



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA ESTRUTURA E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS (ABNT 430 E
ABNT 409) SOLDADOS COM METAL DE ADIÇÃO AUSTENÍTICO -
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA”**

Ludimila Guimarães

Ouro Preto, Maio de 2021

Ludimila Guimarães

**Avaliação comparativa da estrutura e propriedades mecânicas de aços inoxidáveis
ferríticos ABNT 430 e ABNT 409 soldados com metal de adição austenítico -
Revisão bibliográfica**

Monografia de Graduação apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. D.Sc. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto, Maio de 2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963a Guimarães, Ludimila.

Avaliação comparativa da estrutura e propriedades mecânicas de aços inoxidáveis ferríticos ABNT 430 e ABNT 409 soldados com metal de adição austenítico. [manuscrito] / Ludimila Guimarães. - 2021.
59 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Soldagem - Junta - Estabilização. 2. Aço inoxidável. 3. Soldabilidade. I. Porcaro, Rodrigo Rangel. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.791.05

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Ao segundo dia do mês de junho de 2021, às 08 horas, por meio da plataforma de videoconferência Google Meet, foi realizada a defesa de monografia pelo(a) aluno(a) **Ludimila Guimarães**, sendo a comissão examinadora constituída pelo Prof. DSc. Rodrigo Rangel Porcaro (Orientador), pelo MSc. Tainan Ferreira Muniz e pelo Eng. Salvatore Giuliano Peixoto Tropia de Abreu. O(A) aluno(a) apresentou a monografia intitulada: “*Avaliação Comparativa da Estrutura e Propriedades Mecânicas de Aços Inoxidáveis Ferríticos (ABNT 430 e ABNT 409) Soldados com Metal de Adição Austenítico - Revisão Bibliográfica*”. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao(à) aluno(a) um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo(a) aluno(a).

Ouro Preto, 02 de junho de 2021.

Prof. DSc. Rodrigo Rangel Porcaro
Orientador – Presidente

MSc. Tainan Ferreria Muniz
Membro

Salvatore Giuliano Peixoto Tropia de Abreu
Membro

Ludimila Guimarães
Aluno(a)

RESUMO

A soldagem é um dos processos mais requisitados em tempos de crescimento industrial, devido à necessidade de junção de componentes. Sendo o setor automotivo um dos maiores consumidores de aço, mais especificamente os aços inoxidáveis ferríticos aplicados em sistema de exaustão dos automóveis e caminhões. Entretanto, para esse tipo de aço é requerido cautela para evitar problemas quando soldado como Fragilidade a 475°C, Fase Sigma, Precipitação de Carbonetos, Trincas Térmicas, Corrosão Intergranular, Crescimento de Grão, Formação de Martensita e a Sensitização para que não afete o desempenho do material. Neste contexto, foi feito um estudo comparativo sobre os efeitos da soldagem em dois aços inoxidáveis ferríticos: ABNT 430 (não estabilizado) e ABNT 409 (estabilizado). Foram estudados diversos livros e artigos para avaliar os resultados de processos de soldagem e possíveis metais de adição para melhor desempenho de juntas soldadas dos aços. A partir dos resultados apresentados por pesquisadores diversos, fica claro que o aço não estabilizado (AISI 430) tende a apresentar martensita na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF). Além disso, a não estabilização também pode levar à formação de carbonetos de cromo e ao desenvolvimento de corrosão intergranular (sensitização). Por outro lado, o aço estabilizado com a adição de titânio (AISI 409) apresenta melhor soldabilidade, sobretudo em relação ao fenômeno da sensitização. Outro ponto que merece destaque é que a redução dos teores de elementos intersticiais também tem sido utilizada como mecanismo de melhoria de soldabilidade dos aços ferríticos. O uso de processos de menor aporte térmico também contribui para um melhor desempenho das soldas, uma vez que há menor tempo para difusão de elementos, formação de martensita e precipitação de carbonetos.

Nos casos em que a soldagem exige uso de metal de adição, os estudos demonstram que a melhor opção é a utilização de aços inoxidáveis austeníticos, que dará origem a uma ZF mais refinada e pode-se minimizar os eventuais problemas com base em diagramas de constituição (prevendo a microestrutura de cordões de solda e prevendo possíveis problemas de soldagem de acordo com aço e metal de adição usado). Por fim, pode-se concluir que os aços inoxidáveis ferríticos podem ser soldados de maneira satisfatória a partir da seleção adequada de materiais e/ou controle dos parâmetros do processo aplicado.

Palavras-chaves: Estabilização; ABNT 430; ABNT 409; Soldagem.

ABSTRACT

Welding is one of the most requested processes in times of industrial growth, due to the need for joining components. As the automotive sector is one of the largest consumers of steel, more specifically ferritic stainless steels applied to the exhaust system of automobiles and trucks. However, for this type of steel, caution is required to avoid problems once welded such as Fragility at 475 ° C, Sigma Phase, Carbide Precipitation, Thermal Cracks, Intergranular Corrosion, Grain Growth, Martensite Formation and Sensitization so it won't affect the material performance. In this context, a comparative study was carried out on the effects of welding on two kinds of ferritic stainless steel: ABNT 430 (unstabilized) and ABNT 409 (stabilized). Several books and articles were consulted to evaluate the results of welding processes and possible addition metals for better performance of the steel welded joints. From the results achieved by several researchers, it is clear that non-stabilized steel (AISI 430) usually presents martensite in the thermally affected zone (ZTA) and in the molten zone (ZF). In addition, non-stabilization can also lead to the formation of chromium carbides and the development of intergranular corrosion (sensitization). Contrariwise, steel stabilized with the addition of titanium (AISI 409) has better weldability, especially in relation to the phenomenon of sensitization. It is worth mentioning that the reduction in the levels of interstitial elements has been used as a mechanism for improving the weldability of ferritic steels. The use of processes with lower thermal input also contributes to a better performance of the welds, since there is less time for diffusion of elements, formation of martensite and carbide precipitation.

In cases where welding requires filler metal, studies show that the best option is the use of austenitic stainless steels, which will result into a more refined ZF and can minimize any problems based on constitution diagrams (prefiguring the microstructure of weld beads and possible welding problems in according with the steel and filler used). Finally, it can be concluded that ferritic stainless steels can be welded satisfactorily from the proper selection of materials and / or control of the parameters of the applied process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4. 1- (a) Um tubo do sistema de exaustão para um automóvel, feito com aço inoxidável ferrítico 409L. (b) A microestrutura ferrítica na condição laminada a quente (AHN et al, 2012).	17
Figura 4. 2 - Curva tensão (σ) – deformação plástica (ϵ_p), reais, trecho plástico, para obtenção do coeficiente de resistência (H) e o expoente de encruamento (n), obtida com os resultados do ensaio de tração (VIEIRA e SALERNO, 2015).	18
Figura 4. 3 - Representação esquemática do processo TIG – região do arco (MATHERS, 2002).	21
Figura 4. 4 - Representação esquemática do processo MIG/MAG (TALKINGTON, 1998).	21
Figura 4. 5 – Trincas secundárias transgranulares e intergranulares de CST na ZTA de aço AISI409 H= 400J/mm, Ataque: eletrolítico, tempo de ataque 2,5 min (SILVA, 2011).	22
Figura 4. 6 a e b – Corrosão intergranular em aço AISI 409 (AGARELLI e GIAMPIETRI, 2017).....	23
Figura 4. 7 - Diagrama de Schaeffler para soldagem do aço AISI 409 com adição de arame tubular ABNT ER308LSi (ACESITA, 2015).....	24
Figura 4. 8 - Diagrama de fase conforme fração atômica de Cromo (GROBNER, 1973).	25
Figura 4. 9 - Microestrutura do (a) metal de base e da (b) zona fundida.	27
Figura 4. 10 – Comportamento da microdureza do aço AISI409 soldado com metal de adição AWSE316LT1-4 com variação do aporte térmico (SILVA, 2011).	28
Figura 4. 11 - Diagrama constitucional de Balmforth para aços inoxidáveis ferrítico-martensíticos, com o posicionamento calculado do aço ABNT 430 e ABNT 409 (BALMFORTH e LIPPOLD, 2000).	29
Figura 4. 12 - Comparação entre curvas TTS dos aços AISI 304 e AISI 430 tratados a 1066°C (HENTHORNE, 1972).....	31
Figura 4. 13 - Diagrama de Schaeffler para prever o teor de ferrita de solda e o modo de solidificação (SCHAEFFLER,1949 apud KOU, 2003).....	32
Figura 4. 14 - Precipitação de carbonetos de cromo (GIRALDO, 2006).	33
Figura 4. 15 - Trinca por corrosão sob tensão intergranular na ZTA de aço inoxidável tipo ABNT 304 (ASM; 1987).....	35

Figura 4. 16 - Aço ABNT 410L com metal de adição ABNT 308LSi (CANDIDO, 2014).....	39
Figura 4. 17 - Aço ABNT 410L com metal de adição ABNT 430 (CANDIDO,2014).	40
Figura 4. 18 - Micrografias óptica do aços AISI 430, AISI 430Ti, AISI 430Nb e AISI 430 (Ti + Nb) respectivamente soldadas por TIG mecanizado, ataque eletrolítico (GONÇALVES, 2018).	41
Figura 4. 19 - Microestrutura do aço AISI-409 soldado com H=805J/mm por TIG (SILVA, 2011).....	42

LISTA DE TABELA

Tabela 4. 1 - As cinco principais famílias de aço inoxidáveis. (MOIRON, 2008).....	16
Tabela 4. 2 - Composição química nominal dos principais aços ferríticos. (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; SILVA, 2011).	19
Tabela 4. 3 - Comparativo do melhor método de soldagem para cada material (KOU, 2003).....	20
Tabela 4. 4 – Valores de cromo e níquel equivalente e previsão de quantidade de ferrita segundo as relações de Balmforth para aço ABNT 430 e ABNT 409 estudado (TAVARES, 2017).	29
Tabela 4. 5 - Requisitos de Composição Química (ACESITA, 2006)	38

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CST - Corrosão sob Tensão

EBW - *Electron Beam Welding* - Soldagem por feixe de elétrons

G – Grande espessura à ser soldada a cima de 19 mm

GMAW – *Gas-metal arc welding* – Soldagem a Arco de metal a gás

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding* - Soldagem por arco de gás tungstênio

HV – Dureza Vickers

I – Intermediária espessura à ser soldada entre 3 – 6 mm

LBW - *Laser Beam Welding* – Soldagem por feixe de laser

M – Média espessura à ser soldada entre 6 – 19 mm

MB – Metal Base

MIG – *Metal Inert Gas* – Gás Inerte Metal

OFW - *Oxy Fuel Gas Welding* - Soldagem por Oxigás

P – Pequena espessura à ser soldada até 3 mm

PAW - *Plasma Arc Welding* - Soldagem a arco de plasma

SAW - *Submerged Arc Welding* - Soldagem por Arco Submerso

SMAW - *Shielded Metal Arc Welding* - Soldagem com eletrodo revestido

TIG – *Tungsten Inert Gas* - Gás Inerte Tungstênio

UCS - *Units of Crack Susceptibility* - Unidades de Suscetibilidade a Trincas

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo Geral	12
3 DESENVOLVIMENTO.....	13
3.1 Tipo de estudo	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 Aços Inoxidáveis	15
4.1.1 Aços inoxidáveis ferríticos	17
4.2 Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos	20
4.3 Problemas na Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Ferríticos.....	23
4.3.1 Fenômeno de fragilidade a 475°C	24
4.3.2 Formação de martensita nos contornos de grão.....	26
4.3.3 Precipitação de carbonetos	29
4.3.4 Trincas de solidificação	36
4.3.5 Corrosão intergranular.....	34
4.4 Seleção do Metal de Adição	37
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

Com um crescimento de 15,1% no ano de 2018, segundo a revista Veja, o maior em 11 anos, devido à redução de impostos, a venda de carros novos impulsionou o setor de veículos no Brasil (ROMANI, 2019). Isto levou a maior demanda de componentes e, por consequência, de matéria-prima. Isso porque, grande parte da matéria-prima produzida mundialmente serve como insumos para o abastecimento da indústria automobilística (PORTILLO, 2019). Por consequência, o aço inoxidável ferrítico, que é o material mais adequado para o sistema de exaustão, tem seu consumo privilegiado.

Os aços inoxidáveis são aços ligados com, no mínimo 11% de cromo (BRESCIANI FILHO 1991; COUTINHO, 1992; PADILHA e GUEDES, 1994; SMITH, 1999; LIPPOLD e KOTECKI, 2005 apud SILVA, 2011). Esse elemento é responsável pela elevada resistência à oxidação nos materiais, que reflete no emprego deste aço em aplicações que requeiram resistência ao calor e à fluência, como nos sistemas de exaustão de veículos.

Os aços inoxidáveis, por muito tempo, apresentaram propriedades desfavoráveis à soldabilidade, porém, depois de muita pesquisa, foi provado que não é uma verdade absoluta, graças ao desenvolvimento de técnicas que reverteram este quadro negativo (SILVA, 2011). As pesquisas se iniciaram com Schaeffler visando a relação quantitativa entre a composição e o teor de ferrita do metal de solda. Assim diagramas quantitativos foram criados para facilitar o trabalho de soldagem, como é o caso de previsão de composição química que relaciona a composição e o teor de ferrita em metais de solda usando Diagramas de Constituição (SOLOMON, 1979; KOU e LE, 2003).

A soldagem de aços inoxidáveis requer cuidados a fim de evitar problemas de corrosão que afetam as propriedades do material. Portanto a utilização de procedimentos inadequados de soldagem pode comprometer de forma definitiva algumas características do material. Esse fato é causa alterações significativas no metal de base, principalmente no comportamento mecânico e no que concerne a sua resistência a corrosão (BARBOSA et al, 1995; SILVA, 2011).

A resistência à corrosão em aços inoxidáveis ferríticos pode ser reduzida drasticamente

com a Soldagem. Esse material fica susceptível à variação de propriedades devido à corrosão intergranular, *pitting* e trincamento transgranular por corrosão sob tensão (CST). Devido à ausência de Níquel, os aços inoxidáveis ferríticos são, geralmente, resistentes ao trincamento por corrosão sob tensão. Assim, são submetidos promissora e aos aços inoxidáveis austeníticos em ambientes contendo cloreto, uma vez que os austeníticos têm microestrutura sensível à CST (LIPPOLD e KOTECKI, 2005).

Aços inoxidáveis podem estar envolvidos em juntas soldadas com diferentes graus de dissimilaridade. Cada situação requer alguma análise a ser realizada pelo responsável pela integridade da junta. É especialmente importante fazer uma seleção apropriada de metal de adição para produzir uma junta soldada que proporcione desempenho em serviço satisfatório (LIPPOLD e KOTECKI, 2005).

Para os aços inoxidáveis ferríticos, os teores de carbono e nitrogênio variam de 0,010% a 0,035% em massa, podendo apresentar elementos estabilizadores como titânio e/ou nióbio que são algumas vezes adicionados para aprisionar algum elemento intersticial livre, em forma de carbonetos. Esses são os aços estabilizados, que têm sido utilizados em substituição ao ferro fundido e ao aço galvanizado no coletor do sistema de exaustão dos motores a combustão. Esta substituição reflete em um aumento na eficiência dos motores dos automóveis e caminhões, por meio da redução do peso (FUJITA et al. 1996; ARCELLOR MITTAL, 2006; SILVA, 2011). Estes aços possuem ótima resistência à corrosão e oxidação, aliada à boa soldabilidade e boa estampabilidade, devido à sua composição química (FORONI et al. 2006; SILVA, 2011).

Porém, estudos mostram que a Zona Termicamente Afetada (ZTA) das juntas soldadas do aço ferrítico pode sofrer uma significativa perda de tenacidade devido ao excessivo crescimento de grão nesta região. Como consequência ocorre aumento do nível de dureza localizado, e principalmente pela precipitação de carbonetos ou de fases intermetálicas após a permanência em elevadas temperaturas. Para minimizar esses efeitos, foi descoberto o bom comportamento da solda quando feita com metal de adição austenítico (MODENESI 2001; SILVA, 2011).

A soldagem a arco gás-metal (GMAW) é um processo que funde e une metais por aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um fio de enchimento alimentado

continuamente (eletrodo) e o metal base da peça a ser soldada. A proteção do arco e da poça fundida é frequentemente obtida usando gases inertes, como argônio e hélio, e é por isso que o GMAW também é chamado de gás metal-inerte (processo MIG de soldagem). Um arco elétrico estável suaviza a transferência de metal líquido, com baixa perda de material por projeção de respingos e boa penetração de solda no metal base (MOIRON, 2008).

O foco da indústria é sempre procurar novos meios de reduzir custo e também peso do veículo, para obter menores consumos de combustível. Tudo isso é conseguido com desenvolvimento em pesquisas de materiais, razão pela qual foi escolhido este tema para o trabalho que será desenvolvido.

Neste contexto, O foco agora será revisar artigos em relação à soldagem ABNT 430 (não estabilizado) e ABNT 409 (estabilizado) e discutir o que tem sido feito, para depois concluir sobre o comportamento destes materiais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem o objetivo de fazer uma revisão bibliográfica sobre a soldabilidade de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados e não estabilizados submetidos à soldagem por fusão.

2.2 Objetivo Específicos

1. Definir as variáveis de soldagem para chapas de aços inoxidáveis ferríticos ABNT 430 e ABNT 409 a partir do processo GMAW com adição de consumíveis;
2. Averiguar diferentes estudos sobre a microestrutura dos materiais em microscópio óptico, e microscópio eletrônico de varredura (MEV);
3. Conhecer resultados de ensaios de tração já feitos nos metais base e nas juntas soldadas;
4. Aprofundar em perfis de microdureza Vickers nesse tipo de juntas soldadas;
5. Assimilar possíveis problemas causados pela solda aos materiais em foco;
6. Pesquisar a susceptibilidade à corrosão intergranular a partir da prática W da Norma ASTM A763 (2015);
7. Compreender a busca de novas fontes de junção desses aços inoxidáveis;
8. Analisar cenário global da indústria e os desafios da soldagem.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Tipo de estudo

A monografia desenvolvida seguiu regras estipuladas para estudo exploratório, por meio de uma pesquisa bibliográfica desenvolvida conforme materiais já elaborados como livros, artigos científicos e dissertações de mestrado (GIL, 2008).

1ª Etapa – Fontes

A seguir estão descritas as fontes que fornecerem as respostas adequadas à solução do problema proposto:

- a) Foram utilizados 24 livros, divididos em soldagem, em aço inoxidável, em aço inoxidável ferrítico, em corrosão, em tratamento térmico e em microestrutura que acrescentaram na abordagem em idiomas: 15 livros em ingleses e 9 livros em portugueses disponíveis na literatura, publicados no período de 1987 a 2016.
- b) Foram utilizados 48 artigos científicos sobre o conteúdo foram acessados pelo *Google Scholar*, publicados nos últimos 37 anos (1982 a 2019). O foco das pesquisas foram os seguintes assuntos: sensibilização em aço inoxidáveis ferríticos, formação de martensita, precipitação da fase sigma, materiais metálicos, aço ABNT 409 e ciclo térmico. 31 artigos em ingleses e 17 artigos em portugueses.
- c) Foram utilizadas 4 monografias disponíveis na biblioteca da: Escola de Minas de Ouro Preto (UFOP), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), publicados em 2008 a 2017.
- d) Oito dissertações de mestrado foram consultadas sobre os assuntos sensibilização e corrosão sob tensão em aços inoxidáveis ferríticos, publicadas entre 1972 a 2019, disponíveis em Google Scholar.

2ª Etapa – Coleta de Dados

A coleta de dados teve a seguinte premissa:

- a) Leitura Exploratória de todo o material selecionado (leitura rápida que objetiva

- verificar se a obra consultada é de interesse para o trabalho);
- b) Leitura Seletiva (leitura mais aprofundada das partes que realmente interessam);
 - c) Registro das informações extraídas das fontes em instrumento específico (autores, ano, método, resultados e conclusões).

3ª Etapa – Análise e Interpretação dos Resultados

Nesta Etapa foi realizada uma leitura analítica com a finalidade de ordenar e sumarizar as informações contidas nas fontes, de forma que estas possibilitassem a obtenção de respostas ao problema da pesquisa.

4ª Etapa – Discussão dos Resultados

Categorias que emergiram da etapa anterior foram analisadas e discutidas a partir do referencial teórico relativo à temática do estudo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A finalidade dessa Revisão Bibliográfica é embasar tecnicamente o trabalho com informações sobre aspectos relevantes da soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos não estabilizados e estabilizados.

4.1 Aços Inoxidáveis

Uma breve história do desenvolvimento dos aços inoxidáveis segundo Lippold e Kotecki (2005):

- 1821: Experimentos de Frenchman Berthier com adições de Cr no aço.
1897: Desenvolvimentos tecnológicos de German Goldschmidt na produção de ligas de ferro cromo baixo carbono.
- 1904 – 1909: Ligas de teor de cromo entre 13% e 17% foram produzidas na França e na Alemanha.
- 1913: Fundições Englishman Breatly começaram a comercializar ligas com 0,24% C; 0,2% Si; 0,44% Mn; 12,86% Cr.
- 1916: Primeira patente americana para 9% a 16% de Cr em aços inoxidáveis com menos que 0,7% de C.

A corrosão é indesejável para leigos por degradar o material, entretanto a indústria siderúrgica toma desse processo para usar em prol de novos materiais. Dessa forma, um aço é conhecido como inoxidável se, em ar ambiente, está naturalmente recoberto com uma camada de óxido de cromo impermeável devido a agentes atmosféricos no ambiente (GENTIL, 2007).

A presença de cromo aumenta a resistência à corrosão do aço, formando uma película de óxido de cromo muito fina, estável, regenerativa e passiva na superfície. O termo “passivo” significa que a reação do metal com seus arredores, por exemplo com o oxigênio atmosférico, forma uma camada superficial de proteção que é uniforme e retarda a reação posterior. Se o filme for danificado, o cromo do aço reage novamente para reformar a camada protetora, uma reação que leva apenas alguns segundos. A composição real do filme de óxido é mais bem representada como $Cr_2 - xFe_xO_3$ onde x é quase zero para ligas ricas em cromo, como pode ser conferida cada classificação na Tabela 4.1. O filme de óxido frequentemente é capaz de se adaptar ainda mais ao ambiente no qual o aço é colocado. É por isso que os aços inoxidáveis cromo-níquel são

agora os materiais mais usados em uma ampla gama de ambientes corrosivos, tanto em ambientes como em temperaturas elevadas, em engenharia, bem como em construções artísticas (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006).

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco grupos principais de acordo com sua composição e estrutura metalúrgica (Tabela 4.1). Estruturas de transição ou particularidades analíticas dão origem a subgrupos colocados entre os grupos principais ou adicionados a eles. Especificamente, estes tendem a serem os aços martensita-ferríticos e aços martensíticos ou austeníticos com endurecimento por precipitação (MOIRON, 2008).

Tabela 4. 1 - As cinco principais famílias de aço inoxidáveis. (MOIRON, 2008)

Família	Elementos Principais	Elementos de Adição	Possível estabilização
1- Aço Martensítico	Cr 10,5% – 17% C > 0,1%	Mo – V	
2- Aço Ferrítico	Cr 10,5% – 29%	Mo – Al	Ti – Nb – (Zn)
3- Aço Austenítico	Cr 16% – 18% Ni 8% – 13%	Mo – Cu Mn – N	Ti – Nb
4- Aço Refratário (austenítico)	Cr 20% – 25% Ni 10% – 20%	Si	
5- Aço Austenítico – Ferrítico (duplex)	Cr 20% – 25% Ni 4% – 7% N 0,1% – 0,3%	Mo – Cu	

4.1.1 Aços inoxidáveis ferríticos

O aço inoxidável ferrítico é classificado conforme o predomínio metalúrgico da fase ferrita. Esses aços possuem resistência à corrosão, a pites de corrosão sob tensão e a trincas por corrosão (particularmente em ambientes contendo cloretos). As aplicações desse aço são feitas quando se prioriza a resistência à corrosão, ao invés de propriedades mecânicas sendo a resistência, a tenacidade e a ductilidade. Ligas de Baixo Cromo (10,5% a 12,5% de Cr) são usadas em sistema de exaustão em automóveis (Figura 4.1), onde a resistência à corrosão, geralmente, é superior aos aços carbono. As Ligas de Médio a Alto Cromo são mais usados em ambientes mais severos de oxidação (MOIRON, 2008).



Figura 4. 1- (a) Um tubo do sistema de exaustão para um automóvel, feito com aço inoxidável ferrítico 409L. (b) A microestrutura ferrítica na condição laminada a quente (AHN et al, 2012).

As aplicações do ABNT 430 se restringem àquelas que não precisam de soldagem, ou quando as soldas não são consideradas operações de alta responsabilidade. Por exemplo, uma pia de cozinha pode ser soldada com a mesa, mas não se pode construir um tanque para estocar ácido nítrico (mesmo que o ABNT 430 resista muito bem a este ácido). Os ferríticos estabilizados, como o ABNT 409 têm uso quase que exclusivo na indústria automobilística, no sistema de escapamento dos gases de combustão (CARBÓ, 2008).

Os aços inoxidáveis ferríticos são um pouco mais resistentes mecanicamente do que os aços inoxidáveis austeníticos, as tensões de escoamento estando na faixa de 300MPa a 400MPa, mas eles trabalham menos endurecidos, então as resistências à tração são semelhantes, estando entre 500MPa e 600MPa. No entanto, os aços inoxidáveis ferríticos, em geral, não possuem conformabilidade igual às ligas austeníticas devido à menor ductilidade. No entanto, eles são adequados para outros processos de deformação, como trefilação e forjamento a frio (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006).

A liga UNS S43932, é um aço inoxidável ferrítico, e como todos os aços desta categoria possui baixo coeficiente de encruamento, em comparação com os aços inoxidáveis austeníticos (coeficientes de encruamento entre 0,3 e 0,45, em sua maioria) mostrado na Figura 4.2 pelos corpos de provas (CP) desse aço. Portanto praticamente não há aumento da resistência do material devido atuação de uma tensão que cause deformação a frio, logo sua vida em fadiga deve ser menor que a de um aço inoxidável austenítico (VIEIRA e SALERNO, 2015).

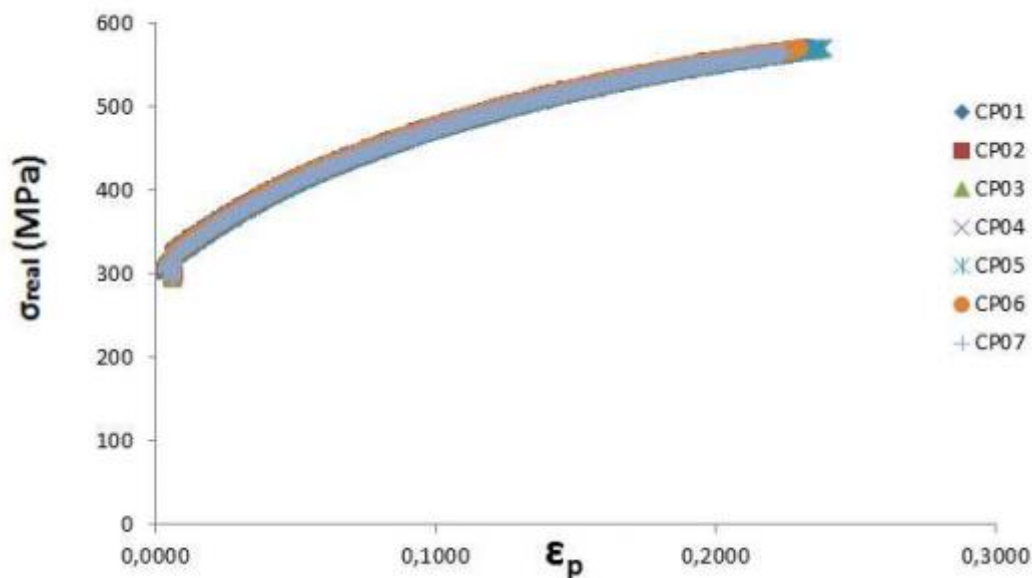


Figura 4. 2 - Curva tensão (σ) – deformação plástica (ϵ_p), reais, trecho plástico, para obtenção do coeficiente de resistência (H) e o expoente de encruamento (n), obtida com os resultados do ensaio de tração (VIEIRA e SALERNO, 2015).

Metalurgicamente, soldas nessas ligas são principalmente ferríticas, embora a martensita possa estar presente sob certas condições e a precipitação de carbonetos e nitretos seja comum. O principal problema de soldabilidade das classes ferríticas é a manutenção da tenacidade e ductilidade adequadas na condição de soldagem (LIPPOLD e KOTECKI, 2005).

A soldagem dos aços ferríticos não estabilizados será possível quando forem tomadas as precauções necessárias, uma vez que a solda pode apresentar baixa ductilidade e tenacidade, além da sensibilidade a corrosão intergranular. Esses problemas de soldagem foram o estímulo para a criação dos aços ferríticos estabilizados, onde há adição de elementos como Nióbio e Titânio (SILVA, 2011).

A Tabela 4.2 apresenta um panorama de composição dos aços inoxidáveis ferríticos conforme a classificação de cada liga.

Tabela 4. 2 - Composição química nominal dos principais aços ferríticos. (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; SILVA, 2011).

Liga	Composição (% em peso máximo)						
	C	Nb	Cr	Mo	N	Ni	Outros
Aços de primeira geração							
AISI- 429	0,12		14-16	-			-
AISI - 430	0,12		16-18	-			-
AISI - 434	0,12		16-18	0,75-1,25			-
AISI - 436	0,12		16-18	0,75-1,25			Nb+Ta=5x%Cmin
AISI - 442	0,20		18-23	-			
AISI- 446	0,20		23-27	-			
Aços de segunda geração							
AISI- 405	0,08		11,5-14,5	-			0,10-0,30Al
AISI-409	0,08		10,5-11,5			-	0,10-0,30 Al
AISI- 441	0,02		18,0			0,3	0,7Nb,0,3Ti
AISI-439	0,07		17,0-19,0			0,5	Ti=0,20+4(C+N)- 1,0 máx
AISI-406	0,06		12,0-14,0			0,5	2,75-4,25Al; 0,6Ti
Aços de terceira geração							
AISI-444	0,025	-	17,5-19,5	1,75-2,00	0,035	1,00	Ti+Nb=[0,20+ 4(C+N)]-0,80
XM-27	0,010	0,05- 0,20	25-27,5	0,75-1,50	0,015	0,50	-
25-4-4	0,025	-	24,5-26,0	3,5-4,5	0,035	3,5-4,5	Ti+Nb=[0,20+ 4(C+N)]-0,80
29-4	0,010	-	28,0-30,0	3,5-4,2	0,020	0,15	-
29-4-2	0,010	-	28,0-30,0	3,5-4,2	0,020	2,0-2,5	-

4.2 Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos

A evolução da indústria requer desenvolvimentos de práticas, visando cada vez mais agilidade, mantendo a qualidade. Dessa forma, o processo de soldagem é um mecanismo de junção crescente no mercado industrial devido às boas propriedades mecânicas e à excelente resistência a corrosão. Assim, para se definir o melhor processo de soldagem para o aço escolhido deve-se ater à Tabela 4.3 divididas pós espessuras do material a ser soldado P (Pequena espessura à ser soldada até 3 mm), I (Intermediária espessura à ser soldada entre 3 – 6 mm), M (Média espessura à ser soldada entre 6 – 19 mm) e G (Grande espessura à ser soldada a cima de 19 mm), sendo o foco desse estudo chapas finas (BARBOSA et al, 1995).

Tabela 4.3 - Comparativo do melhor método de soldagem para cada material (KOU e LE, 2003)

Material	Espessura	SMAW	SAW	GMAW	FCAW	GTAW	PAW	ESW	OFW	EBW	LBW
Aço Carbono	P	X	X	X		X			X	X	X
	I	X	X	X	X	X			X	X	X
	M	X	X	X	X				X	X	X
	G	X	X	X	X			X	X	X	X
Aço baixo carbono	P	X	X	X		X			X	X	X
	I	X	X	X	X	X				X	X
	M	X	X	X	X					X	X
	G	X	X	X	X			X		X	X
Aço inoxidável	P	X	X	X		X	X		X	X	X
	I	X	X	X	X	X	X			X	X
	M	X	X	X	X		X			X	X
	G	X	X	X	X			X		X	X
Ferro Fundido	P	X							X		
	I	X	X	X	X				X		
	M	X	X	X	X				X		
	G	X	X	X	X				X		
Níquel e suas ligas	P	X		X		X	X		X	X	X
	I	X	X	X		X	X			X	X
	M	X	X	X			X			X	X
	G	X		X				X		X	X
Alumínio e suas ligas	P			X		X	X		X	X	X
	I			X		X				X	X
	M			X		X				X	X
	G			X						X	X

A Tabela 4.3 mostra que os aços inoxidáveis em chapa fina, que é o caso em questão, podem ser soldados por SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), SAW (*Submerged Arc Welding*), PAW (*Plasma Arc Welding*), OFW (*Oxy Fuel Gas Welding*), EBW (*Electron Beam Welding*) LBW (*Laser Beam Welding*). Os processos de solda utilizados variam de acordo com o modelo do veículo e seus projetos de produção, mas os mais usados são TIG (*Tungsten Inert Gas*), MIG e MAG (GONÇALVES et al, 2014).

Sendo que GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) possui alta qualidade de soldagem, constitui de um processo excelente para pequenas espessuras (chapas finas), em alguns

casos não necessita metal de adição, não há escória nem salpicos (respingos), possui alta eficiência térmica e menor aquecimento da peça como ilustrado na Figura 4.3 (MATHERS, 2002).

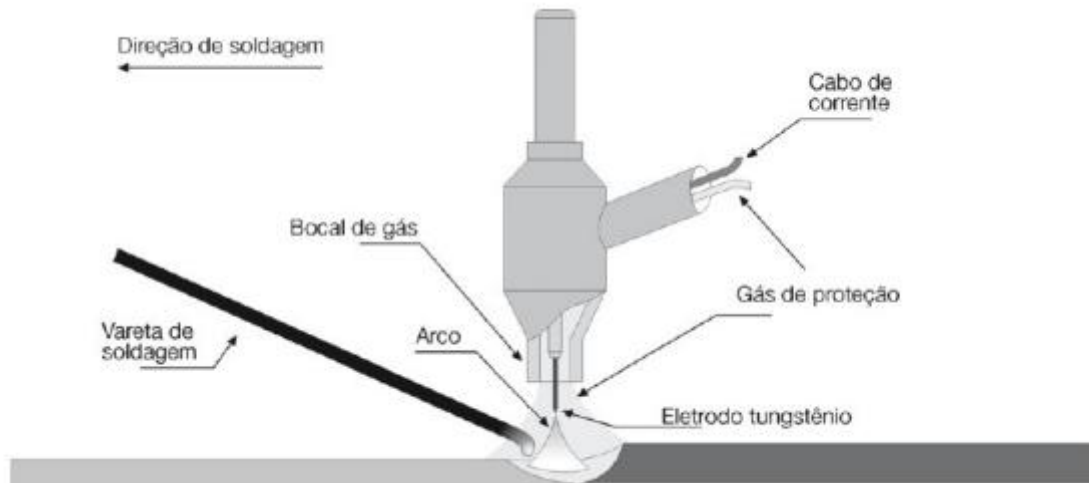


Figura 4.3 - Representação esquemática do processo TIG – região do arco (MATHERS, 2002).

Enquanto o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) possui o eletrodo nu é alimentado continuamente, evitando perda de arame, não há escória, a penetração é mais uniforme quando comparado com ao processo de eletrodo revestido, a penetração e a diluição podem ser controladas durante o processo e é um processo com baixo teor de hidrogênio, como representado na Figura 4.4 (TALKINGTON, 1998).

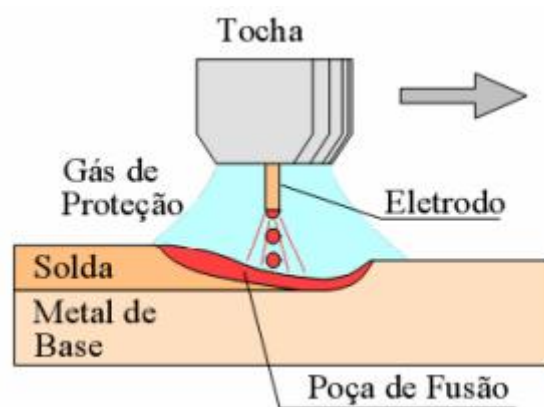


Figura 4.4 - Representação esquemática do processo MIG/MAG (TALKINGTON, 1998).

Aços inoxidáveis ferríticos com teor mais elevado de cromo, com menor teor de elementos intersticiais e/ou adições de elementos estabilizantes podem ter um balanço entre elementos alfa-gênios e gama-gênios tal que a austenita não se forma em nenhuma

temperatura. Nestas condições dos aços não estabilizados, a sua zona termicamente afetada (ZTA) será formada essencialmente por uma região de crescimento de grão e uma zona fundida (ZF) que apresentará uma estrutura grosseira e colunar, com precipitados finos intra e intergranulares ilustrado na Figura 4.5. Em aços estabilizados com Nb (nióbio) ou Ti (titânio), o crescimento de grão pode ser reduzido parcialmente pela maior estabilidade dos carbonitretos destes elementos em relação aos de Cr (cromo) em relação aos não estabilizados. Nos aços com menores teores de intersticiais, o problema de crescimento de grão é mais intenso, já que a quantidade de precipitados é menor (MODENESI, 2001).

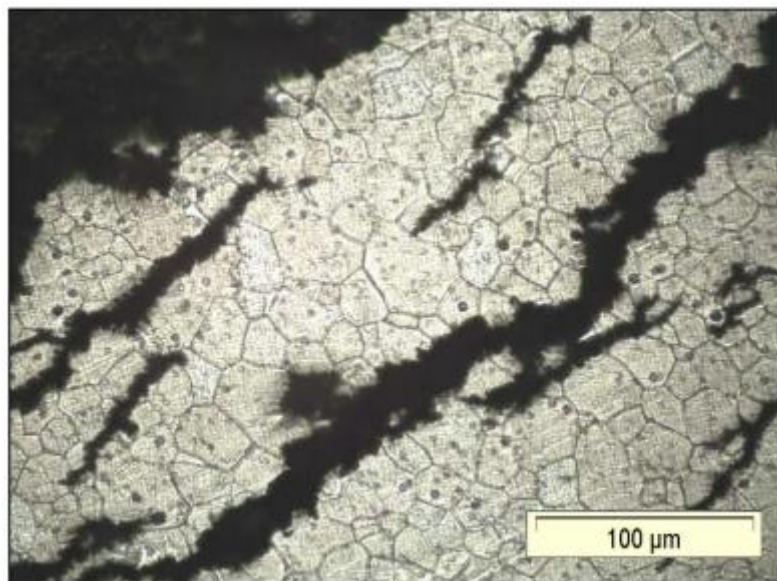


Figura 4. 5 – Trincas secundárias transgranulares e intergranulares de CST na ZTA de aço AISI409 H=400J/mm, Ataque: eletrolítico, tempo de ataque 2,5 min (SILVA, 2011).

A soldagem GTAW ou TIG é um processo a arco elétrico que produz soldas adequadas para aplicações em diversas ligas metálicas, incluindo os aços inoxidáveis ferríticos como visto na Tabela 4.3. No entanto, a ZF e a zona termicamente afetada ZTA desses aços podem apresentar crescimento indesejável de grãos, formação de fases secundárias, incluindo a precipitação de constituintes ricos em cromo, o que contribui para baixa tenacidade e ductilidade além de reduzir a resistência à corrosão do material ou liga (AMUDA e MRIDHA, 2009).

Ao aplicar-se o processo de soldagem no aço ABNT 409, por possuir teores baixos de Cr em sua composição (10,81%Cr), ele fica suscetível à corrosão intergranular, devido ao crescimento de grãos equiaxiais de ferrita α . Além de ser 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 (AGARELLI e GIAMPIETRI, 2017).

A corrosão intergranular acaba por afetar a vida útil dos equipamentos, podendo ocasionar falhas catastróficas nas peças, precisando ser identificada. Tal identificação pode ser realizada com 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 e FALLEIROS, 2002).

Observou-se a ocorrência de valas nos contornos de grão na zona termicamente afetada e na zona fundida (Figuras 4.6 a e b), em ambas as condições de soldagem, caracterizando as amostras como susceptíveis a corrosão intergranular (AGARELLI e GIAMPIETRI, 2017).

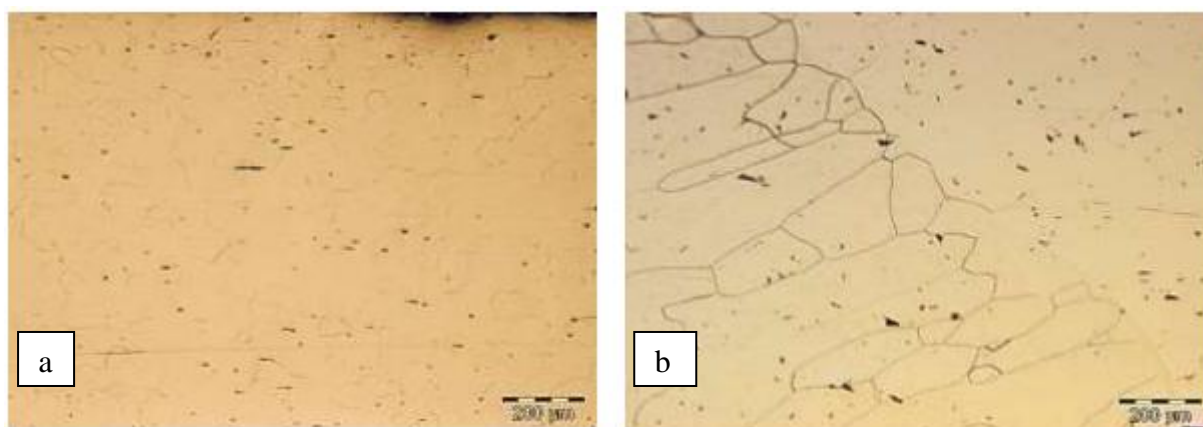


Figura 4. 6 a e b – Corrosão intergranular em aço AISI 409 (AGARELLI e GIAMPIETRI, 2017)

Assim a pesquisa em termos de corrosão é de suma importância para a indústria automobilística.

4.3 Problemas na Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Ferríticos

Esses aços têm algumas limitações, particularmente aqueles com alto teor de cromo,

onde pode haver uma tendência marcante de fragilização. Cuidados devem ser tomados para que os problemas Fragilidade a 475°C, Fase Sigma, Precipitação de Carbonetos, Trincas Térmicas e Corrosão intergranular não afetem a soldabilidade do material (BHADESHIA e HONEYCOMBE R. 2006).

Schaeffler desenvolveu um diagrama para prever a microestrutura resultante do processo de soldagem, assim, além de identificá-la, pode identificar possíveis falhas na soldagem (ZAMIN, 2017). Cada um dos grupos de aços inoxidáveis apresenta características próprias com relação à soldabilidade e seus problemas. Os problemas normalmente encontrados em soldagem por resistência são a falta de fusão e trincas (BARROS, 1989). A Figura 4.7 ilustra esses problemas de soldagem que serão discutidos nos próximos tópicos.

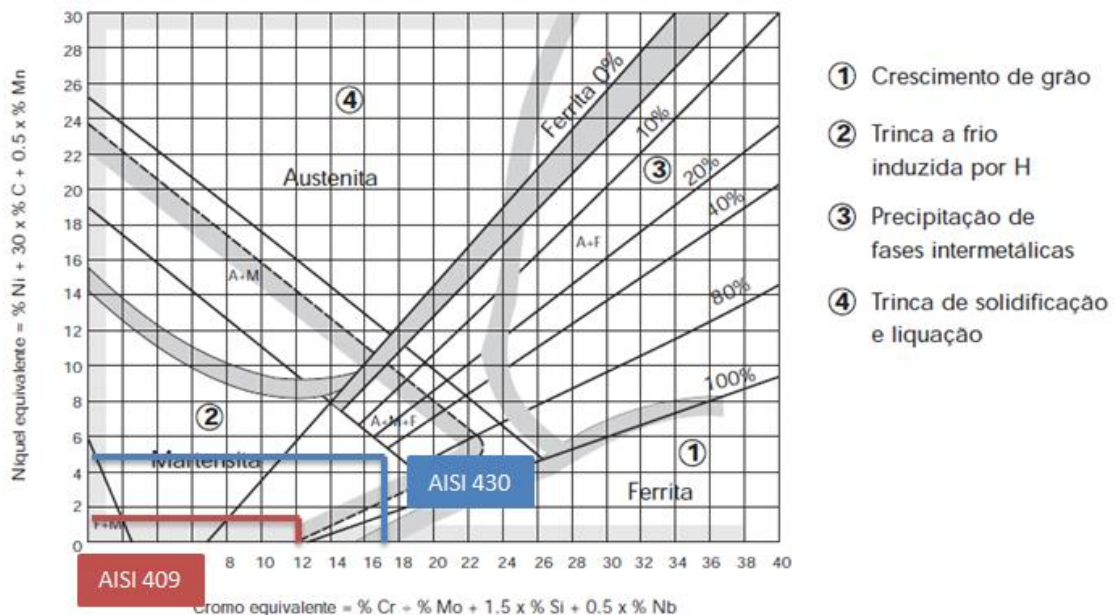


Figura 4.7 - Diagrama de Schaeffler para soldagem do aço AISI 409 com adição de arame tubular ABNT ER308LSi (ACESITA, 2015).

4.3.1 Fenômeno de fragilidade a 475°C

A formação da fase sigma (σ) é uma modificação metalúrgica que pode causar corrosão em aços inoxidáveis. Silva et al. (2005) afirma que a decomposição da ferrita em duas fases α/σ acarreta numa microestrutura fina, com uma fase rica em ferro e outra rica em cromo. O que resulta a variação das propriedades mecânicas e físico-químicas destes

materiais, crescimento do campo magnético médio do material e indicação de segregação de elementos de liga. Em paralelo a fase rica em cromo (fase σ) causa o fenômeno da fragilidade à 475°C, a fase pobre em cromo fica mais vulnerável ao processo de corrosão. A região correspondente no Diagrama *Schaeffler* (Figura 4.7) é aquela em que ocorre crescimento do grão, região 1.

A causa da fragilização a 475°C foi reconhecida como a precipitação de uma fase rica em cromo (fase sigma). A composição desse precipitado varia de 61% a 83% Cr (FISHER et al, 1953). A precipitação desta fase é devido a uma decomposição do ferro-cromo em solução sólida instável a temperaturas mais baixas. A extensão da lacuna de miscibilidade é mostrada na Figura 4.8. De acordo com este diagrama de fases, a 21 Fragilização a 475°C pode ser esperada em temperaturas abaixo de 516°C em ligas de Fe-Cr na faixa de cerca de 12 a 92% de Cr (GROBNER, 1973).

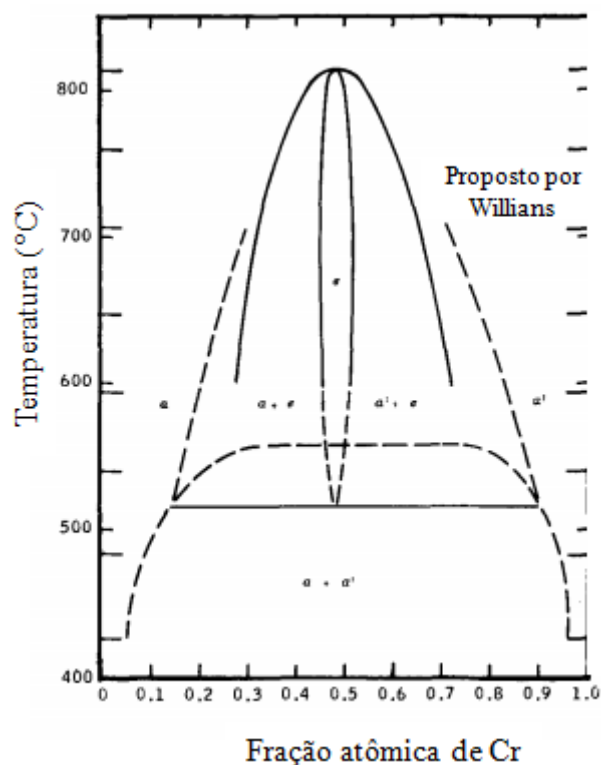


Figura 4. 8 - Diagrama de fase conforme fração atômica de Cromo (GROBNER, 1973).

Tratamentos pós-soldagem são válidos para evitar esse problema. A proximidade da temperatura limite superior de σ ($\approx 600^\circ$), permite observar a formação de fase σ relacionando o teor de cromo no aço com a temperatura, pois essa fase se forma mais rapidamente. Conhecendo esse fenômeno prejudicial é possível suavizar as

consequências por meio do aquecimento acima da temperatura máxima de formação da fase σ , dissolvendo-a na austenita ou convertendo-a em ferrita delta (δ), desaparecendo assim, com a fragilidade que essa fase provoca. Posteriormente, deve-se resfriar rapidamente próximo da temperatura perigosa (475°C), evitando a formação da fase prejudicial. Contudo, é possível restabelecer as propriedades normais, sendo que as temperaturas recomendadas para o tratamento são superiores a 900°C (SANCHES, 2009).

Os aços inoxidáveis ferríticos são sensíveis à fragilização a 475 °C (entre 400 °C e 600 °C) devido à baixa fração de cromo (e também molibdênio) em uma liga de Fe-Cr envolvendo a formação de uma fase α rica em cromo (30%) e no molibdênio, uma fase dura e quebradiça. Esta fase se forma após longos períodos em seu campo de estabilidade. É muito raramente observado. A fragilização a 475 °C não deve ser temida após uma operação de soldagem (BLONDEAU, 2013).

4.3.2 Formação de martensita nos contornos de grão

O tratamento térmico pós-soldagem a 800 °C (revenimento com martensita) melhora significativamente a tenacidade do entalhe. Suprimir a formação de martensita pela adição de 0,5% de Ti ou 1% de Nb também favorece a soldagem devido a essa estabilização. Isso provavelmente ocorre porque tanto o Ti quanto o Nb aumentam a estabilidade da ferrita δ , suprimindo a formação de austenita. Além disso, como mencionado anteriormente, eles tendem a formar carbonetos em altas temperaturas. Portanto, o teor de carbono é reduzido e a tendência para formar martensita diminui. O crescimento excessivo de grãos pode ser evitado, é claro, usando entradas de calor de soldagem mais baixas no material soldado (KOU e LE, 2003).

Contudo, os aços inoxidáveis ferríticos podem apresentar problemas durante o processo de soldagem, devido a formação de martensita e crescimento de grão, que causam a redução da ductilidade e tenacidade. Portanto, é essencial o conhecimento da transformação de fases no estado sólido destas ligas, avaliando a cinética de formação das fases ferrita e martensita (VILELA et al, 2019).

Geralmente, a temperatura de início de formação da martensita, M_i , é afetada pela composição química, tamanho de grão austenítico (KITAHARA et al, 2006) e taxa de

resfriamento (TSAI et al, 2002; BRACHET et al, 1998; GAO et al, 2014). Elevadas temperaturas de austenitização e taxas de resfriamento diminuem a temperatura M_s , como sugerido por Tsai et al (2002) e Gao et al. (2014).

Mesmo que a solidificação seja 100% ferrita, na soldagem desses materiais, dependendo do balanço entre os elementos estabilizadores da ferrita, existe a possibilidade de formação de austenita, que no resfriamento pode se transformar em martensita. A região 2 do Diagrama Schaeffler (Figura 4.7) é aquela na qual ocorre esse fenômeno (LIPPOLD e KOTECKI, 2005 apud AZEVEDO et al, 2009).

A Figura 4.9(a) mostra a microestrutura do metal base e a Figura 4.9(b) mostra a microestrutura da zona fundida soldada sem a presença de fluxo. Sendo esse fluxo responsável pela microestrutura formada por martensita (região escura) e ferrita (região clara) (AZEVEDO et al, 2009).

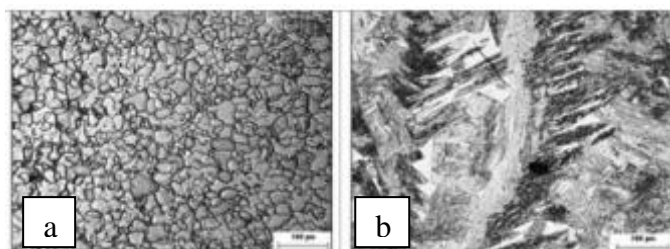


Figura 4. 9 - Microestrutura do (a) metal de base e da (b) zona fundida.

A Figura 4.10 apresenta o perfil de micro dureza obtido nas regiões da junta soldada pelo estudo por Silva et al (2011), verificou-se que as soldas no aço inoxidável férrico estabilizado (AISI 409), que são realizadas com menor aporte térmico (400J/mm) apresentam uma tendência a ter microdureza mais elevada na ZTA. Esta tendência era de se esperar devido a maior taxa de resfriamento experimentada por estas soldas associado à presença de precipitados de cromo e de alguns elementos químicos presentes no metal de adição (DE SOUZA, 2013). Segundo Evans et al (1991), alguns elementos químicos como o níquel e manganês tendem a promover a micro-segregação de Ni, Mn e Si nas zonas reaquecidas a baixa temperatura ($<900^{\circ}\text{C}$) levando a uma redução da tenacidade e aumento da dureza. Assim, os teores de manganês e níquel tendem a afetar a microestrutura do metal de solda favorecendo a formação de

martensita e promovendo a formação de ferrita acicular também denominada “lathy”, sendo esta típica da solidificação primária em austenita (ZHANG e FARRAR, 1997).

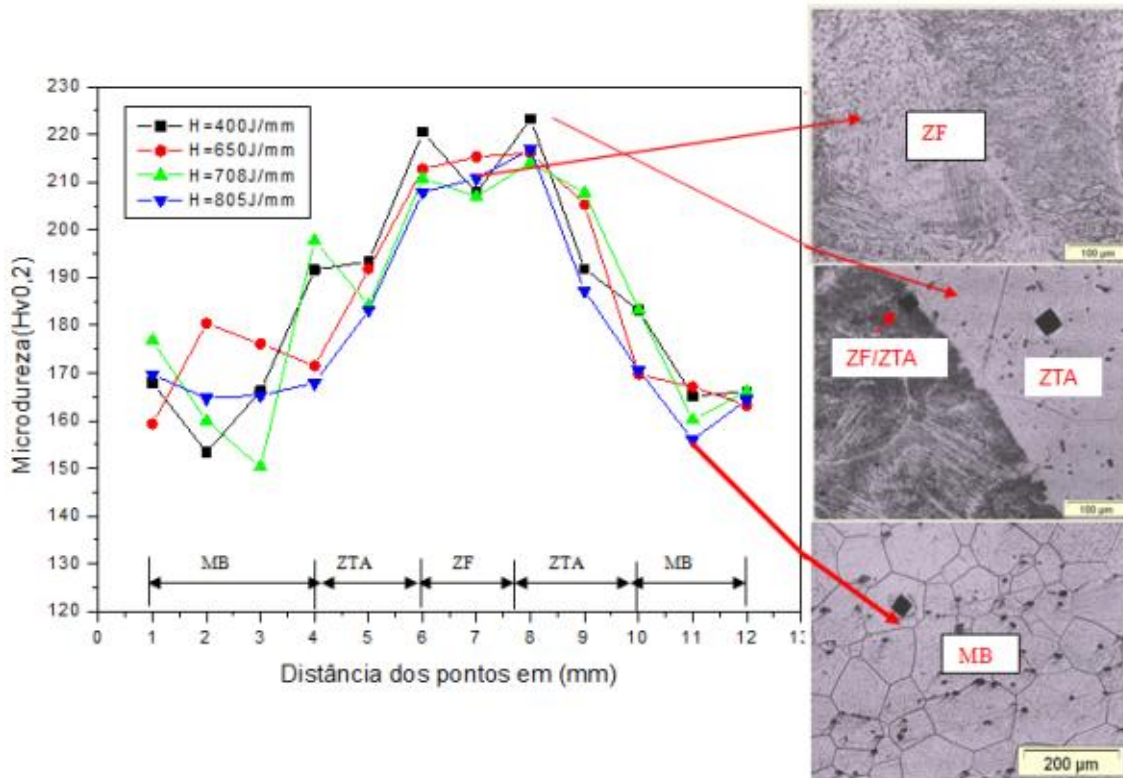


Figura 4. 10 – Comportamento da microdureza do aço AISI409 soldado com metal de adição AWSE316LT1-4 com variação do aporte térmico (SILVA, 2011).

Foi observado que o aço inoxidável ferrítico com 11,1 de %Cr, 0,011 de %C e 0,013 de %N, apresenta, na condição de partida, microestrutura predominantemente ferrítica e majoritariamente a fase martensita para taxas de resfriamento entre 0,5 e 100 °C/s. Observa-se também, microdureza Vickers variando de 319±4 HV0.2 a 338±4 HV0.2, valores coerentes com o baixo conteúdo de carbono no aço inoxidável ferrítico, bem como o possível autorevenimento da microestrutura martensítica (VILELA et al, 2019).

A quantidade de ferrita pode ser estimada de forma complementar pelo diagrama constitucional de Balmforth (BALMFORTH e LIPPOLD, 2000), apresentado na Figura 4.11. O diagrama permite estimar frações volumétricas de fases em aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos, prevendo a microestrutura de cordões de solda. O diagrama foi desenvolvido utilizando faixas de composição química específicas, de modo que para ligas com teor de carbono muito baixo (menor que 0,03% em massa), os resultados se tornam imprecisos (LIBERATO, 2013 apud TAVARES, 2017). A posição

das ligas no diagrama é também definida pelos elementos estabilizadores de ferrita e austenita por meio dos valores de cromo (Cr_{eq}) e de níquel (Ni_{eq}) equivalentes, conforme as Equações 4.1 e 4.2, respectivamente. A Tabela 4.4 apresenta a previsão da quantidade de ferrita segundo as relações de Balmforth para os aços ABNT 430 e ABNT 409.

$$Cr_{eq} = Cr + 2Mo + 10 (Al+Ti) \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N \quad (\text{Equação 4.2})$$

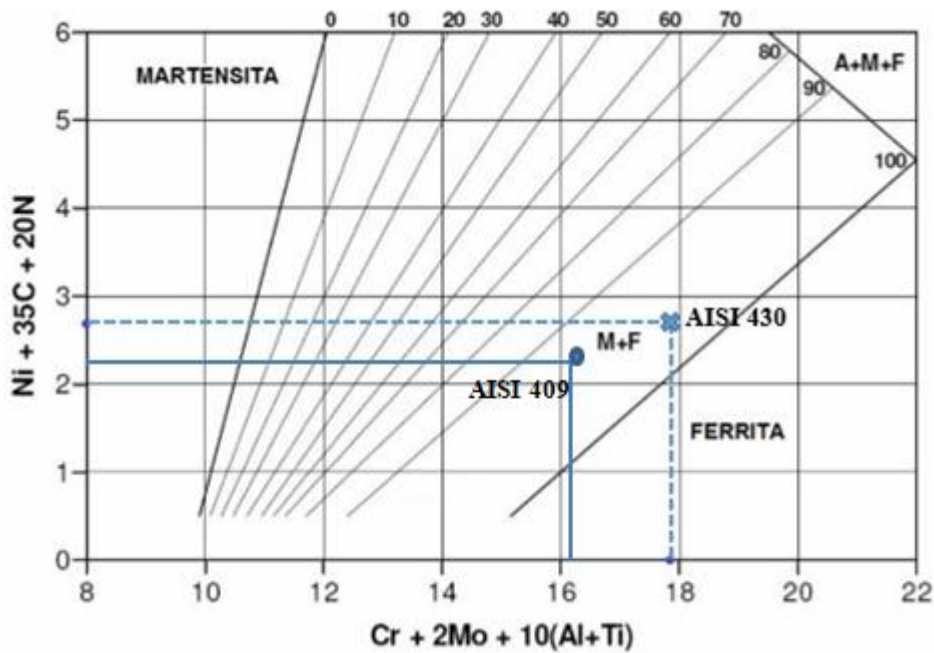


Figura 4. 11 - Diagrama constitucional de Balmforth para aços inoxidáveis ferrítico-martensíticos, com o posicionamento calculado do aço ABNT 430 e ABNT 409 (BALMFORTH e LIPPOLD, 2000).

Tabela 4. 4 – Valores de cromo e níquel equivalente e previsão de quantidade de ferrita segundo as relações de Balmforth para aço ABNT 430 e ABNT 409 estudado (TAVARES, 2017).

Aço	Cr_{eq}	Ni_{eq}	% Ferrita
ABNT 430	17,87	2,68	96
ABNT 409	16,37	2,15	94

4.3.3 Precipitação de carbonetos

A sensitização é um fenômeno que os aços inoxidáveis ferríticos estão sujeitos quando

colocados em certas condições de temperatura, ocasionando um dos tipos de corrosão mais danosa que um aço pode ter, a corrosão intergranular. Tal fenômeno acontece quando aços ferríticos são aquecidos por algum processo de soldagem ou tratados termicamente em uma faixa de temperatura entre 400 e 900°C. Esse aquecimento faz com que haja um processo de precipitação dos carbonetos nos contornos de grão com empobrecimento em cromo da região vizinha do contorno do grão. Fazendo com que o aço perca suas características, por causa do baixo teor de cromo nessas regiões (PALÁCIO, 2008).

A Figura 4.12 ilustra o efeito da sensitização comparando em dois aços: os inoxidáveis ferríticos e os austeníticos. O coeficiente de difusão do Cr é 100 vezes maior na ferrita, como é possível ver nos gráficos (HENTHORNE, 1972). Dessa forma, a diferença entre o fenômeno de sensitização dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos baseia-se na menor solubilidade de carbono e nitrogênio na ferrita do que na austenita, por consequência, precipitação mais rápida de carbonetos e nitretos na ferrita (SANCHES, 2009; MADEIRA 2007; SEDRIKS, 1996).

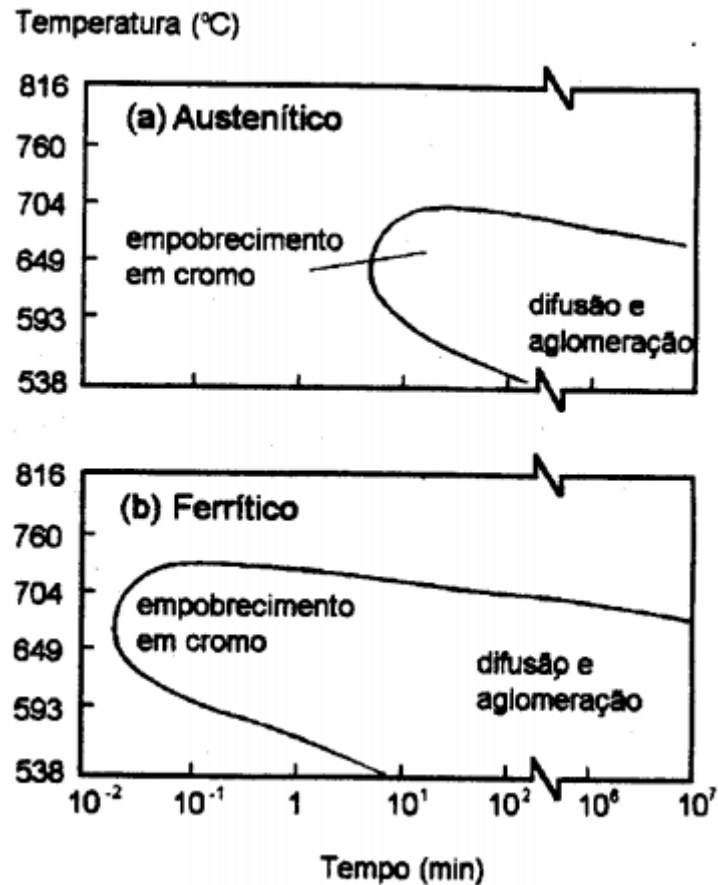


Figura 4. 12 - Comparação entre curvas TTS dos aços AISI 304 e AISI 430 tratados a 1066°C (HENTHORNE, 1972)

O estudo de Barbosa et al (2006) mostrou que os valores do grau de sensitização dos aços inoxidáveis ferríticos estabilizados e não estabilizados diminuíram ou desapareceram com o aumento da velocidade de resfriamento das amostras durante os tratamentos térmicos. Esse é um exemplo eficaz de tratamento que minimiza efeitos da sensitização, tornando o aço com melhor soldabilidade.

No diagrama Schaeffler, Figura 4.7, os precipitados de carbonetos se formam na região 3. As ligas austeníticas alcançam resistência máxima à corrosão intergranular por recozimento em solução. Estruturas como fundidas, ou fundições expostas a temperaturas de 425°C a 870°C (800°F a 1600°F) podem conter carbonetos de cromo complexos precipitados preferencialmente ao longo dos limites de grão em ligas totalmente austeníticas. Esta microestrutura é suscetível à corrosão intergranular, especialmente em soluções oxidantes. Em ligas parcialmente ferríticas, os carbonetos tendem a precipitar nos *pools* de ferrita descontínua; assim, essas ligas são menos suscetíveis ao ataque intergranular. O objetivo do recozimento de solução é garantir a

solubilização completa de carbonetos na matriz e reter esses elementos em solução sólida (ASM International,1993).

Schaeffler (1949) propôs primeiro a relação quantitativa entre a composição e o teor de ferrita do metal de solda. Conforme mostrado pelo diagrama de constituição na Figura 4.13, o equivalente de cromo de uma determinada liga é determinado a partir das concentrações de formadores de ferrita Cr, Mo, Si e Cb, e o equivalente de austenita é determinado a partir das concentrações de formadores de austenita Ni, C e Mn.

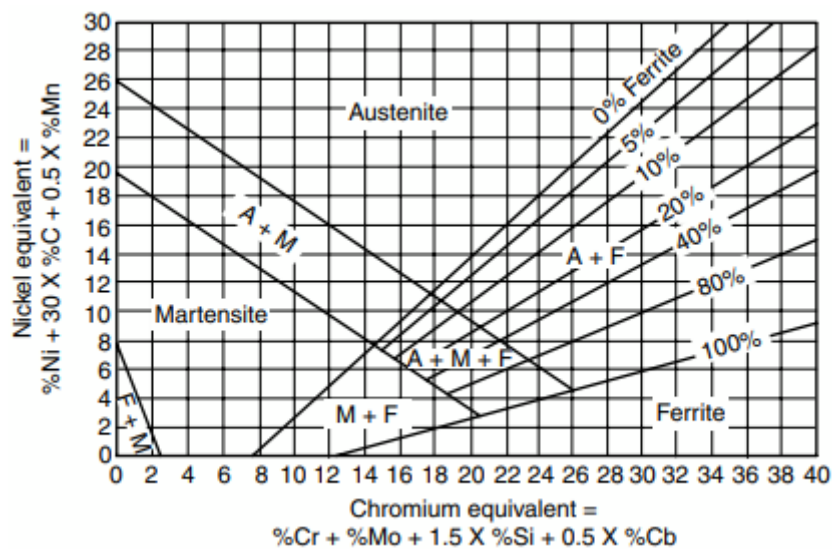


Figura 4. 13 - Diagrama de Schaeffler para prever o teor de ferrita de solda e o modo de solidificação (SCHAEFFLER,1949 apud KOU e LE, 2003).

Os aços inoxidáveis austeníticos podem sofrer problemas de corrosão intergranular da mesma forma que os aços inoxidáveis ferríticos. Como fica nítido no Diagrama de Schaeffler, a sensibilização à corrosão intergranular é causada pela precipitação de carbonetos de cromo ($Cr_{23}C_6$) nos contornos de grãos da matriz, sendo o mecanismo do problema similar para estes dois aços. (REGÔ, 2005).

Esta precipitação ocorre quando o material é exposto a temperaturas entre 500°C – 900°C por tempo suficientemente longo, causando o empobrecimento de cromo nas regiões imediatamente adjacentes a estes contornos e o metal se diz, então, sensibilizado. Como resultado, os contornos de grãos tornam-se mais sensíveis à corrosão que o restante do material (MODENESI, 2001).

Assim, quando este material é exposto a um meio agressivo, a corrosão se processará

rapidamente ao longo dos contornos dos grãos causando o desprendimento dos grãos. Esse mecanismo fica perceptível na Figura 4.14 (a), (b) e (c) apresenta esquematicamente a evolução da corrosão intergranular pelo mecanismo de dissolução de precipitados (GIRALDO, 2006).

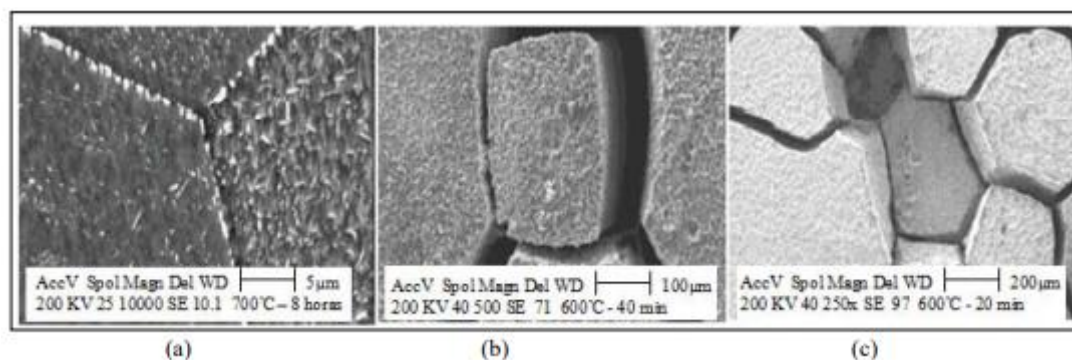


Figura 4. 14 - Precipitação de carbonetos de cromo (GIRALDO, 2006).

A diminuição da quantidade de carbono não é eficiente na redução da degradação da solda nos aços inoxidáveis ferríticos, dentro de certa faixa. Esse motivo é explicado por Kou e Le (1987) ao analisar aços não estabilizados como ABNT 430 com baixo teor de carbono (0,12% de C, Tabela 4.4), se mostram susceptíveis a degradação da junta soldada. Como a taxa de difusão de carbono é muito maior em estruturas de corpo centrado (ferrita) do que em estruturas de face centrada (austenita), o rápido resfriamento a partir de temperaturas superiores a 925°C não suprime eficientemente a precipitação de carboneto de cromo nos contornos de grão em aços inoxidáveis ferríticos não estabilizados. Entretanto, quando valores de teor de carbono são baixíssimos, que é o caso dos estabilizados ABNT 409 (0,03% de C, Tabela 4.4), a precipitação é reduzida.

Conforme Uhlig (1971) recozimento pós-soldagem entre temperaturas de 650°C e 815°C facilita a difusão de átomos de cromo para a região de baixo-cromo adjacente aos precipitados de carbonetos de cromo auxiliando, o restabelecimento de uma composição uniforme de cromo. Como consequência, tem-se uma ZTA resistente à corrosão intergranular (RÊGO, 2004).

A redução dos elementos intersticiais em níveis inferiores, aos seus limites de solubilidade resultará em uma prática economicamente inviável (GORDON e VAN BENNEKOM, 1996). Assim a sensibilização pode ser reduzida, adicionando elementos

estabilizadores, tais como titânio, nióbio, zircônio. Esses elementos formam carbonetos e ou nitretos mais estáveis em elevadas temperaturas, reduzindo apreciavelmente a sensitização (OGWU e DAVIES, 1997; TOMARI et al., 1982).

Outro mecanismo mitigatório da influência danosa dos precipitados de carbonetos é a presença de formadores de Carbonetos. Os elementos mais utilizados são Titânio, Nióbio e Vanádio que precipitam preferencialmente ao Cromo, promovendo segregação com mais microdureza nos contornos de grão. Reaquecer a peça faz com que as tensões sejam aliviadas, evitando a propagação de trincas devido a essa interface com impurezas nos contornos de grão (LIPPOLD, 2015).

O uso de processos de menor aporte térmico como a soldagem a Laser é um processo relativamente novo e as alterações microestruturais devido aos efeitos do calor são menores do que outros processos (GU et al, 2013; JENNEY e O'BRIEN,1991). As soldagens realizadas com material de enchimento (COMMITTE, 2001), apresentam baixa resistência à corrosão devido aos efeitos galvânicos gerados na microestrutura por efeitos térmicos. Por outro lado, o processo a laser apresenta menores alterações microestruturais, portanto, a taxa de corrosão é menor, toda essa condição pode auxiliar na redução das tensões térmicas e residuais (COLOMB et al, 2013; YILBA et al, 2010). No entanto, o aço inoxidável ferrítico ABNT 409, sob qualquer processo de soldagem, torna-se mais vulnerável à sensibilização ou corrosão intergranular. Os carbonetos de cromo precipitam nos contornos do grão devido à exposição térmica.

4.3.4 Corrosão intergranular

Aços inoxidáveis Austeníticos são ligas ativo-passivas usadas em várias aplicações industriais. A corrosão localizada (píte, corrosão em fresta, corrosão intergranular e corrosão sob tensão) é o fator que mais contribui para a falha destes aços nos componentes da indústria. Salientando que esse fenômeno não se estende para os aços inoxidáveis ferríticos, por não estar na região de ocorrência do Diagrama de Schaeffler, Figura 4.7 (MUDALI, 2006; SEDRIKS, 1979).

Os principais problemas encontrados durante a soldagem de aços inoxidáveis ferríticos são o aumento do grão e a precipitação de nitreto e carboneto de cromo que podem causar corrosão intergranular. Esses fenômenos são particularmente prevalentes durante

o uso de processos de soldagem com alta energia linear. O feixe de energia de alta densidade em processos de soldagem com baixo aquecimento e alta taxa de resfriamento, limitam esses fenômenos e melhoram de forma significativa a resistência mecânica da junta soldada (BLONDEAU, 2013).

A sensibilização pode promover trincas devido à corrosão por tensão intergranular tanto nos graus austenítico (Figura 4.15) quanto ferrítico do aço inoxidável. Projetos ou condições de soldagem que geram alta tensão residual ou criam concentrações de tensão também podem promover trincas por corrosão sob tensão. O alívio do tensões pós-soldagem pode ser usado para reduzir essas tensões e minimizar a suscetibilidade à corrosão sob tensão. Mas, conforme discutido anteriormente, o alívio tensão pós-soldagem precisa ser feito com cuidado para evitar a sensibilização (LIPPOLD, 2015).

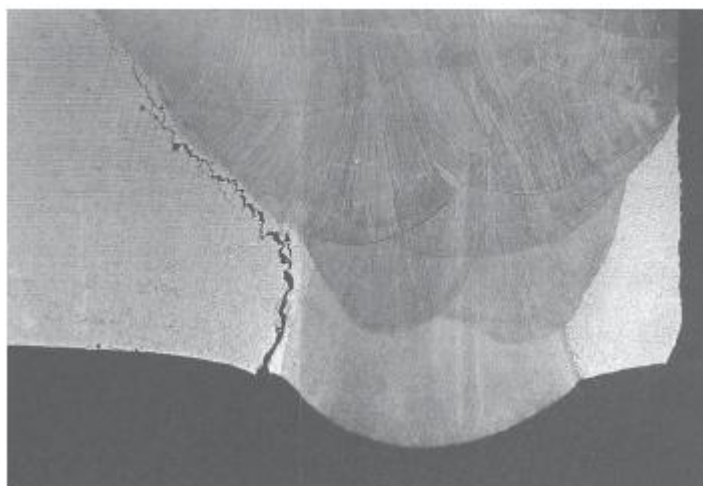


Figura 4. 15 - Trinca por corrosão sob tensão intergranular na ZTA de aço inoxidável tipo ABNT 304 (ASM, 1987)

Alem de alívio de tensões, outro mecanismos é a adição desses elementos de liga pode ser realizada mutuamente (Ti+Nb). Segundo Modenesi (2001), esse tipo de estabilização tende a minimizar a perda de propriedades mecânicas quando comparado ao aço não estabilizado ou com adição de um único elemento. No entanto, deve-se ater aos teores ideais de elementos estabilizadores onde a adição insuficiente permite a formação de precipitados de Cr, tornando o aço susceptível à corrosão, e a adição em altos teores tende a elevar a deterioração das propriedades mecânicas (GORDON e VAN BENNEKOM, 1996). De acordo com Yan et al (2008), a estabilização simultânea exibe uma resistência à corrosão intermediária aos aços estabilizados somente com Ti ou Nb.

O estudo de Bond e Lizlovs (1969) reitera a eficácia na prevenção da corrosão intergranular no teste de Strauss após tratamento térmico de alta temperatura. No entanto, em meios altamente oxidantes, como ácido nítrico a 65% em ebulição, os aços contendo titânio, exemplo do ABNT 409, podem ser sensibilizados à corrosão intergranular.

4.3.5 Trincas de solidificação

A trinca de solidificação da solda ocorre preferencialmente ao longo dos limites dos grãos de solidificação e, ocasionalmente, nos limites de sub-grãos na zona de fusão. O trincamento de solidificação da solda é um fenômeno que foi objeto de estudo considerável, em uma ampla variedade de ligas de engenharia, nos últimos 40 anos. Apesar do grande conjunto de informações atualmente disponíveis quanto à trinca por solidificação da solda, os micromecanismos das trincas ainda não são completamente compreendidos. Fundamentalmente, duas condições devem ser satisfeitas para a ocorrência de trincas por solidificação da solda: (i) restrição imposta (tensão) termicamente e / ou mecanicamente e (ii) uma microestrutura suscetível a trincas (MODENESI, 2001).

Quanto a restrição mecânica, as trincas de solidificação podem ser minimizadas ou eliminadas com a redução do nível de tensão. Por exemplo, geometrias de juntas ou alterações de parâmetros de solda que alterarem o tamanho e a forma do cordão geralmente são eficazes para evitar as trincas (ALEXANDROV et al, 2005).

Quanto a microestrutura suscetível a trincas resulta da persistência de filmes líquidos ao longo dos limites de solidificação no metal de solda. Uma solução permanente para problemas persistentes de trincas de solidificação geralmente não é alcançada. No entanto, uma modificação da composição do metal de solda ou controle do processo de solidificação pode ser efetiva, conforme observado em estudos. Como apresentado na Figura 4.7 a região 4 do diagrama de Schaeffler é aquela que mais apresenta esse tipo de problema (LIPPOLD, 2015).

No caso dos aços leves e de baixa liga, Bailey et al (1978) deduziu de um experimento fatorial o parâmetro UCS (*Units of Crack Susceptibility*). Dessa forma, caracteriza a susceptibilidade à formação de trincas na solidificação na soldagem a arco submerso

analisando o metal fundido. Por meio do aumento de cromo, molibdênio ou vanádio além desses valores reduz o risco de trincas na solidificação, enquanto um aumento de níquel e boro tem um efeito negativo (CORRÊA et al, 2008).

A partir da fórmula de UCS, Equação 4.3, verifica-se que o carbono não tem efeito de até 0,08%, mas o elemento mostra-se mais nocivo além desse valor, ou seja, a partir do momento em que a solidificação envolve a reação peritética. Isso é amplamente explicado pelo fato de que a solubilidade do enxofre e do fósforo são muito maiores na ferrita. De modo que o aparecimento da reação peritética resulta em um aumento na segregação desses elementos, promovendo a formação de filmes interdendríticos com um ponto de fusão baixo e, portanto, o risco de trincas. (BLONDEAU, 2013).

$$UCS = 230C^* + 190S + 75P + 45 Nb - 12.3Si - 5.4Mn - 1 \quad (\text{Equação 4.3})$$

com $C^* = 0.08$ se $C < 0.08\%$ e $C^* = C$ se $C > 0.08\%$

A função do carbono está diretamente relacionada com o tipo de aço (martensíticos, austeníticos e ferríticos). A estrutura ferrítica tem uma solubilidade tão pequena para carbono e nitrogênio que há uma grande tendência para segregação desses solutos em defeitos (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006). Além destes elementos, ainda podem ser adicionados os elementos estabilizadores como titânio, nióbio e tântalo, os quais possuem grande afinidade pelo carbono. Estes elementos são utilizados para impedir ou dificultar a sensitização, devido à formação de carbonetos de cromo. Portanto, o carbono da liga se combina com esses elementos formando carbonetos de titânio (TiC), de nióbio (NbC) ou de tântalo (TaC) (ZAMIN, 2017; BARROS, 1989).

4.4 Seleção do Metal de Adição

Os aços inoxidáveis permitem diversas formas de adição de elementos na solda. Por exemplo, a adição de pó de óxido de titânio promove a nucleação e o refinamento do grão. Enquanto a adição de manganês tende a reduzir a suscetibilidade ao trincamento a quente. Isso é, presumivelmente, devido à sua interação com o enxofre e mitigação de filmes líquidos ricos em enxofre pela formação de um composto de MnS de alta temperatura (LIPPOLD, 2015). Para minimizar problemas estudados nos tópicos anteriores, o metal de adição austenítico melhora a ZF, mas a ZTA continua a depender

do metal base e do ciclo térmico de soldagem (MODENESI, 2001).

Neste sentido, é importante usar o diagrama de Schaeffler para que o metal de adição fique na região central do diagrama, com cerca de 7 ou 10% de ferrita. A formação de novos grãos não é um evento na solidificação em soldagem, de modo geral. Ao contrário do lingote ou peça fundida, a solda se forma pelo crescimento de grãos do metal de base que estão na interface sólido-líquido. Este fenômeno, chamado de “crescimento epitaxial”, assegura a continuidade metálica entre a ZF e o metal de base. Quando há o uso do material austenítico, a ZF fica mais refinada, mas a ZTA não muda, pois a ductilidade evita trincas após resfriamento da solda (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2006).

A Tabela 4.5 mostra a composição química do AISI 409 e do AISI 430, os teores de cromo e níquel equivalentes determinados conforme Equações 4.5 e 4.6, respectivamente, bem como algumas propriedades mecânicas do arame tubular utilizado, características estas dependentes do gás de proteção (ESAB, 2010).

Vale ressaltar que, dentre os elementos químicos característicos do arame tubular austenítico, ABNT ER308LSi, contém molibdênio em teores expressivos, o qual resulta em aumento da resistência à corrosão localizada induzida pelos ácidos sulfúricos e sulfurosos, cloretos e soluções de celulose. Desta forma, este arame é muito utilizado principalmente nas indústrias de papel e de tintas e foi desenvolvido para a soldagem de aços inoxidáveis do tipo 18%Cr- 12%Ni-2%Mo de baixo teor de carbono ou para a soldagem de juntas de aços inoxidáveis dissimilares (SILVA, 2011).

Tabela 4.5 - Requisitos de Composição Química (ACESITA, 2006)

Materiais	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Ti	N	Mo	Cr _{eq}	Ni _{eq}
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
AISI 430	0,12	1,0	1,0	16,2	0,75	0,56	-	-	0,003	17,98	4,85
AISI 409	0,03	1,0	1,0	11,35	0,5	-	0,5	0,03	0,01	12,86	1,9
ABNT ER308LSi	0,02	0,85	1,5	20,0	10,0	-	-	-	0,58	21,85	11,35

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\% Si + 0,5\% Nb \quad (\text{Equação 4.5})$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \quad (\text{Equação 4.6})$$

Com os dados da Tabela 4.5 aplicados nas Equações 4.5 e 4.6 formam os valores para os eixo x e y do Diagrama de Schaeffler, assim segue o Diagrama na Figura 4.7, para seleccionar o melhor metal de adição e se evitar os problemas de soldabilidade. Assim, a microestrutura esperada na soldagem de aços AISI 430 é 100% martensítica, a soldagem de aços AISI 409 é 100% ferrita e irá crescer grãos.

As Figuras 4.16 e 4.17 são microestruturas comparativas entre um aço ferrítico soldado com metal de adição austenítico (ABNT 308LSi) e metal de adição ferrítico (ABNT 430), respectivamente. Fica nítido pelas imagens que o aço com metal de adição ferrítico gera crescimento de grão enquanto para o metal de adição austenítico o grão fica mais refinado na zona fundida (CANDIDO, 2014).

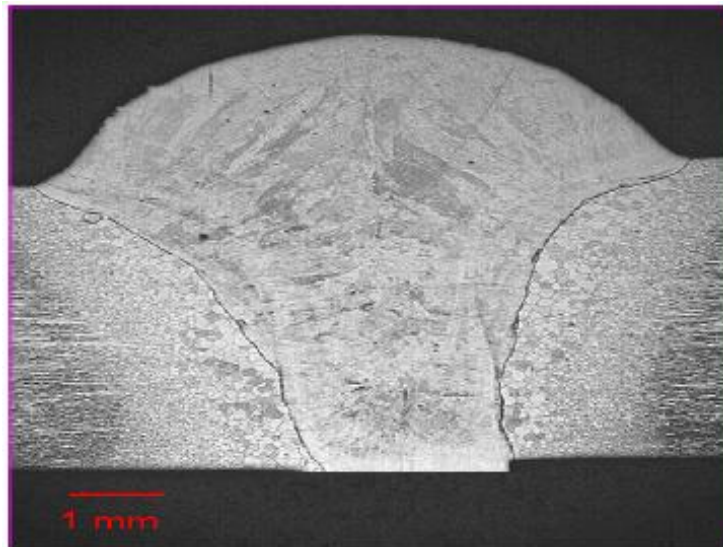


Figura 4. 16 - Aço ABNT 410L com metal de adição ABNT 308LSi (CANDIDO, 2014).

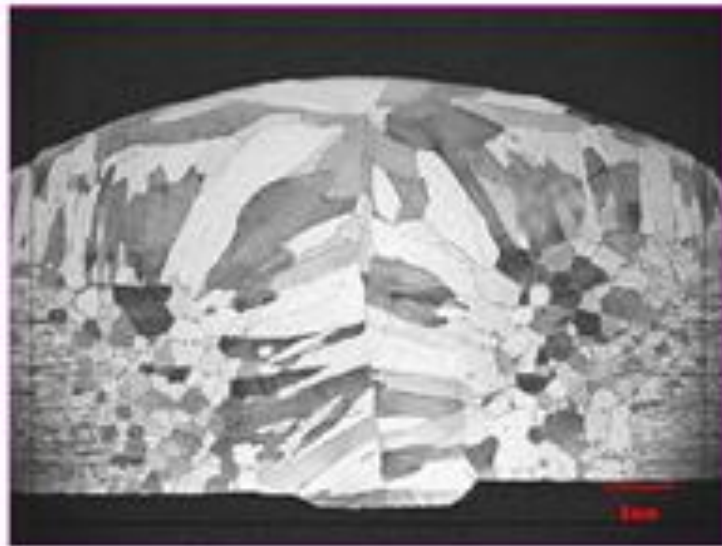


Figura 4. 17 - Aço ABNT 410L com metal de adição ABNT 430 (CANDIDO,2014).

Outro método de refinamento de grãos é a Estabilização. No aço AISI 430 não estabilizado, Figura 4.18, observa-se que a ZTA e a ZF apresentaram uma rede de martensita junto aos contornos de grão da ferrita além de precipitados finos de carbonetos e nitretos de Cr, após ataque eletrolítico (GONÇALVES et al, 2018). Essa microestrutura é justificada pelos altos teores de (C+N) que favorecem a formação da austenita em temperaturas altas, mesmo para elevados teores de cromo. Desta forma, durante a soldagem, o aço sofre transformação parcial da ferrita em altas temperaturas apresentando estrutura bifásica, austenita (fase clara) + ferrita (fase escura), e estrutura ferrita (fase escura) + martensita (forma de agulhas regiões escuras) após o resfriamento rápido (MODENESI, 2001).

O AISI 430 estabilizado com Nb (Figura 4.18) revelou crescimento epitaxial dos grãos, onde os grãos da ZF se formaram como um prolongamento dos grãos do metal base (MODENESI et al, 2016). Conforme a literatura, a adição de Nb gera um efeito de ancoramento dos contornos de grão (*pinning*), que reduz as taxas de crescimento de grão, resultando em grãos mais finos do que aqueles do mesmo aço não estabilizado.

O aço inoxidável ferrítico AISI 430 com estabilização dupla (Ti+Nb) apresentou a ZF com uma estrutura grosseira (Figura 4.18) e com precipitados finos inter e intragranulares de carbonetos e carbonitretos de Ti e Nb, e a ZTA com crescimento de grãos (FARINA, 2010 apud GONÇALVES et al, 2018).

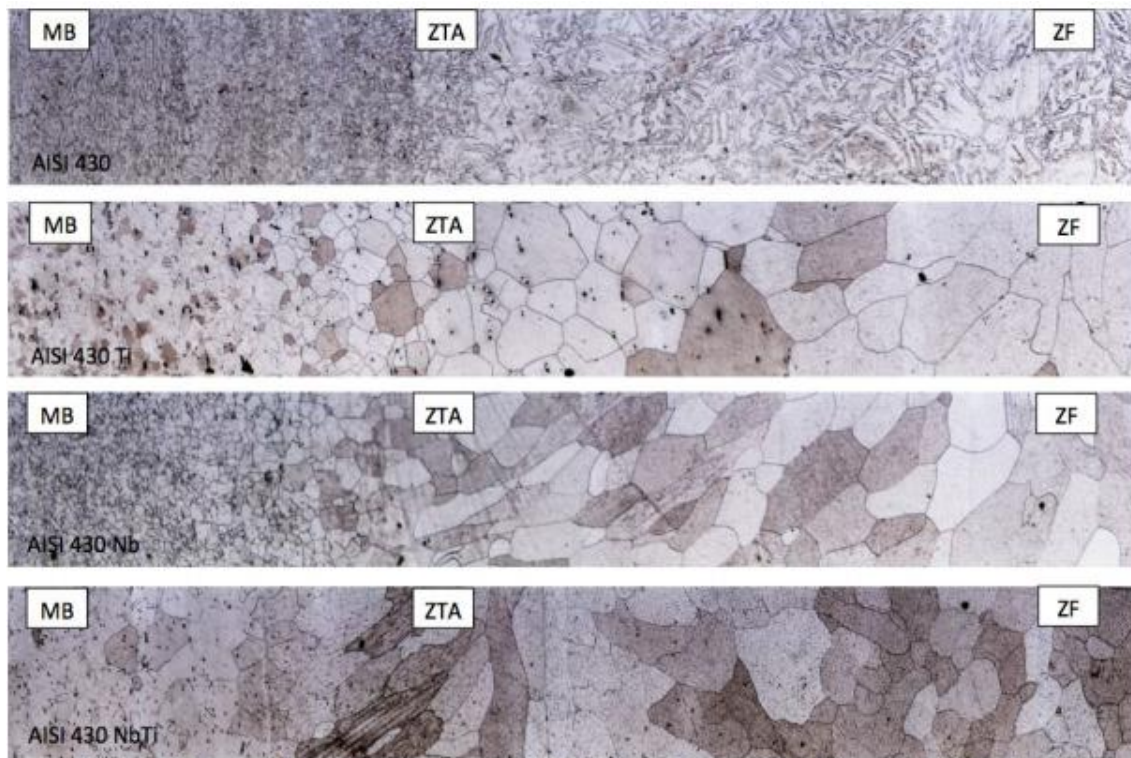


Figura 4. 18 - Micrografias óptica do aço AISI 430, AISI 430Ti, AISI 430Nb e AISI 430 (Ti + Nb) respectivamente soldadas por TIG mecanizado, ataque eletrolítico (GONÇALVES et al, 2018).

Em comparação com a região de solda de um aço inoxidável ferrítico não estabilizado, Figura 4.19 mostra a microestrutura da ZTA sendo esta formada por grãos poligonais de ferrita de um aço inoxidável ferrítico estabilizado soldado por TIG. Verifica-se também a presença de maclas no interior de alguns grãos e a precipitação de carbonetos $M_{23}C_6$ nos contornos de grão na região da ZTA. Cabe ressaltar que a precipitação de carbonetos resulta em heterogeneidades composicionais na região de contorno de grão, tornando estas áreas anódicas em relação ao restante do grão e, desta forma, acelera o desenvolvimento de trincas de corrosão, ocasionadas pelo aumento dos pontos de concentração de tensões (SILVA, 2011).

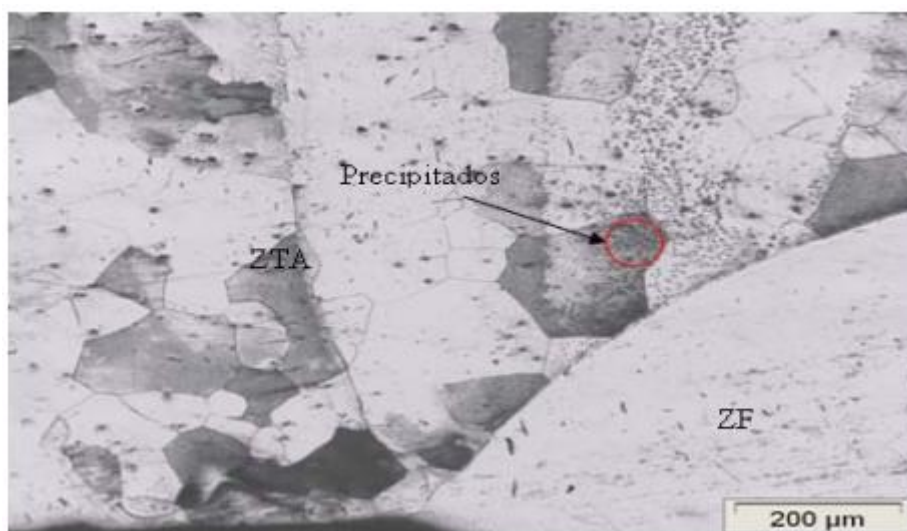


Figura 4. 19 - Microestrutura do aço AISI-409 soldado com H=805J/mm por TIG (SILVA, 2011).

Venkatesan et al (2014) encontrou uma variação na dureza do metal de solda e ZTA das juntas de solda de ABNT 409, feitas com três diferentes entradas de calor. É claro que a dureza ZTA (270 HV) é maior do que a do metal de base (200 HV) e isso está de acordo com a presença de martensita na ZTA. Park et al (2013) atribuíram a dureza alcançada aos precipitados de TiN na zona de fusão, encontrando zonas vulneráveis na área de soldagem.

Alizadeh-Sh et al (2014) estudou a soldagem por pontos do aço inoxidável ferrítico ABNT 430, o perfil de dureza heterogêneo do ZTA em relação ao ZF e metal base (MB) é o resultado de diferentes transformações que ocorrem nesta região da solda. O menor valor da dureza na zona termicamente afetada em comparação com as regiões adjacentes pode ter contribuído para o crescimento do grão e também a ausência de martensita nos contornos dos grãos de ferrita (CABRAL et al, 2017).

Outro método de soldagem que evita problemas na soldabilidade de chapas de aço inoxidável ferrítico ABNT 430 não estabilizado é o Laser. A frequência de pulso se aplica para controlar o aquecimento durante o processo de soldagem, bem como o ciclo térmico no cordão de material de adição desta, tendo em vista que a largura temporal propicia um cordão de solda maior por meio de uma região afetada pela temperatura em função do maior tempo de condução de calor (BORGES, 2019).

Dessa forma, como registrado na pesquisa de America et al (2016), a potência de pico considerada como ideal envolve a maior penetração sem que ocorra expulsão do

material, sendo esta soldagem de condução propiciada por menor energia de pico com maior largura temporal, o que implica redução do aporte térmico de soldagem. Borges (2019) chegou a conclusão que essa condição da soldagem a laser aumenta a dureza devido à presença de uma estrutura martensítica que ocorreu devido ao tempo de resfriamento, que restringe a formação de precipitado por ser rápido, após a soldagem, podendo-se transformar em uma região frágil com baixa tenacidade e alta ductilidade, com baixa resistência mecânica a tração.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Os resultados obtidos por essa pesquisa demonstram que aço não estabilizado (ABNT 430) tende a apresentar martensita na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF). Outra possibilidade é a formação de carbonetos de cromo e o desenvolvimento de corrosão intergranular (sensitização) devido a não estabilização. Em contra partida, em relação ao fenômeno da sensitização, o aço estabilizado com a adição de titânio (ABNT 409) apresenta melhor soldabilidade. Destaca-se também que a redução dos teores de elementos intersticiais tem sido utilizada como mecanismo de melhoria de soldabilidade dos aços ferríticos, em associação ou não à estabilização.
- Outra contribuição para a soldabilidade é o uso de processos de menor aporte térmico, tendo em vista que há menor tempo para difusão de elementos, formação de martensita e precipitação de carbonetos.
- Considerando circunstância de soldagem com utilização metal de adição, de acordo com a bibliografia, os aços inoxidáveis austeníticos garantem melhores condições devido à ocorrência de uma ZF mais refinada e pode-se minimizar os eventuais problemas com base em diagramas de constituição. Sendo as formas preventivas sobre a microestrutura de cordões de solda e sobre possíveis problemas de soldagem de acordo com aço e metal de adição usado.
- Enfim, existem soluções, como controle dos parâmetros do processo aplicado, para minimizar os problemas e ter um desempenho adequado na soldagem para os aços inoxidáveis ferríticos estabilizados e não estabilizados.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver experiências comparativas entre soldas em aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACESITA. **Aços inoxidáveis**. Catálogos Arcelor Mittal, 2006.

ACESITA. Apostila **Soldagem dos aços inoxidáveis**. 38 p. 2015. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/Okutagawa/acesita-apostila-ao-inox-soldagem>>. Acessado em: 30/01/2021.

AGARELLI, G. L. e GIAMPIETRI S. M. Análise da sensitização de juntas soldadas em aço inoxidável AISI 409 para uso em sistema de exaustão veicular. **XXV Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva. Instituto Mauá de Tecnologia. Mauá, 2017.**

AHN B.W, CHOI D.H, KIM D.J, JUNG S.B. Microstructures and properties of friction stir welded 409L stainless steel using a Si₃N₄ tool. **Materials Science & Engineering: A**, v. 532, p. 476–479, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509311012263> Acessado em: 30/01/2021

ALEXANDROV, B. et al. Cold cracking in weldments of steel S 690 QT. **Welding in the World**, v. 49, n. 5, p. 64-73, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03263411> Acessado em: 30/01/2021

ALIZADEH-SH. M.; MARASHI S. P. H. and POURANVARI M. Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties. **Material & Design (1980-2015)**, v.53, p.258-263. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306913010704> Acessado em: 30/01/2021

AMERICA, A. M. et al. Laser welding fundamentals. **Califórnia: [s.n.]**, p.42, 2016.

AMUDA, M. O. H.; MRIDHA, S. Microstructural features of AISI 430 ferritic stainless steel (FSS) weld produced under varying process parameters. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 4, n. 2, p. 160-166, 2009.

ASM International. Handbook Committee. ASM Handbook; vol 13: Corrosion. **Materials Park, OH, ASM International, 1987**

ASM International. Welding, Brazing, and Soldering. Metals Handbook; vol. 6, **Materials Park, OH, ASM International**, 1993

AZEVEDO, A. G; FERRARESI, V. A; FARIAS, J. P. Soldagem de um aço inoxidável ferrítico com o processo A-TIG. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 1, p. 2-9, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/4Fxvpp6KTjyWVLVtMH7ztcM/?lang=pt> Acessado em 13/05/2021.

BAILEY N. et al. The solidification cracking of ferritic steel during submerged arc welding. **Welding Journal**, p. 217-231, 1978. Disponível em: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALSOUUSAGE790008470> Acessado em 13/05/2021.

BALMFORTH, M. C.; LIPPOLD, J. C. A New Ferritic-Martensitic Stainless Steel Constitution Diagram. **Welding Research - Supplement to The Welding Journal**, v. 79, n. 12, p. 339–345, 2000. Disponível em: <https://app.aws.org/wj/supplement/12-2000-BALMFORTH-s.pdf> Acessado em 13/05/2021.

BARBOSA, A. D.; SOUSA F. M.; CARVALHO J. A. N.; ARAÚJO C. R. e CÂNDIDO L. C. Avaliação da sensitização em aços inoxidáveis ferríticos estabilizados e não estabilizados usando-se a técnica reativação eletroquímica potencionética em meio sulfúrico. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.3. n.2, p. 39-44, 2006.

BARBOSA, R.P. et al. **Efeito do tipo de Metal de Adição e do Aporte Térmico na Corrosão sob Tensão de Juntas Soldadas de Aço Inoxidável Austenítico AISI-304**. 1995. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1995. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/157962> Acessado em 13/05/2021.

BARROS, P. M. **Módulo Aços Inoxidáveis**. Associação Brasileira de soldagem, 1989.

BHADESHIA, H.K.D.H.; HONEYCOMBE, R. **Steels: microstructure and properties**. The tempering of martensite steels. Oxford: Elsevier; 2006.

BLONDEAU, R. **Metallurgy and mechanics of welding: processes and industrial applications**. John Wiley & Sons, 2013.

BOND, A. P.; LIZLOVS, E. A. Intergranular corrosion of ferritic stainless steels. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 116, n. 9, p. 1305, 1969. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2412306/meta> Acessado em: 30/01/2021.

BORGES, M. L. Aplicação de laser pulsado Nd: YAG na soldagem de chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 430. p.64, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/183071> Acessado em: 15/05/2021.

BRACHET, J.-C.; GAVARD, L.; BOUSSIDAN, C. Modelling of phase transformations occurring in low activation martensitic steels. **Journal of Nuclear Materials**, v. 258-263, p. 1307-1311, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022311598001974> Acessado em: 15/05/2021.

BRESCIANI FILHO, E. **Seleção de materiais metálicos**. Ed. da UNICAMP, p.326 1991.

CABRAL-MIRAMONTES, J. A.; GAONA-TIBURCIO, C.; ALMERAYA-CALDERÓN, F. Electrochemical Reactivation of AISI 409 Ferritic Stainless Steel Sheet Welded by Laser Process with application in aeronautical. **Int. J. Electrochem. Sci**, v. 12, p. 4928-4939, 2017. Disponível em: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol12/120604928.pdf> Acessado em: 17/05/2021.

CÂNDIDO, L.C. Apostila da Disciplina Tecnologia e Metalurgia da Soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/Escola de Minas/UFOP, 2014.

CARBÓ, H. M. Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. **Belo Horizonte: ArcelorMittal Inox**, 2008. Disponível em: <https://www.grupohumma.com.br/biblioteca/literatura/aplicacaoespecificacao.pdf> Acessado em: 17/05/2021.

COLOMB, D.; COLOSIMO, B. M. e PREVITALI, B. Comparison of methods for data analysis in the remote monitoring of remote laser welding. **Optics and Lasers in**

Engineering, v. 51, n. 1, p. 34-46, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816612002333> Acessado em: 12/06/2021.

COMMITTE A. W. S., "Welding Handbook", AWS U.S.A. 2001

CORRÊA, M.; LEMOS, M. F.; LEITE, R. Susceptibilidade a Corrosão Intergranular de Juntas Soldadas do Aço AISI 317L. 2008. Disponível em: https://intercorr.com.br/anais/2008/INTERCORR2008_166.pdf Acessado 13/05/2021.

COUTINHO, C.B. **Materiais Metálicos para Engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, p.1-75. 1992.

DE SOUZA, V. M. et al. Estudo da Influência da Microestrutura na Suscetibilidade à Sensitização do Aço Inoxidável AISI 430 por Polarização Eletroquímica de Reativação Cíclica (PERC). **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 4, p. 691-712, 2013. Disponível em: <http://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/388> Acessado 13/05/2021.

ESAB – **Catálogo de Caracterização ABNT ER 308LSi** ,2010. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumíveis/tubulares/tubularesPG.cfm>>. Acesso em: 02 de dezembro de 2019.

EVANS, G. M. et al. The effect of nickel on the microstructure and properties of C-Mn all-weld metal deposits. **Welding Research Abroad**, v. 37, n. 2/3, p. 70-73, 1991.

FARINA A.B. **Avaliação da Sequência de Transformação de Fases do Aço AISI430 Tradicional** . Tese de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da USP. 2010.

FISHER, R. M.; DULII, E. e CARROL K.G. In: **AIME Trans**, vol. 197, p. 690, 1953.

FORONI, F. D. ; MENEZES, M. A. ; MOREIRA FILHO, L. A. Uso do Aço AISI- 409 para Fabricação de Pás para Ventiladores. In: **CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2006, p1-12.

FUJITA, N. et al. Effect of Nb on High Temperature Properties for Ferritic Stainless Steel. **Scripta Materials**, v.35, n.6, p.705-710, 1996. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/382540> Acessado 13/05/2021.

GAO, Q. et al. Martensite transformation kinetics in 9Cr–1.7 W–0.4 Mo–Co ferritic steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 610, p. 322–330, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838814011359> Acessado 13/05/2021.

GENTIL, V. **Corrosão**, Livros Tecnicos e Cientificos, Rio de Janeiro, v.5, p.360, 2007.

GIL, A.C. **Métodos e Técnicas de Pesquisas Social**. 6º Ed. São Paulo: Atlas, 2008. Disponível em: <https://biblioteca.isced.ac.mz/handle/123456789/707> Acessado 21/05/2021.

GIRALDO, C.A.S. **Resistência à Corrosão Intergranular do Aço Inoxidável Ferrítico UNSS43000: Avaliação por Método de Reativação Eletroquímica, Efeito de Tratamento Isotérmico e Mecanismo de Sensitização**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo-USP, p.197. 2006.

GONÇALVES, C. N. et al. Estudo da microestrutura e susceptividade à corrosão intergranular dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 430, AISI 430Ti, AISI 430Nb e AISI 430 (Ti+ Nb) submetidos ao processo de soldagem. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/NeiceSantos/publication/329257460_ESTUDO_D_A_MICROESTRUTURA_E_SUSCEPTIBILIDADE_A_CORROSAO_INTERGRANULAR_DOS_ACOS_INOXIDAVEIS_FERRITICOS_COMERCIAIS_AISI_430_AISI_430Ti_AISI_430Nb_E_AISI_430Ti_Nb_SUBMETIDOS_AO_PROCESSO_DE_SOLDAGEM_TIG/links/5cd980c2299bf14d9592ce32/ESTUDO-DA-MICROESTRUTURA-E-SUSCEPTIBILIDADE-A-CORROSAO-INTERGRANULAR-DOS-ACOS-INOXIDAVEIS-FERRITICOS-COMERCIAIS-AISI-430-AISI-430Ti-AISI-430Nb-E-AISI-430Ti-Nb-SUBMETIDOS-AO-PROCESSO-DE-SOLDAGEM-TI.pdf Acessado 21/05/2021.

GONÇALVES, L. B. et al. Soldagem robótica aplicada a indústria automobilística: a evolução e processos adaptativos para o desenvolvimento do setor. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 1, n. 1, p. 85-98,

2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/1121>
Acessado 21/05/2021.

GORDON, W.; VAN BENNEKOM, A. Review of Stabilisation of Ferritic Stainless Steel. **Materials Science and Technology**, v.12, p.23-26. 1996. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/mst.1996.12.2.126> Acessado 21/05/2021.

GROBNER, P.J. Metallurgical Transactions. **Climax Molybdenum Company**, Michigan, v.4, p. 251, 1973.

GU, X; LI, H; YANG, L. e GAO; Y., Opt. Laser Technol, v.48, p.246. 2013.

HENTHORNE. Comparação entre curvas TTS dos aços AISI 304 e AISI 430 tratados a 1066°C. In: MAGRI, Marcelo, **Tese de Mestrado, EPUSP**, 1995, p.25, Fig. 2-14. 1972.

JENNEY C. L. e O'BRIEN A. "Welding Handbook", AWS. Miami, FL. USA. E.9. 1991.

KITAHARA, H.; TSUJI, N.; MINAMINO, Y. Martensite transformation from ultrafine grained austenite in Fe–28.5 at.% Ni. **Materials Science and Engineering: A**, v. 438, p. 233–236, Nov. 2006.

KOU, S.; LE, Y. Metallurgical. Transactions, v.13A: p.1141, 1987.

KOU, S.; LE, Y. **Welding Parameters and the Grain Structure of Weld Metal**. 2.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, v. 19A, p.461, 2003.

LIBERATO, F. de M. **Soldagem A-TIG em Aços Inoxidáveis Ferríticos UNS S41003**, 2013. 95f. Tese de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Área de Concentração: Metalurgia de Transformação, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-993GP5> Acessado em: 16/05/2021

LIPPOLD, J.C. e KOTECKI, D.J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. 2005. Disponível em:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005wmws.book....L/abstract> Acessado em: 16/05/2021.

LIPPOLD, J.C. **Welding metallurgy and weldability**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118960332> Acessado em: 16/05/2021.

MADEIRA, R. P. Influência do uso de arames inoxidáveis ferríticos nas características da zona fundida de um aço inoxidável ferrítico com 17% de cromo bi-estabilizado. Tese de Mestrado. Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8DHHD2> Acessado em: 16/05/2021.

MATHERS, G. **The Welding of Aluminium and its Alloys**. 1. ed. Cambridge: CRC Press, Woodhead publishing, p.233, 2002. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=HEFO8ty6hnEC&oi=fnd&pg=PR9&dq=MATHERS,+G.+The+Welding+of+Aluminium+and+its+Alloys.+1.+ed.+Cambridge:+CRC+Press,+p.233,+2002.&ots=XJmitze_V2&sig=L-DCeyrTth- r_XYYYqo0xOHAZc#v=onepage&q&f=false Acessado em: 16/05/2021.

MODENESI, P.J. et al. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: SENAI-SP, v.1. p.100, 2001.

MOIRON, J.L. Welding Stainless Steels. In: BLONDEAU, R (Ed.). **Metallurgy and mechanics of welding: processes and industrial applications**. Londres: ISTE Ltd, p.397 – 431, 2008.

MUDALI, U. K.; RAO, C. B.; RAJ, B. Intergranular corrosion damage evaluation through laser scattering technique. **Corrosion science**, v. 48, n. 4, p. 783-796, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X05000946> Acessado

em: 16/06/2021.

OGWU, A.A. e DAVIES, T.J. Improving the Sensitisation Resistance of Ferritic Stainless Steel. **Scripta Materials**, v.37, n.3, p.259-263. 1997. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/49884734/s1359-6462_2897_2900125-520161026-15997-okpkka.pdf?1477494197=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DImproving_the_sensitisation_resistance_o.pdf&Expires=1623871720&Signature=T4KwBKp2b2CXY4JRXn~p7eO9nJfjNadGs0LB4Z60VDRN3ffwhGpzSBXPW-dA6gucjGY6wuXkclDLAi5nzHHQHLTg6u7-s7WfHhXzL7cTViL~IkHWI2Novf3uNNfFYWmMubRKIYx-KyfIMyIUNQHkgjI4BQzB6AP28PCxCWjNhjVBnPuNNVBo5ugRapqfKsaVQMhj6ul6Vq7gDYKrISAWYrXOjB~V5HLDtnNvYa25jr8UsB4lqkhmS53gfwBbArMTbnbRqQouoCNU1U89lbWKvntzki7e0OoPtEyFb6rCZsDRZ0vTqXpBZWYEqQ8YDDD3OixQaxCKNa2ZIFI4OZpaSw_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA Acessado em: 16/06/2021.

PADILHA, A.F e GUEDES, L.C. “Aços Inoxidáveis Austeníticos, Microestrutura e Propriedades”. Hemus, Universidade de São Paulo, São Paulo: 1994.

PALÁCIO, F. O. **Efeito do Tratamento Térmico no Grau de Sensitização do Aço Inoxidável Austenítico AISI 304, avaliado por método de reativação eletroquímica potenciodinâmica na versão ciclo duplo (DL-EPR)**. 2008. 44f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2008.

PARK, T. J.; KONG, J. P.; UHM, S. H.; WOO, I. S.; LEE, J. S. e KANG C. Y., J. Mater. Process. Technol. p.415, 2013.

PIRES, R. F.; FALLEIROS, N. A. Corrosão intergranular de aço inoxidável ferrítico: avaliação através de método eletroquímico. **São Paulo**, 2002.

PORTILLO, J A et al. Uma análise das estratégias do setor automobilístico e investimentos das quatro maiores montadoras brasileiras até 2020: aplicação da matriz insumo-produto. **Práticas em Contabilidade e Gestão**, v. 7, n. 1, 2019. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/c5e71d6e528636f31e8cc3b684faa4d7/1?pq-origsite=gscholar&cbl=4941437> Acessado em: 16/06/2021.

RÊGO, A. T. **Automação de Máquina de Solda por Pontos para Modelagem Matemática do Perfil de Temperatura no Aquecimento da Soldagem de Topo de Aço Aisi 409**. 2004. Tese de Doutorado. PUC Minas. Disponível em: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_RegoAT_1.pdf Acessado em: 16/06/2021.

RÊGO, R. U. Estudo do Ciclo Térmico da Soldagem de Topo do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 409. **Belo Horizonte, novembro de 2005**. Disponível em: <https://www.sapili.org/subir-depois/dplivros/cp001986.pdf> Acessado em: 16/06/2021.

ROMANI, A. IBGE: Setor automotivo tem maior crescimento em 11 anos. Revista Veja, 2019. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/ibge-setor-automotivo-tem-maior-crescimento-em-11-anos/> Acesso em: 19/10/2019.

SANCHES, L.P. **Estudo Comparativo quanto a referência à corrosão entre aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor**. Projeto Final de Curso de Metalurgia Departamento de Engenharia Metalúrgica e de matéria, 2009, UFRJ. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003588.pdf>. Acessado em: 13/05/2021.

SCHAEFFLER, A. L., Metal Prog., 56: 680 p. 1949.

SEDRIKS A.J., Corrosion of Stainless Steels, John-Wileyand Sons, NewYork USA, 1979.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steel**, Ed 2., Jonh Wiley and Sons, New York – NY 1996. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/378109> Acessado em: 13/05/2021.

SILVA, E. M. **Estudo da correlação entre o aporte térmico, as propriedades magnéticas e a corrosão sob tensão em juntas soldadas de aço inoxidável ferrítico AISI-409**. 187f. Tese (Doutorado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Campinas. 2011.

SILVA. C.C, et al. 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. Disponível em:
<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM315/Avalia%E7%E3o%20Leitura%20de%20Semina%20rio%20para%20Resumo/ESTUDO%20DA%20SENSITIZA%20CAUSADA%20PELO%20CICLO%20T%20RMICO%20DE.pdf> Acessado em: 13/05/2021.

SMITH, W.F. **Materials Science and Engineering.** 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1999, p. 547.

SOLOMAN, H. D. Weldments In: R. J. Christoffel, E. F. Nippes, and H. D. Solomon (Eds.) **Physical Metallurgy and Failure Phenomena**, New York: General Electric Company, Schenectady, 1979, p. 149.

TALKINGTON, J. **Variable Polarity Gas Metal Arc Welding.. MSc Dissertation, The Ohio State University.** p.113, 1998. Tese de Doutorado. The Ohio State University. Disponível em:
https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_olink/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=osu1130352747 Acessado em: 13/05/2021.

TAVARES, T. B. **Desenvolvimento de Dispositivo para Soldagem GTAW Mecanizada, na Posição Plana, com Controle de Velocidade e sua Aplicação em Estudo de Solidificação de Aço Inoxidável Ferrítico ABNT 430.** 2017. 38f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2017.

TOMARI, H. et al, “Intergranular Stress Corrosion Cracking of 13% Cr and 18% Cr Ferritic Stainless Steels in High Temperature High Purity Water”. **Corrosion**, v.38, n°5, May, p.283-294, 1982. Disponível em:
<https://meridian.allenpress.com/corrosion/article-abstract/38/5/283/159224/Intergranular-Stress-Corrosion-Cracking-of-13-Cr> Acessado em: 13/05/2021.

TSAI, M.C.; CHIOU, C.S.; DU, J.S. Phase Transformation in AISI 410 stainless steel, **Materials Science and Engineerin: A**, v. 332, p. 1-10, 2002. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509301017105> Acessado em: 27/04/2021.

UHLIG, H. Corrosion and Corrosion Control, New York: John Wiley&Sons. 1971.

VENKATESAN M. V; MURUGAN N; SAM S. and ALBERT S. K. Effect of Heat Input on Macro, Micro and Tensile Properties of Flux Cored Arc Welded Ferritic Stainless Steel Joints. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 67, n. 3, p. 375-383, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12666-013-0358-3> Acessado em: 27/04/2021.

VIEIRA G. F. de F. e SALERNO G. Caracterização e comportamento mecânico de aço inoxidável ferrítico, In: Contribuição técnica ao 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2015. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/caracterizacao-e-comportamento-mecanico-de-aço-inoxidavel-ferritico> Acessado em: 27/04/2021.

VILELA, L. de B. M. et al. Efeito da taxa de resfriamento sobre a formação de martensita em um aço inoxidável ferrítico com 11% Cr e baixos teores de intersticiais. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, n. 1, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/12696> Acessado em: 27/04/2021.

YAN H, et al. Microstructure and texture of Nb+ Ti stabilized ferritic stainless steel. **Materials Characterization**, v. 59, n. 12, p. 1741-1746, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580308001289> Acessado em: 27/04/2021.

YILBA, B. S; ARI, A. F. M.; ALEEM, B. J. A. Laser welding of low carbon steel and thermal stress analysis. **Optics & Laser Technology**, v. 42, n. 5, p. 760-768, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003039920900259X> Acessado em: 28/01/2021.

ZAMIN, L. G. Soldagem de aços inoxidáveis dissimilares por projeção. 2017. Disponível em: <https://repositorio.uces.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1843/TCC%20Lucas%20Guilherme%20Zamin.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acessado em: 24/03/2021.

ZHANG, Z.; FARRAR, R. A. Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals. **Welding Journal**, v. 76, n. 5, p. 183, 1997. Disponível em: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1997_05_s183.pdf Acessado em: 24/03/2021.