do sistema de exaustão, uma vez que apresentem coeficiente de expansão térmica inferior aos aços inoxidáveis austeníticos, deformam-se menos em altas temperaturas, característica que permite a simplificação do projeto, trazendo vantagens do ponto de vista de custo e peso das peças. Por deformar-se menos, os aços ferríticos são mais propícios para aplicações onde há fadiga termodinâmica associada a corrosão em altas temperaturas, por ocasionar menos desprendimento de óxido, sendo este o caso dos tubos e paredes do sistema de exaustão e principalmente do coletor de escape (DI CUNTO,2005).

Quando soldado, o aço inoxidável ferríticos pode ser suscetível a corrosão intergranular, devido as altas temperaturas 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. 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 sensibilização dos aços inoxidáveis (KIM, 2011; SEDRIKS,1996; HUANG,2015; GHORBANIA, 2019).

A corrosão localizada é difícil de ser caracterizada considerando que a perda de massa é muito baixa e as dimensões muito reduzidas. O ensaio de reativação eletroquímica potenciodinâmica é capaz de quantificar o grau de sensibilização do aço inoxidável e sua suscetibilidade (IACOVIELLO, 2017; CAETANO,2019). Neste trabalho foi utilizado o DL-EPR que é a polarização cíclica, sua curva consiste em uma ativação seguida de reversão começando pelo potencial ativo de circuito aberto (OCP). Considerando o teste do DL-EPR, o grau de sensibilização do aço inoxidável pode ser avaliado pela relação entre a corrente de ativação e a corrente reversa,  $i_r/i_a$ .

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

As juntas estudadas foram confeccionadas utilizando o mesmo processo de fabricação do coletor de escape, mas contendo somente a parte de interesse que é a região da solda do tubo de aço inoxidável ferrítico AISI 409 com a flange de aço ASTM A36, soldada com arame tubular A.T.430Ti. A composição química dos materiais utilizados encontra-se na tabela 1. Os parâmetros de soldagem encontram-se na tabela 2.

Tabela 1 – Composição química dos aços AISI 409, ASTM A36 e do arame tubular A.T. 430Ti.

	Composição química (% em massa)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Mo
ASTM36	0,18 - 0,23	0.10	0,30 – 0,60	0.03	0.035	-----	-----	-----	-----
AISI 409	0.03	1.00	1.00	0.04	0.02	10.50- 11,70	0.50	0.132	-----
A.T.430Ti	0.021	0.740	0.750	0.021	0.001	17.74	0.25	0.380	0.030

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem:

PARÂMETROS TUBULAR (EXTERNO)

Programa = 10

CrNi =&gt; 18 - 8 - 6

ARAME = 1,2 =&gt;MC439Ti

Amperagem = 325A

Voltagem = 27,3V

Indutância = -5

Comprimento do Arco -18

Velocidade = 25

GÁS = AG12

As amostras foram tratadas termicamente a 750°C, por 50 e 100h. Esse valor de temperatura foi obtida através da instalação de um termopar em um coletor de escape durante testes de um motor 1.4 a gasolina, montado em um banco de ensaios dinamométrico, Os valores utilizados representam a faixa de funcionamento do trecho de maior temperatura.

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. Foram realizados por meio de um potenciostato/ galvanostato Autolab.

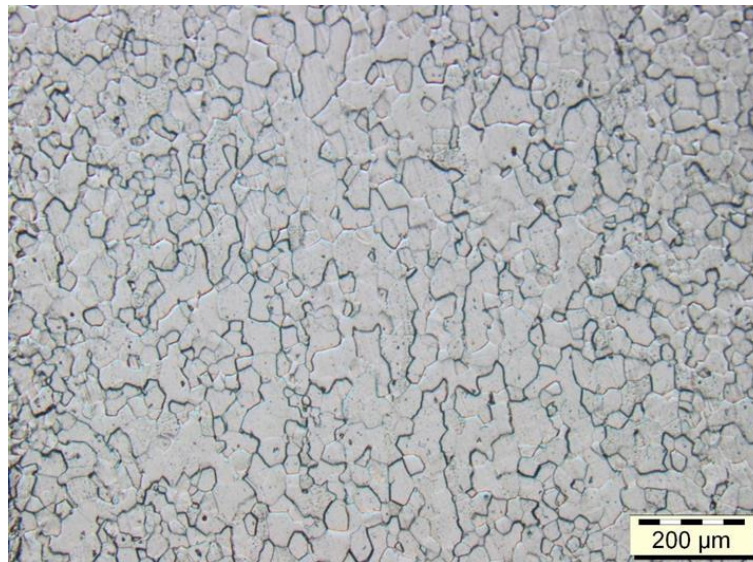
Foram ensaiadas três amostras soldadas, sendo uma não tratada termicamente, e uma quarta amostra com o metal base AISI409 sem soldagem. Os ensaios foram realizados em solução aquosa de 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e uma velocidade de varredura de 1,67 mV/s, sendo o acabamento superficial de lixa #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.

As amostras foram analisadas metalograficamente com ataque Villela e ácido oxálico 10%, segundo a norma ASTM763, para caracterizar a suscetibilidade a corrosão intergranular

## 2.2 Resultados e discussão

Na figura 1, observa-se o aço AISI409 como recebido, sem solda nem tratamento térmico, onde observa-se presença de matriz ferrítica.

Figura 1 –Aço AISI409, ataque Villela, aumento 100x.



Nas figuras 2 a 4, observam-se as amostras apenas soldadas, soldadas e tratadas a 750°C por 50h e soldada e tratada a 750°C por 100h, respectivamente. Pode-se observar nas micrografias a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona fundida (ZF).

Figura 2 –Aço AISI409 soldado, ataque Villela, aumento 50x.

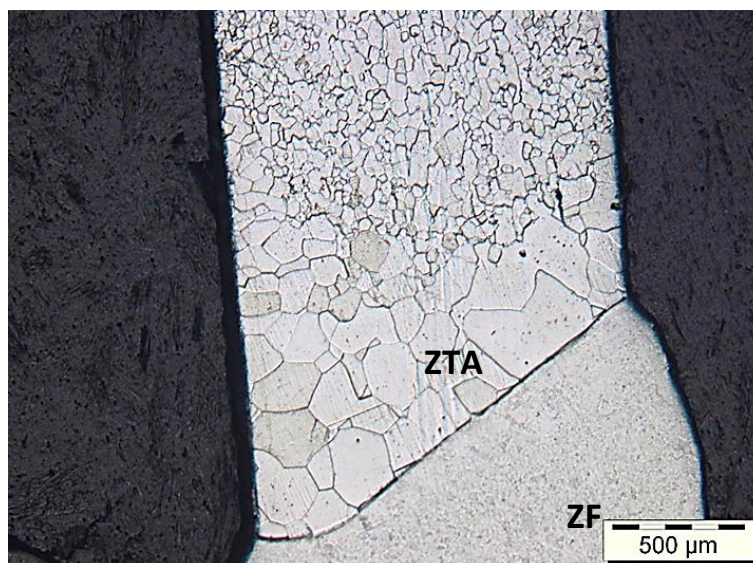


Figura 3 –Aço AISI409 soldado e tratado a 750°C por 50h, ataque Villela, aumento 50x.



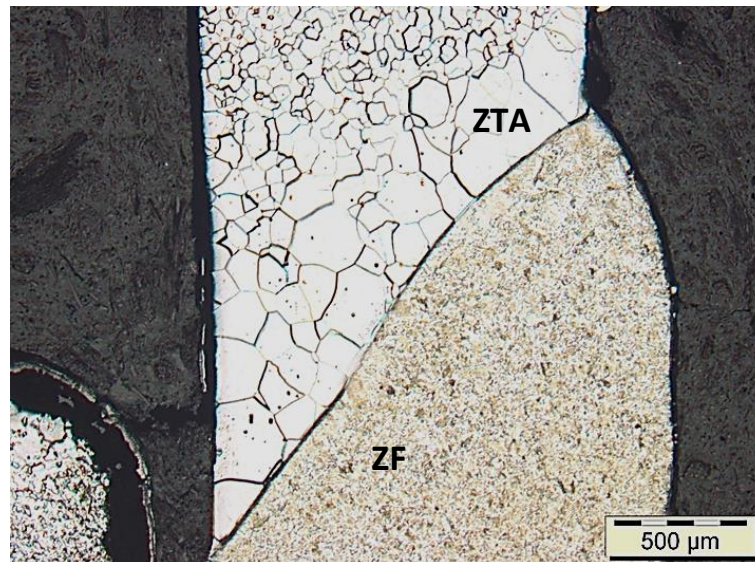
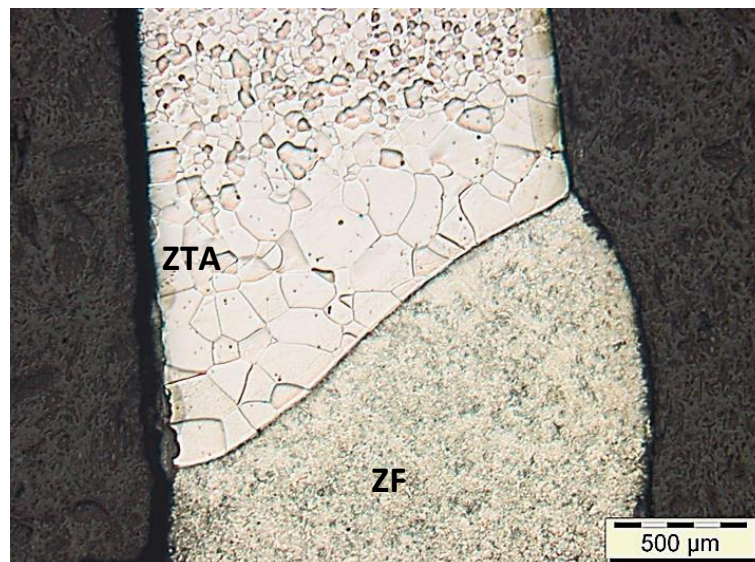


Figura 4 –Aço AISI409 soldado e tratado a 750°C por 100h, ataque Villela, aumento 50x.



Pode-se observar que a zona termicamente afetada apresenta aumento de grão ferrítico tanto na amostra sem tratamento térmico quanto nas amostras tratadas termicamente após soldagem.

As figuras 5 a 7 apresentam as amostras apenas soldadas, soldadas e tratadas a 750°C por 50h e soldada e tratada a 750°C por 100h, respectivamente, com ataque eletrolítico em ácido oxálico 10%. Esse ensaio caracteriza a suscetibilidade à corrosão intergranular das amostras. Pode-se observar nas micrografias a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona fundida (ZF).

Figura 5 –Aço AISI409 soldado, ataque ácido oxálico 10%, aumento 100x.

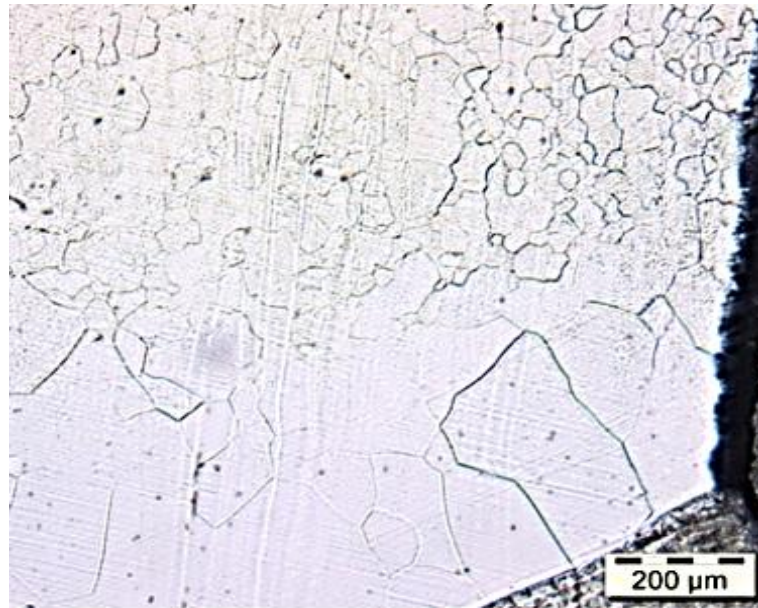


Figura 6 –Aço AISI409 soldado e tratado a 750°C por 50h, ácido oxálico 10%, aumento 50x.

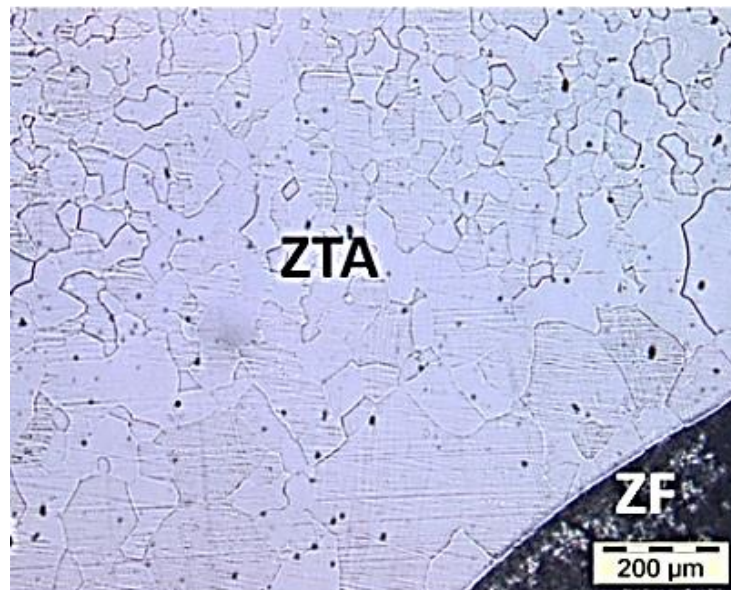
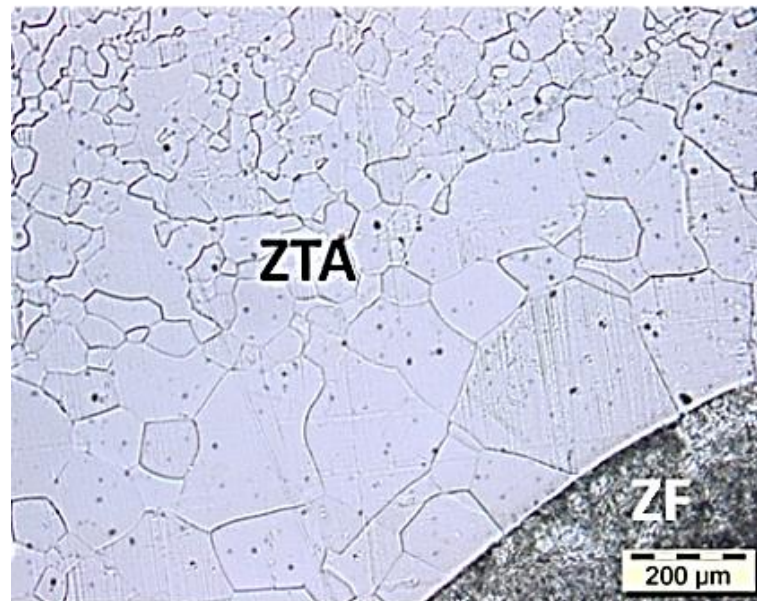




Figura 7 –Aço AISI409 soldado e tratado a 750°C por 100h, ácido oxálico 10%, aumento 50x.



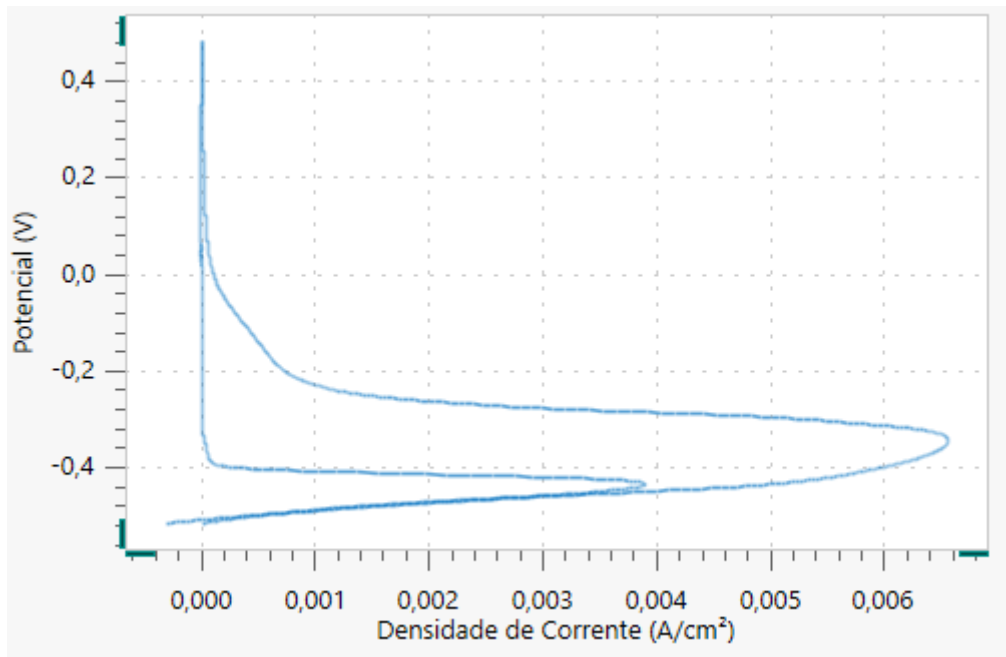
Pode-se observar que não houve grande variação quanto a suscetibilidade à corrosão intergranular com a variação do tempo de tratamento termico. Nota-se ainda, que também não houve variação significativa das amostras apenas soldadas daquelas que foram soldadas e tratadas termicamente.

Apesar da amostra tratada por 50h apresentar uma quantidade maior de precipitados em contornos de grão, como pode-se observar na figura 3, o ensaio com ataque em ácido oxálico não revelou uma variação significativa de contornos de grão apresentando *ditchs* ou valas em relação às demais amostras, conforme pode-se observar na figura 6.

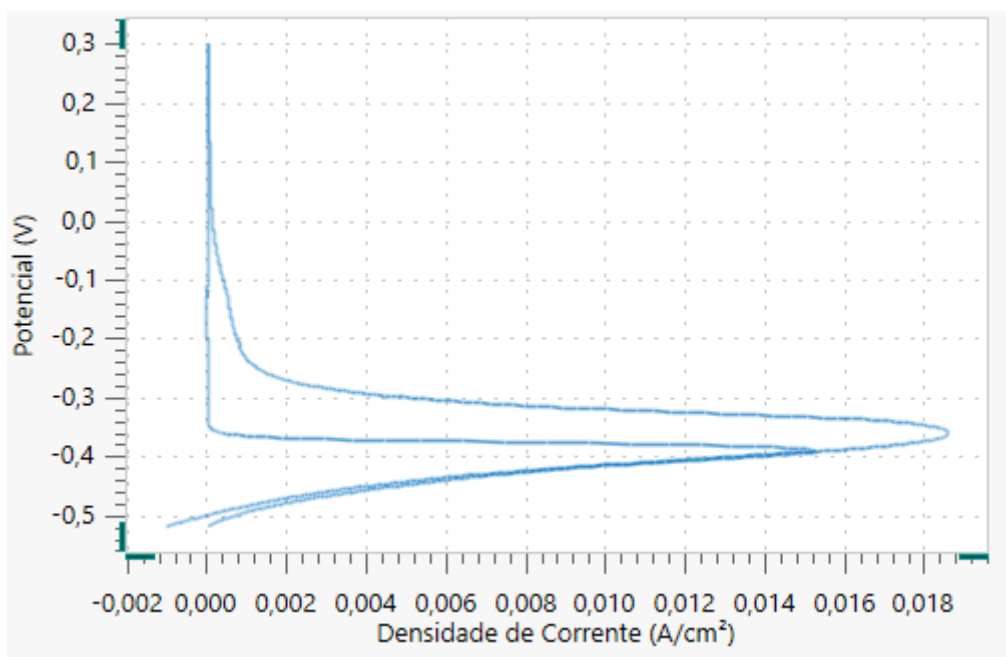
Os valores do grau de sensitização das amostras, tabela 3, coincidem com o aumento da quantidade de precipitados que podem ser observados com ataque de Villela na figura 5. O ataque com ácido oxálico evidencia a formação de carbonetos e, nesse caso, a precipitação de fases como a sigma e chi podem ser preferenciais no aumento da suscetibilidade a corrosão da liga tratada em 50h.

As curvas de polarização potenciodinâmica podem ser observadas na figura 8 . Os valores de máxima densidade de corrente ativa ( $i_a$ ) e a máxima densidade de corrente reversa ( $i_r$ ) bem como o grau de sensitização do material, obtido pela relação  $i_r/i_a$ , encontram-se na tabela 3.

Figura 8 – Curvas de polarização do ensaio DL-EPR. a) AISI409 metal base. b) AISI409 apenas soldado. c) AISI409 soldado e tratado a 750°C por 50h. d) AISI409 soldado e tratado a 750°C por 100h.

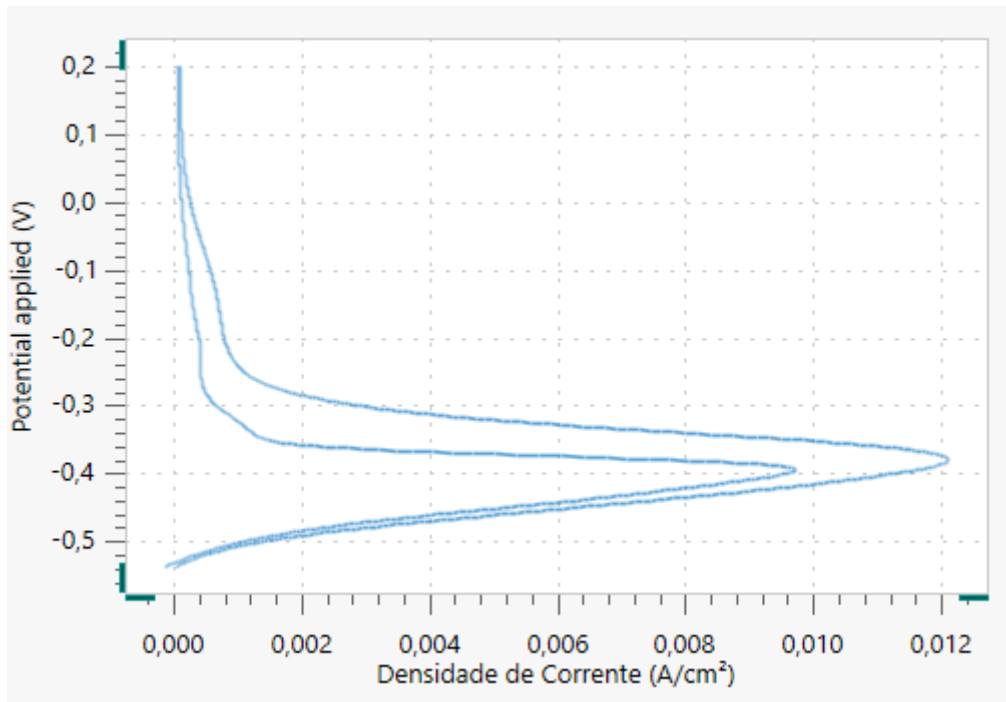


(a)

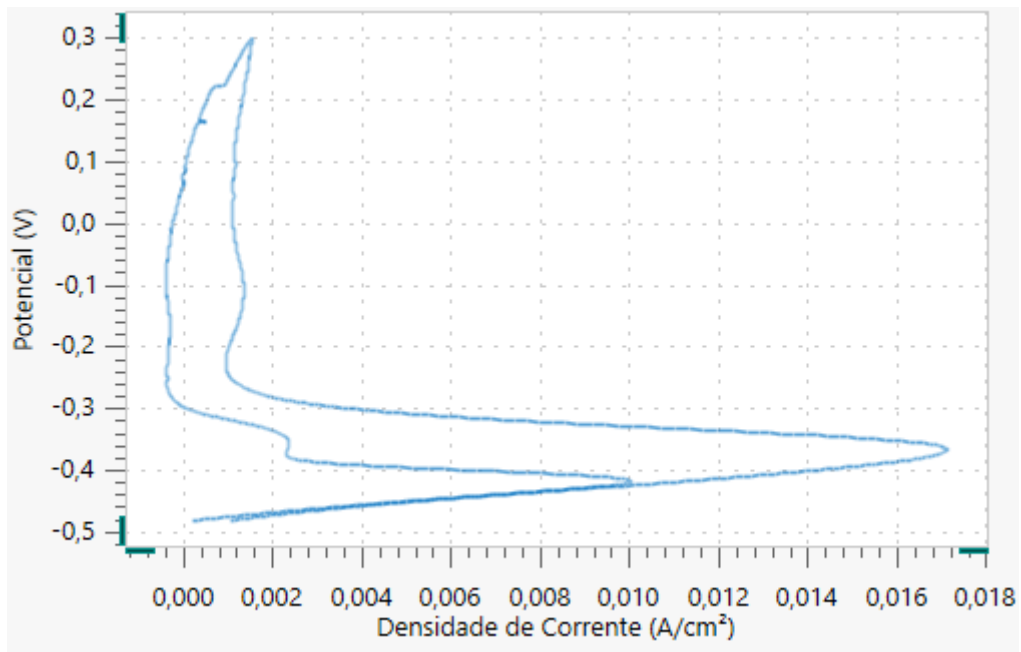


(b)





(c)



(d)

Tabela 3 – Valores de máximos de densidade de corrente e valor do grau de sensitização para cada amostra.

Amostra	$i_a$ (A/cm <sup>2</sup> )	$i_r$ (A/cm <sup>2</sup> )	$i_r/i_a$	Média
AISI 409 metal base	0,0066	0,0041	0,6303	0,5793
AISI 409 metal base	0,0064	0,0034	0,5283	
AISI 409 soldado sem tratamento térmico	0,0190	0,0141	0,7392	0,7787
AISI 409 soldado sem tratamento térmico	0,0185	0,0138	0,7478	
AISI 409 soldado sem tratamento térmico	0,0186	0,0158	0,8490	0,7623
AISI 409 soldado e tratado a 750°C 50h	0,0126	0,0098	0,7731	
AISI 409 soldado e tratado a 750°C 50h	0,0121	0,0096	0,7969	0,7168
AISI 409 soldado e tratado a 750°C 50h	0,0124	0,0089	0,7168	
AISI 409 soldado e tratado a 750°C 100h	0,0167	0,0083	0,4977	0,5682
AISI 409 soldado e tratado a 750°C 100h	0,0178	0,0109	0,6110	
AISI 409 soldado e tratado a 750°C 100h	0,0189	0,0113	0,5959	

Pode-se verificar que houve um aumento do grau de sensitização após a soldagem do material, no entanto não houve aumento significativo após os tratamentos térmicos.

Além disso, a sensitização diminuiu após o tratamento térmico em 100h. Uma hipótese seria a parcial solubilização de alguns precipitados após longo tempo de tratamento, apesar da temperatura de tratamento ainda estar abaixo da especificada para a solubilização da liga.

Deve-se ainda ressaltar que o material antes de ser soldado já apresentava discreta sensitização.

### 3 CONCLUSÃO

Para a condição de estudo proposta neste trabalho, conclui-se que o aço AISI 409 apresenta aumento do grau de sensitização após processo de soldagem e ausência do aumento da sensitização do material soldado após tratamentos térmicos a 750°C por 100h.

### Agradecimentos

Ao Instituto Mauá de Tecnologia, a General Motors Mercosul e a Tenneco Automotive Brasil.

## 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*. 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.

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.

Sedricks A. J. *Corrosion of Stainless Steel*. Second Edition. Princeton: New Jersey, 1996.