



## **AVALIAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ATRAVÉS DO ENSAIO DE ULTRASSOM**

Clécio Vicente da Silva, [cvslecio@gmail.com](mailto:cvslecio@gmail.com)<sup>1</sup>  
Adalberto Nunes Siqueira, [adalbertonunes2012@gmail.com](mailto:adalbertonunes2012@gmail.com)<sup>1</sup>  
Diogo Monteiro do Nascimento, [diogomonteiro.nascimento@gmail.com](mailto:diogomonteiro.nascimento@gmail.com)<sup>2</sup>  
Djailson Joaquim Bezerra, [djabezerra@hotmail.com](mailto:djabezerra@hotmail.com)<sup>2</sup>  
Erika da Silva Braga, [erika.braga@hotmail.com.br](mailto:erika.braga@hotmail.com.br)<sup>2</sup>  
George Marinho do Nascimento, [georgenascimento@recife.ifpe.edu.br](mailto:georgenascimento@recife.ifpe.edu.br)<sup>3</sup>  
José Endreo Baracho da Costa, [andreomec@hotmail.com](mailto:andreomec@hotmail.com)<sup>2</sup>  
Moisés Euclides da Silva Junior, [juniormoisés7@hotmail.com](mailto:juniormoisés7@hotmail.com)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário Estácio do Recife, Av. Gen. San Martin, 1449, Jiquiá, Recife – PE, 50761-650,

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco, R. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, Recife – PE, 50740-530,

<sup>3</sup> Instituto Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luís Freire, 500 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-545.

**Resumo.** *Materiais de aços inoxidáveis austeníticos submetidos ao ensaio de ultrassom, apresentam maior dificuldade na detecção de defeitos internos que outros metais por apresentarem estrutura granular grosseira, discordâncias nas orientações cristalográficas e alto grau de anisotropia, limitando a sensibilidade e até impossibilitando o ensaio e provocando distorções do feixe sônico relacionadas à sua microestrutura. Esses materiais anisotrópicos modificam a velocidade, podendo alterar 100% nas ondas transversais. Diante disso, procurou-se desenvolver nesse estudo a viabilidade de um procedimento que estabeleça e descreva as condições necessárias para a execução do ensaio. As técnicas, avaliações e critérios de aceitação para a construção dos corpos de provas e realização dos ensaios de ultrassom seguiram padrões normativos da ASTM e dos códigos internacionais da ASME. Devido o diâmetro externo e espessura dos corpos de provas serem significativamente pequenos, foram utilizados transdutores com cristais piezoelétricos emitindo ondas longitudinais e frequência de 5MHz e 7,5MHz. Pôde-se perceber uma melhora nas características físicas das ondas ultrassônicas: campo próximo, divergência, sensibilidade e atenuação sônica. Tendo como parâmetro comparativo o ensaio de radiografia industrial, o método utilizado e os transdutores, apresentaram resultados satisfatórios, permitindo identificar precisamente a localização, orientação, dimensionamento e o tipo de defeito encontrado nos corpos de provas.*

**Palavras chave:** *Austeníticos. Anisotropia. Transdutores.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A mecânica da fratura se inicia com a hipótese de que os materiais possuem trincas de alguma dimensão, mesmo que ao nível submicroscópico. É por causa das condições de carregamento e ambiente que uma fratura causa a propagação quase instantânea de uma ou mais trincas originais, levando um componente a falhar (JUVINALL, 2013). Embora as causas das falhas e o comportamento dos materiais possam ser conhecidos, a prevenção de falhas é difícil de ser garantida. As causas comuns são a seleção, o processamento inadequado de materiais, além do projeto inadequado ou má utilização de um componente (CALLISTER, 2015).

O ensaio de ultrassom está, cada vez mais, contribuindo para a identificação de trincas que levam um equipamento ou componente mecânico a falhar. As aplicações do ensaio vão desde características da microestrutura, tais como porosidade, tamanho e orientação dos grãos, até as propriedades relacionadas aos mecanismos de falha, como fadiga, fluência e tenacidade (MARTIN, 2012). A evolução tecnológica da eletrônica implantadas nos aparelhos de ultrassom tem contribuído na descoberta e desenvolvimento de novas técnicas de inspeção, aumentando a quantidade de materiais a ser inspecionado e facilitando as interpretações dos resultados por possibilitar aos profissionais um estudo mais preciso e detalhado.

Os materiais de aço inoxidáveis austeníticos são bastantes utilizados nas indústrias devido suas características porém apresentam um elevado grau de anisotropia, granulação grosseira e contorno dos grãos acentuados, os quais, alteram o comportamento das ondas ultrassônicas, causando atenuação, dispersão e divergência do feixe sônico, dificultando a interpretação dos ecos apresentados na tela do aparelho bem como a sua avaliação, quando submetidos ao ensaio de ultrassom.

Este trabalho se propõe a analisar a viabilidade de um procedimento seguindo recomendações de normas internacionais, que estabeleça as condições mínimas necessárias à execução do ensaio de ultrassom convencional (pulso eco) a ser aplicado na inspeção de soldas em materiais de aço inoxidável austeníticos (de espessura 3,9mm e diâmetro externo Ø2" – 60,3mm) com o objetivo de verificar a capacidade de detecção e precisão de transdutores com características específicas (dimensões e frequência dos cristais) para inspeção dos aços inoxidáveis austeníticos, bem como o nível de respostas das indicações obtidas, comparadas com o ensaio de radiografia industrial.

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A condução do ensaio seguiu as condições e exigências mínimas dos Códigos ASME *Boiler & Pressure Vessel Code - Nondestructive Examination - Section V*, ASME B31.3 - *Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping* e das Normas Técnicas da ASTM A 312 - *Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes* e *BRITISH STANDARD* que determinaram critérios e padrões de referências para a obtenção satisfatória nos exames de ultrassom nos corpos de prova de aço inox austenítico com características geométricas definidas.

### 2.1 Corpos de prova, blocos padrões e equipamentos

O tipo de material em estudo é especificação padrão para tubos de aço inoxidável austenítico sem costura soldada e trabalhados fortemente a frio (ASTM A312, 2007) muito empregados em equipamentos de processos para serviços cíclicos severos e de alta pressão (ASME B31.3, 2010). O tipo de aço inox austenítico e composição química estão descritos conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química dos Corpos de Prova de Aço Inox Austenítico (Adaptado de ASTM A312, 2007)

| Material | LRT (MPa) | Carbono % | Manganês % | Fósforo % | Silício % | Enxofre % | Cromo % | Níquel % | Molibidênio % |
|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|---------|----------|---------------|
| TP 304L  | 485       | 0,035     | 2,00       | 0,045     | 0,030     | 1,00      | 18-20   | 8-13     | -             |
| TP 347   | 515       | 0,080     | 2,00       | 0,045     | 0,030     | 1,00      | 17-19   | 9-13     | -             |

A Tabela 2 apresenta a identificação dos corpos de prova, tipo de material, processo de soldagem, espessura, diâmetro e tipo de união.

Tabela 2 - Identificação dos Corpo de Prova, Material, Dimensão e Tipo de União (Autor, 2017)

| Corpo Prova | Material ASTM A 312 | Processo Soldagem | Espessura da Junta (mm) | Diâmetro (mm) | Tipo de União |
|-------------|---------------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| CP 01       | TP 347              | GTAW + GMAW       | 3,9                     | 60,3          | Tubo + Tubo   |
| CP 02       | TP 347              | GTAW + GMAW       | 3,9                     | 60,3          | Tubo + Curva  |
| CP 03       | TP 347              | GTAW + GMAW       | 3,9                     | 60,3          | Tubo + Flange |
| CP 04       | TP 304L             | GTAW + GMAW       | 3,9                     | 60,3          | Tubo + Tubo   |
| CP 05       | TP 304L             | GTAW + GMAW       | 3,9                     | 60,3          | Tubo + Curva  |
| CP 06       | TP 304L             | GTAW + GMAW       | 3,9                     | 60,3          | Tubo + Flange |

Os corpos de prova usados no exame de ultrassom estão apresentados nas Figuras: 1, 2, 3, 4 e 5.

Figura 1 - CP 01, TP347, Tubo + Tubo e CP 05, TP304L, Tubo + Curva (Autor, 2017)



Figura 2 - CP 02, TP347, Tubo + Curva (Autor, 2017)



Figura 3 - CP 03, TP347, Tubo + Flange de Pescoço (Autor, 2017)



Figura 4 - CP 04, TP304L, Tubo + Tubo (Autor, 2017)



Figura 5 - CP 06, TP304L, Tubo + Flange de Pescoço (Autor, 2017)



Também foram utilizados na realização dos ensaios nos corpos de prova: transdutores angulares de  $60^\circ$  e  $70^\circ$  de onda tipo longitudinal (cuja forma construtiva é mostrada na Figura 5) para os quais as dimensões e frequências de ambos são de 6 x 6 mm e 5,0 MHz, respectivamente, e, transdutor duplo cristal (Figura 6), também de onda longitudinal, com dimensão de  $\phi$  6 mm e frequência de 7,5 MHz; cabos coaxiais (Figura 7) utilizados para transportar os pulsos elétricos do aparelho aos cristais dentro da estrutura dos transdutores e conduzir novamente as vibrações dos cristais para o aparelho em forma de sinais elétricos sendo visualizados as reflexões na tela do aparelho; acoplante carboxi metil celulose da Metal Chek tipo Supermagna 2000 A/US dissolvido em água para varredura das soldas.

O aparelho de ultrassom convencional tipo Pulso Eco (Figura 8), tem apresentação da tela do tipo A-SCAN que fornece o tempo de percurso da energia sônica e a intensidade da energia refletida por uma interface. Observando a linha horizontal tem-se a que distância está a descontinuidade, na linha vertical do aparelho aparece a amplitude da descontinuidade, que essa altura do eco está relacionada com a área da descontinuidade encontrada sendo possível localizar, dimensionar e avaliar descontinuidades em toda sua morfologia.

Figura 5: Forma Construtiva do Transdutor Angular (MARTIN, 2012)

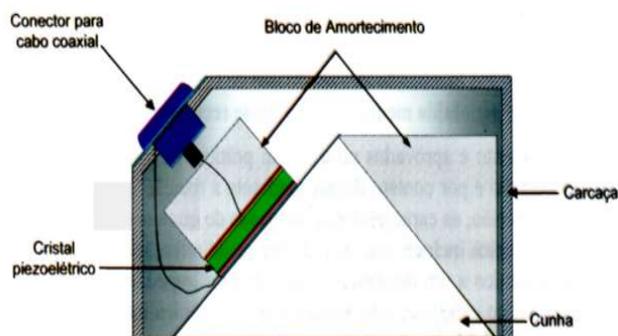


Figura 6 - Forma Construtiva do Transdutor Duplo Cristal SE (MARTIN, 2012)

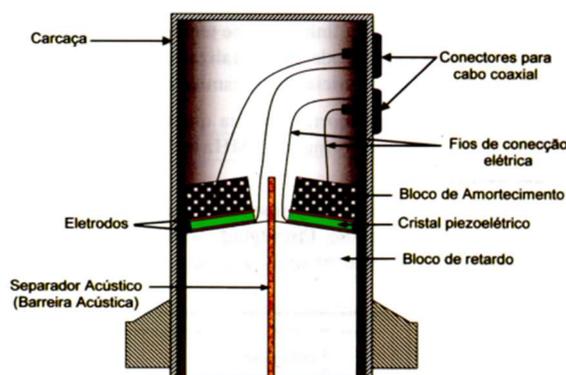


Figura 7 - Transdutores e Cabos Coaxiais (Autor, 2017)



Figura 8 - Aparelho de ultrassom convencional tipo Pulso Eco (Autor, 2017)

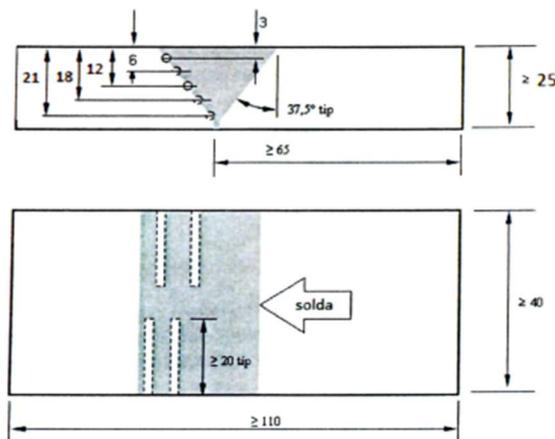


Para a calibração da sensibilidade dos transdutores SE e angulares, foi utilizado o bloco de referência JVC-034 Figura 9, com uma fusão de solda apresentando furos com diâmetro de 2,5mm. O processo de soldagem da fusão do bloco de

referência foi o mesmo produzido e conduzido nas mesmas condições que a dos corpos de provas. As dimensões (110x40x25mm), formas geométricas, diâmetro do furo e seu comprimento no bloco de referência seguiram as recomendações e exigências mínimas do código (ASME V, 2010) conforme está ilustrado Figura 10.

Figura 10 - Dimensões do Bloco de Referência JVC-034 (Autor, 2017)

Figura 9 - Bloco de Referência JVC-034 (Autor, 2017)



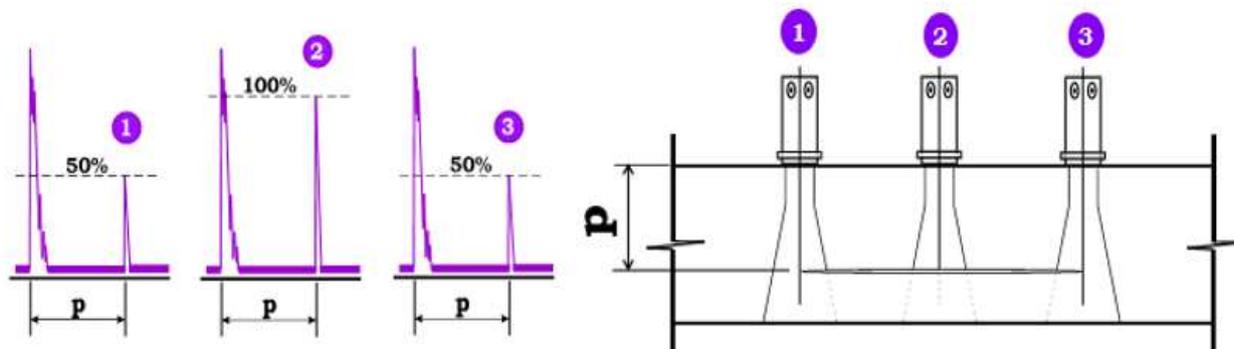
Os blocos curvos para calibração da sensibilidade são utilizados para os transdutores angulares de ondas transversais (ASME V, 2010), o qual não foi usado nesse estudo.

## 2.2 Técnicas de ensaio, registros e aceitação de descontinuidades

O reforço do cordão de solda foi esmerilhado e posteriormente escovado, mantendo a superfície mais lisa. Em seguida cada corpo de prova foi inspecionado primeiramente pelo transdutor duplo cristal de forma longitudinal e transversal ao cordão de solda para verificar a existência de descontinuidades paralelas a superfícies do corpo de prova. Depois foi realizado varredura longitudinal e transversal ao cordão de solda com os transdutores angulares de 70° e 60° nessa ordem.

As descontinuidades detectadas foram dimensionadas com base na técnica dos 6dB. Esta técnica parte do princípio de que, quando o transdutor é posicionado para obter uma resposta de amplitude máxima da descontinuidade, a altura correspondente do eco exibido cai pela metade, ou seja, 6dB (50%), quando o eixo do feixe sônico é trazido para próximo das extremidades da descontinuidade (MARTIN, 2012), como ilustra a Figura 11.

Figura 11: Dimensionamento de Descontinuidades Pela Técnica dos 6dB (Adaptado de CETRIL, 2005)



Foram registradas todas as descontinuidades para estudo desse trabalho, em que nos aspectos quantitativos, foram comparadas com as registradas no ensaio de radiografia industrial. Os registros também serviram para avaliar a capacidade (sensibilidade) dos transdutores em estudo em função dos critérios de aceitação definidos nos Códigos ASME.

- Foram inaceitáveis descontinuidades com refletividade acima da Curva de Referência Primária (CRP) e com comprimento ( $D$ ) excedente a 6mm nos corpos de prova para aplicação de uso geral conforme (ASME V, 2010), (ASME B31.3, 2010).

- b) Independentemente do comprimento, foram inaceitáveis descontinuidades avaliadas como defeito planar (trinca) e falta de fusão (penetração incompleta) nos corpos de provas para serviços cíclicos, severos de alta pressão conforme (ASME B31.3, 2010).

## 2.3 Resultados e discussões

### 2.3.1 Ultrassom comparado com radiografia industrial

A Tabela 3 mostra a quantidade de descontinuidades detectadas pelo ensaio de ultrassom e de radiografia industrial para cada corpo de prova.

Tabela 3 - Descontinuidades Detectadas pelo Ensaio de Ultrassom e Radiografia (Autor, 2017)

| CORPO DE PROVA | ENSAIO NÃO DESTRUTIVO       |         |                             |         |
|----------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                | Ultrassom                   |         | Radiografia                 |         |
|                | Descontinuidades Detectadas |         | Descontinuidades Detectadas |         |
|                | (FF, PO, IE)                | Trincas | (FF, PO, IE)                | Trincas |
| CP 01          | 7                           | 0       | 6                           | 0       |
| CP 02          | 5                           | 0       | 5                           | 0       |
| CP 03          | 5                           | 0       | 3                           | 0       |
| CP 04          | 5                           | 0       | 3                           | 0       |
| CP 05          | 7                           | 0       | 7                           | 0       |
| CP 06          | 5                           | 0       | 3                           | 0       |
| TOTAL          | (34)                        | (0)     | (27)                        | (0)     |

Legenda: (FF - Falta de Fusão, PO - Poro, IE - Inclusão de Escória)

### 2.3.2 Resultados Referente ao Critério de Aceitação (a)

A Tabela 4 mostra o número de descontinuidades detectadas inaceitáveis em cada corpo de prova, atendendo o critério de aceitação (a): descontinuidades com refletividade (ecos) maiores que a Curva de Referência Primária (CRP) e o comprimento das descontinuidades ( $D$ ) maiores que 6mm.

Tabela 4 - Descontinuidades Detectadas Referente ao Critério de Aceitação (a) (Autor, 2017)

| CORPO DE PROVA | PROFISSIONAL              |                            |                           |                            |
|----------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
|                | A                         |                            | B                         |                            |
|                | Total de Descontinuidades | Eco > CRP $D > 6\text{mm}$ | Total de Descontinuidades | Eco > CRP $D > 6\text{mm}$ |
| CP 01          | 7                         | 2                          | 7                         | 2                          |
| CP 02          | 5                         | 2                          | 5                         | 2                          |
| CP 03          | 5                         | 1                          | 5                         | 1                          |
| CP 04          | 5                         | 1                          | 5                         | 1                          |
| CP 05          | 7                         | 0                          | 7                         | 0                          |
| CP 06          | 5                         | 1                          | 5                         | 1                          |
| TOTAL          | (34)                      | (7)                        | (34)                      | (7)                        |

Legenda: (CRP – Curva de Referência Primária,  $D$  – Comprimento da Descontinuidade)

### 2.3.3 Resultados Referente ao Critério de Aceitação (b)

A Tabela 5 mostra o número de descontinuidades detectadas inaceitáveis em cada corpo de prova, atendendo o critério de aceitação (b): independente do seu comprimento, descontinuidades detectadas avaliadas como trinca ou falta de fusão no cordão de solda.

Tabela 5 - Descontinuidades Detectadas Referente ao Critério de Aceitação (b) (Autor, 2017)

| CORPO DE PROVA | PROFISSIONAL     |      |         |                  |      |         |
|----------------|------------------|------|---------|------------------|------|---------|
|                | A                |      |         | B                |      |         |
|                | Descontinuidades |      |         | Descontinuidades |      |         |
|                | Total            | FF   | Trincas | Total            | FF   | Trincas |
| CP 01          | 7                | 6    | 0       | 7                | 6    | 0       |
| CP 02          | 5                | 4    | 0       | 5                | 4    | 0       |
| CP 03          | 5                | 3    | 0       | 5                | 3    | 0       |
| CP 04          | 5                | 4    | 0       | 5                | 4    | 0       |
| CP 05          | 7                | 4    | 0       | 7                | 4    | 0       |
| CP 06          | 5                | 4    | 0       | 5                | 4    | 0       |
| TOTAL          | (34)             | (25) | (0)     | (34)             | (25) | (0)     |

Legenda: (FF-Falta de Fusão)

### 3. CONCLUSÕES

De posse dos resultados obtidos no ensaio de ultrassom nos corpos de prova, foi identificado que os transdutores em estudo têm uma alta capacidade de detecção para pequenas descontinuidades mesmo os corpos de prova apresentando as características geométricas com espessura e diâmetro externo significativamente pequenos, e que não foi identificado perda de transferência (dB) e atenuação sônica acentuada.

Com a frequência mais alta e a diminuição da área dos cristais piezoelétricos, em relação aos transdutores convencionais mais usados, percebeu-se que essas mudanças não aumentaram o campo próximo e divergência do feixe sônico, o que não contribuiu nas interferências e turbulências no feixe sônico comprometendo a inspeção e a varredura nos corpos de prova.

Sabendo que o aumento da frequência aumenta a sensibilidade do ensaio e causa um aumento do ângulo de divergência, é relevante explicar que esse aumento tornou o feixe concentrado na espessura de 3,9mm, por ser uma espessura significativamente pequena, contribuiu para a focalização do feixe sônico e o aumentou a sensibilidade do ensaio.

Como os materiais dos corpos de provas apresentam uma estrutura granular não homogênea e anisotrópica, esse tipo de estrutura contribui muito para a dispersão do feixe sônico; também o processo de soldagem desses materiais pode causar o efeito de sensitização na região da solda e adjacência o que pode influenciar o aparecimento de trincas conforme explanado por LUZ (2002).

Da Tabela 3 temos o teor de carbono muito baixo para os materiais dos corpos de prova, que esse valor significativamente igual ou abaixo de 0,080%, não causa efeito acentuado da sensitização ou efeito algum, conseqüentemente a não ocorrência de trincas intergranular nos contornos dos grãos na região da solda conforme explanado por TELLES (2003). Afirmar tecnicamente que não ocorreu trincas nos corpos de provas (Tabela 3 e 5) por causa do teor de carbono baixo, pode ser um equívoco, pois o aparecimento de trinca depende de vários fatores, por exemplo: o processo de soldagem, preparação da junta; mas pode se entender que esse teor de carbono tem influência importante no processo de soldagem e o aparecimento ou não das trincas; assim como a temperatura de soldagem e o tempo de exposição do cordão de solda a essa temperatura.

Os transdutores em estudo conseguiram detectar as descontinuidades nos corpos de provas sem perder a sensibilidade mesmo com vários fatores característicos de comportamento das ondas ultrassônicas como também as características dos materiais dos corpos de provas e sua forma geométrica.

Os tipos de transdutores aqui utilizados com suas características de onda longitudinal de frequência elevada (7,5 MHz e 5,0 MHz) foi mencionado como sugestão de trabalho na dissertação de pós-graduação: “Estudo da viabilidade do Ensaio de Ultrassom na Inspeção de Juntas Soldadas de Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 316” de Tancredo Loberto, Curitiba 2007 onde o mesmo descreveu: “O aumento da frequência associada com a onda longitudinal aumenta significativamente a sensibilidade do ensaio a detecção de descontinuidades ou defeitos de tamanho reduzido”. Está explanação foi identificada neste trabalho onde os transdutores detectaram descontinuidades com comprimento menores que 6mm e refletividade acima da curva de referência como mostra a Tabela 4 do item 2.3.2 Resultados referentes ao critério de aceitação (a).

#### **4. REFERÊNCIAS**

- ASME B31.3. Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping. EUA: ASME - American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- ASME V. Boiler & Pressure Vessel Code - Nondestructive Examination - Section V. EUA: ASME - American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- ASTM A312. Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes. EUA: ASTM Internacional, 2007.
- CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais. 8º. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- JUVINALL, R. C. Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. único, 2013.
- LUZ, T. S. Influência das Variáveis e do Processo de Soldagem na Sensitização dos Aços Inoxidáveis Austeníticos. Fortaleza: Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da Universidade Federal do Ceará, 2002.
- MARTIN, C. C. Ultrassom. 1º. ed. São Paulo: ABENDI - Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2012.
- TELLES, P. C. S. Materiais para Equipamentos de Processo. 6º. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

#### **5. AVISO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste trabalho.