

# **ANÁLISE DA SENSITIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 409 PARA USO EM SISTEMA DE EXAUSTÃO VEICULAR**

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

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

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

**Resumo.** Pretende-se avaliar a suscetibilidade quanto à corrosão intergranular de juntas soldadas do aço AISI 409 utilizado na fabricação de escapamentos automotivos. O possível fenômeno de sensitização nas zonas termicamente afetadas, bem como seus efeitos nas propriedades mecânicas, serão avaliados por ensaios de tração, de corrosão e metalográficos.

## **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.

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe) e cromo (Cr) com teor mínimo de 10,50% de Cr, elemento que garante ao material elevada resistência à corrosão. Outros elementos de liga podem ser adicionados na matriz, tais quais níquel (Ni), molibdênio (Mo), titânio (Ti) e nióbio (Nb), com o intuito de garantir características específicas às ligas (MONTEIRO, 2013).

Os aços inoxidáveis podem ser 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 + 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 + Cr.

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de Fe + Cr e tem composições que interceptam o campo austenítico. São aços que possuem uma fase metaestável supersaturada de carbono, sendo monofásica (TCC), tetragonal de corpo centrado, uma vez que se encontra em equilíbrio.

Dentro do grupo dos aços inoxidáveis ferríticos encontra-se o aço AISI 409, em especial o Acesita – AISI 409, o qual apresenta excelentes propriedades para soldagem e conformação, fato que vem garantindo sua participação no sistema de exaustão de veículos(LIMA, 2007).

Ao observar fotomicrografias obtidas através de microscopia óptica do aço inoxidável ferrítico AISI 409, nota-se que ele apresenta crescimento de grãos equiaxiais de ferrita  $\alpha$  (LOPES, 2009; DURAND – CHARRE, 2004). Tal microestrutura confere propriedades mecânicas ao aço inox, boa ductilidade e resistência à corrosão, capazes de garantir, junto com teores de Cr específicos para cada liga, o seu uso em sistemas de exaustão de veículos e em componentes estruturais de máquinas (SALES, 2013).

Porém, ao aplicar-se o processo de soldagem no aço AISI 409, por ele possuir teores baixos de Cr em sua composição (10,81%Cr), ele fica suscetível à corrosão intergranular, intensificada quando técnicas inadequadas de soldagem são realizadas, capazes de comprometer a microestrutura ferrítica e originar, em partes, fase martensítica na matriz. Tal alteração microestrutural faz com que a camada passiva de Cr seja perdida, dando espaço para a corrosão em questão, assim como provoca uma alteração nas propriedades mecânicas da liga utilizada (ELSEVIER, 2012).

Como maneira de analisar os efeitos da soldagem, o aço inoxidável AISI 409 será submetido a testes metalográficos, de corrosão e de tração, como solução para estudar o fenômeno de sensitização das juntas soldadas do sistema de exaustão dos veículos automotivos.

O aço inoxidável ferrítico AISI 409 (10,81%Cr), devido às suas propriedades de resistência à corrosão, está sendo empregado no sistema de exaustão de veículos automotivos e submetido ao processo de soldagem na união de suas peças, fato que, adicionado a condições de variação térmica, intensifica a tendência do surgimento de um meio corrosivo (CUNTO, 2005), afetando mecânica, térmica e metalurgicamente as zonas termicamente afetada (ZTA) e fundida do material soldado.

A fragilização da zona termicamente afetada (ZTA) é atribuída a três fatores principais:

1. Granulação grosseira nas regiões de crescimento de grão da ZTA e da zona fundida, quando o metal de adição também for um aço inoxidável ferrítico;
2. Formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos de grãos ferríticos, mais intensa em aços inoxidáveis com alto teor de elementos intersticiais.
3. Fragilização à alta temperatura, devido a reprecipitação intensa e muito fina de carbonitretos após a soldagem (FILHO, 2010).

Como a corrosão é muitas vezes intergranular, ela acaba por afetar a vida útil dos equipamentos, podendo ocasionar falhas catastróficas nas peças, precisando ser identificada. Assim, pode ser realizado um ataque metalográfico em ácido oxálico, o qual revela a presença de fases ricas em Cr, como carbonetos de cromo, formadas através do fenômeno de sensitização. Este ensaio pode ser utilizado junto com outros mais precisos como critério de aprovação da peça (PIRES,2002). Assim a pesquisa em termos de corrosão é de suma importância para a indústria automobilística.

## Materiais e Métodos

A composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 409 e do arame tubular 430 Ti encontram-se ilustradas nas tabelas a seguir:

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 409

Composição Química (%) Aço Inoxidável AISI 409								
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Ti	%Mo
0,008	0,48	0,27	0,026	0,0004	10,81	0,28	0,23	0,025

Tabela 2. Composição química do arame tubular 430 Ti

Composição Química Arame Tubular 430 Ti									
%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Ti
0,021	0,750	0,740	0,001	0,021	0,250	17,740	0,030	0,080	0,380

A seguir, encontram-se os parâmetros de soldagem impostos na confecção das amostras de soldagem manual e automática:

Tabela 3. Parâmetros de soldagem no aço AISI 409

Parâmetros de soldagem manual no aço AISI 409					
	Velocidade do arame (m.min <sup>-1</sup> )	Tamanho do arco voltaico	Vazão de gás (L.min <sup>-1</sup> )	Ø arame (mm)	Tipo de solda
Soldagem manual	12	-15	10 a 15	1,0/ 430 Ti	Pulsado
Soldagem automática	3 a 7	-22 a -5	10 a 15	1,0/ 430 Ti	Pulsado

O material de teste foi fornecido pela GM. Para as análises metalográfica e de corrosão, foi feita a soldagem de 2 juntas, compostas de aço AISI 409, utilizando-se o arame tubular 430Ti. Foram-se adotados parâmetros de soldagem em duas condições: soldagem manual (velocidade do arame = 12 m.min<sup>-1</sup> e tamanho do arco voltaico = -15) e soldagem automática (velocidade do arame = 3 a 7 m.min<sup>-1</sup> e tamanho do arco voltaico = -22 a -5), para que, variando apenas a velocidade de soldagem e o tamanho do arco voltaico, fosse possível a análise da influência do tempo de soldagem perante a microestrutura do aço inoxidável adotado.

Para a avaliação da suscetibilidade a corrosão intergranular nas juntas soldadas, foram cortadas quatro amostras de dimensões 1,0 cm x 1,0 cm, as quais foram submetidas ao ataque de ácido oxálico (10%), conforme a norma ASTM A763.

Para a análise metalográfica, foram cortadas quatro amostras de 3,0 cm x 0,5 cm, sendo submetidas, com base na norma E3, a três ataques químicos distintos: vilela (solução composta por 5ml HCl, 1g ácido pícrico, 100ml de etanol (95%)), hidróxido de sódio (solução composta por 85g NaOH e 50ml de água) e persulfato de amônia(solução composta por 10g de persulfato de amônia e 100ml de água), seguidos por avaliação em microscopia ótica, para a determinação dos contornos de grão, das diferentes fases na microestrutura e os tipos de precipitados que ocorrem na matriz ferrítica.

Para a realização do estudo da resistência mecânica nas zonas termicamente afetadas pelas soldas, o material será submetido à ensaios de tração considerando a norma ASTM A370. O dimensionamento do corpo de prova, assim como o polimento da superfície, deverão seguir os procedimentos impostos pela norma anteriormente exposta.

## Resultados e Discussões

Os resultados dos ensaios metalográficos podem ser observados nas figuras 1 a 4.



Figura 1. AISI 409 soldagem automática, ataque Vilela: a) região fora da solda, aumento 200 x; b) região solda, aumento 50x

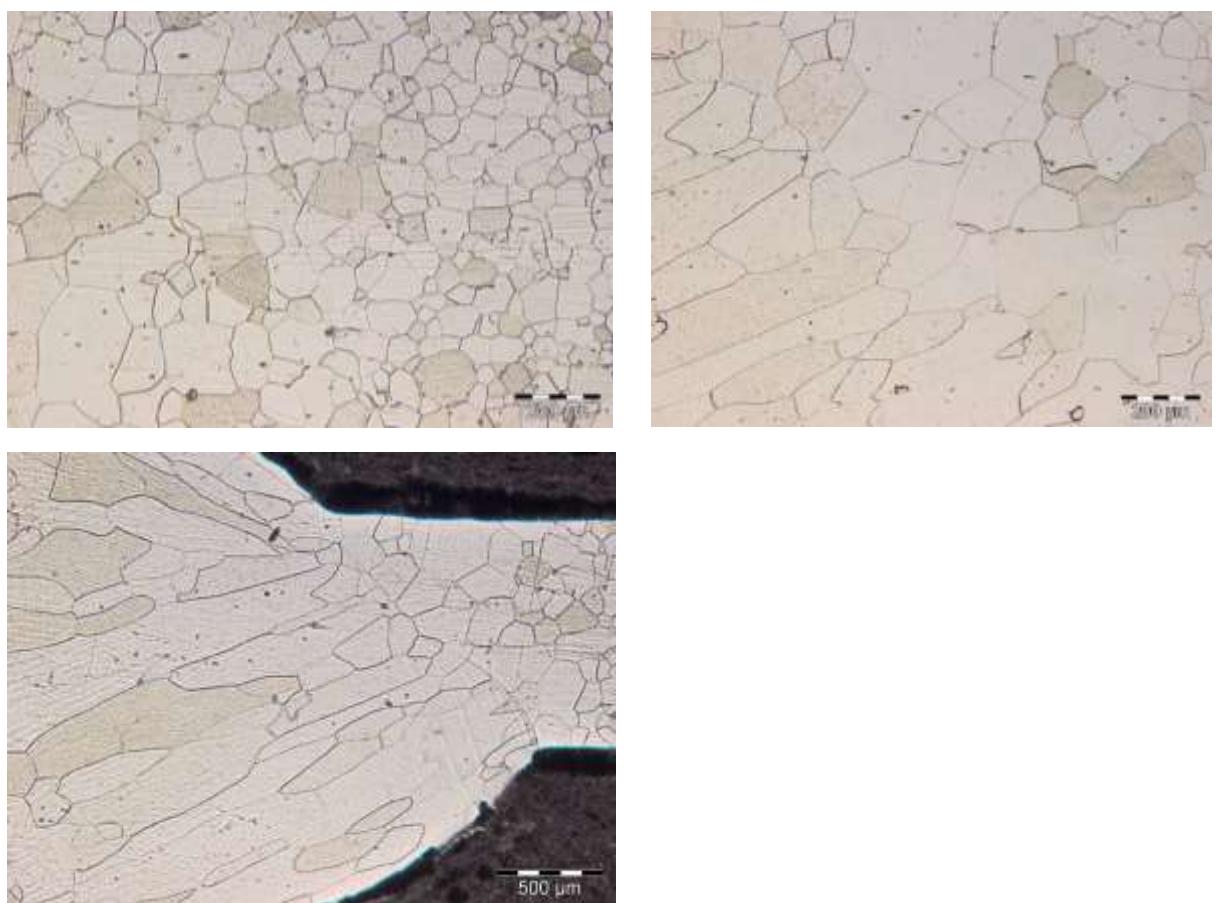


Figura 2. AISI 409 soldagem manual, ataque Vilela: a) região fora da solda, aumento 100 x; b) região solda, aumento 100 x; c) região de transição, aumento 50 x

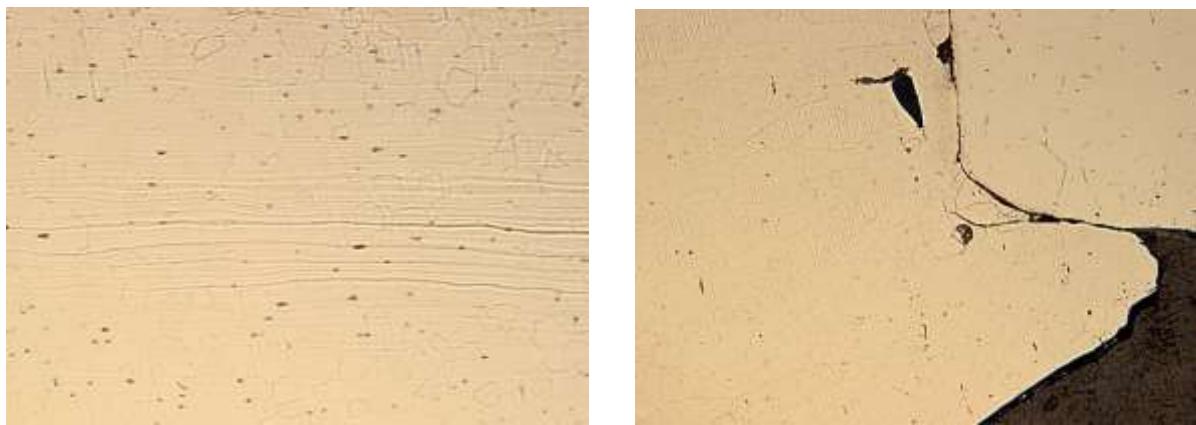


Figura 3. AISI 409 soldagem automática, ataque persulfato de amônia: a) região fora da solda, aumento 200 x; b) região solda, aumento 100x

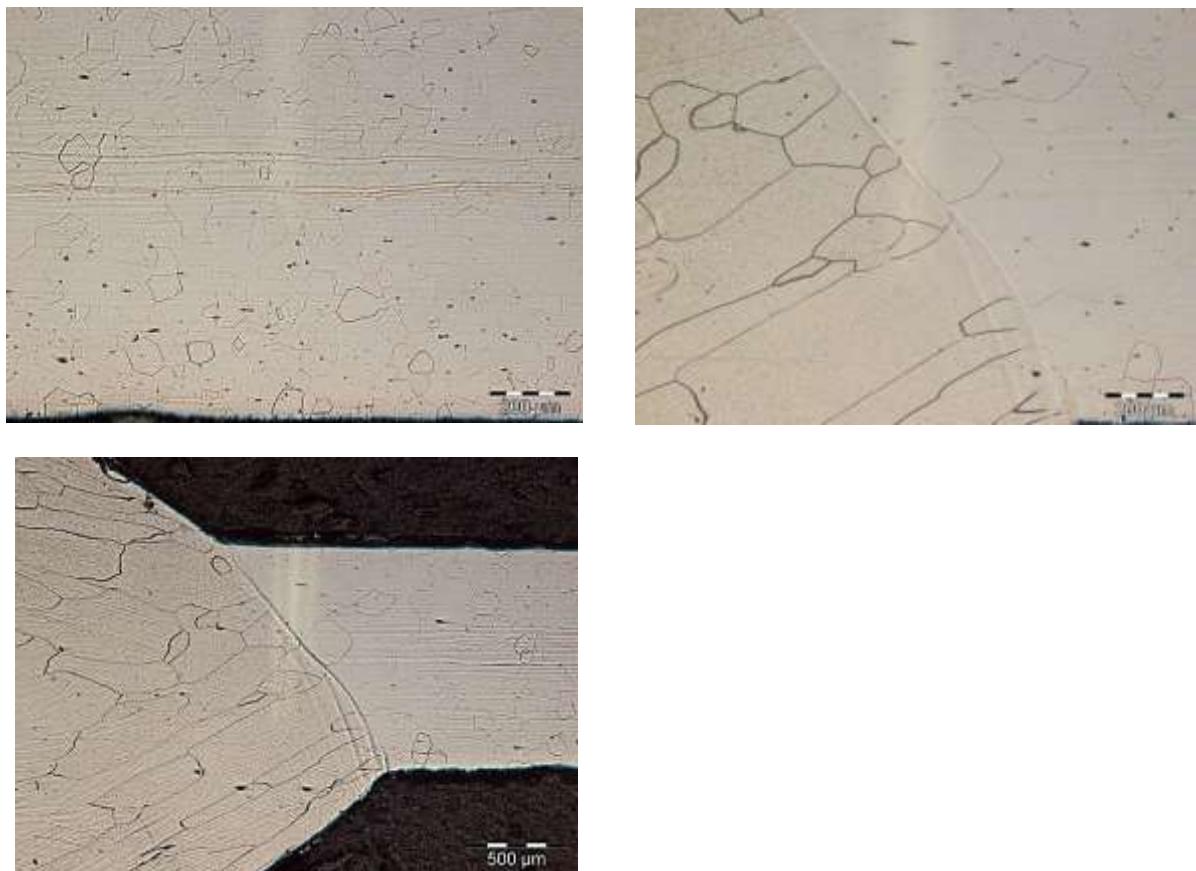


Figura 4. AISI 409 soldagem manual, ataque persulfato de amônia: a) região fora da solda 100 x; b) região solda 200 x; c) região de transição 100 x

Ao analisar-se metalograficamente os corpos de prova em questão, observou-se que, na zona fundida, os grãos da amostra AISI 409 de soldagem automática (figuras 1 e 3) se apresentaram maiores do que os da amostra AISI 409 de soldagem manual (figuras 2 e 4). Também verificou-se a presença de precipitados nos grãos de ferrita (figuras 2.a), 3.a), 4)). O ataque com persulfato de amônia revela, preferencialmente, carbonetos e nitretos.

Os resultados dos ensaios de suscetibilidade a corrosão intergranular podem ser observados nas figuras observados nas figuras 5 e 6.

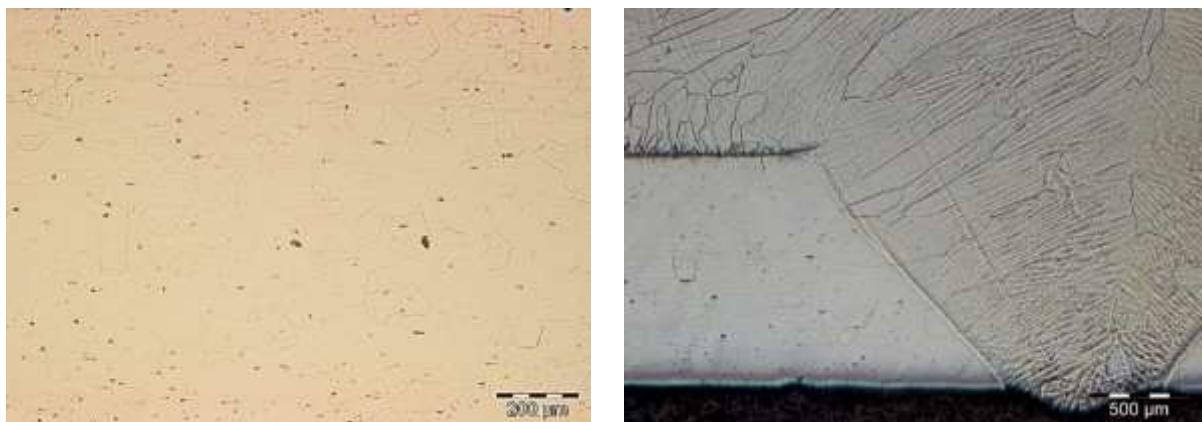


Figura 5. AISI 409 soldagem automática, ácido oxálico: a) região fora da solda, aumento 100 x; b) região solda, aumento 50 x

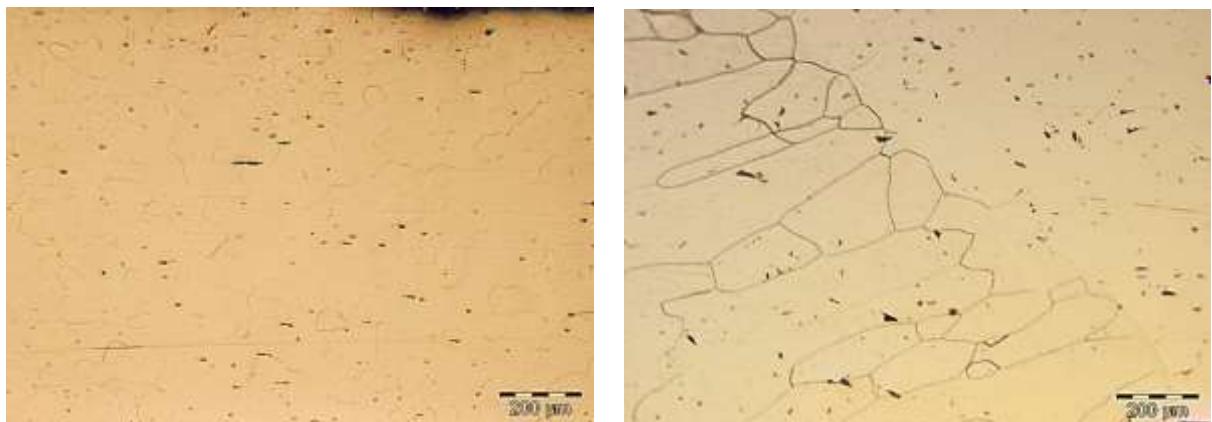


Figura 7. AISI 409 soldagem manual, ácido oxálico: a) região fora da solda 100 x; b) região da solda 100 x

Observou-se a ocorrência de valas nos contornos de grão na zona termicamente afetada e na zona fundida (figuras 6.b) e 7.b)), em ambas as condições de soldagem, caracterizando as amostras como susceptíveis a corrosão intergranular.

Os resultados dos ensaios de tração, são apresentados na tabela 4:

Tabela 4. Limite de resistência e alongamento das amostras AISI 409 obtidos no ensaio de tração

Amostra	Limite de resistência (Mpa)	Alongamento (%)
409 - soldagem manual	398,27	28,27
409 - soldagem manual	398,46	28,35
409 - soldagem automática	200,38	4,21
409 - soldagem automática	194,29	3,37

Pode-se observar que o limite de resistência e o alongamento das amostras 409 de soldagem manual foram maiores do que os das amostras 409 de soldagem automática.

## Conclusão

A partir das constatações anteriores, conclui-se que quanto maior o tempo empregado na soldagem, maior o tempo de exposição à alta temperatura da zona termicamente afetada (ZTA), propiciando grão com maiores dimensões e assim, uma diminuição da resistência mecânica do material.

Por meio dos dados coletados dos ensaios de corrosão, constatou-se, nitidamente, a ocorrência do fenômeno de sensitização na ZTA, o que comprova a influência da alta temperatura de sensitização do aço inoxidável ferrítico AISI 409 na precipitação de carbonetos e nitretos de cromo, elementos apassivadores.

Os ensaios de tração evidenciaram a influência da velocidade de soldagem em relação ao limite de resistência e à ductilidade das juntas soldadas. As amostras de soldagem automática, devido à menor velocidade do processo, apresentaram menor resistência mecânica e ductilidade, uma vez que tiveram as zonas termicamente afetada e fundida mais tempo expostas a elevadas temperaturas, suscetibilizando o crescimento grosso de grão e a precipitação de carbonetos e nitretos na estrutura ferrítica, principalmente nos contornos de grão.

## **Referências Bibliográficas**

- A.K. Lakshminarayanan; V. Balasubramanian. Materials and design. Assessment of sensitization resistance of AISI 409M grade ferritic stainless steel joints using Modified Strauss test. Centre for Materials Joining and Research (CEMAJOR), Department of Manufacturing Engineering, Annamalai University, Annamalai Nagar 608 002, TamilNadu, India, 2012.
- Bracarense, A. Q. Processo de soldagem - Gás Metal Arc Welding GMAW. Apostila curso Processos de Soldagem - Mestrado UFMG, 2005.
- Cunto, Julio Cesar. Estuda da resistência à corrosão de aços inoxidáveis para o uso na parte fria dos sistemas de exaustão de veículos. Ipen, 2005.
- DURAND-CHARRE, M. Microstructure of steels and cast irons. Berlin: Springer, 2004. 417p.
- Filho, Demostenes Ferreira. Influência do gás de proteção na soldabilidade do aço inoxidável ferrítico aplicado a sistemas de exaustores automotivos. UFU (Universidade Federal de Uberlândia), Faculdade de engenharia mecânica, Tese apresentada ao Programa de pós-graduação em engenharia mecânica como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, 2010.
- 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.
- LOPES, W. Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 186p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- Mei, P. R.; Silva, A. L. C. Aços e ligas especiais. 2 ed. Sumaré, SP: Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988.
- Modenesi, P. J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. Coleção Tecnologia da Soldagem, v.1. Senai, SP. 2001.
- Modenesi, P. J.; Marques, P. V.. Introdução aos Processos de Soldagem. UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), 2006.
- Monteiro, F. T. Comportamento mecânico e estudo metalográfico do aço inoxidável hiper duplex SAF 3207HD tratado termicamente. CEUN-IMT, 2013.
- Pires, R. F.; Alonso-Falleiros, N. Corrosão intergranular de aço inoxidável ferrítico: Avaliação através do método eletroquímico. Produção em Iniciação Científica da Epusp, 2002.
- Sales, Valmir. Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento. Cefet - MG, 2013.