

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS PAIVA MATIAZZI

**INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO GÁS DE PURGA NA PROTEÇÃO DE
SOLDAS EM AÇO INOX AISI 304 PELO PROCESSO TIG**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

LUCAS PAIVA MATIAZZI

**INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO GÁS DE PURGA NA PROTEÇÃO DE
SOLDAS EM AÇO INOX AISI 304 PELO PROCESSO TIG**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Anderson
Geraldo Marena Pukasiewicz

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DA VAZÃO DO GÁS DE PURGA NA PROTEÇÃO DE SOLDAS EM AÇOS INOX AISI 304 PELO PROCESSO TIG

por

LUCAS PAIVA MATIAZZI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 28 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Orientador

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que me ajudaram diretamente e indiretamente de alguma forma para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus familiares, irmãos, mãe e pai por terem me apoiado, encorajado e incentivado ao longo da minha vida acadêmica.

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Anderson Geraldo Marenha Pukasiewicz, pela paciência, atenção, conselhos, sugestões e principalmente pelo tempo para me ajudar na elaboração das amostras e elaboração deste trabalho

Agradeço aos meus amigos Pedro e Rafael por terem me emprestado ferramentas para a execução dos meus testes e estarem sempre dispostos a me ajudarem no que fosse preciso.

Aos meus colegas de laboratório, Murilo, Giovany, André, Jack e Lorenzo por serem as minhas companhias mais frequentes ao longo do semestre.

Aos meus amigos de curso, Galvão, Nathália, Shay, Vínicius, Felipe e Allan por serem grandes amigos e terem me ajudado e oferecido ajuda nas mais diversas situações e momentos.

Um agradecimento aos meus dois amigos franceses Pierre e Marie, por terem sido boas companhias e pela oportunidade de me ajudarem com a minha língua francesa.

RESUMO

MATIAZZI, Lucas Paiva. **Influência da vazão do gás de purga na proteção de soldas em aços inox AISI 304 pelo processo TIG**. 2018. 35 p. Trabalho de conclusão de curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Os aços inoxidáveis são ligas metálicas que possuem propriedades mecânicas e metalúrgicas, em geral, diferente da maioria dos aços comuns ao carbono. A característica mais marcante desta liga é a grande resistência a corrosão, seja em meio alcalino ou ácido. O processo de soldagem TIG é o processo mais utilizado para realizar uniões metálicas nessas ligas, pois o uso de um gás inerte e um eletrodo não consumível conseguem eliminar problemas de formação de óxidos nos cordões de solda. Com o objetivo de analisar a importância de utilizar e identificar uma vazão apropriada de gás inerte para criar uma atmosfera protetora na região da poça de fusão e proximidades, escolheu-se realizar esse processo em diferentes situações. Foram escolhidos cinco tubos de aço inoxidável AISI 304 para serem soldados com varetas de aço inoxidável AISI 309L, e cada um com uma determinada vazão de gás argônio ao interior do tubo. Usando uma variação na vazão do gás de 2,5 l/min para cada tubo, partindo de zero até 10 l/min.. Após a soldagem das amostras, estas foram cortadas e separadas para o ensaio de corrosão superficial. O ensaio foi feito por imersão parcial numa solução salina com uma concentração de 3.500 ppm de cloreto de sódio em água. O tempo total da imersão foi de 120 horas, com troca da solução a cada 24 horas. Ao final do teste de corrosão, identificou-se que a amostras com vazões de 7,5 e 10 l/min apresentaram menos sinais de corrosão e um cordão de solda com a raiz mais limpa.

Palavras-chave: Soldagem. Inoxidável. TIG. Corrosão.

ABSTRACT

MATIAZZI, Lucas Paiva. **Influence of shielding gas flow in the protection of weldings on AISI 304 stainless steels by the TIG process.** 2018. 35 pages. Conclusion Course Work of Mechanical Engineering Degree – Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Stainless steels are metal alloys that have mechanical and metallurgical properties, generally different to the most common carbon steel alloys. The most remarkable feature of this alloy is its great corrosion resistance, whether in alkaline or acidic environment. The TIG welding process is the most used process for making metallic joints in these alloys, since the use of an inert gas and a non-consumable electrode can remove problems of oxide development in the weld beads. With the objective of analyzing the importance of using and identifying an appropriate inert gas flow to create a protective atmosphere in the region of the fusion pool and in the surroundings, it has chosen to make this process in different situations. Five AISI 304 stainless steel pipes were chosen to be welded with AISI 309L stainless steel rods, and each with a certain flow of argon gas inside the pipe. Using a gas flow changing of 2.5 l/min for each pipe, starting from zero up to 10 l/min. After the samples welded, they have cut and separated for the surface corrosion experiment. The experiment has done by partial immersion in a saline solution with a concentration of 3,500 ppm of sodium chloride in water and left out of doors. The total immersion time was 120 hours, with solution change of every 24 hours. At the end of the corrosion experiment, it has identified that samples with the flow of 7.5 and 10 l / min have showed less signs of corrosion and a weld bead with the cleanest root.

Keywords: Welding. Stainless. TIG. Corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crosta de óxido formando-se durante a soldagem	10
Figura 2 - Esquema de soldagem TIG	11
Figura 3 – Esquema de uma bancada de soldagem TIG	13
Figura 4 – Taxa de corrosão em função do percentual de cromo presente na liga...	16
Figura 5 – Diagrama de equilíbrio de fases para aços inoxidáveis	17
Figura 6 – Diagrama de Schaeffer para aços inoxidáveis	18
Figura 7 – Diagrama de Delong para aços inoxidáveis	18
Figura 8 – Cordão de solda contaminado	21
Figura 9 – Cordão de solda com deposição de tungstênio	22
Figura 10 – Tubo cortado no sentido horizontal	23
Figura 11 – Adaptação a partir de uma conexão de três vias	25
Figura 12 – Método de vedação do tubo	25
Figura 13 - Amostras imersas em solução salina.....	26
Figura 14 – Raiz do cordão de solda resultante para as seguintes vazões: (a) sem vazão; (b) 2,5 l/min; (c) 5 l/min; (d) 7,5 l/min; 10 l/min.....	27
Figura 15 - Amostras após o ensaio de corrosão: sem vazão (a); 2,5 l/min (b); 5,0 l/min (c); 7,5 l/min (d); 10 l/min (e)	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade mecânicas do aço austenístico recozido em geral, aço extra doce e aço maraging.....	19
Tabela 2 - Composição (% do peso) dos elementos de liga presentes no aço AISI 304.	20
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço AISI 304 e 316L.	20

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVO	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.3	JUSTIFICATIVA.....	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	PROCESSO TIG	11
2.1.1	Equipamentos e materiais	12
2.1.2	Variáveis de soldagem	13
2.1.3	Vantagens e desvantagens	14
2.2	AÇOS INOXIDÁVEIS.....	15
2.2.1	Diagrama de fases dos aços inoxidáveis.....	16
2.2.2	Aços austenísticos.....	19
2.2.3	Aço inoxidável AISI 304.....	20
2.3	DEFEITOS DE SOLDAGEM EM AÇOS INOXIDÁVEIS	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	23
3.2	PARÂMETROS DE SOLDAGEM E EXECUÇÃO DO PROCESSO	24
3.3	ENSAIO DE CORROSÃO	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5	CONCLUSÃO.....	31
	REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de fabricação mecânica mais utilizado para se unir metais atualmente e abrange uma variedade de aplicações. Seu princípio básico de união, a fusão de um metal de adição ou não sobre um metal de base faz com que aquela região unida tenha propriedades mecânicas semelhantes ou próximas a de uma área qualquer do metal de base. A qualidade da solda resultante pode afetar a eficiência dessa união.

Por isso, o processo de soldagem com eletrodo de tungstênio e gás inerte (TIG) se destaca quando o objetivo é obter um cordão de solda de qualidade. Por utilizar um fluxo de gás inerte, esse processo é mais adequado para soldar metais mais suscetíveis à contaminação e à corrosão. Todavia, defeitos podem surgir quando a soldagem não for bem executada ou alguns de seus parâmetros forem mal regulados.

Ao se soldar um tubo pelo processo TIG é preciso tomar alguns cuidados quanto a proteção da poça de fusão e da ZTA (sigla para Zona Termicamente Afetada), que são as regiões próximas ao cordão de solda e afetadas pelo calor gerado no processo. Para proteção dessas 2 áreas, utiliza-se um sistema de vazão de gás inerte sobre uma área para expelir e eliminar a reação do oxigênio presente na atmosfera com os metais de liga do aço, principalmente quando o metal de base e de adição estiverem líquidos. Esse método é comumente chamado de purga, ou seja, basicamente seria o processo de eliminação de impurezas, e o gás utilizado para essa função é comumente chamado de gás de purga.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar através de ensaio de corrosão, inspeção visual e comparação entre as amostras após os ensaios para saber quais são as vazões de gás de purga que proporcionam uma menor formação, em termos qualitativos e quantitativos, de defeitos após a soldagem de um tubo de aço inoxidável AISI 304 pelo processo TIG.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são divididos da seguinte maneira:

- Soldagem das amostras variando-se apenas a vazão de gás de purga;
- Realização de um ensaio de corrosão superficial das amostras;
- Comparação das amostras após os ensaios e conclusões finais.

1.3 JUSTIFICATIVA

É de conhecimento dos que trabalham na área ou com o processo de soldagem que no processo TIG o gás de purga é muito importante para proteção da solda durante a execução. Porém, poucos projetistas sabem quais as vazões apropriadas para execução de uma solda de qualidade e a origem de alguns defeitos de soldagem. É de praxe que muitos soldadores utilizem vazões elevadas, no qual muitas vezes acaba gerando desperdício do gás inerte, ou uma proteção defeituosa. Muitas vezes sem o conhecimento adequado sobre como fazer uma proteção adequada da região solda, ou simplesmente ignoram os defeitos que vão aparecendo ao longo do processo. A Figura 1 abaixo ilustra um exemplo de um aço inoxidável.

Figura 1 – Crosta de óxido formando-se durante a soldagem



Fonte: BRAZILWELDS – Canal da Soldagem

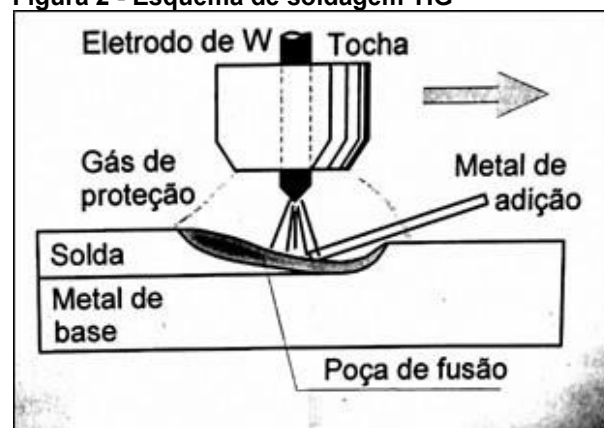
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO TIG

A possibilidade de usar hélio para proteger o arco voltaico e a poça de fusão foi primeiro investigada na década de 20. Durante a Segunda Guerra Mundial, esse processo foi desenvolvido quando a indústria americana de aviões de combate precisava substituir os rebites por soldas em ligas de alumínio e magnésio, e soldando com um eletrodo de tungstênio no polo negativo obteve-se uma solda de ótima qualidade (QUITES, 2002).

O processo TIG (sigla em inglês para *Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (sigla em inglês de *Gas Tungsten Arc Welding*) é a soldagem a arco elétrico com um eletrodo de tungstênio, não consumível, que irá aquecer e gerar uma poça de fusão em um metal de base, no qual um metal de adição poderá ser adicionado ou não diretamente na poça; se adicionado pode ser manualmente ou automaticamente. Essa poça será protegida contra a contaminação pelo fluxo de um gás inerte ou mistura de gases inertes (MARQUES, 2011). A Figura 2 ilustra a execução do processo.

Figura 2 - Esquema de soldagem TIG



Fonte: MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE (2005)

Por ser envolvida por uma proteção gasosa, a poça de fusão é protegida da atmosfera contaminante e oxidante do ar ambiente, garantindo um cordão de solda de boa qualidade se bem executado. Atualmente o processo TIG é utilizado para soldar, principalmente, ligas de alumínio, magnésio, titânio e aços inoxidáveis (BRANDI, 1992).

2.1.1 Equipamentos e materiais

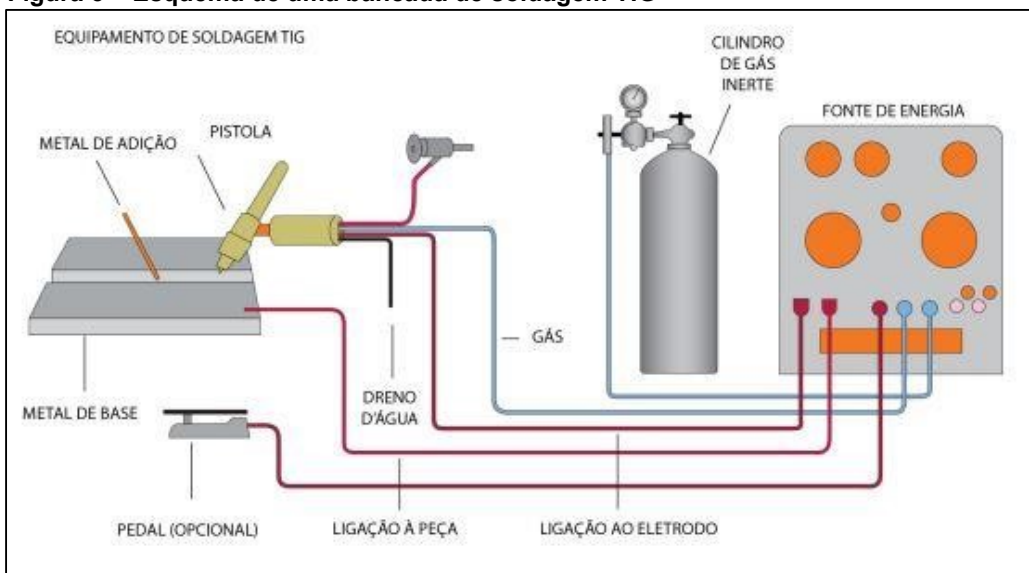
Esse processo utiliza equipamentos e materiais de soldagem que são semelhantes ou iguais aos usados em outros processos, como uma máquina retificadora de soldagem que pode ser usada para fornecer corrente elétrica tanto para soldagem TIG como para soldagem a eletrodo revestido. Logo, os equipamentos mais comuns para a soldagem manual TIG são:

- Fonte de corrente elétrica: Pode ser um gerador, transformador ou retificador e irá fornecer uma corrente elétrica, alternada ou contínua, para o processo (BRANDI, 1992). Algumas máquinas de solda TIG, chamadas de inversoras, possuem um equipamento eletrônico que é utilizado para gerar a corrente contínua pulsada, onde basicamente controla-se uma corrente contínua alta e baixa e a sua frequência;
- Gás de proteção: Os gases mais utilizados para a proteção da poça de fusão são o argônio, o hélio ou as suas misturas. Se for utilizar algum na forma pura, essa pureza deve ser de 99,99% (BRANDI, 1992);
- Tocha: É um dispositivo que fixa o eletrodo de tungstênio a um cabo elétrico ligado a fonte de corrente e conduz o fluxo de gás até a região da poça de fusão. Possui um bocal de cerâmica para suportar a temperatura da região próxima ao arco elétrico. Para correntes elétricas muito altas utiliza-se uma tocha especial que é refrigerada à água;
- Eletrodo: O eletrodo pode ser de tungstênio puro, porém existem ligas de tungstênio que contêm óxidos de cério, de zircônio, de lantânio ou de tório (CARY; HELZER, 2005);
- Metal de adição: Também conhecido como vareta de adição, possui três diâmetros padronizados (1,6mm; 2,4mm; 3,2mm) e a suas composições são estabelecidas por normas técnicas para cada material a ser soldado, como por exemplo, a norma A5.28 da AWS (sigla em inglês para *American Welding Society*) que estabelece a composição das varetas TIG para soldar aços de baixa liga;

- Sistema de refrigeração: Equipamento separado ou acoplado na máquina de solda, é composto por uma mangueira, bomba e reservatório utilizados para bombear água que refrigerará a tocha que for apropriada para esse sistema.

A Figura 3 ilustra um esquema dos principais materiais e equipamentos para uma soldagem TIG manual.

Figura 3 – Esquema de uma bancada de soldagem TIG



Fonte: www.profissionaldoaco.com.br

2.1.2 Variáveis de soldagem

Segundo Franco (2008), as variáveis de soldagem do processo TIG são basicamente a tensão do arco, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e vazão de gás de proteção.

- Segundo Delgado (2000), a tensão total do arco elétrico aumenta com o comprimento do arco, além do tipo de gás exercer uma influência nessa tensão. Logo, quanto mais longo o arco, maior será a tensão do mesmo. Todavia, o seu tamanho irá exercer enorme influência sobre a formato final da região soldada. Arcos muito curtos ou pequenos tendem a ser instáveis e mais propícios a defeitos de soldagem. Se for

muito longo, o cordão será raso e largo e não haverá muita penetração, se for muito curto, haverá excesso de penetração podendo furar a peça ao invés de soldar (MARQUES, 2011);

- Ainda segundo Delgado (2000), o calor total desenvolvido no arco voltaico é proporcional ao produto entre a corrente de soldagem e a tensão no arco. Pois para um comprimento de arco constante, aumentando-se a corrente ou diminuindo-a, a penetração da solda pode aumentar ou diminuir respectivamente;
- Tanto o hélio como o argônio podem ser utilizados no processo TIG, porém o argônio é mais utilizado por esse ser mais denso, poder gerar um arco elétrico com uma tensão menor e ter um arco mais estável (DELGADO, 2000). A vazão de gás também influencia na qualidade da solda. Se for insuficiente, o ar atmosférico irá reagir com o metal fundido formando óxidos e poros, se for muito elevada pode causar turbulência no fluxo e causar efeitos semelhantes aos de vazão insuficiente (MARQUES, 2011).

2.1.3 Vantagens e desvantagens

Assim como todo processo de soldagem, o processo TIG também apresenta limitações, vantagens e desvantagens quanto ao seu uso. Dentre elas estão:

- Soldas de alta qualidade, quando a soldagem for bem executada e nos parâmetros apropriados;
- Produz poucos respingos;
- Melhor controle dos parâmetros de soldagem;
- Ótimo para soldar aços inoxidáveis e ligas de metais reativos (MODENESI, 2013);
- Controle na penetração da solda;
- Pode ser manual ou automática;
- Os equipamentos são compatíveis e podem ser utilizados em outros processos de soldagem;
- Proteção da poça de fusão por um gás inerte;

- Baixa taxa de deposição de metal (MODENESI, 2013);
- Limitado a soldar peças de espessuras relativamente finas (MODENESI, 2013);
- Inclusão de tungstênio na poça de fusão caso o eletrodo a toque;
- Pode haver contaminação da solda se a poça não for bem protegida e limpa antes da soldagem.

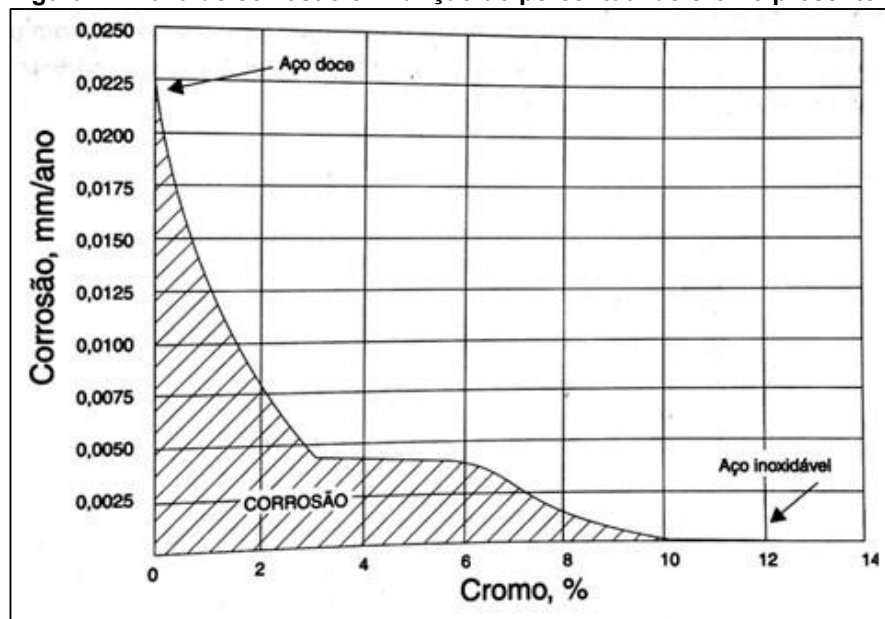
2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas em que o elemento de liga predominante é o cromo, e a sua concentração deve ser pelo menos de 11% da massa total da liga. Por isso, essas ligas de aço são altamente resistentes a corrosão em vários tipos de ambientes (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Tal propriedade faz com que esse aço seja amplamente utilizado em tubos, chapas, arames, revestimentos, parafusos, porcas e arruelas para indústrias e equipamentos que trabalhem com materiais corrosivos ou em ambientes degradantes, como a indústria alimentícia, química, petrolífera, de combustíveis, estaleiros e etc.

A resistência à corrosão destas ligas à base de ferro e cromo ocorre devido a passivação, isto é, a formação de uma camada de óxidos de cromo e de outros metais de liga e a dissolução desta camada no meio corrosivo (COSTA; MEI, 2006). Além do cromo, o silício, o níquel, o nitrogênio e o molibdênio são outros elementos que podem aumentar ainda mais a resistência a corrosão da liga (TREMARIN, 2007).

O gráfico da Figura 4 ilustra como o aumento da concentração de cromo, em porcentagem total de peso da liga, irá diminuir a taxa de corrosão para uma mesma liga exposta a um ambiente corrosivo.

Figura 4 – Taxa de corrosão em função do percentual de cromo presente na liga



Fonte: CHIAVERINI (1996)

Cada elemento de liga afeta de maneira individual alguma propriedade mecânica do aço. A microestrutura da liga também pode exercer influência nas propriedades mecânicas e físicas do aço inoxidável, fazendo com que aços inoxidáveis com composições semelhantes e microestruturas diferentes tenham características tão diferentes entre si. Segundo Costa e Mei (2006), a classificação dos aços inox é feita em 5 categorias: os aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos, austeníticos, ferríticos-austeníticos (também conhecidos como *duplex*) e os aços endurecidos por precipitação.

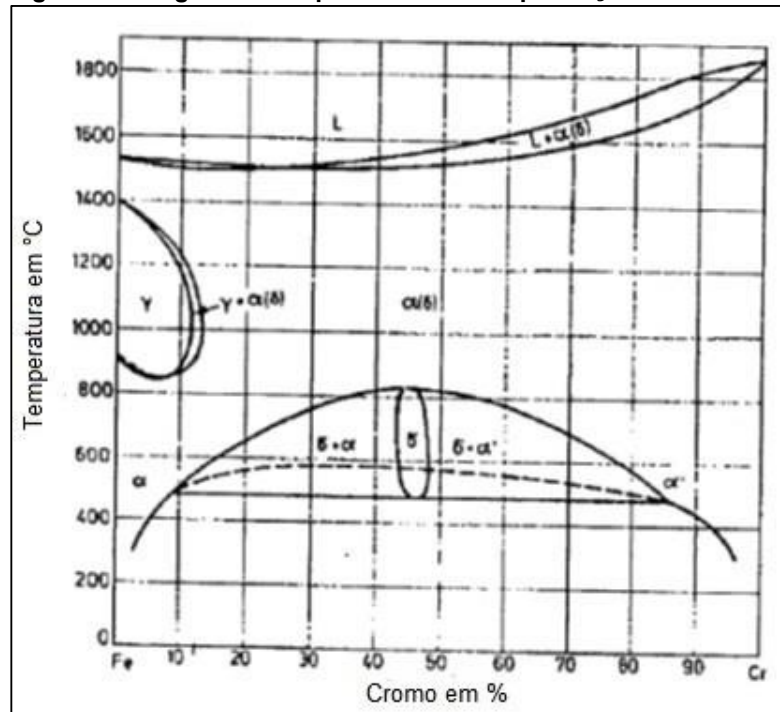
2.2.1 Diagrama de fases dos aços inoxidáveis

Um diagrama de equilíbrio de fases nada mais é do que um gráfico que representa as microestruturas estáveis e estados físicos dos elementos presentes em uma liga. O diagrama que correlaciona a temperatura e a concentração de um ou mais elementos é o mais utilizado. Esses gráficos fornecem informações úteis a respeito do desenvolvimento e transformação das microestruturas, seja na fusão, solidificação, resfriamento ou em algum tratamento térmico.

Atualmente já estão disponíveis diagramas de fases para vários metais e ligas metálicas, o mais conhecido e utilizado é o diagrama ferro-carbono (Fe-C). A partir

dele é possível compreender a formação e a diferença entre vários tipos de aços e ferros fundidos. A Figura 5 ilustra um diagrama de equilíbrio de fases para os aços inoxidáveis.

Figura 5 – Diagrama de equilíbrio de fases para aços inoxidáveis



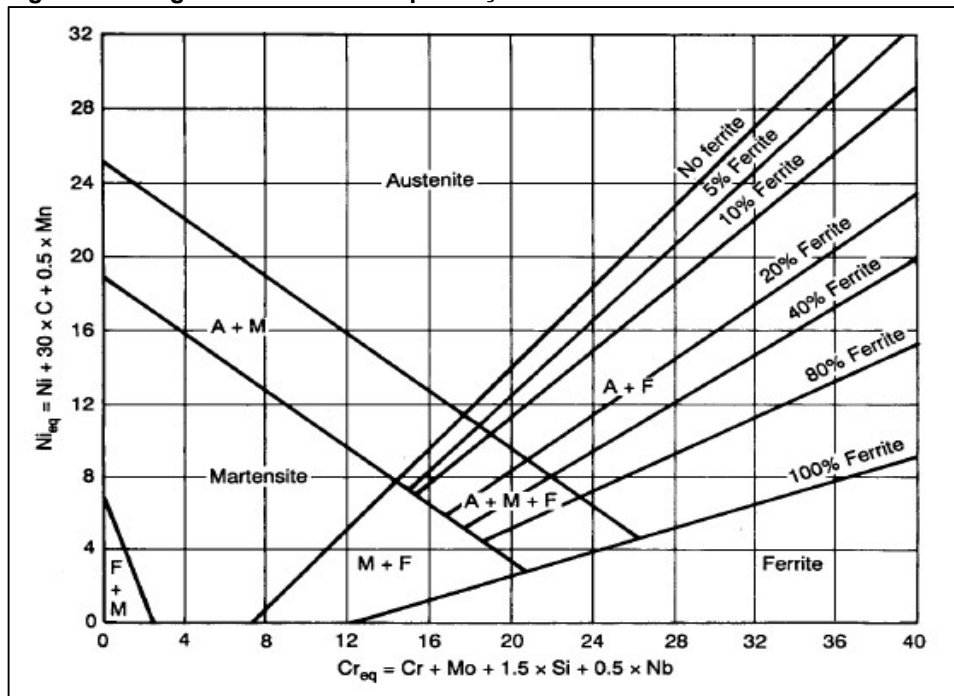
Fonte: BAULY (2000)

Os aços inoxidáveis são separados principalmente em 5 categorias de acordo com as microestruturas estáveis presentes. Porém, existe mais de um diagrama disponível para esses aços. Uma vez que, os principais elementos de liga são, além do ferro, o cromo, para os aços ferríticos por exemplo, ou uma combinação de cromo e níquel, para os austeníticos.

Outros diagramas e gráficos foram criados para estimarem quais serão as microestruturas resultantes nestas ligas após a solidificação, como o que acontece nas soldas. Dois exemplos desses diagramas são as Figuras 6 e 7 que ilustram, respectivamente: o Diagrama de Schaeffler, que é um diagrama que foi projetado para prever as microestruturas e composições químicas nas ligas de aços inoxidáveis após a sua solidificação levando-se em conta a concentração de metais de liga (KEJELIN, 2012); o Diagrama de DeLong, que é um diagrama de Schaeffler modificado, pois este passa a levar em consideração o nitrogênio nos cálculos dos elementos equivalentes

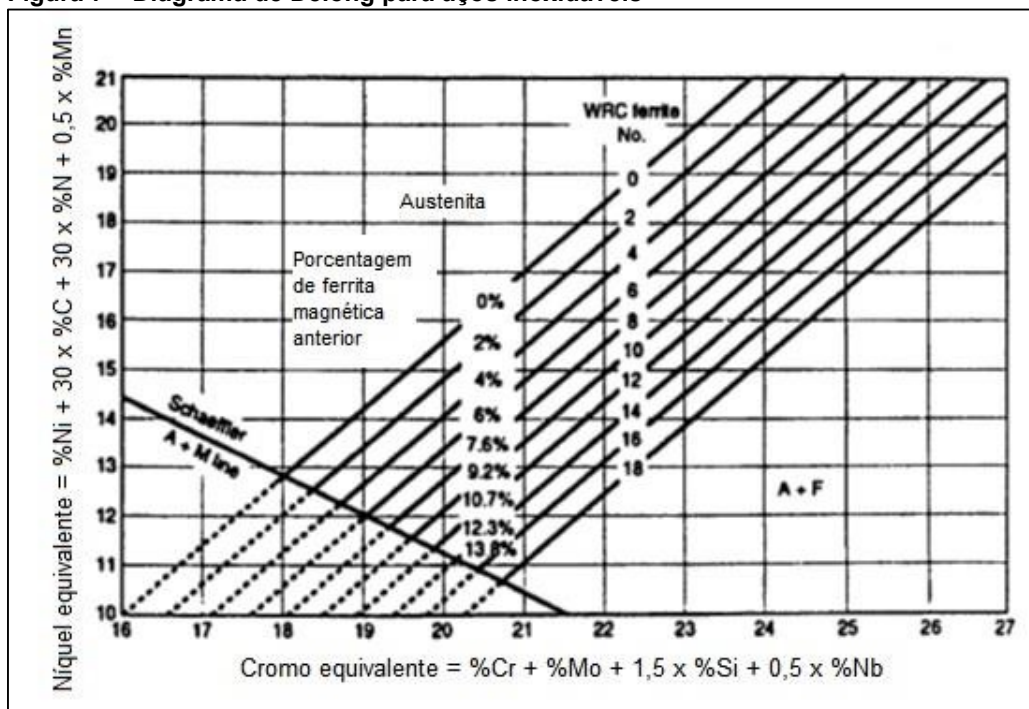
(BAULY,2000). Uma vez que, a adição de nitrogênio como estabilizante de austenita é uma técnica introduzida há poucas décadas.

Figura 6 – Diagrama de Schaeffer para aços inoxidáveis



Fonte: ASM (2008)

Figura 7 – Diagrama de Delong para aços inoxidáveis



Fonte: BAULY (2000)

2.2.2 Aços austenísticos

São ligas à base de ferro, onde a concentração de carbono é inferior a 0,08%, o teor de cromo é de 16 a 30% e o níquel de 8 a 35%, e a sua microestrutura predominante é a austenita à temperatura ambiente, e não são magnéticos. Segundo a classificação AISI (sigla em inglês para *American Iron and Steel Institute*), classificação mais utilizada e aceita pela indústria e comércio, os aços mais comuns são o 304, 304L, 310, 316, 316L e entre outros (COSTA; MEI, 2006). A Tabela 1 mostra uma comparação entre algumas propriedades mecânicas dos aços austenísticos em geral, recozidos, com um aço extra doce, e um aço *maraging* para mostrar que os inoxidáveis austenísticos possuem uma combinação de boa ductilidade com alta resistência à tração, e não apenas ótima resistência a corrosão.

Tabela 1 - Propriedade mecânicas do aço austenístico recozido em geral, aço extra doce e aço *maraging*.

Propriedades	Limite de escoamento (N/mm ²)	Limite de resistência à tração (N/mm ²)	Alongamento (%)
Aço austenístico	200 a 250	450 a 750	35 a 45
Aço extra doce	180 a 200	300 a 320	30
Aço <i>maraging</i>	>2300	>2300	<10

Fonte: PADILHA; GUEDES (1994)

À temperatura ambiente o aço inox austenístico não tem um limite de escoamento elevado quando comparado com outros tipos de aços, porém, apresenta limites de resistência à tração aceitáveis para certas aplicações e uma alta ductilidade e tenacidade. Sua resistência à tração e dureza podem ser melhoradas com o encruamento, e o tratamento térmico não tem efeito sobre essas propriedades mecânicas. Além disso, é o grupo de aços inoxidáveis mais resistentes a corrosão; são adequados para trabalhos em temperaturas elevadas (até 925°C) e em temperaturas criogênicas (abaixo de 0°C); e possuem boa soldabilidade (FERNANDES, 2010).

Tais propriedades permitem a esses aços serem utilizados na fabricação de caldeiras, vasos de pressão, tanques de armazenamento e processamento, tubulações para transporte de vapor ou de algum fluido ou meio corrosivo, sob pressão e/ou em alta temperatura.

2.2.3 Aço inoxidável AISI 304

Esse é o tipo de aço inoxidável mais utilizado e comercializado pela indústria atualmente. Devido a sua altíssima resistência à corrosão, seja em temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas. Até 850°C, o aço 304 mantém a sua resistência à oxidação e resistência à corrosão intergranular até 300°C. (FERNANDES, 2010). Por ser um aço inoxidável do tipo austenístico, e já descrito no item anterior, apresenta um bom alongamento e resistência à tração, além de uma boa conformação a frio e fácil soldabilidade. As Tabelas 2 e 3 a seguir ilustram, respectivamente, a composição química do aço 304 em porcentagem de peso e algumas das suas propriedades mecânicas, em valores aproximados, comparadas com outro aço inoxidável.

Tabela 2 - Composição (% do peso) dos elementos de liga presentes no aço AISI 304

AISI	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Ni	Cr	N máx.
304	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	8,0 a 10,5	18,0 a 20,0	0,10

Fonte: FERNANDES (2010)

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço AISI 304 e 316L

AISI	Condição	Limite de resistência à tração (N/mm ²)	Limite de escoamento (N/mm ²)	Alongamento (%)
304	Recozido	515	205	40
316L	Recozido	485	170	40

Fonte: CALLISTER; RETHWISCH (2014)

Este aço é comercializado sobre a forma de chapas, tubos e tarugos, pois como é possível conformar a frio, uma chapa pode passar por processos diversos como extrusão, trefilação, prensagem, estampagem e dentre outros processos. Porém pode ser encontrado como elementos de máquinas, parafusos, porcas, arruelas, rebites, equipamentos ou utensílios para uso em outras áreas, como materiais cirúrgicos por ser um material praticamente inerte.

2.3 DEFEITOS DE SOLDAGEM EM AÇOS INOXIDÁVEIS

Como em todo processo de soldagem, os aços inoxidáveis também apresentam defeitos se o processo ao qual foram soldados foi mal executado ou o material soldado era de baixa qualidade. Como os aços inoxidáveis são materiais que possuem uma complexa composição química com vários elementos de liga, o seu processo de soldagem é mais difícil e complexo do que soldar aços de baixa liga, e eles também estão suscetíveis a defeitos de soldagem. Assim como na soldagem de outros materiais, é possível ocorrer defeitos como trincas, poros, mordeduras, falta de penetração e contaminação. A Figura 8 ilustra um desses defeitos.

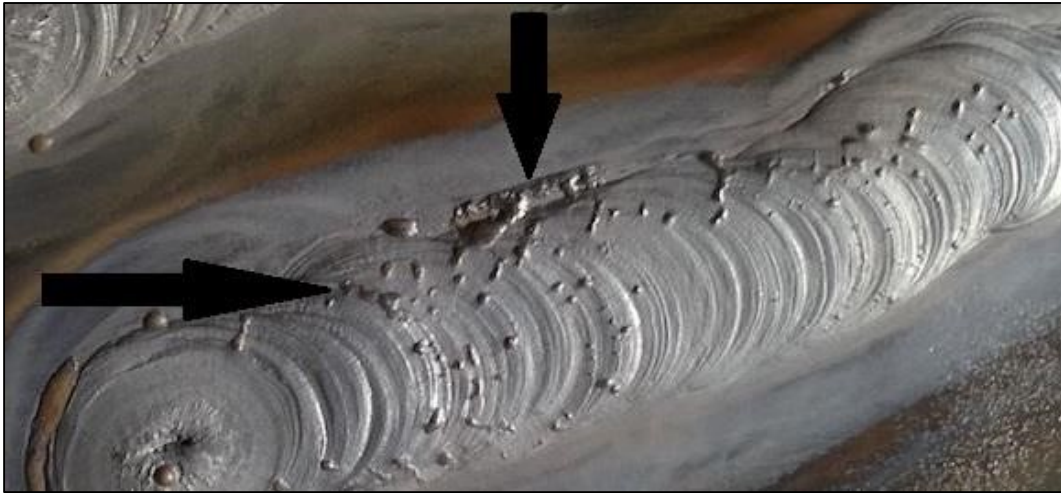
Figura 8 – Cordão de solda contaminado



Fonte: www.fabricatingandmetalworking.com/2011/09/10-common-tig-problems-and-solutions/

Por ser um processo de soldagem que é operado, na maioria dos casos, de forma manual, existe um defeito que é mais característico deste processo, que é a deposição de tungstênio no cordão de solda. Isso ocorre devido ao eletrodo ter entrado em contato com a poça de fusão em algum momento durante o processo. O que gera consumo do eletrodo e o aparecimento de grãos na superfície soldada após a solidificação. A Figura 9 ilustra um cordão de solda com deposições de tungstênio indicadas pelas setas.

Figura 9 – Cordão de solda com deposição de tungstênio



Fonte: weldingweb.com/showthread.php?362501-Got-My-TIG-Welder-Running-First-Attempt-At-TIG-Welding-Comments-Please

Dependendo da microestrutura predominante nos aços inoxidáveis, cada categoria é mais suscetível a um determinado defeito mais do que o outro. Por isso um Diagrama de Schaeffler, também pode ser usado para fazer uma previsão dos possíveis problemas de soldabilidade em função da microestrutura resultante da solda (KEJELIN, 2012).

A sensitização é outro defeito de soldagem bastante comum nos aços inoxidáveis. Segundo Rashid *et al* (2012), durante a soldagem quando a temperatura da ZTA está entre 550 °C e 800 °C, o cromo presente nos grãos afetados tem alta afinidade com o carbono e após o resfriamento formam carbetos de cromo. Logo, o fenômeno é ocorre quando há precipitação de carbetos de cromo nos contornos de grão, com isso o cromo deixa de formar a camada de óxido responsável pela proteção a corrosão (ASM, 2008). Ao perder essa camada protetora o aço inoxidável fica suscetível a corrosão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e procedimentos para a execução da soldagem, preparação das amostras e os ensaios e testes para as mesmas.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O material das amostras será o aço inoxidável AISI 304. Foi utilizado um tubo com as seguintes dimensões: 2 pol. de diâmetro (50,8 mm), 1 metro de comprimento e espessura de parede de 2 mm. Esse tubo, foi cortado verticalmente para se obter seções com 100 mm de comprimento. E cada seção foi cortada horizontalmente com o uso de um arco de serra, para obter um espaçamento entre as paredes de aproximadamente 2 mm de largura e permitir que o metal de adição preenchesse por completo o espaço entre as paredes do tubo.

Ao total foram cortados 5 tubos para serem utilizados como amostras. A Figura 10 abaixo ilustra como os tubos foram cortados. As três marcas, equidistantes entre si e das extremidades, serviram como referência para a medição da velocidade de soldagem para um cordão de aproximadamente 50 mm de comprimento.

Figura 10 – Tubo cortado no sentido horizontal



Fonte: Aatoria própria

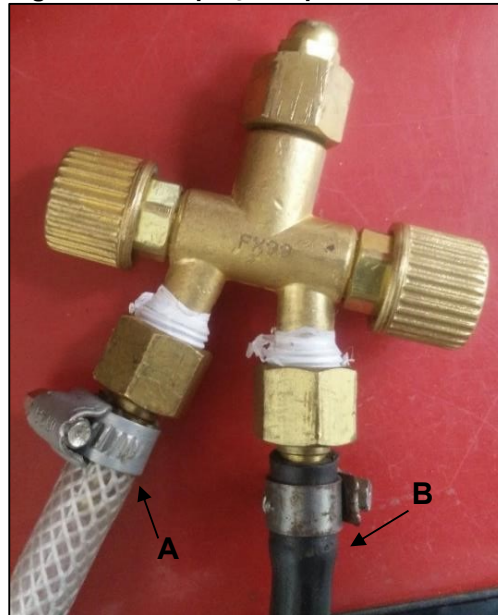
Para a soldagem foi utilizado um equipamento de soldagem TIG, *Square Wave TIG 355* da Lincoln Electric®, com gás argônio puro como gás de purga e de proteção. Os eletrodos de tungstênio utilizados foram os de ponta vermelha WT20 (eletrodos com 1,8 a 2,2% de óxido de tório em sua composição) com 2,4 mm de diâmetro, a escolha foi feita seguindo recomendação do fabricante da máquina de soldagem utilizada, o qual recomenda este tipo de eletrodo para soldar com corrente

contínua. Como metais de adição serão utilizadas as varetas AWS 5.9 ER309L de 2,4 mm de diâmetro. A tocha TIG utilizava um bocal de alumina (óxido de alumínio) número 7 (diâmetro de 11,2 mm para o bocal de saída do gás).

3.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM E EXECUÇÃO DO PROCESSO

Para o processo de soldagem TIG foi utilizada uma corrente contínua com aproximadamente 81 A de corrente elétrica e não pulsada, por ser um valor suficiente para se soldar uma espessura de 2 mm segundo o fabricante do equipamento de soldagem. Esses parâmetros foram constantes para a soldagem de todas as amostras. Para as vazões do gás de purga a serem utilizadas foram escolhidos 5 valores: sem vazão qualquer (zero); 2,5 l/min; 5 l/min; 7,5 l/min e 10 l/min.. Esses valores foram escolhidos pois na escala do fluxômetro a resolução era de apenas 2,5 l/min..

Com a disponibilidade de apenas um cilindro de gás argônio, foi preciso utilizar uma conexão de 3 vias (ou conexão em Y), para fornecer gás tanto para a tocha de soldagem quanto para o interior do tubo, acoplada a uma válvula reguladora para cilindro com fluxômetro. Uma mangueira de 5/16 pol. de diâmetro foi usada para conduzir parte do gás de purga até o interior do tubo e outra mangueira para a tocha. A Figura 11 ilustra a montagem final, com a mangueira para purga indicada por A e a mangueira para tocha indicada por B, da conexão adaptada que foi utilizada para conduzir o fluxo de gás.

Figura 11 – Adaptação a partir de uma conexão de três vias

Fonte: Autoria própria

A vedação de cada um dos tubos foi feita com tiras circulares de raspa de couro, com diâmetro maiores do que 2 pol., postas em ambas as extremidades e presas com fitas *Hellerman*. Um pequeno corte foi feito em uma das tiras para que a mangueira pudesse ser encaixada. A Figura 12 ilustra a montagem final do tubo vedado com a mangueira acoplada.

Figura 12 – Método de vedação do tubo

Fonte: Autoria própria

Após a soldagem, cada tubo foi cortado novamente com um arco de serra para poder ter uma vista melhor da parte interna e para cortá-los em tamanhos apropriados para o teste de corrosão seguintes.

3.3 ENSAIO DE CORROSÃO

Para o ensaio de corrosão superficial, optou-se por realizar através da imersão parcial das amostras em solução salina. Para esse ensaio, as amostras foram cortadas ao meio e perpendiculares ao sentido cordão de solda e somente uma metade de cada amostra foi utilizada para o ensaio de corrosão. A mistura de água com sal utilizada possuía uma concentração de 3500 ppm (ou 3,5% da massa total) de cloreto de sódio, esse valor é a concentração aproximada de sais na água do mar.

Em seguida, dois potes simples de vidro foram utilizados e dentro de cada um adicionou-se 100 ml da solução e as amostras que foram cortadas previamente, o volume adicionado foi suficiente para cobrir aproximadamente a metade da altura das amostras. Os potes foram deixados ao ar livre e abertos para que a água pudesse evaporar e criar uma atmosfera úmida e alcalina no entorno das partes não imersas. A Figura 13 abaixo ilustra o procedimento montado.

Figura 13 - Amostras imersas em solução salina



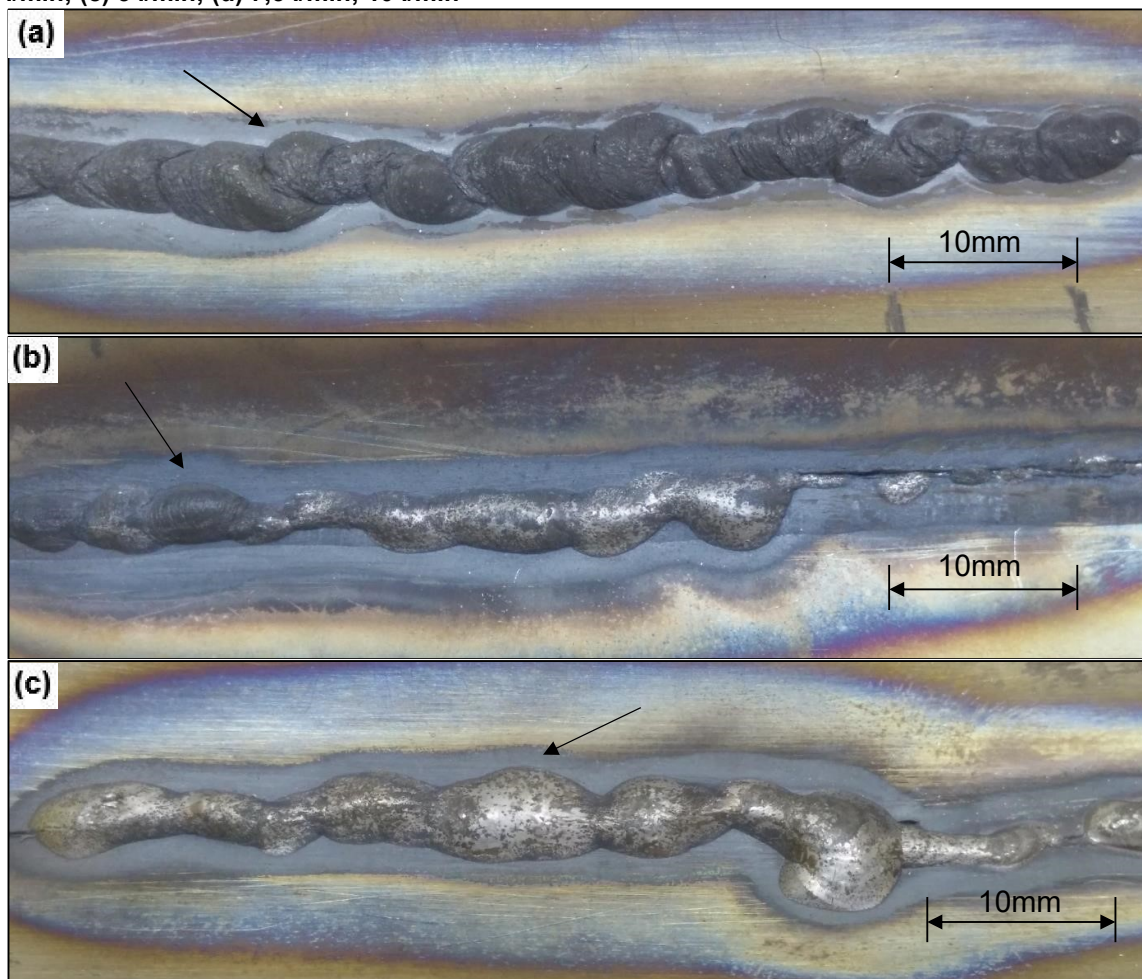
Fonte: Autoria própria

Após um período de 24 horas, a solução usada anteriormente era descartada, as amostras eram secas, fotografadas e imersas novamente em uma nova solução salina, com a mesma concentração e mesmo volume que as anteriores. A troca era feita pois o líquido atingia um estado de saturação, fazendo com que a taxa de corrosão diminuísse com o tempo. Esse processo foi repetido 5 vezes ao todo, resultando em aproximadamente 120 horas de imersão parcial das amostras em água salgada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 14(a) a 14(e) ilustram as raízes dos cordões de solda resultantes em cada um dos tubos para cada uma das cinco vazões em ordem crescente de vazões. Os tempos para soldar um cordão de 50 mm em cada um dos tubos foram de aproximadamente: 24 s; 23 s; 26 s; 24 s; 27 s. O que rendeu uma velocidade de soldagem o mais uniforme possível para todas as amostras, pois nos processos de soldagem a velocidade do processo tem influência de como será a qualidade dos cordões resultante e a penetração do material de adição. Se a velocidade for muito baixa, haverá fusão do metal de base sem deposição do metal de adição, se for muito rápida não haverá fusão e deposição do metal de adição o suficiente.

Figura 14 – Raiz do cordão de solda resultante para as seguintes vazões: (a) sem vazão; (b) 2,5 l/min; (c) 5 l/min; (d) 7,5 l/min; 10 l/min



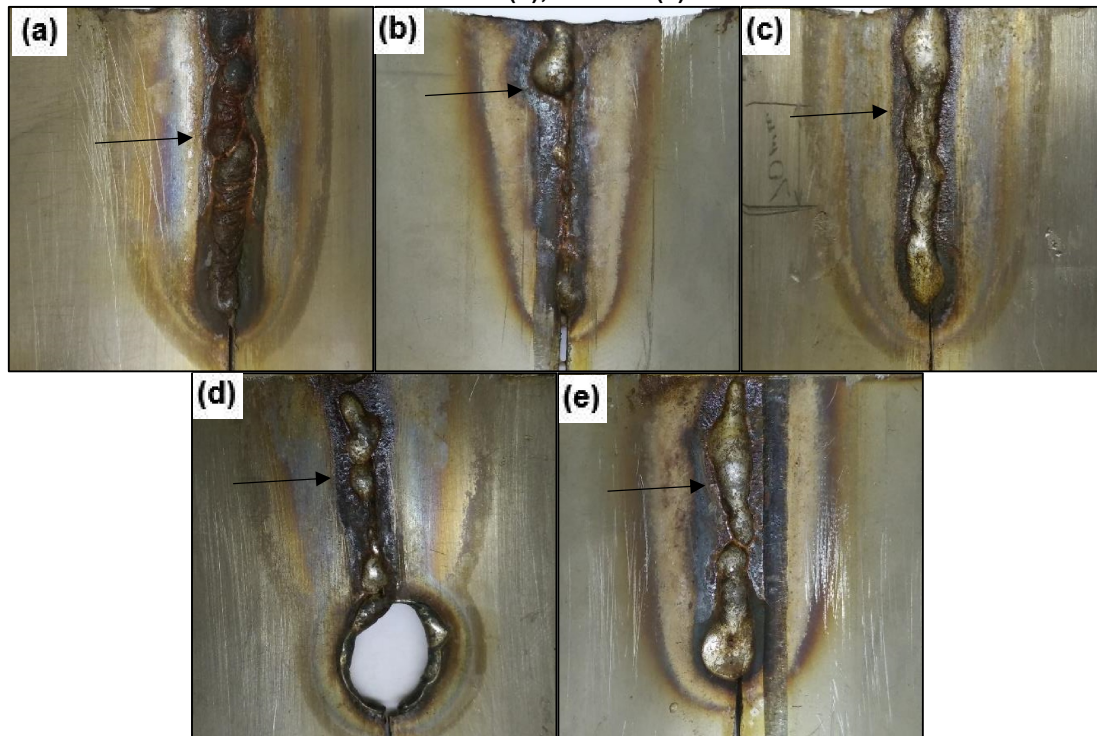


Fonte: Autoria própria

Na Figura 14(a) indicada pela seta, esta amostra em particular, apresentou uma deposição de óxido sobre a raiz do seu cordão de solda. Pois, quando a região da poça de fusão estava líquida, o oxigênio do ar ambiente provavelmente reagiu com o cromo e metais de liga do metal de base que se aglomeraram ao redor da raiz do cordão. O que resultou numa superfície com uma crosta de óxidos e que não tem resistência a corrosão alguma. Conforme aumentava-se a vazão, pode-se perceber que a superfície tende a ficar mais limpa e com menor adição de óxido, pois o fluxo de gás argônio não permitia que o oxigênio entrasse em contato com a poça de fusão.

Após os testes de corrosão superficial por imersão parcial em água salina, no qual as amostras ficaram imersas por aproximadamente 120 horas, obteve-se os seguintes resultados ilustrados nas Figura 15(a) a 15(e) abaixo.

Figura 15 - Amostras após o ensaio de corrosão: sem vazão (a); 2,5 l/min (b); 5,0 l/min (c); 7,5 l/min (d); 10 l/min (e)



Fonte: Autoria própria

Nas Figuras 15(a) e 15(b) percebe-se, através da coloração de tom marrom e indicada pela seta no qual basicamente é corrosão, que para as amostras sem vazão e 2,5 l/min, o efeito da corrosão foi mais severo do que em relação às outras. Para as amostras que receberam 7,5 e 10 l/min, estas foram as que apresentaram resultados mais satisfatórios, a corrosão se localizou estreitamente ao longo do cordão de solda e a raiz tinha um aspecto mais limpo.

Ao longo dos testes também foi possível notar que a coloração da solução salina de ambos os potes alterava após intervalo de horas. Inicialmente a solução era totalmente incolor, porém após horas de exposição, a solução adquiria leves tons da cor verde. Sinal que o cromo presente no aço inoxidável estava sendo diluído na água.

Na Figura 15(a) também é possível notar que esta foi a amostra que sofreu uma corrosão muito mais acentuada em relação aos outros corpos de prova. Também é possível ressaltar que o metal de adição na parte interna do tubo está coberto de óxidos, e eles não possuem resistência a ambiente corrosivos.

Durante a execução da soldagem, optou-se por utilizar um sistema de vedação em ambas as extremidades do tubo, e com isso criar uma atmosfera de gás inerte no interior. Visto que essa prática é muito comum na indústria e em áreas de

serviços e é conhecido como padrão sanitário. Todavia, outros procedimentos poderiam ser feitos alterando-se apenas alguns parâmetros de soldagem, tais como tipo e quantidade de corrente elétrica; um outro gás inerte ou mistura de outros gases, como uma mistura de argônio com hélio ou hélio puro; e até mesmo outros tipos de aços inoxidáveis, como um aço inox AISI 316.

5 CONCLUSÃO

A partir das análises das amostras após os testes foi possível chegar a algumas conclusões. Uma conclusão levantada foi que o gás de purga na proteção da poça de fusão no cordão de solda, tanto o utilizado na tocha como o utilizado na proteção das regiões vizinhas, faz com que remova e impeça o aparecimento da crosta de óxidos ilustrado na Figura 15(a) e indicada por uma seta. Após os testes, esta mesma crosta mostrou-se não ter resistência a corrosão. E conforme aumentava-se a vazão do gás argônio, menor era a quantidade de óxidos presentes e mais limpa era a superfície das raízes dos cordões resultantes.

Como conclusão final, descobriu-se que para as vazões iguais ou superiores a sete litros e meio por minuto, a corrosão era menos acentuada e ocorreu apenas em faixas estreitas ao longo do metal depositado, tanto na parte interna quanto externa. Soldar um aço inoxidável sem a devida proteção da poça de fusão e da ZTA, só faz com que o aço perca as suas propriedades metalúrgicas e tenha a sua composição e microestrutura alteradas e ocasione a perda da sua resistência a corrosão. Todavia, este valor pode ter uma variação para peças de grandes dimensões ou pela geometria da região a ser soldada.

REFERÊNCIAS

ASM International. Handbook Committee Austenitic Stainless Steel. In: ASM International. Handbook Committee. **Stainless Steels**. 2. ed. [S. l.]: Asm International, 2008. Cap. 6. p. 69-78.

BAULY, Julio Cesar. **Caracterização microestrutural e propriedades de juntas dissimilares entre aços inoxidáveis fabricadas por processos de fusão**. 2000. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/handle/123456789/10832> >. Acesso em: 21 junho 2017.

BRANDI, Sérgio D.. Processos de soldagem com arco elétrico: Processo TIG. In: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Blucher, 1992. Cap. 2. p. 60-98.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. Applications and Processing of Metal Alloys. In: CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Materials Science and Engineering An Introduction**. 9. ed. [Hoboken]: John Wiley & Sons, 2014. Cap. 11. p. 414-416.

CARY, Howard B.; HELZER, Scott C. **Modern welding technology**. 6th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 715 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo, SP: ABM, 1996. 599 p. ISBN 8586778486

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmen Isse; MACHADO, Giovanna. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV). In: DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmen Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: Edipucrs, 2007. Cap. 1. p. 9-25. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2018.

DELGADO, Luis Carlos. **Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de arame**. 2000. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/79168>>. Acesso em: 24 set. 2017.

FERNANDES, João Carlos. **Desenvolvimento de um Dispositivo Tipo Carga Constante para Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão de Aço Inoxidável Austenítico**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais em Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036190.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2017.

FRANCO, Fernand Díaz. **MONITORIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDAGEM TIG ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO INFRAVERMELHO**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, [Distrito Federal], 2008. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/5112>>. Acesso em: 26 maio 2017.

KEJELIN, Norton Zanette. **Soldagem de revestimento de aços comuns C-Mn com superliga a base de níquel inconel 625**. 2012. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Paulo, Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/96380>>. Acesso em: 21 junho 2017.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2011. 362 p.

MODENESI, Paulo J.. A química da formação do cordão na soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 18, n. 3, p.287-300, set. 2013. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242013000300011>>. Acesso em: 26 de maio 2017.

PADILHA, Angelo F.; GUEDES, Luis Carlos. **Aços Inoxidáveis Austenísticos: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: Hemus, 1994. 170 p.

QUITES, Almir Monteiro. Soldagem TIG. In: QUITES, Almir Monteiro. **Introdução à soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: Editora Soldasoft, 2002. Cap. 4. p. 39-41.

RASHID, M. W. A.; GAKIM, M.; ROSLI, Z. M.; AZAM, M. A. Formation of Cr₂₃C₆ during the Sensitization of AISI 304 Stainless Steel and its Effect to Pitting Corrosion. **International Journal of Electrochemical Science**. Melaka, Malásia, v. 7, n. 10, 01 out. 2012. Disponível em < <http://www.electrochemsci.org/papers/vol7/71009465.pdf>> Acesso em: 10 de junho 2018.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 646 p. CD-ROM ISBN 8521203829

TREMARIN, Ronaldo Cesar. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO AISI 304 E VARIANTES ESTABILIZADAS COM NIÓBIO**. 2007. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <http://www.emc.ufsc.br/control/arquivos/estagio/geral/arquivo_156-RonaldoCesarTremarin.PDF>. Acesso em: 26 maio 2017.