

## Estudo do processo de reparo numa junta soldada de aço inoxidável

### Study of the repair process on a welded stainless steel joint

#### RESUMO

Josué da Silva Santos  
[josuesantos@alunos.utfpr.edu.br](mailto:josuesantos@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

Márcio Andreato Batista Mendes  
[marciomendes@utfpr.edu.br](mailto:marciomendes@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

Silvia Midori Higa  
[silviahiga@utfpr.edu.br](mailto:silviahiga@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

Os aços inoxidáveis estão presentes em uma ampla gama de funções na indústria, exercendo suas importantes propriedades mecânicas com abundante resistência a corrosão em relação a outras ligas metálicas. Porém, no decorrer de processos de soldagem por fusão pode ser ativado mecanismos de degradação no material, comprometendo sua integridade microestrutural e reduzindo a vida útil do equipamento. Entre esses processos de soldagem, o reparo é industrialmente presente, aplicando a ressoldagem na região do cordão de solda a qual a falha se apresenta. O objetivo inicial deste trabalho foi analisar a integridade microestrutural e o comprometimento das propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 304 submetido a reparo por ressoldagem. Foi realizado o levantamento bibliográfico das características do aço inoxidável austenítico AISI 304, os conceitos envolvidos no processo de soldagem e os mecanismos que causam modificações na microestrutura, como precipitações de fases deletérias na etapa de solidificação do material.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço inoxidável. Soldagem. Microestrutura. Reparo.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



#### ABSTRACT

Stainless steels are present in a wide range of functions in the industry, exercising their important mechanical properties with abundant resistance to corrosion in relation to other metallic alloys. However, during the fusion welding processes it can be enabled degradation mechanisms in the material, compromising its microstructural integrity and reducing the service life of the equipment. Among these welding processes, the repair is industrially present, applying re-welding in the region of the weld bead to which the fault arises. The initial aim of this study was to analyze the microstructural integrity and the compromise of the mechanical properties of the AISI 304 austenitic stainless steel submitted to repair by re-welding. It conducted a bibliographic research of the characteristics of AISI 304 austenitic stainless steel, the concepts involved in the welding process and the mechanisms that cause changes in the microstructure, as precipitation of deleterious phases in the solidification step of the material.

**KEYWORDS:** Stainless Steel. Welding. Microstructure. Repair.

## INTRODUÇÃO

A classe de aço inoxidável austenítico (AIA) AISI 300 criada em meado dos anos 90 alcançou na engenharia sua utilidade percorrendo diversas indústrias, e atualmente, como na última década, continua como o tipo de aço inoxidável (AI) mais comum a ser selecionado para funções de importância (LOPES, 2009; AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 2010; LO; SHEK; LAI, 2009).

Dentro de uma aplicação, na maioria das situações, surge a necessidade de selecionar materiais que tenham respostas a diferentes esforços mecânicos simultaneamente sem que comprometam as suas funções, como elementos estruturais, equipamentos químicos, vasos criogênicos, oleodutos, reatores nucleares, tubulações e acessórios de transporte de água em sistemas de refrigeração, aplicações essas as quais o AIA AISI 304 pode contemplar e ser utilizado pelo engenheiro de materiais (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009; KANNE; CHANDLER; NELSON; FRANCO-FERREIRA, 1995; MORISHIMA; KOSHIISHI; KASHIWAKURA; HASHIMOTO; KAWANO, 2004; SREEVIDYA; ABHIJITH; ALBERT; VINOD; BANERJEE, 2020).

Conforme suas aplicações, as técnicas utilizadas nos setores de produção emergem como fatores a serem estudados para o prolongamento da vida útil do produto. Um desses processos é a soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), na qual consiste na produção de um cordão de solda no material matriz pela qual a adesão e união entre as partes ocorre (BAILEY, 1994, p. 14).

Nesse processo de união de partes são ativados alguns mecanismos de degradação que promovem a ocorrência de falhas ao material, gerando grandes fatalidades e custos à indústria, e constantemente presentes nas etapas de fabricação e em situações de serviço (CHUN; SAIDA, 2018; REVIE, 2015).

Em virtude das condições que o material está submetido, a falha pode ocorrer por diferentes razões, e a análise de falha é crucial para que o evento não seja recorrente (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1987). Assim como é fundamental o estudo da fratura nos materiais, a análise e sistematização dos reparos torna-se essencial para que o produto não perca suas capacidades de trabalho, como um decréscimo na tenacidade do material ou formação de trincas e rachaduras, ocasionando fraturas abruptas do material em serviço (SREEVIDYA; ABHIJITH; ALBERT; VINOD; BANERJEE, 2020; CHUN; SAIDA, 2018; REVIE, 2015). Esses defeitos são viabilizados por uma variedade de mecanismos, sejam estes: superaquecimento (LUDER; HUNDHAUSEN; KAMINSKY; SHOR; IDDAN; ARIELY, YALIN, 2015), corrosão por pites (MARTINS, MOREIRA; MARTINS, 2014), sensibilização (ABOU-ELAZM; MAHALLAWI; ABDEL-KARIM; RASHAD, 2009), oxidação dos limites dos grãos (BAHRAMI; ANIJIDAN; TAHERI; YAZDAN, 2018), trincas por corrosão sob tensão (GAO; ZHANG; XIONG; ZHENG; ZHU, 2012) e fadiga (KRAL; MAHER; MCSWAIN, 2008)

Algumas dificuldades para uma ideal realização de uma solda e/ou reparo por soldagem está na necessidade de tempos prolongados de exposição do material em altas temperaturas, procedimentos inadequados de preparo da junta de solda, contaminação da composição do metal de base e de adição. Em vista disso, o presente trabalho visou a análise da transformação microestrutural, suas propriedades mecânicas e resistência a corrosão, em busca de avaliar a integridade do material após o procedimento de reparo de soldagem por fusão no AIA AISI 304,

acrescido ainda pela necessidade de estudos com ênfase nos reparos realizados em AIs (SREEVIDYA; ABHIJITH; ALBERT; VINOD; BANERJEE, 2020).

## MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste estudo é um AIA AISI 304 soldado por meio do processo de soldagem TIG. Os métodos empregados foram:

1. Levantamento teórico dos tipos de solda aplicados em aço inoxidável e o impacto nas aplicações e no tempo de vida útil.
2. Aquisição da peça a ser estudada.
3. Estudo e preparação dos corpos de prova (CPs) e dos parâmetros de ressoldagem.
- 4\*. Soldagem das partes por meio de junta de topo em ambos os CPs.
- 5\*. Propagar o crescimento de trinca no cordão de solda do CP2, adequação da superfície do mesmo e reaplicação do processo de soldagem (reparo).
- 6\*. Corte dos CP 1 soldado e avaliação estrutural e das propriedades mecânicas do cordão de solda e da zona termicamente afetada (ZTA). Análise metalográfica e ensaio mecânicos.
- 7\*. Corte dos CP 2 reparado e avaliação estrutural e das propriedades mecânicas do cordão de solda e da ZTA. Análise metalográfica e ensaios mecânicos.
- 8\*. Preparação do relatório e de trabalhos para participação de congresso.

Não foi possível realizar os procedimentos experimentais das etapas 4 a 8 devido ao fechamento dos laboratórios em virtude da pandemia COVID-19.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1. Características de soldagem nos aços inoxidáveis

A versatilidade dos aços inoxidáveis (AIs), em função das suas importantes propriedades, torna-se notável no Brasil pela constante necessidade de produção e consumo no país, mesmo em tempos de crise econômica. Segundo o Instituto Aço Brasil e a Associação Brasileira do Aço Inoxidável (2020), a produção brasileira de aço inoxidáveis plano e não planos e o seu consumo aparente no Brasil na última década permanece acima de 350 mil toneladas ao ano.

O crescimento de técnicas para o refino do aço nas aciarias viabilizou para os engenheiros de materiais e de metalurgia um controle estreito da composição dos aços produzidos, reduzindo impurezas ao limite ou um elemento que esteja favorecendo uma propriedade em contraposição ao interesse e/ou adicionando elementos essenciais para o fim estabelecido. Para os AIs um desses elementos é o cromo, cuja composição é mínima de 10,5 wt% de cromo.

Em meio a diversas classes de AIs os que ocupam maiores funções na indústria são os austeníticos, ferríticos, martensíticos e os dúplex. Apesar da grande variedade de AIs, a série 300 é a mais comumente utilizada baseada na

composição 18Cr-8Ni. Entre os AIAs o tipo 304 e 304L são os mais comuns empregados na indústria e sua versatilidade fundamenta o presente estudo.

Conforme já mencionado, a composição é essencial para conceder as propriedades ao material, mas também para prever a microestrutura do metal com base no teor de elementos estabilizantes. Na figura 1a é apresentado o diagrama de Schaeffer, o qual pode fornecer pelo Níquel e Cromo equivalente a microestrutura resultante de acordo com as equações 1 e 2.

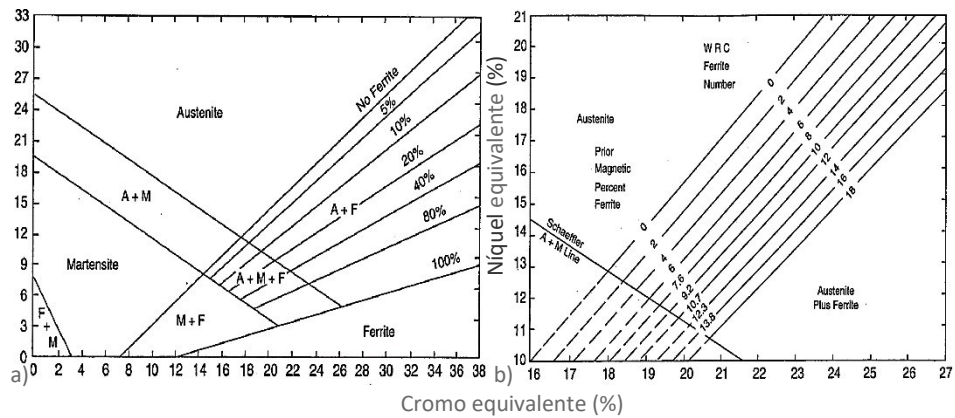
$$\text{Níquel equivalente} = \%Ni + 0,5\%Mn + 30\%C \quad (1)$$

$$\text{Cromo equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad (2)$$

A seguir na figura 1b, um diagrama é apresentado com algumas mudanças ao anterior para facilitar no momento de prever a quantidade de ferrita delta em volume nas soldas realizadas com esse material, relacionando com as características ferromagnéticas da Ferrita delta (CCC) e não magnética da austenita (CFC) (LIPPOLD; KOTECKI, 2005). A equação 1 foi alterada como apresentada na equação 3.

$$\text{Níquel equivalente} = \%Ni + 0,5\%Mn + 30\%C + 30\%N \quad (3)$$

Figura 1 – a) Diagrama de Schaeffer de 1949, b) Diagrama de DeLong de 1973



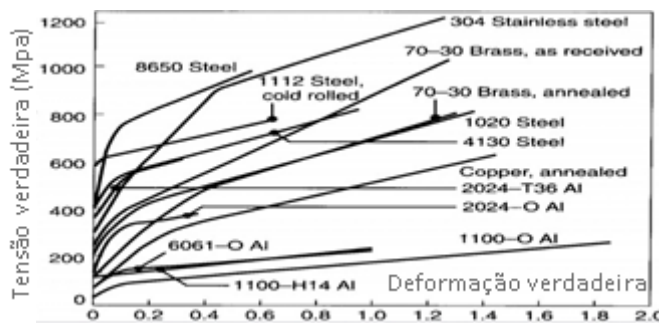
Fonte: Lippold; Kotecki (2005).

Uma importante característica presente nos AIAs é a capacidade do material resistir a distorções em altas temperaturas por um longo tempo de exposição, podendo ser utilizados em vasos de pressão ou tubulações pressurizadas (Atlas Steels, 2013, p. 48). Segundo a American Society For Metals (2010), a resistência a deformação pela temperatura do AIA AISI 304 se mantém superior a algumas ligas como 1040, 4140, 1015 para temperaturas acima de 1100°C.

O AIA AISI 304 possui propriedades mecânicas as quais viabiliza sua utilização para diversas funções e em conjunto com outras propriedades é um material que atende requisitos fundamentais para sua seleção, como ductilidade e tenacidade, excelente soldabilidade, resistência a corrosão para aplicações em altas temperaturas (até 1150°C) e em condições criogênicas (ARCELORMITTAL, 2020). Na figura 2 é mostrado a singularidade do AIA 304 em relação a outras ligas.

Figura 2 – Curvas tensão - deformação verdadeira na mesma temperatura para vários metais a partir do limite de escoamento

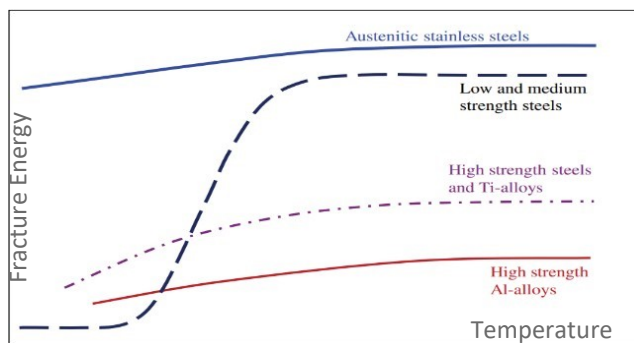




Fonte: Kalpakjian; Schmid (2009).

Em condições criogênicas, como demonstrado na figura 3, a resistência ao impacto é mantida e não ocorre a transição dúctil – frágil, portanto, sua tenacidade é conservada. Essas condições são exigidas quando a faixa de temperatura de trabalho permanece ainda que por um curto intervalo de tempo em temperaturas abaixo de 0°C, requisitos evidentes nos AIAs.

Figura 3 – Ilustração da tenacidade em função da temperatura para diversos materiais



Fonte: Lippold (2015).

Na Tabela 1 são apresentadas algumas propriedades mecânicas para as ligas de AIs usados para a fabricação de vasos de pressão e aplicações gerais.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de algumas ligas de aços inoxidáveis. Adaptada.

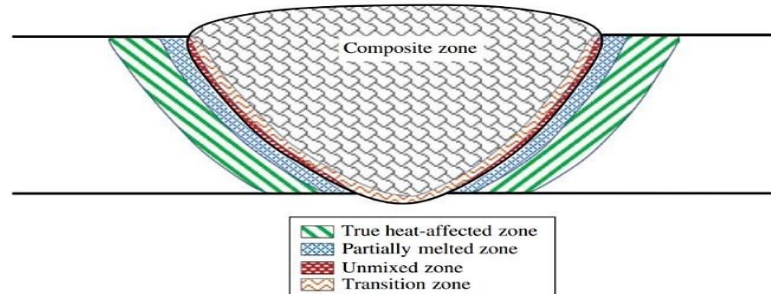
Aço	Tipo	Resistência a tração [Mpa]	Resistência ao escoamento [Mpa]	Alongamento [%]	Dureza [HBW]
AISI 410	Ferrítico	450	205	20	217
AISI 304	Austenítico	515	205	40	201
AISI 316L	Austenítico	485	170	40	217
UNS 32205	Dúplex	655	450	25	293

Fonte: American Society for Testing and Materials (2015).

A soldagem por fusão foi durante os anos sendo ferramenta de fabricação para união de diferentes ligas de materiais, as suas terminologias e conceitos para as zonas de solda. Desde 1959, essas zonas vêm sendo estudadas. O conhecimento dos mecanismos envolvidos na solidificação do material, no qual está o seu aquecimento e resfriamento, é primordial para o funcionamento do produto com aumento de vida útil. Na figura 4 são apresentadas as regiões de solda com suas

transições de microestrutura e composição, provocado pelo aporte térmico do processo de união no material (LIPPOLD, 2015, p. 400).

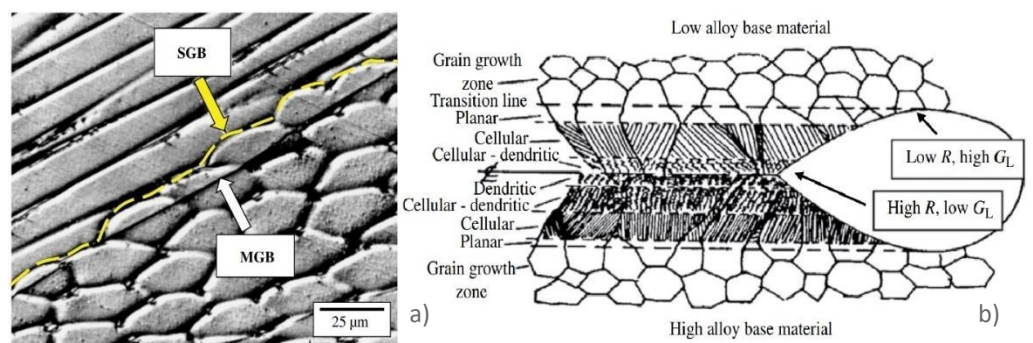
Figura 4 – Esquemático moderno mostrando regiões de uma solda por fusão



Fonte: Lippold (2015).

Em um junta soldada a microestrutura formada pela solidificação da zona de fusão consiste em interfaces sujeitas às direções cristalográficas preferenciais de crescimento de sólido e a redistribuição do soluto. Esses limites de solidificação formados são importantes para compreensão de defeitos que ocorrem durante a fabricação e em serviço, como a desorientação entre grãos, diferentes concentrações de soluto, acúmulo de impurezas e segregações ao longo da *Migrated Grain Boundaries* (MGB) como pode ocorrer em aços inoxidáveis austeníticos apresentado na figura 5. O MGB é predominante em metais de solda monofásicos e é formado a partir da desorientação de alto ângulo da *Solidification Grain Boundaries* (SBG), na qual origina-se da intersecção do crescimento oposto entre os grãos e dendritas (LIPPOLD, 2015, p. 400).

Figura 5 – a) Mudança no modo de crescimento de solidificação em função da localização na solda. b) Exemplos de limites na zona de fusão de um aço inoxidável austenítico (CFC).



Fonte: Lippold (2015).

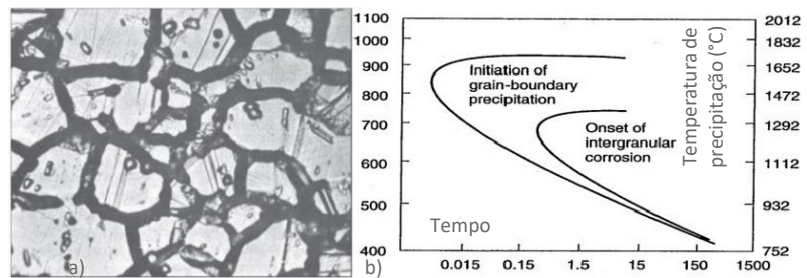
Muitas das falhas dos elementos metálicos ocorrem por uma deficiência da resistência a corrosão do material, em alguns casos por uma seleção inadequada do material para sua função. Mas também pode ocorrer pela utilização do material correto para o trabalho, entretanto, reduzindo a sua vida útil em razão das etapas de fabricação, manutenção e exposição de serviço. Essas modificações no material, ou precipitações, podem ocorrer pelos processos termomecânicos realizados e a composição do AIA, levando a fragilização, sensitização do material entre outros.

A figura 6a mostra resultados para algumas das precipitações causadas pelo aquecimento e a taxa de resfriamento no processo de soldagem.

Outras fases deletérias podem reduzir a tenacidade do material quando exposto a altas temperaturas como as fases *Sigma*, *chi*, *eta*, *G* e *Laves*. A complexidade da formação dessas fases está associada aos elementos formadores de carbonetos na composição do material e a permanência na temperatura de formação como também ilustrado na figura 6b (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

Figura 6 – a) Corrosão intergranular. Ataque do contorno de grão na ZTA do AIA 304

b) Precipitação dos carbonetos  $M_{23}C_6$  no Al tipo 304 com C = 0,05wt%



Fonte: a) Lippold (2015). b) Lippold; Kotecki (2005).

## 2. Resultado preliminares de preparação dos corpos

As amostras para estudo foram retiradas da estrutura de AIA AISI 304 soldada pelo processo TIG. A Figura 9 mostra as seções que foram cortadas (linhas vermelhas) e removidos os CPs para estudo. Para o corte foi utilizado uma serra fita horizontal com refrigeração por óleo, para obter duas amostras planas, CP1 e CP2. Os CPs têm dimensões de 4 x 100 x 100 mm. As rebarbas de corte das duas amostras foram removidas utilizando um esmeril. As amostras foram preparadas para a soldagem TIG, para posterior estudo da ressoldagem (no qual se dará o reparo). Essas etapas do reparo serão realizadas no próximo projeto de IC.

Figura 7 – Fotografias da estrutura de AIA AISI 304 e seus cortes definidos



Fonte: O autor (2020).

## CONCLUSÃO

Através do estudo realizado neste trabalho pode-se reunir conceitos da importância do aço inoxidável austenítico para as indústrias em razão da sua variedade de possíveis aplicações. Principalmente em relação ao material de estudo, o AIA AISI 304, torna-se essencial o aprofundado conhecimento sobre o processo e parâmetros de soldagem a qual o material é submetido. Alguns fatores durante a soldagem por fusão, como o tempo de exposição a altas temperaturas, as taxas de aquecimento e resfriamento, a preparação da junta soldada, a



composição química da liga metálica e suas características físicas podem intensificar as modificações microestruturais, bem como sua sensitização, a fragilização pela precipitação e formação de fases deletérias, essas comprometendo o desempenho e a integridade do material. A relevância desses conceitos fundamenta-se no estudo de reparos realizados por ressoldagem em aço inoxidável, que tenham sofrido algum tipo de falha ou degradação durante serviço. No presente trabalho avaliou-se amostras soldadas, pelo processo TIG, para o estudo da ressoldagem para realização do reparo. Devido ao fechamento dos laboratórios da UTFPR, esta parte não foi concluída, e serão abordados no próximo projeto de iniciação científica.

### REFERÊNCIAS

- ABINOX. Brasil – Aços inoxidáveis. Disponível em:  
<https://www.abinox.org.br/site/aco-inox-estatisticas-brasil-acos-inoxidaveis.php>.  
Acesso em 10 de agosto de 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**: propriedades e seleção: ferros aços e ligas de alto desempenho. Vol.1, ASM International, 10 ed. 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A240-15a**: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM International, 2015.
- ASM HANDBOOK. **Fractography**. v. 12. ASM International, 1990.
- BAHRAMI, A., ANIJ DAN, M. S.H., TAHERI, P., YAZDAN, M. M, Failure of AISI 304H stainless steel elbows in a heat exchanger, **Engineering Failure Analysis**, v. 90, p. 397–403, 2018.
- BAILEY, N. **Weldability of ferritic steels**. Cambridge: Abington Publishing, 1994. 286 p.
- CHUN, E., SAIDA, K. Prediction of sigma-phase embrittlement and its influence on repair weldability for type 316FR stainless steel weld metals with different solidification modes. **Journal of Nuclear Materials**, v. 505, p. 212-226, 2018.
- GAO, Y., ZHANG, C., XIONG, X., ZHENG, Z., ZHU, M. Intergranular corrosion susceptibility of a novel super304H stainless steel, **Engineering Failure Analysis**, v. 24, p. 26–32, 2012.
- K.H. LO, C.H. SHEK, J.K.L. LAI. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering R**, v. 65, p. 39-104, 2009.



KALPAKJIAN, S; SCHIMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6.ed. Pearson Education Canada, 2009. 1216 p.

KANNE, W. R., CHANDLER, G. T., NELSON, D. Z., FRANCO-FERREIRA, E.A. Welding irradiated stainless-steel. **Journal of Nuclear Materials**, v. 225, p. 69–75, 1995.

KRAL, M.V., MAHER, C.M., McSwain, R.H. Failure analysis of a brazed, stainless steel fuel injection line. **Engineering Failure Analysis**, v. 88, p. 54–62, 2018.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. New Jersey: Wiley Interscience, 2005. 357 p.

LIPPOLD, J.C. **Welding metallurgy and weldability**. New Jersey: Wiley Interscience, 2015. 400 p.

LOPES, W. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. 2009. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

LUDER, D., HUNDHAUSEN, T., KAMINSKY, E., SHOR, Y., IDAN, N., ARIELY, YALIN, S. Failure analysis and metallurgical transitions in SS 304L air pipe caused by local overheating. **Engineering Failure Analysis**, v. 59, p. 292–303, 2015.

MARTINS, C.M.B., MOREIRA, J.L., MARTINS, J.I. Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. **Engineering Failure Analysis**, v. 39, p. 65–71, 2014.

MORISHIMA, Y., KOSHIISHI, M., KASHIWAKURA, K., HASHIMOTO, T., KAWANO. S. Re-weldability of neutron irradiated type 304 and 316L stainless steels. **Journal of Nuclear Materials**, 329–333 (Part A), p. 663-667, 2004.

REVIE, W. R. **Oil and gas pipelines: Integrity and Safety handbook**, New Jersey, 2015.

SAAD ABOU-ELAZM, A., EL MAHALLAWI, I., ABDEL-KARIM, R., RASHAD, R. Failure investigation of secondary super-heater tubes in a power boiler. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, p. 433–448, 2009.

SREEVIDYA, N., ABHIJITH, S., ALBERT, S.K., VINOD, V., BANERJEE, I. Failure analysis of service exposed austenitic stainless steel pipelines. **Engineering Failure Analysis**, v. 108, 2020.

The Atlas Steels Technical handbook of Stainless Steels. **Atlas Steels**. 2013. 48 p.

ArcelorMittal. **Aços inoxidáveis**: aplicações e especificações. Disponível em: <http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/aperam-catalogo.pdf>. Acesso em 10 de agosto de 2020.