



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

WELLINGTON BRUNO SILVA DE JESUS

**ESTUDO DE CASO SOBRE FALHA EM SUPORTE DE SENSOR DE  
TEMPERATURA EM GASODUTO INDUSTRIAL**

Ananindeua, PA  
2020

WELLINGTON BRUNO SILVA DE JESUS

**ESTUDO DE CASO SOBRE FALHA EM SUPORTE DE SENSOR DE  
TEMPERATURA EM GASODUTO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Deibson Silva da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Eng. Luiz Gabriel da Silva Nascimento

Ananindeua, PA  
2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

J58e Jesus, Wellington Bruno Silva de.  
Estudo de caso sobre falha em suporte de sensor de temperatura  
em gasoduto industrial / Wellington Bruno Silva de Jesus. — 2020.  
57 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
Coorientador(a): Prof. Dr. Luiz Gabriel da Silva Nascimento  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de  
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2020.

1. Caracterização. 2. Trinca. 3. Soldagem. 4. Aço  
Inoxidável. 5. Gasoduto Industrial. I. Título.

WELLINGTON BRUNO SILVA DE JESUS

ESTUDO DE CASO SOBRE FALHA EM SUPORTE DE SENSOR DE  
TEMPERATURA EM GASODUTO INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Data da Aprovação: 27/10/2020

Conceito: Exceleante

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Eng. Deibson Silva da Costa  
(FEMat / CAMPANIN / UFPA – Orientador)

Luiz Gabriel da Silva

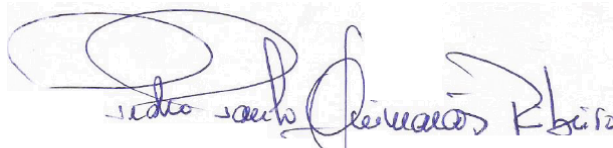
Nascimento: 84420081287

Assinado de forma digital por Luiz Gabriel da Silva

Nascimento: 84420081287

Dados: 2020.10.27 17:12:27 -03'00'

Prof. Dr. Eng. Luiz Gabriel da Silva Nascimento  
(IFPA / Belém – Coorientador)



Prof. Me. Eng. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro  
(FEMat / CAMPANIN / UFPA – Examinador Interno)

Syme Regina Souza

Queiroz: 36434280220

Assinado de forma digital por Syme Regina Souza Queiroz: 36434280220

Dados: 2020.10.27 17:07:18 -03'00'

Profa. Dr<sup>a</sup>. Eng<sup>a</sup>. Syme Regina Souza Queiroz  
(IFPA / Belém – Examinadora Externa)

Aos meus Pais, Antônio Leite de Jesus e  
Maria do Carmo Silva de Jesus por serem  
minha base.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecer a Deus, por sempre me guiar e por permitir que eu chagasse até o fim dessa longa caminhada com saúde, pois sem ele nada sou.

A toda a minha família, em especial aos meus pais Maria do Carmo e Antônio Leite, pois tudo o que conquistei, o que sou e onde cheguei, foram graças ao amor e esforços dos dois.

As minhas irmãs Ana Paula, Ana Cleide, Ana Karla, Ana Kariny e irmão Paulo Henrique, que mesmo distantes fisicamente acreditam e torcem sempre por mim, pelo meu melhor.

A Lourenço Neto por acompanhar de perto essa longa caminhada que foi a graduação, me ajudando nas horas mais difíceis e tornando mais leves meus dias na universidade, e claro sua família em especial seus pais Deusilene e Ney Marruaz, junto com as tias Dilcelene e Darcilene, que sempre estiveram me apoiando. Não menos importante, agradecer também todo o acolhimento dado pelo senhor Antonio Lourenço (seu major) e vovó Ivanise Andrade, esta última que hoje descansa na paz de Deus.

Aos meus orientadores prof. Deibson Costa e Luiz Gabriel pelo apoio, incentivo e por toda a dedicação não medindo esforços para que esse trabalho pudesse se concretizar, aos colegas de turma e laboratório pela paciência e parceria ao longo desses anos. A Liana Castro e Leonardo Mendes e o grupo de pesquisa em materiais (GRUPMAT) do IFPA campus Belém pela ajuda, apoio e parceria ao longo deste trabalho.

A todos os amigos que fiz desde que cheguei a Belém do Pará, que contribuíram de forma direta ou indiretamente para que eu pudesse chegar até aqui.

Por fim, quero agradecer a cada um os docentes da Faculdade de Engenharia de Materiais – FEMat da Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus Ananindeua por terem compartilhado e contribuído durante 5 anos para que enfim meu sonho se tornasse realidade em me tornar engenheiro pela maior universidade do Norte.

“Sonhos determinam o que você quer.  
Ação determina o que você conquista”.  
(Aldo Novak)

## RESUMO

Atualmente, é considerável o número de falhas que ocorrem em equipamentos industriais soldados. Porém, situações nas quais estruturas em aço inoxidável soldadas apresentem falhas e/ou perdas de propriedades importantes são incomuns, uma vez que essa liga metálica apresenta boa soldabilidade e necessita apenas de cuidados especiais no processo de soldagem. O presente trabalho objetiva caracterizar uma peça em aço inoxidável, mais especificamente uma flange utilizada como suporte em um gasoduto para instalação de sensores de temperatura, a qual apresenta trincas que provocam vazamento na tubulação. A caracterização foi realizada por meio dos ensaios de líquido penetrante; fluorescência de raios X; metalografia; microscopia óptica; microscopia eletrônica de varredura e microdureza Vickers. Os resultados possibilitaram também conhecer o tipo de aço inox, identificação de trincas na microestrutura, bem como a composição química da amostra e o aumento da dureza em regiões próximas da trinca que podem ser associadas ao processo de soldagem na região de falha. Os resultados obtidos nos ensaios realizados, apresentaram algumas não conformidades em etapas importantes do processo de fabricação do dispositivo, como a falta de penetração do material de adição no material de base e regiões com diferentes tenacidades, o que pode ter contribuído para o surgimento da trinca.

**Palavras-chave:** Caracterização. Trinca. Soldagem. Aço Inoxidável. Sensor de Temperatura. Gasoduto Industrial.

## ABSTRACT

Currently, the number of failures that occur in welded industrial equipment is considerable. However, situations in which welded stainless steel structures have important flaws and / or loss of properties are uncommon, since this class of metals has good weldability and requires only special care in the process. The present work aims to characterize a stainless steel part, more specifically a flange used as a support in a pipeline to connect temperature sensors, which presents cracks that cause leakage in the pipe. The characterization was carried out by means of penetrating liquid tests; X-ray fluorescence; metallography; optical microscopy; scanning electron microscopy and Vickers microhardness. The results also made it possible to know the type of stainless steel, identification of cracks in the microstructure, as well as the chemical composition of the sample and the increase in hardness in regions close to the crack that can be associated with the welding process in the failure region. The results obtained in the tests performed, presented some phenomena in important stages of the device manufacturing process, such as the lack of penetration of the addition material in the base material and regions with different toughness, which may have contributed to the appearance of the crack.

**Keywords:** Description. Welding. Stainless steel. Temperature Sensor. Industrial Pipeline.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxo simplificado de produção de aço.....	19
Figura 2.2 – Fenômeno de passivação.....	20
Figura 2.3 – Estrutura cristalina de face centrada.....	21
Figura 2.4 – Processo de soldagem.....	23
Figura 2.5 – Regiões de junta soldada.....	24
Figura 2.6 – Ciclo térmico no ponto A.....	27
Figura 2.7 – Porosidades.....	28
Figura 2.8 – Trinca formada a partir da raiz da solda.....	29
Figura 2.9 – Tipos de fratura.....	30
Figura 2.10 – Etapas de fratura dúctil.....	31
Figura 2.11 – Esquema do princípio de medição de microdureza Vickers.....	35
Figura 3.1 – Suporte de gasoduto.....	36
Figura 3.2 – Fluxograma da caracterização.....	37
Figura 3.3 – Peça antes da aplicação de líquido penetrante.....	37
Figura 3.4 – Equipamento de Fluorescência de Raios X (FRX).....	38
Figura 3.5 – Fluxograma do ensaio metalográfico.....	38
Figura 3.6 – Sequência de cortes realizados.....	39
Figura 3.7 – Embutimento.....	39
Figura 3.8 – Lixadeira manual.....	40
Figura 3.9 – Politriz.....	40
Figura 3.10 – Ataque químico.....	41
Figura 3.11 – Microscópio Óptico.....	41
Figura 3.12 – Microdurômetro.....	42
Figura 3.13 – Regiões de endentações.....	42
Figura 4.1 – Trincas detectadas em ensaio por líquido penetrante.....	43
Figura 4.2 – Micrografia de material de base.....	45
Figura 4.3 – Microestrutura típica de aço inoxidável austenítico.....	45
Figura 4.4 – Micrografias.....	46
Figura 4.5 – Aspectos da fratura em região frágil.....	46
Figura 4.6 – Aspectos da fratura revelando região dúctil.....	47
Figura 4.7 – Microdureza Vickers.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Fluorescência de raios X da amostra.....	44
Tabela 4.2 – Fluorescência de raios X do aço 316L.....	44
Tabela 4.3 – Média e desvio padrão.....	49

## LISTA DE SIGLAS

Dr.	Doutor
Dr <sup>a</sup> .	Doutora
Eng.	Engenheiro
Eng <sup>a</sup> .	Engenheira
Me.	Mestre
Prof.	Professor
Prof <sup>a</sup> .	Professora

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAMPANIN	Campus Ananindeua
FRX	Fluorescência de Raios X
FEMAT	Faculdade de Engenharia de Materiais
HV	Microdureza Vickers
GPEMAT	Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais
GRUPMAT	Grupo de Pesquisa em Materiais
IFPA	Instituto Federal do Pará
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
UFPA	Universidade Federal do Pará
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## LISTA DE SIMBOLOS

$\mu$	Microns
$\Theta_m$	Temperatura máxima atingida
$T_p$	Tempo de permanência acima de certa temperatura
$V\Theta$	Velocidade de resfriamento
rpm	Rotações por minuto

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1 Objetivos</b> .....	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivo específico.....	18
<b>1.2 Síntese do trabalho</b> .....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
<b>2.1 Aços</b> .....	19
2.1.1 Estrutura dos aços inoxidáveis.....	20
2.1.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos.....	21
<b>2.2 Soldabilidade dos aços inoxidáveis</b> .....	22
<b>2.3 Metalurgia da soldagem</b> .....	22
2.3.1 Metal de base.....	23
2.3.2 Poça de fusão.....	23
<b>2.4 Parâmetros de soldagem</b> .....	24
2.4.1 Aporte térmico.....	25
2.4.2 Velocidade de soldagem.....	26
2.4.3 Corrente de soldagem.....	26
2.4.4 Ciclo térmico.....	26
<b>2.5 Defeitos de soldagem</b> .....	27
2.5.1 Poros.....	28
2.5.2 Trincas.....	29
2.5.3 Fraturas em materiais metálicos.....	30
2.5.3.1 Fraturas frágeis.....	31
2.5.3.2 Fratura dúctil.....	31
<b>2.6 Ensaios de caracterização</b> .....	32
2.6.1 Ensaio de líquido penetrante.....	32
2.6.2 Fluorescência de Raios -X.....	32
2.6.3 Microscopia.....	33
2.6.3.1 Microscopia óptica.....	33
2.6.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	34
2.6.4 Ensaio de microdureza Vickers.....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36

<b>3.1 Estudo de caso.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2 Ensaio de liquido penetrante.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3 Fluorescência de raios X (FRX).....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Ensaio metalográfico.....</b>	<b>38</b>
<b>3.5 Microscopia.....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 Ensaio de microdureza (HV).....</b>	<b>41</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Considerações iniciais à peça.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Ensaio de liquido penetrante.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3 Fluorescência de raios X (FRX).....</b>	<b>44</b>
<b>4.4 Microscopia óptica.....</b>	<b>44</b>
<b>4.5 Microscopia eletrônica de varredura.....</b>	<b>46</b>
<b>4.6 Microdureza Vickers (HV).....</b>	<b>48</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1 Trabalhos futuros.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução das aplicações dos aços como material de engenharia se deve a diversos fatores técnicos e econômicos. Notadamente, nas últimas décadas o conhecimento acumulado sobre as relações entre composição química, estrutura, propriedade e desempenho e o efeito do processamento sobre estas características atingiu um nível que vem permitindo o incessante desenvolvimento científico de novas ligas e o aprimoramento das ligas existentes (COLPAERT, 2008).

Os aços inoxidáveis se classificam de uma forma geral de acordo com a fase microconstituente predominante na sua microestrutura, podendo ser basicamente ferríticos, austeníticos e martensíticos, caracterizando-se principalmente por sua alta resistência a corrosão a altas temperaturas se comparados a outros aços. Os aços inoxidáveis austeníticos são os aços mais importantes dos grupos de aços, pois apresentam simultaneamente Cr e Ni, variando entre 16 – 26% e 6 – 22% respectivamente (ROMEIRO, 1997).

Na indústria as condições a que um material é submetido influenciam diretamente no seu desempenho, principalmente com relação ao ambiente e aos seus esforços. O material pode variar sua microestrutura de acordo com as temperaturas a que é exposto, podendo ocorrer alterações significativas no seu desempenho. Atualmente são vários os relatos sobre a ocorrência de trincas em acoplamentos de máquinas e equipamentos industriais, em grande parte propagadas a partir do cordão de solda (VENDRAMIM, 2015).

A falha em materiais de engenharia é sempre um evento indesejável por várias razões, as quais incluem vidas humanas que são colocadas em risco, perdas econômicas e interferência na disponibilidade de produtos e serviços. As causas comuns são a seleção e o processamento inadequados de materiais, além do projeto inadequado ou da má utilização de um componente (CALLISTER, 2016).

Alguns problemas podem ser evitados ou resolvidos aplicando-se princípios metalúrgicos apropriados ao processo de soldagem. Por isso, a importância de conhecer, identificar, interpretar e correlacionar os fatores que afetam o ciclo térmico que ocorrem durante a soldagem de materiais metálicos (LOBATO, 2010).

A soldagem pode ser feita por fusão localizada das partes a serem unidas ou ainda por fusão somente de um metal de adição. É utilizada não só na produção de produtos, mas também no processo de manutenção e reparo de componentes metálicos (VENDRAMIM, 2015).

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar e analisar um suporte de sensor de temperatura em aço inoxidável para investigar os prováveis motivos que à levaram a falha. Foi retirada uma mostra da peça para os ensaios de líquido penetrante (ELP), composição química por fluorescência de raio X (FRX), microdureza Vickers (HV), microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A partir dos resultados torna-se possível considerar a hipótese do processo de fabricação do suporte e identificar falhas que possam ter contribuído para o surgimento e propagação das trincas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

- Caracterizar e analisar a falha em uma flange em aço inoxidável, que servia como suporte de sensor de temperatura em um gasoduto industrial.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Obter a composição química da peça;
- Observar a microestrutura do material através de Microscopia Óptica (MO) e Eletrônica de Varredura (MEV);
- Analisar a dureza da peça em regiões próximas e distantes do local de falha;
- Identificar o processo de fabricação do dispositivo.

## **1.2 Síntese do Trabalho**

O capítulo 1 desta monografia se trata de uma introdução a problemática em estudo abordando os principais pontos que norteiam o trabalho.

No capítulo 2 temos a Revisão Bibliográfica, que irá abordar de uma forma geral os principais ensaios, e variáveis que envolvem a investigação, baseados na literatura científica.

O capítulo 3 é o de Materiais e Métodos, que primeiramente irá discorrer brevemente sobre o estudo de caso mostrando a problemática da investigação, logo em seguida ainda neste mesmo tópico é exposto os materiais, equipamentos e a metodologia aplicada para a realização dos ensaios de caracterização da peça em estudo.

No capítulo 4 serão apresentados os Resultados e Discussões obtidos durante os ensaios e correlacionados com as literaturas existentes e expostas no capítulo 2.

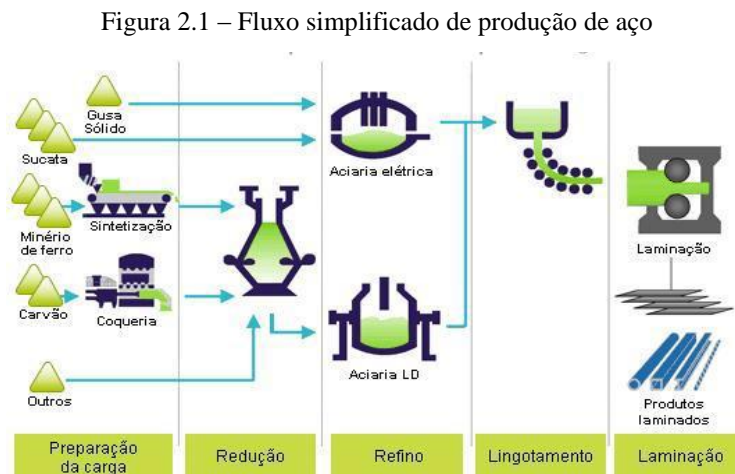
Por fim, será apresentada a Conclusão, onde serão revisados os objetivos juntamente com um fechamento dos resultados, assim como também serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros com o objetivo de agregar conhecimento e desenvolvimento científico tanto para o meio acadêmico quanto profissional.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços

É uma liga de ferro e carbono que sempre contém elementos secundários presentes, devido aos processos de fabricação ou para fornecer alguma característica a ele de maneira a formar as grandes famílias de aço, dos mais rígidos aos mais estampáveis. O Carbono é o principal elemento endurecedor em relação ao ferro, contendo geralmente de 0,008 % a 2,0 % de carbono, definindo sua classificação quanto à quantidade do mesmo (RODRIGUES, 2015).

O aço é o produto siderúrgico obtido por via líquida através da fusão do ferro como componente básico e acrescentado o carbono com um teor em até 2 %. São encontrados nessa liga também níquel, volfrâmio, manganês, cromo, fósforo, enxofre entre outros elementos e resíduos resultantes do processo de fabricação. Com a evolução da tecnologia, o processo de produção do aço (fases de redução, refino e laminação de acordo com a Figura 2.1) estão sendo reduzidas no tempo, aumentando assim a velocidade na produção (ALVES FILHO, 2012).



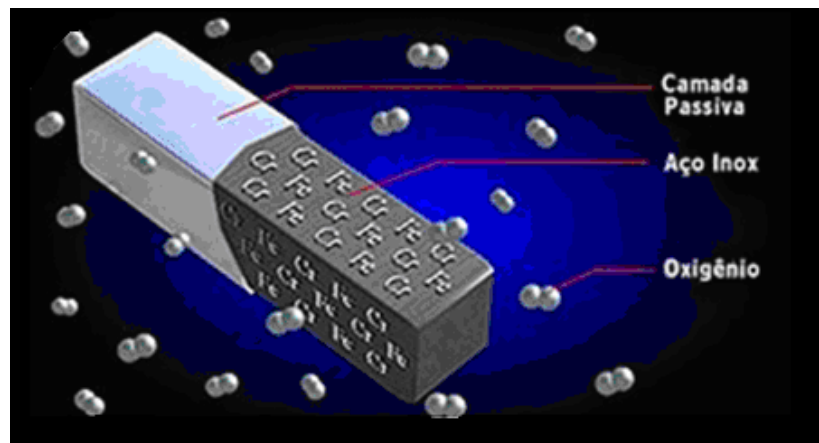
Fonte: Alves Filho, (2012).

Existe uma grande variedade de aços que se diferenciam pela forma, tamanho e uniformidade dos grãos que o compõem e é claro, por sua composição química, sendo que esta pode ser alterada conforme o interesse de sua aplicação final, obtendo-se através da adição de determinados elementos químicos, aços com diferentes graus de resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade, resistência à corrosão, entre outros (IMIANOWSKY, 2008).

### 2.1.1 Estrutura dos Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro classificadas como aços de alta liga com teores de Cr (cromo) acima de 12 %. Este tipo de aço é de grande interesse de aplicação em ambientes ou situações devido à sua capacidade de resistir à corrosão aliada a algumas propriedades mecânicas. Apresentam em sua composição outros elementos chamados elementos liga em concentração inferior a 5 %. Assim Como nos aços patináveis, a característica de alta resistência à corrosão é obtida pela reação do cromo com o oxigênio, (conforme pode ser observado na Figura 2.2 a seguir), formando uma película finíssima de óxido de cromo sobre a superfície do aço (POVOA, 2017).

Figura 2.2 - Fenômeno da passivação



Fonte: Ribeiro, (2012).

Os aços inoxidáveis são classificados em função da sua microestrutura em cinco classes diferentes: austeníticos, martensíticos, ferríticos, duplex (ferrítico-austenítica) e endurecíveis por precipitação (SABARÁ, 2013).

Os aços inoxidáveis ferríticos são aqueles que sua composição química o principal elemento de liga é o cromo, de 15 % a 30 % em peso, e o teor de carbono é relativamente baixo, com algumas adições de molibdênio, nióbio ou titânio. Aços inoxidáveis martensíticos são ligas metálicas ferrosas que possuem teores de cromo variando entre 12 % e 17 % e de carbono em geral superior a 0,1 %, podendo chegar a 1,0 %. Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados os mais comuns dentre essas ligas metálicas, representando cerca de 2/3 da produção mundial, com o cromo variando entre 16 % e 26 % e o níquel de 6 % a 22 %, sendo que os teores médios são 18 % e 8 % respectivamente. Já os aços inoxidáveis duplex se caracterizam por apresentarem estrutura bifásica ferrítica-austenítica, levando a uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis homônimos, tais como boa

resistência à corrosão, tenacidade e elevada resistência mecânica (SALES, 2013).

Por fim os inoxidáveis endurecíveis por precipitação possuem teores de cromo entre 12 % e 18 % e níquel entre 3 % e 10 %, bem como adições de cobre, titânio e alumínio que promovem endurecimento por precipitação após tratamento térmico (SABARÁ, 2013).

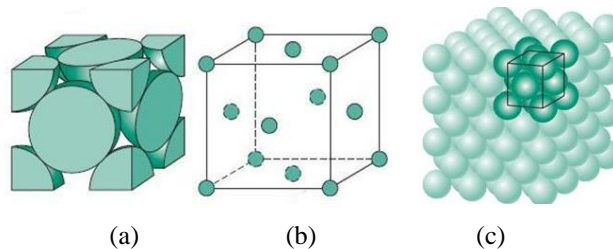
### 2.1.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos representam a maior produção dentre os aços inoxidáveis. São aços com composição química rica em cromo e níquel, sendo as ligas mais usadas as constituídas por 18 % Cr e 8-10 % Ni. Esses aços são comumente os da série 300 da AISI, caracterizadas por serem altamente resistentes à corrosão. Além do Ni e do Cr, podem ser encontrados também o manganês, que assim como Nitrogênio e Carbono, é estabilizador de austenita (VIEIRA, 2016).

No grupo de aços inoxidáveis é possível encontrar famílias em função dos elementos de liga adicionados, e por consequência da microestrutura obtida à temperatura ambiente. Os aços inoxidáveis austeníticos constituem a família de maior relevância, pois aliam excelente resistência à corrosão, boa soldabilidade e boas propriedades mecânicas como ductilidade e tenacidade (SILVA, 2017).

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem estrutura cúbica de face centrada (Figura 2.3). Esta estrutura é obtida através de elementos de austenitização como o níquel, manganês e nitrogênio. Esses aços são chamados de austeníticos por que apresentam esta fase estável em temperaturas até mesmo inferiores a ambiente (LOUREIRO, 2010).

Figura 2.3 – Estrutura cristalina de face centrada, (a) representação de célula unitária por meio de esferas rígidas, (b) esferas reduzidas e (c) um agregado de muitos átomos.



Fonte: Callister, (2016).

## **2.2 - Soldabilidade dos aços Inoxidáveis**

A soldabilidade dos aços inoxidáveis está diretamente ligada ao tipo de microestrutura do aço inox, sendo que cada grupo pode apresentar alguns tipos de problemas de soldagem, tanto metalúrgicas como através de descontinuidades introduzidas no cordão de solda. O quadro 2.2 contempla alguns problemas de soldabilidade metalúrgica que cada tipo de aço inox pode sofrer, além de uma possível solução para evitar que o defeito ocorra (Zotto, 2016).

O procedimento para a soldadura de aços inoxidáveis não difere muito da soldadura de aço macio. O material a ser tratado, no entanto, é caro e as condições exigentes de serviço são geralmente necessárias, necessitando de precauções adicionais e atenção aos detalhes.

O aço inoxidável pode ser soldado tanto em AC ou DC, com um arco mais curto possível de forma a superar qualquer possibilidade de perda de liga através do arco. Quando se utiliza corrente alterna, pode ser necessária uma configuração de corrente ligeiramente mais elevada. Ao soldar ao baixo, devem ser utilizados suportes e, o balanceamento do arco for necessário, esta deve ser limitada a 2 vezes o diâmetro do eléctrodo. O aporte térmico, o que pode afectar negativamente a resistência à corrosão e conduzir a uma distorção excessiva, deve ser limitada através da utilização do diâmetro correto do eléctrodo para dar o perfil com as propriedades requeridas e à velocidade máxima.

## **2.3 Metalurgia de Soldagem**

A metalurgia de soldagem busca estudar os efeitos da operação de soldagem na estrutura e propriedades dos materiais, de forma a obter informações que auxiliem no desenvolvimento de novos materiais menos sensíveis à soldagem e determinar os parâmetros operacionais de soldagem que mais influenciam nas alterações da estrutura e propriedades dos materiais (MODENESI, 2012).

A metalurgia da soldagem se preocupa com os fenômenos metalúrgicos da fusão, solidificação e transformações microestruturais e macroestruturais do processo de soldagem e está inteiramente ligada a qualidade da junta soldada (SOMMACAL, 2015).

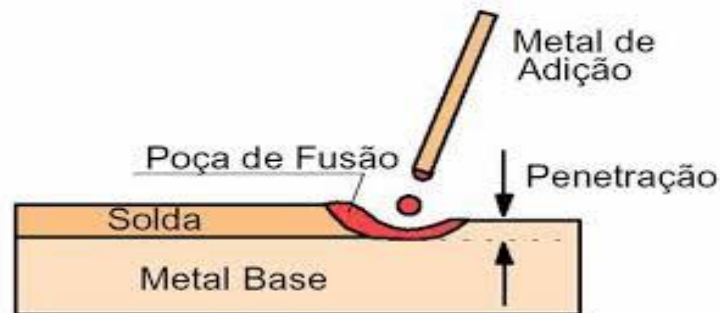
O conhecimento da metalurgia da soldagem é de suma importância desde o início da soldagem, onde começam os fenômenos físico-químico e metalúrgicos, como primeiros problemas de oxidação e elevação nos teores de nitrogênio, até a etapa final onde a microestrutura e as propriedades mecânicas resultantes que são reflexo da taxa de resfriamento do material. Esta condição é acompanhada da ideia de que a qualidade de uma

junta soldada não deve ser avaliada somente pelo aspecto visual do cordão de solda (PEREIRA, 2009).

### 2.3.1 Metal de Base

Durante o processo de soldagem para uma dada aplicação, deve-se sempre levar em consideração as características do metal de base, principalmente as relacionadas a seus aspectos metalúrgicos (MODENESI, 2008). Chama-se comumente de metal de base durante o processo de soldagem, (Figura 2.4) o material da peça a ser unida, e de material de adição ao que será depositado na região de junção (SOARES, 2017).

Figura 2.4 – Processo de soldagem



Fonte: Modenesi, (2008).

### 2.3.2 Poça de Fusão

A poça de fusão é formada por contribuições do metal de base e do metal de adição, que são misturados no estado líquido, formando assim literalmente uma poça de metal derretido, que determina o local da solda em estado líquido (MODENESI, 2012).

A microestrutura dessa zona é diferente das regiões que fazem fronteiras, e por esse motivo, podem se formar trincas devido a transformações das fases metalúrgicas que não são homogêneas dentre outros fenômenos críticos como: transformações martensíticas, segregação, porosidades, crescimento de grãos e precipitações de carbonetos duros (SAVI, 2018).

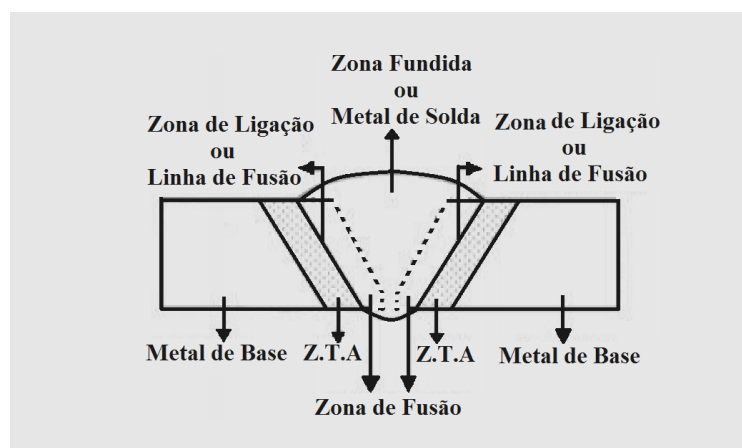
Na parte posterior da poça de fusão, o metal líquido solidifica dando origem ao cordão de solda. O processo de solidificação determina diversas características macro e microestruturais do cordão, tendo assim um importante efeito sobre as propriedades e o comportamento da solda. A microestrutura de uma junta de solda pode variar em função da

velocidade de resfriamento da poça de fusão. Outro parâmetro é a polaridade, que influencia a forma e a dimensão da poça de fusão (SOUZA, 2015).

## 2.4 Parâmetros de Soldagem

Na soldagem por fusão, parte do material de base se funde com o material de adição, onde a região próxima à fundida é afetada pelo calor da solda é denominada zona termicamente afetada (ZTA), a qual depende do material de base do processo e procedimento de soldagem. Sua extensão está em função do gradiente térmico na região, que por sua vez depende da temperatura de pré-aquecimento, da espessura e geometria da peça, das características térmicas do material de base e do processo de soldagem (REIS SOBRINHO, 2000). Um esquema dessas regiões é apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Regiões de junta soldada.



Fonte: Barbedo, (2011).

Uma boa soldagem deve oferecer entre outras coisas segurança e qualidade. Para alcançar esses objetivos, é necessário que os cordões de solda sejam efetuados com o máximo de habilidade e boa regulagem. Uma solda de qualidade deve possuir algumas características como boa penetração, isenção de escavações, fusão completa, ausência de porosidade, boa aparência e ausência de trincas.

A falta e o excesso de penetração, são fatores causados pela falta de controle sobre parâmetros de soldagem durante o processo como; regulagem da intensidade de corrente, velocidade e tensão de soldagem. Quanto às porosidades, trincas e inclusões de escórias, essas podem ser causadas pelas propriedades do material ou manuseio incorreto do equipamento pelo operador (ROSA, 2014).

#### 2.4.1 Aporte Térmico

Na prática, a intensidade de uma fonte de calor em soldagem não pode se medida facilmente, porém tem-se como parâmetro alternativo, de uso mais comum, é a energia de soldagem, ou aporte térmico, que é a quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento da junta (MODENESI, 2003).

A eficiência térmica do processo de soldagem dependerá da natureza do material de base, do tipo da fonte de calor e dos parâmetros de soldagem de uma forma geral (CASTRO, 2011). Devido ao intenso calor do processo de soldagem, as regiões próximas a linha de fusão sofrem severos ciclos térmicos, que causam aquecimento e resfriamento não uniforme no material, causando deformações plásticas e tensões residuais, que podem ser agravadas pela sequência de soldagem. Essas tensões residuais podem comprometer a utilização de produtos, aumentando a possibilidade de falhas em soldas por fadiga, corrosão sob tensão e fraturas (SOUZA, 2016).

#### 2.4.2 Velocidade de Soldagem

Entende-se por velocidade de soldagem é velocidade de deslocamento do arco elétrico ao longo do comprimento da junta. Quanto menor a velocidade de soldagem, maior a penetração da solda e diminui com o aumento da velocidade e conseqüentemente, a largura do cordão. Uma alta velocidade de soldagem pode conduzir a formação de descontinuidades devido a falta de fusão do material. A redução da largura e penetração do cordão com a velocidade de soldagem estão associadas a diminuição da quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta, ou seja, todos esses parâmetros estão interligados (MOREIRA, 2008).

A máxima velocidade de soldagem em alguns aços pode fornecer resultados satisfatórios durante a soldagem, como um bom padrão visual, isento de mordeduras, trincas e outras descontinuidades que prejudicam a solda (SILVA, 2013).

É um parâmetro de grande importância para a soldagem além de ser uma das variáveis para análise do aporte térmico da soldagem, e mais uma variável que em processos manuais depende do soldador. Conseqüentemente, esse parâmetro pode influenciar no calor gerado pelo arco, na penetração da solda e em alguns pontos da estrutura da zona fundida e afetada pelo calor (GUEDES, 2009).

### 2.4.3 Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem é a corrente de saída da fonte quando a solda está sendo realizada. Em uma situação em que as demais variáveis de soldagem se manterem todas constantes e houver um aumento na corrente de soldagem, isso acarretará um aumento na taxa de deposição e conseqüentemente aumento na profundidade e largura do cordão de solda (MOREIRA, 2008).

A corrente de soldagem é um dos parâmetros mais importantes para a soldagem, pois é o fluxo de corrente que vai dar energia de soldagem necessária para a homogeneidade do processo.

A corrente de soldagem controla todas as características operatórias do processo, como o aspecto do cordão e as propriedades da junta soldada. Ela controla de modo direto a magnitude e a distribuição espacial da energia térmica disponível no arco elétrico, e também maior parte dos fenômenos que ali ocorrem. Vale ressaltar que a intensidade de corrente é também um importante parâmetro de efeito controlador da penetração da solda, da largura e do esforço do cordão (GUEDES, 2009).

### 2.4.4 Ciclo Térmico

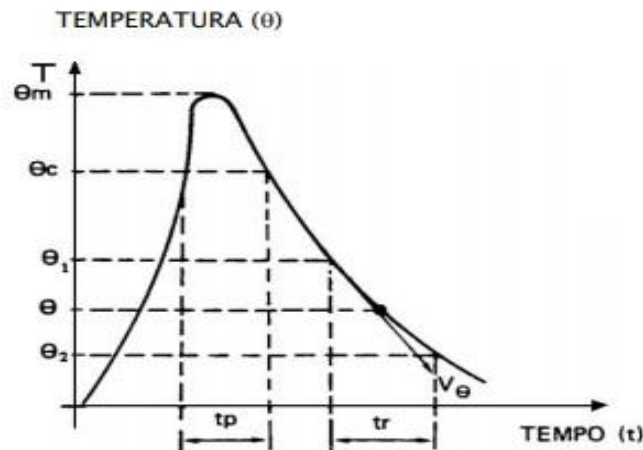
A variação de temperatura durante a soldagem em um ponto da peça é descrita pelo seu ciclo térmico de soldagem, onde cada ponto é submetido a um ciclo térmico que vai depender de outros fatores e da localização deste ponto em relação à solda (MODENESI, 2003).

Os ciclos térmicos exercem forte influência sobre a microestrutura formada na junta soldada. A especificação adequada do ciclo térmico é também importante para se evitar o superaquecimento da região de solda, o que pode acarretar em comprometimento das propriedades mecânicas da junção (VILCHEZ, 2005). O controle do ciclo térmico durante a soldagem é importante para a obtenção de uma junta soldada isenta desse tipo de defeito, como ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio ou trincas a frio, que podem ocorrer tanto no metal de solda quanto na zona termicamente afetada da junta soldada (MOUSINHO, 2016).

A variação de temperatura em função do tempo, em um ponto qualquer da junta soldada é o ciclo térmico no ponto considerado. Através de uma curva (Figura 2.6) podemos determinar:  $\theta_m$  - a temperatura máxima atingida,  $t_p$  - tempo de permanência acima de uma

certa temperatura, por exemplo:  $\theta_c$ ,  $V_{\theta}$  - velocidade de resfriamento à temperatura e  $\theta_{tr}$  - tempo de resfriamento entre as temperaturas  $\theta_1$  e  $\theta_2$  (BORBA, 2019).

Figura 2.6 – Ciclo térmico no ponto A



Fonte: Borba, (2019).

## 2.5 Defeitos em Soldagem

A soldagem por ser um processo de fusão que envolve o aquecimento demasiado da região onde se aplica, gera tensões concentradas no material devido à fonte de calor concentrada em um ponto, o que causa na peça o aparecimento de deformações elásticas, plásticas na região soldada e ainda deformações permanentes de dimensões, causadas por tensões internas. Essas tensões podem gerar ainda, uma série de problemas como a maior propensão a ocorrência de fratura por fadiga e perda da estabilidade dimensional.

Descontinuidades são formadas por interrupções que ocorrem em uma estrutura ou peça soldada, afetando assim a sua homogeneidade física, mecânica e metalúrgica, podendo assim ser considerada um defeito formado no processo, quando os defeitos tornam a peça inaceitável para uso (BENVENHÚ, 2016).

Existem diversos tipos de defeitos nas soldas, as deformações e falhas no processo de soldagem devem ser previstas a fim de se tornar medidas necessárias para evita-las. Os principais tipos de defeitos deste processo são inclusões de escória; são mais comuns quando são feitas várias camadas de soldas no mesmo local, as mordeduras; que são reentrâncias agudas formadas pelo arco elétrico e pela ação de sua fonte de calor, fusão incompleta ou penetração inadequada; são causadas por preparação imprópria da junta, técnica e corrente de soldagem inadequada, a porosidade; que são pequenas bolhas de gás que se apresentam

durante o resfriamento, e fissuras; ocorrem quando há um resfriamento muito rápido do material, mas podem ser controladas através do controle da velocidade de resfriamento (OLIVEIRA, 2014).

Os defeitos em soldagem podem ter efeitos negativos nas propriedades físicas, mecânicas e resistência à corrosão, tornando difícil a manutenção. O conhecimento dos tipos de discontinuidades relacionadas com a operação de soldagem, bem como os seus mecanismos de formação e as técnicas de controle, é de extrema importância para que se possa realizar a manutenção ou prevenção desses defeitos (BARRA, 2013).

Geralmente os problemas enfrentados relacionados aos defeitos em soldagem, deve-se ao fato do aparecimento inesperado de condições adversas, como um erro de procedimento durante a operação de soldagem, aparentemente sem influência, porém gerando discontinuidades, como concentração de tensões que resultam na redução da vida útil do componente, além da possibilidade de ocasionar falhas (BENEDETTE, 2013).

### 2.5.1 Poros

A porosidade pode ser definida como um espaço vazio formado pelo aprisionamento de gás durante a solidificação. Pode ser esférico ou cilíndrico; gerado pela umidade do consumível, falha na proteção gasosa, ou outro desvio durante o processo. É classificado como um defeito volumétrico, geralmente aceito pelas normas de qualificação de procedimentos e soldadores até uma determinada dimensão e distribuição (NOVAIS, 2010).

Figura 2.7 - Porosidades



Fonte: Castro, (2015).

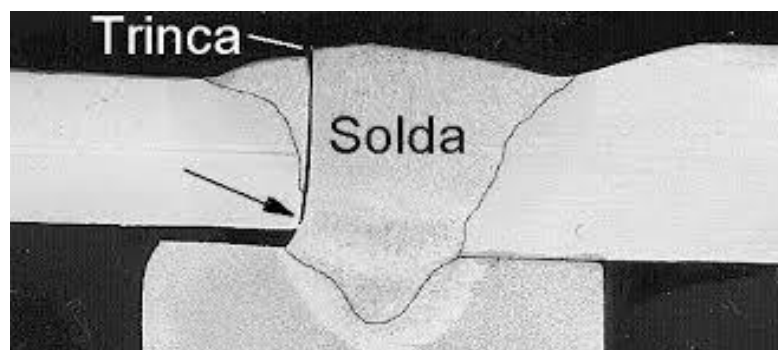
A formação de poros na soldagem dos metais está relacionada com o aprisionamento de gases durante a solidificação do metal fundido. A formação de gases no processo de soldagem depende da natureza dos gases, da supersaturação de gases dissolvidos, da quantidade de gases liberados de reações químicas com liberação de gases e as condições em que o metal se solidifica. Esse defeito apesar de geralmente encontrado na forma esférica, também pode ser encontrado na forma alongada ou vermiforme (MICHELS, 2014).

O principal fator que contribui para a formação da porosidade é a introdução de hidrogênio proveniente de fontes externas, tais como; vapor d'água, óleo, graxa, etc., dentro da atmosfera do arco de modo que assim, o hidrogênio penetra na poça de solda. A porosidade poder ser agrupada, que é normalmente consequência de uma variação nas condições de soldagem podendo ou não ser inaceitável, ou pode ser porosidade alinhada; que usualmente está relacionada a um dos outros defeitos, tais como a falta de fusão ou de penetração (GOMES, 2017).

### 2.5.2 Trincas

As trincas são descontinuidades, ou fissurações geradas por tensões que podem ter suas origens em processos de obtenção de determinada peça, ou tensões causadas pelos ciclos térmicos dos processos de soldagem, e se desenvolvem em regiões fragilizadas, que possuem baixa deformação plástica, o que impede a absorção dessas deformações, ocasionando assim as trincas, conforme a Figura 2.8.

Figura 2.8 – Trinca formada a partir da raiz da solda.



Fonte: Gomes, (2017).

Aquelas que ocorrem durante a própria operação de soldagem, ou depois, se distinguem dois grupos: o primeiro é o dos fissuramentos a quente e o outro é o que se produz no metal já bem avançado, no seu resfriamento para a temperatura ambiente, que pode ser

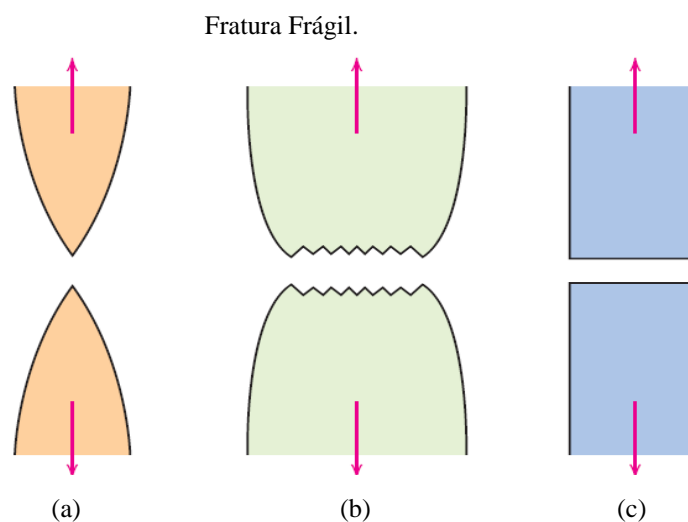
considerado como fissuramento a frio. O fenômeno de trincamento a frio ocorre depois da solda já solidificada do metal de solda (SILVA, 2010).

As trincas de soldagem são consideradas os defeitos mais graves e permitem facilmente a fratura frágil da estrutura soldada. Para que elas ocorram é preciso que haja uma combinação de fragilidade metalúrgica e tensões aplicadas. As trincas a quente sempre ocorrem em regiões que sofreram fusão na soldagem, porém podem ser trincas de solidificação quando ocorrem no metal de solda, ou podem ser trincas de liquação quando ocorrem por efeito de fusão na zona de ligação e zona termicamente afetada (ZTA) (GOMES, 2017).

### 2.5.3 Fraturas em Materiais Metálicos

Pode-se definir fratura como sendo a ruptura de um objeto em duas ou mais partes devido a uma força estática. A fratura pode ser classificada pela deformação plástica do material devido a uma tensão e assim, os modos de fratura são divididos em frágil e dúctil. Os materiais frágeis possuem a capacidade de absorver uma pequena quantidade de energia antes da sua fratura, enquanto que os dúcteis possuem alta absorção de energia e deformação plástica extensa (HUGO, 2017). A Figura 2.9 exemplifica o comportamento do material em fraturas frágeis e dúcteis

Figura 2.9 – Tipos de fraturas (a) Fratura altamente dúctil, (b) Fratura moderadamente dúctil, e (c)



Fonte: Callister, (2016).

O processo de fratura envolve formação e propagação de trincas, sendo o modo da fratura dependente do mecanismo de propagação. As trincas são denominadas instáveis, e a

propagação da trinca uma vez iniciada, irá continuar espontaneamente sem aumento na magnitude da tensão aplicada.

### 2.5.3.1 Fraturas Frágeis

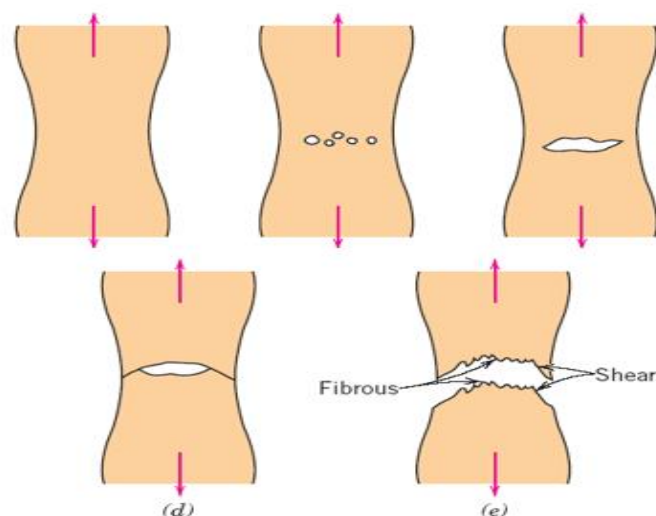
A fratura frágil ocorre sem deformação plástica apreciável e pela rápida propagação de uma trinca. A direção do movimento da trinca é perpendicular à direção da tensão aplicada e produz uma superfície de fratura relativamente plana. Algumas superfícies de fraturas frágeis contêm linhas ou nervuras que se irradiam a partir da origem da trinca, formando um padrão semelhante a um leque, algumas observadas a olho nu (ROCHA, 2016).

### 2.5.3.2 Fraturas Dúctil

A fratura dúctil ocorre quando o material se deforma plasticamente. Devido à grande facilidade da ocorrência de deformação plástica, não existe nenhuma restrição ao movimento das discordâncias e assim elas podem mover-se em um número elevado de sistemas de deslizamentos combinado, ocorre com a interseção de diversos planos cristalográficos.

Nesse tipo de fratura, há predominância da deformação plástica e uma resistência à rápida cisão da estrutura oriunda da propagação de trincas, ou seja: o material que sofre fratura dúctil é resistente à ruptura e tende a se deformar plasticamente antes de fraturar. A Figura 2.10 as etapas de fratura dúctil (SILVEIRA, 2017).

Figura 2.10 – Etapas da fratura dúctil.



Fonte: Callister, (2016).

## 2.6 - Ensaio de Caracterização

### 2.6.1- Ensaio de Líquido Penetrante

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, e ainda que estejam abertas na superfície do material. Este método, se iniciou antes da primeira guerra mundial, principalmente pela indústria ferroviária na inspeção de eixos, porém tomou impulso quando em 1942, nos EUA, foi desenvolvido o método de penetrantes fluorescentes.

O objetivo do ensaio por líquidos penetrantes é detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc...podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. É muito usado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio, e zircônio, além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos. (ANDREUCCI, 2003)

Durante a realização deste ensaio, é importante a utilização de um procedimento escrito, pois existem alguns detalhes que devem ser observados, como por exemplo, atentar para o spray do revelador ser aberto antes do início da peça e ser aplicado em todo o comprimento de uma só vez, para manter constante a pressão. Além disso, antes de se iniciar o ensaio deve-se remover a ferrugem existente com uma escova de aço, não devendo lixar a peça de forma alguma, pois este processo pode gerar um mascaramento nos resultados, encobrendo trincas e falhas. (BARKOEBAS, 2010)

### 2.6.2 - Fluorescência de Raios – X

A análise por fluorescência de raios-X tem fins qualitativos ou quantitativos que se baseiam na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas como elétrons, prótons ou íons produzidos em aceleradores de partículas ou ondas eletromagnéticas, além do processo mais utilizado que é através de tubos de raios-X (SANTOS, 2013).

O que ocorre na fluorescência de raios X é consequência de mudanças que ocorrem dentro de um átomo. Um átomo estável compreende um núcleo e os elétrons que o orbitam. Estes elétrons são organizados em camadas, cada camada é composta por elétrons com a mesma energia. Quando um incidente de alta energia de raios X (primária) colide com um

átomo, ele tem sua estabilidade perturbada, de forma que um elétron é ejetado de um baixo nível/camada de energia, por exemplo, da camada K, e um espaço é criado, onde o resultado é um elétron de um nível de energia mais alto, camada L, por exemplo, cai para este espaço. (LUCENA, 2015)

Esse ensaio é bastante utilizado em aplicações industriais, que frequentemente requerem rotinas analíticas rápidas para controle de qualidade de seus produtos, assim como as análises exploratórias utilizadas em geologia. Ela permite a análise de ligas, pigmentos, rochas, cerâmicas e inúmeros outros e de seus eventuais produtos de corrosão, para determinação de origem, processamento e uso, compreensão de seus processos de deterioração, definição de métodos de preservação e restauração, bem como autenticação (SANTOS, 2013)

### 2.6.3 - Microscopia

#### 2.6.3.1- Microscopia Óptica

Durante a fase de produção ou análise de materiais, quase sempre se torna necessário analisar a sua microestrutura. Esta análise microestrutural é muito importante pois permite entender as correlações microestrutura, defeitos, propriedades e prever essas propriedades quando estas correlações são estabelecidas.

A técnica de microscopia ótica, o contraste da imagem é resultado da diferença de reflectividade da luz nas diversas regiões da microestrutura, uma vez que o sistema é constituído basicamente pela fonte de iluminação e do sistema de lentes. Nos materiais que são opacos a luz visível, como é o caso dos metais, da maioria dos cerâmicos e polímeros, somente a superfície pode ser observada e a mesma precisa ser cuidadosamente preparada de maneira a revelar os detalhes da microestrutura.

Nesta era de intenso avanço tecnológico, cada vez mais os cientistas têm a necessidade de observar, analisar e explicar corretamente os fenômenos que ocorrem na escala micrométrica ou submicrométrica. (MALISKA, 2016)

### 2.6.3.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura é o mais versátil técnica para avaliação, exame e análise das características microestruturais de amostras biológicas e não-biológicas. A grande vantagem desta técnica é a elevada profundidade de campo que o equipamento atinge, da ordem de 10  $\mu\text{m}$  para aumentos de cerca de 10.000 X, chegando a 1 cm para aumentos de 20 X. Esta característica possibilita obter imagens estereoscópicas e bem enfocadas com espécimes até macroscópicos. Além disso, no MEV a amostra pode ser inclinada e rotacionada sob o feixe eletrônico em todas as orientações, logo precisa estar bem preservada nas três dimensões. (CASTRO, 2001)

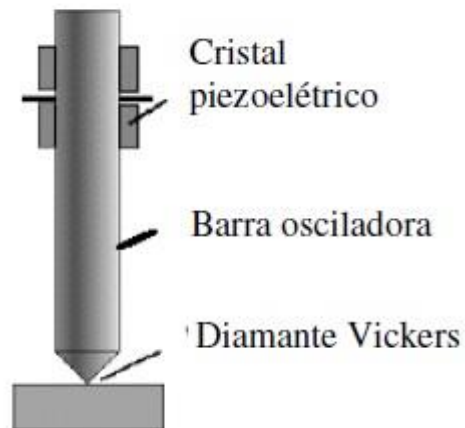
A microscopia eletrônica de varredura permite alcançar aumentos muito superior ao da microscopia ótica. Dependendo do material pode atingir até 900 000 vezes, mas para a análise de materiais normalmente o aumento é da ordem de 10 000 vezes.

Atualmente o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) se tornou um instrumento imprescindível nas mais diversas áreas: eletrônica, geologia, ciência e engenharia dos materiais, ciências da vida, etc. O desenvolvimento de novos materiais tem exigido um número de informações bastante detalhado das características microestruturais só possível de ser observado no MEV, ou seja, podemos afirmar que onde haja um grupo de desenvolvimento de materiais, há a necessidade de um MEV para as observações microestruturais. (MALISKA, 2016)

### 2.6.4 - Ensaio de Microdureza Vickers

O objetivo do ensaio de microdureza Vickers é avaliar a resistência de materiais à deformação plástica localizada. O ensaio consiste na aplicação de uma carga sobre a superfície plana previamente preparada de um material, utilizando-se de um penetrador piramidal de diamante (Figura 2.11). Após a remoção do penetrador da superfície do material, percebe-se a presença de uma impressão no local (RIOS, 2016).

Figura 2.11 – Esquema representativo do princípio de medição de microdureza Vickers.



Fonte: Silva, (2006).

Dentro da área da metalurgia, considera-se dureza como a resistência á deformação plástica. Isso por que uma grande parte da metalurgia consiste em deformar plasticamente os metais (SOUZA, 1974). Já a área da mecânica, diz que dureza é a resistência a penetração de um material duro no outro, por ser uma característica que pode ser medida (GARCIA, 2000).

Algumas investigações teóricas e empíricas resultam em relações quantitativamente precisas também entre dureza e outras propriedades dos materiais, como coeficiente de encruamento, fadiga e fluência. Estas relações auxiliam na avaliação dessas propriedades de forma precisa para o controle de qualidade durante estágios intermediários e finais de fabricação. Em muitas situações o ensaio de dureza é a única alternativa disponível de teste não destrutivo para a qualificação e liberação de componentes para a aplicação ou operação (BERTOL, 2009).

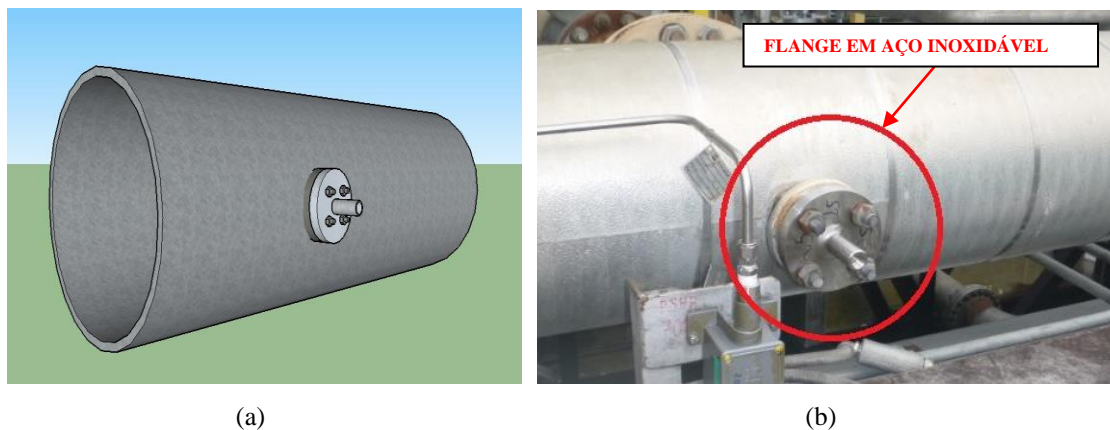
Os ensaios de dureza são realizados com maior frequência do que qualquer outro ensaio mecânico por serem simples de fazer, mais baratos e não comprometem funcionalmente a peça ensaiada (SILVA, 2006).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Estudo de caso

Através dos serviços de inspeccionamento e manutenção de uma conceituada empresa de exploração, produção e refino de petróleo, foi verificado que uma flange em aço inoxidável que servia como suporte em um gasoduto para conectar sensores de temperatura, (Figura 3.1) apresentava trincas que até então eram desconhecidas e que conseqüentemente provocaram vazamento na tubulação. Diante do problema diagnosticado, fica evidente os danos causados por esse tipo de falha, afetando diretamente a empresa em vários aspectos, como funcionamento e produção, cabendo a equipe técnica averiguar as possíveis causas da falha.

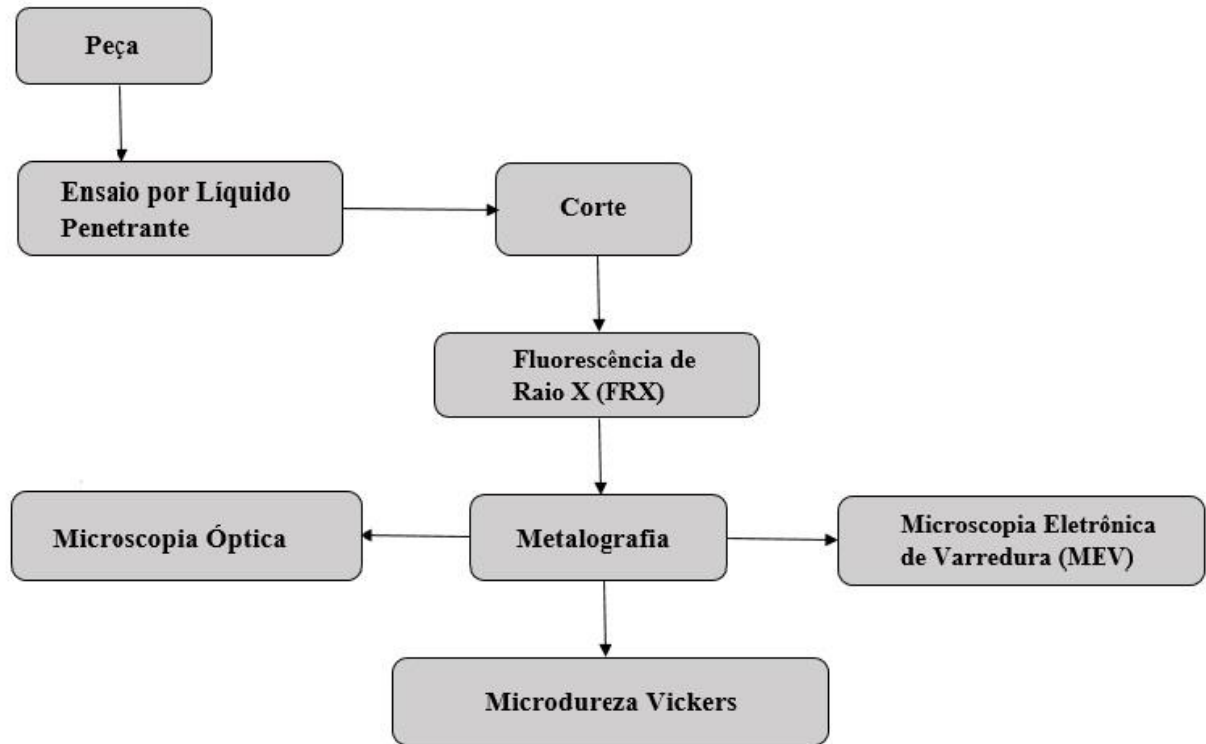
Figura 3.1 – a) Suporte no gasoduto em modelagem 3D, b) Flange em aço inoxidável.



Fonte: Autor, (2020).

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma geral dos ensaios realizados para caracterização da peça, que foi encaminhada aos laboratórios do Instituto Federal do Pará – IFPA e da Universidade Federal do Pará – UFPA campus Belém, onde foram realizados ensaios de líquido penetrante, preparação da amostra através de metalografia para os ensaios de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), em seguida foi obtida a composição química da flange através de fluorescência de raios X (FRX). Por fim realizado o ensaio de microdureza Vickers (HV) de uma extremidade a outra da amostra, passando pela região de trinca.

Figura 3.2 – Fluxograma de caracterização.

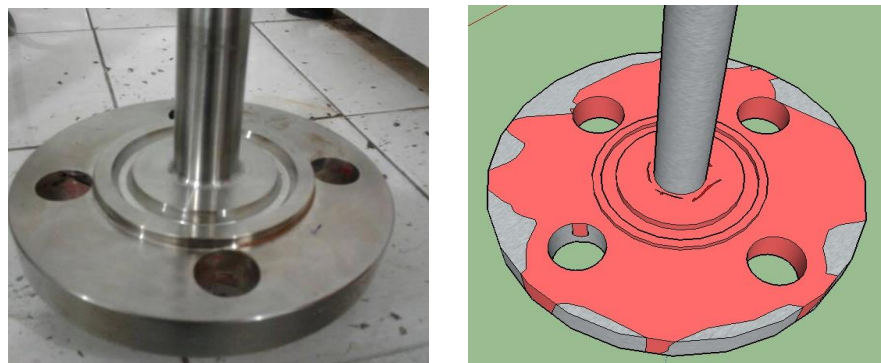


Fonte: Autor, (2020).

### 3.2 Ensaio de líquido penetrante

O ensaio foi realizado na flange ainda acoplada ao eixo de acordo com a norma para ensaio de líquido penetrante da Petrobras N-2370, no qual a amostra foi limpa pulverizando um removedor na superfície da peça e em seguida a mesma foi seca com um pano, na sequência foi aplicado o penetrante deixando-o se estabelecer por 30 minutos, em seguida o excesso de penetrante foi removido e aplicado o revelador na área do ensaio, deixando-o também por 30 minutos. Após isso, foram feitas as inspeções visuais para evidenciar as trincas conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Flange antes da aplicação do líquido penetrante, b) Modelagem 3D flange com o líquido penetrante.



(a)

Fonte: Autor, (2019).

(b)

### 3.3 Fluorescência de raios X (FRX)

A análise química se deu através de fluorescência de raios X em um equipamento modelo FRX S2- Ranger (Figura 3.4) do IFPA campus Belém, onde foram utilizada apenas uma amostra. Esse tipo de análise é de suma importância no processo de caracterização de materiais, uma vez que essas informações sobre a composição química do material levam a uma melhor compreensão sobre seu comportamento.

Figura 3.4 – Equipamento de Fluorescência de raio X (FRX).

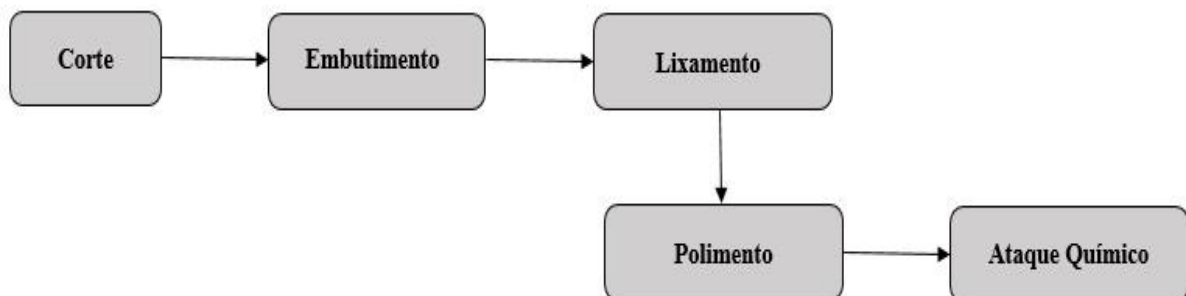


Fonte: Autor, (2020).

### 3.4 Ensaio metalográfico

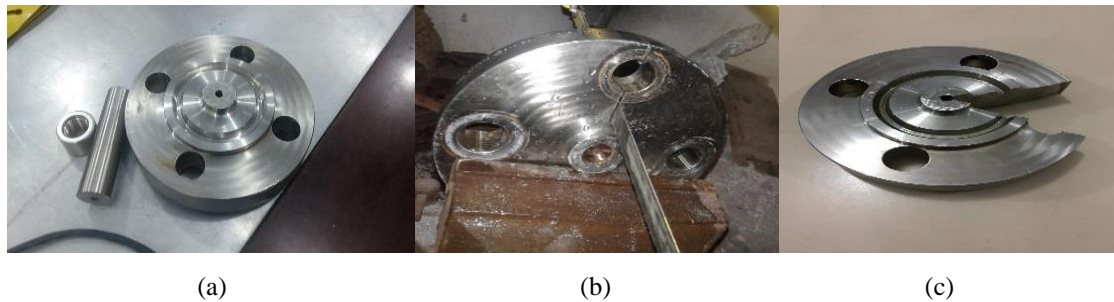
O fluxograma a seguir (Figura 3.5.) mostra a preparação da amostra para os ensaios de metalografia. Inicialmente a peça foi cortada no eixo, e em seguida transversalmente na região circular onde encontra-se a região afetada pela trinca, seccionando uma amostra para o estudo como mostra a sequência na Figura 3.6. Foi utilizada uma serra de corte manual na retirada de duas pequenas amostras para análise. A escolha por esse tipo de corte foi justificada para uma melhor conservação das microestruturas.

Figura 3.5 – Fluxograma de ensaio metalográfico.



Fonte: Autor (2020).

Figura 3.6 – Sequência de cortes realizados, (a) Corte do eixo, (b) Início do corte transversal e (c) Amostra retirada.



Fonte: Autor, (2019).

Em seguida as amostras foram levadas ao laboratório de metalografia do Instituto Federal do Pará (IFPA) campus Belém, para se realizar o embutimento a frio conforme mostra a Figura 3.7. Nesse procedimento foram utilizadas resina acrílica e catalisador. O tempo total de cura da resina foi de 24 horas.

Figura 3.7 – Embutimento. a) Resina em cura, b) Amostra embutida.



Fonte: Autor, (2019).

Após o embutimento as amostras foram lixadas utilizando uma lixadeira manual, (Figura 3.8) passando por lixas de 100 a 2000 mesh com mudança na posição da peça conforme a troca das lixas e refrigeração feita a base d'água

Figura 3.8 – Lixadeira manual.



Fonte: Autor, (2019).

Logo depois foi polida em uma politriz marca/modelo PANAMBRA conforme podemos observar na Figura 3.9, com rotação de 225 rpm utilizando alumina de 0,3 micron como abrasivo.

Figura 3.9 – Politriz.



Fonte: Autor, (2019).

O ataque químico foi realizado com o reativo de Marble ( $\text{CuSO}_4$  20 ml HCl + ml  $\text{H}_2\text{O}$ ) através de esfregação durante 60 segundos, (Figura 3.10) após a perda do aspecto especulado o reagente foi removido com álcool líquido, deixando a peça secar ao ar livre. O uso deste reagente torna visível constituintes especiais de estruturas em aços inoxidáveis austeníticos, onde o mesmo mostrou-se adequado para revelar a microestrutura da amostra em microscópio óptico e identificação das fases presentes.

Figura 3.10 – Ataque Químico.



Fonte: Autor, (2019).

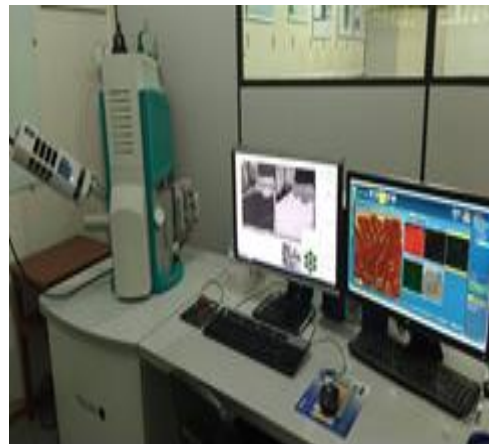
### 3.5 Microscopia

Em seguida foram feitas as micrografias da microestrutura revelada da peça em um microscópio óptico (Figura 3.11 a) e logo depois foi realizada microscopia eletrônica de varredura (MEV) na região de fratura (Figura 3.11 b) ainda nos laboratórios do IFPA.

Figura 3.11 – a) Microscópio Óptico, b) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



(a)



(b)

Fonte: Autor, (2020).

### 3.6 Ensaio de microdureza (HV)

O ensaio de dureza Vickers (HV) foi realizado no laboratório do Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT) vinculado ao curso de Engenharia Mecânica da UFPA, onde a segunda amostra foi colocada em um microdurômetro modelo HV – 1000B (Figura 3.12), submetida a uma carga de 200 grama-força durante 12 segundos, com distância

entre as endentações de 2,0 mm, valores de acordo com a norma ASTM E384 – 17 para esse tipo de material. Essa é uma das escalas mais utilizadas para medição de dureza, podendo ser usada em grande parte dos metais com bastante precisão de medida.

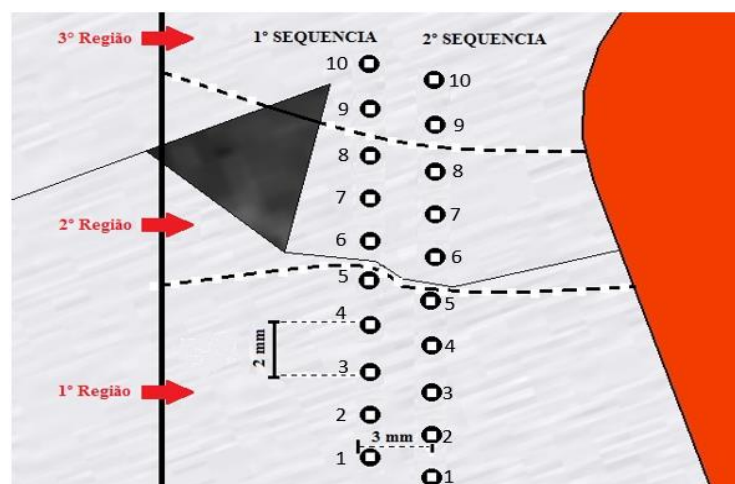
Figura 3.12 – Microdurômetro.



Fonte: Autor, (2019).

A amostra foi dividida em três regiões para se realizar o ensaio. Foram realizadas um total de 20 endentações na amostra, duas sequências (linhas) de endentações paralelas com uma distância de 3 mm entre elas, cada uma com 10 endentações de uma extremidade a outra da amostra passando pela região de trinca como mostra a Figura 3.13. O objetivo de se fazer duas sequências é justamente certificar-se dos valores apresentados conforme o comportamento do material, bem como os valores de média e desvio padrão.

Figura 3.13 – Regiões de endentações.



Fonte: Autor, (2020).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Considerações iniciais à peça

De início foram feitas algumas hipóteses levando em consideração o local da trinca, o tipo de material e seu funcionamento, cogitando a possibilidade do defeito ter origem do processo de fabricação, fadiga, sensitização ou condições de serviço acima de sua capacidade. Em seguida foi realizado o processo de caracterização desse material com a finalidade de se determinar as possíveis causas do surgimento de trincas na flange, através da determinação do processo de fabricação da peça, composição química e análise de superfície de fratura.

### 4.2 Ensaio de líquido penetrante

Através do ensaio de líquido penetrante podemos identificar vários tipos de discontinuidades superficiais, dentre elas, na peça em estudo foi possível observar a presença de algumas trincas concentradas nas regiões de encontro do eixo com flange, (Figura 4.1). Aparentemente as trincas se mostraram com tamanhos e espessuras pequenas.

Figura 4.1 – (a) Trincas na região de interseção eixo e a flange (b) Trincas detectadas em ensaio por líquido penetrante



(a)



(b)

Fonte: Autor, (2019).

### 4.3 Fluorescência de Raios X (FRX)

Através da análise química que se deu por fluorescência de raios x, ensaio esse bastante utilizado na indústria quando se requer dados qualitativos e quantitativos, por exemplo para controle de qualidade de determinado material, constatou-se que a composição química do aço inoxidável é semelhante ao do aço 316 L conforme pode-se observar nas Tabelas 4.1 e 4.2 No geral o teor de carbono é inferior a 0,08 %, outra característica relevante desse aço é seu uso na indústria petrolífera e em peças para indústria química como válvulas e tubos.

A composição química do aço inoxidável austenítico 316L está diretamente ligada as suas propriedades, sendo sua resistência a corrosão e dureza resultado dos altos teores de Cr, assim como o Si age como agente desoxidante, o Ni melhorando a ductilidade, o Mn como dessulfurante e o Mo para melhorar a resistência a altas temperaturas.

Tabela 4.1 – Fluorescência de raios X (FRX) da amostra.

Amostra (%)	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Mo	Sum
	0,38	16,84	1,62	68,53	0,37	9,79	0,50	1,94	100,0

Fonte: Autor, (2020).

Tabela 4.2 – Fluorescência de raios X (FRX) do aço 316L

	Elementos (%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
316 L	Mínimo	0	0	0	16,00	10,00	2,00
	Máximo	0,03	1,00	2,00	18,00	14,00	3,00

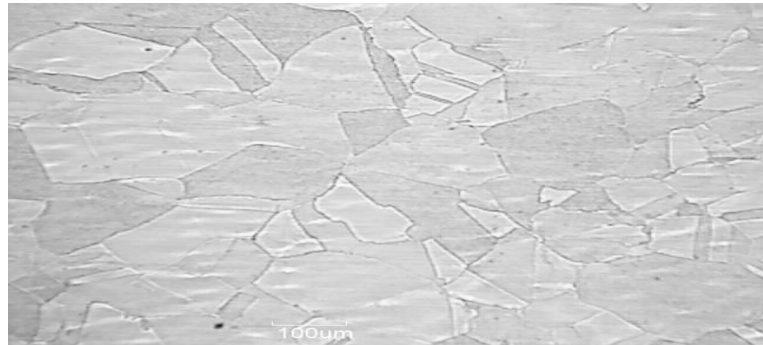
Fonte: ASM Handbook1, (1994).

### 4.4 Microscopia Óptica

Após o corte na peça para retirada da amostra, foi possível constatar por análise visual que se tratava de uma peça produzida através do processo de soldagem uma vez que esse processo visa a união de dois ou mais materiais com região de contato entre ambos (MODENESE, 2000), com a presença de chanfro.

Através da micrografia obtida, (Figura 4.2) por microscópio óptico, com o objetivo de analisar microestruturalmente a flange e correlacionar com seus defeitos e propriedades, foi possível observar que a microestrutura é compatível com microestruturas típicas de aços inoxidáveis de matriz austenítica, se compaarmos a Figura 4.3, e que não há sinais de tensionamento mecânico, haja vista a integridade característica dos grãos austeníticos.

Figura 4.2 – Micrografia do material de base.



Fonte: Autor, (2019).

Figura 4.3 – Microestrutura típica de aço inoxidável austenítico.

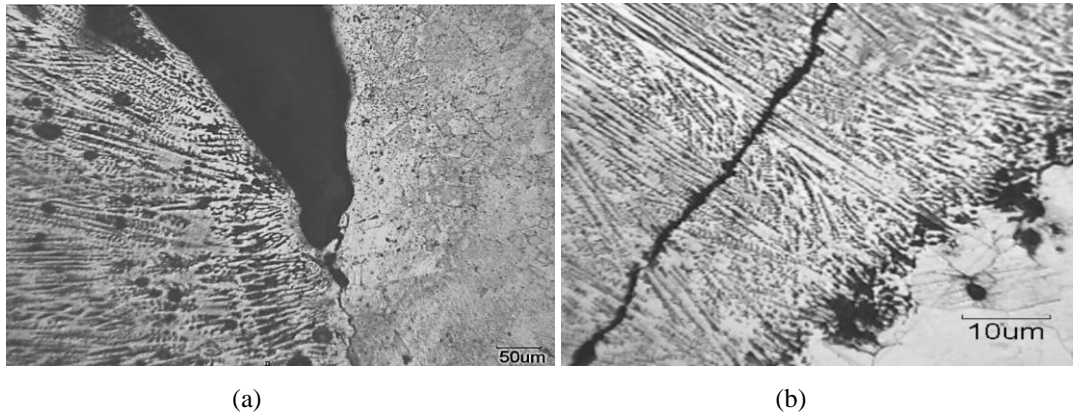


Fonte: Santos, (2009).

Foi possível observar duas trincas, (Figura 4.4) onde a Figura 4.4a), apresenta uma trinca intergranular que se originou a partir do chanfro, que de uma forma geral age como um concentrador de tensões. A outra trinca (Figura 4.4b) se localiza na região do cordão de solda, característica de uma trinca transgranular. Pode-se também observar que existe pouca penetração do material de adição no material de base, que pode ter se originado provavelmente por efeitos térmicos do processo.

Na região fundida também pode-se observar uma grande quantidade de poros vermiculares, o que pode estar associado a velocidade que se deu a soldagem, ou o aporte térmico insuficiente para que ocorresse a junção entre os materiais, vale ressaltar que a ferrita formada na região de solda torna o material mais frágil e duro.

Figura 4.4 – Micrografias a) Micrografia da propagação da trinca a partir do chanfro b) Micrografia de trinca na região de solda.

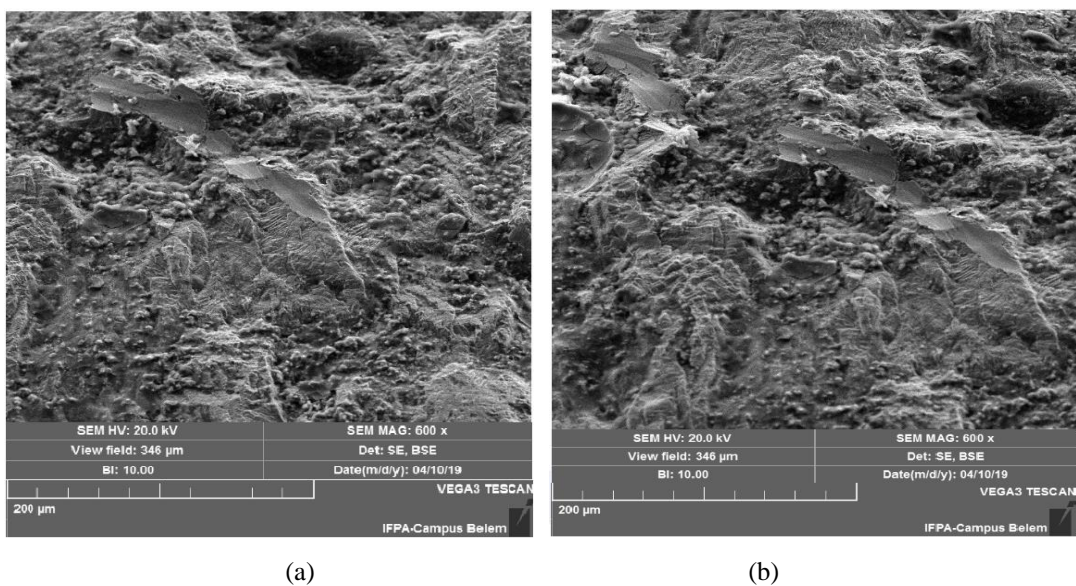


Fonte: Autor, (2019).

#### 4.5 Microscopia eletrônica de varredura

As factografias obtidas a partir da análise de MEV da amostra ampliada 600x, (Figura 4.5) na região da fratura, alcançando aumentos superiores ao da microscopia óptica, pode-se observar algumas características, como o aspecto regular, sem a presença de microcavidades esféricas e sem a presença de planos de clivagem, características essas que só podem ser visualizadas através de microscopia eletrônica de varredura. Também não foram encontradas regiões com estrias que poderiam sugerir fadiga.

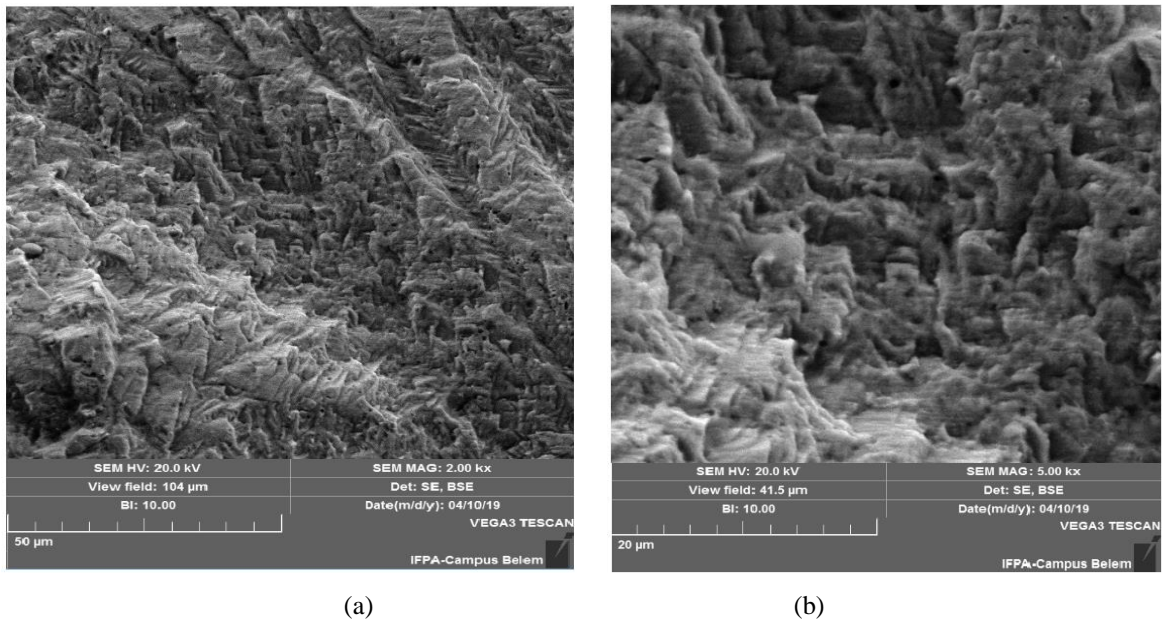
Figura 4.5 - a) e b) Aspecto da fratura em região frágil.



Fonte: Autor, (2019).

Observa-se também na fractografia da amostra na superfície, características do processo de fratura frágil nesta região, dando indícios que esta região possui baixa tenacidade, que é um problema comum do processo de soldagem na região termicamente afetada (ZTA), bem como o surgimento de trincas de solidificação em materiais contaminados. Já a Figura 4.6 a fratura apresenta um aspecto dúctil, o que sugere a coexistência de dois mecanismos de fratura na região de solda.

Figura 4.6. a) e b) Aspecto da fratura revelando região dúctil.



Fonte: Autor, (2019).

A coexistência de regiões com diferentes tenacidades na superfície da fratura nos leva a admitir que os ciclos térmicos sofridos durante o processo de soldagem pelo dispositivo provocaram um acúmulo de tensões, acúmulos estes que foram ampliados pelos poros, presença do chanfro e a baixa penetração somados as condições de trabalho agressivas podem ter contribuído para a falha do dispositivo.

De forma geral os aços inoxidáveis apresentam boa soldabilidade, porém é de suma importância controlar as etapas que norteiam a soldagem, havendo sempre um investimento não só nos equipamentos e tecnologias utilizadas mas também nos profissionais que irão executar o serviço, de forma que envolvam conhecimentos da engenharia e ciência dos materiais durante a etapa de planejamento, análises e seleção de materiais para que se possa evitar falhas dessa natureza.

#### 4.6 Microdureza Vickers (HV)

O Gráfico 4.1 mostra os dados obtidos no ensaio de microdureza (HV), apresenta os dados coletados segundo a área da metalurgia da resistência a deformação plástica desse material. Cada sequência de endentação (sequências 1 e 2) é composta por 10 pontos. Os cinco primeiros pontos do gráfico que são referentes a primeira região de endentação, ou seja, a partir de um ponto próximo a extremidade seguindo em direção a outra extremidade da amostra, é possível observar uma variação na dureza.

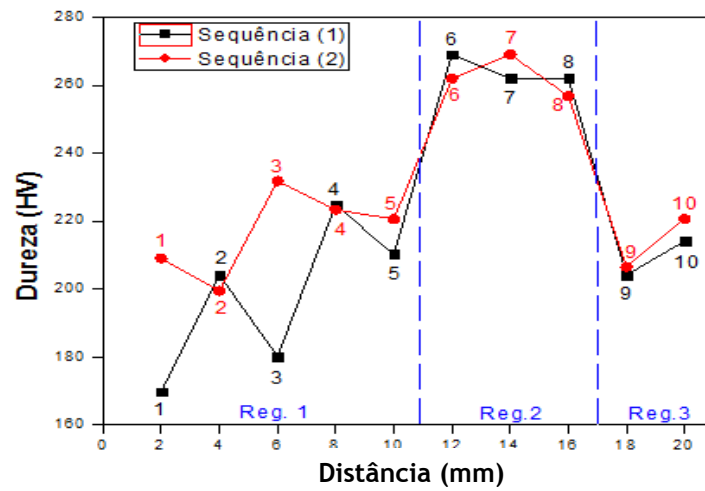
A segunda região onde se encontram os pontos 6, 7 e 8 é a região mais próxima ao cordão de solda e conseqüentemente da trinca, apresentaram os maiores valores de dureza com moderada constância desses seus valores. A partir do 5º ponto para o 6º ocorre um aumento brusco dessa dureza, o que pode-se justificar ser devido a um provável endurecimento do material decorrente das ações da temperatura do processo de soldagem nessa região, como por exemplo a formação de martensita devido ao alto ou abaixo aporte térmico.

Segundo Carvalho (2014), a microestrutura formada após o processo de soldagem quando não submetida a um alívio de tensões posteriormente à solda, é um fator importante para a formação e propagação de trincas. Durante a solidificação na soldagem, em virtude dos diferentes valores de solubilidade dos elementos, existe a formação de fases segregadas que podem gerar fases com baixo ponto de fusão, favorecendo a formação de trincas.

Em seguida, na transição da segunda para a terceira região da amostra, também foi possível observar que do 8º ponto para o 9º ponto ocorre uma queda brusca da dureza, seguida de um moderado pico.

Mondenese (2005), diz que tendo em vista que com relação a trincas e fissuras, a região mais suscetível é a ZTA, devido a aquecimento e a mudança da microestrutura do material como por exemplo o aumento de dureza, tendo como consequência apesar de duro, o enfraquecimento da junta soldada fazendo com que a resistência desta seja menor que a esperada. Pode-se atribuir essa queda na dureza ao afastamento da região de solda. Portanto os valores dos pontos 9 e 10 correspondem ao material de base, sem a provável influência da temperatura de soldagem nessa região.

Figura 4.7 – Gráfico de Microdureza.



Fonte: Autor, (2020).

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos valores da média e desvio padrão do ensaio de microdureza Vickers, reforçando mais uma vez a variação da dureza na amostra no decorrer da varredura.

Tabela 4.3. Microdureza.

	<b>MPa</b>
<b>Sequência 1 (HV)</b>	220,01 ± 34,51
<b>Sequência 2 (HV)</b>	229,91 ± 24,55

Fonte: Autor, (2020).

## 5. CONCLUSÃO

A análise de falha da peça em estudo foi realizada com êxito através de caracterizações visuais, química e mecânica, onde após o corte foi possível observar indícios de que a peça foi produzida através do processo de soldagem por fusão acompanhada de chanfro.

O resultado da composição química da amostra obtida por FRX, revelou grande aproximação da composição característica do aço 316L. A microestrutura observada por microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) exibiram alta semelhança com a microestrutura de uma liga de aço inoxidável austenítico, com a presença de trincas na região de solda. A análise da superfície de fratura mostrou a coexistência de mecanismos de fraturas frágil e dúctil.

De acordo com os resultados obtidos e diante da presença de trincas intergranular e transgranular na região de solda associados a falta de penetração, supõe-se alguns fatores que podem ter contribuído de forma isolada ou em conjunto para o surgimento das trincas.

Recomenda-se que durante a soldagem de aços inoxidáveis o aporte térmico seja baixo e a velocidade elevada, parâmetros inferiores ao mínimo podem ter provocado a baixa penetração encontrada e justifica os poros vermiformes, bem como o chanfro responsável pela falta de penetração na raiz, além de agir como concentrador de tensões. O processo de soldagem gmae-cw seria um processo recomendado para diminuir o aporte térmico.

O ensaio de microdureza Vickers (HV) realizado, apresentou variações de dureza ao longo da amostra, com menores valores de dureza em regiões distantes a solda e os maiores valores em regiões mais próximas a solda, que reforça o pressuposto processo de fabricação citado e evidencia ações térmicas nessa região.

Não houve sinais de fadiga, nem indícios de falha provocada devido a esforços mecânicos ou vibrações. Também não foram encontrados sinais de sensitização, ressaltando as condições adequadas do material para a execução dos serviços os quais foi submetido, sendo a falha justificada por uma possível má execução do processo acompanhada de condições inadequadas.

## 5.1 Trabalhos futuros

Para a continuação desse trabalho futuramente sugere-se:

- Obtenção de uma análise química do material de adição.
- Verificar a dureza em regiões do eixo.
- Realizar uma nova soldagem na região com os mesmos materiais utilizando outros parâmetros, seguida de uma nova caracterização.
- Verificar a possibilidade de substituição do material da flange em estudo por materiais de comportamento semelhante.
- Utilizar o processo gmae-cw como processo de soldagem.

## REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, E. **Estudo da implementação de conceito da produção enxuta para redução de resíduos em uma manufatura do ramo siderúrgico**. 2012. 66 f. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. In West Conshohocken, p. 19428-2959, United States, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. 6. Ed. Ohio: ASM international, 1994. 289p.
- ANDREUCCI, R. S. **Líquidos Penetrantes**. 2ed. São Paulo. Abende, 2003. 53p.
- BARBEDO, N. D. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM a-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.
- BARKOKÉBAS B. J.; VASCONCELOS, B. M.; MONEIRO, M. M.; MACEDO, D. R. M.; RAMOS, A. S. C. Ensaio não destrutivo por líquido penetrante como ferramenta de auxílio à manutenção preditiva de equipamentos de elevação da construção civil. **Rev. Bras. Sold.** Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p. 150 – 172, out. 2010.
- BARRA, S. R. Significância das descontinuidades nas áreas de soldagem. **Rev. Sid. Bras.** São Paulo, v. 14, n. 94, p. 50-53, jul, 2013.
- BENEDETTE, C. E. P.; MONÇÃO NETO, M. R. Controle de qualidade em juntas soldadas: Um estudo de caso em fabricante de equipamentos criogênicos. IN: SIMPOSIO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 11., 2013, Viçosa. **Conferências**, Minas Gerais: 2013, p. 01 – 12.
- BENVENHÚ, M. S. **Avaliação dos processos de alívio das tensões resultantes da soldagem de materiais, pelo processo MAG**. 2016. 82 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.
- BERTOL, H. C. **Determinação de critérios para aceitação de medições de dureza realizadas com durômetros portáteis em regiões de solda**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) – Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- BORBA, T. M. D.; MODENESI, P. J. Influência do ciclo térmico de soldagem no crescimento de grão, nas transformações microestruturais e na formação de MA na GGZAC de aço TMCP. **Soldag. Insp.** São Paulo, v. 29, n. 5, p. 98-114, Jan, 2019.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução** 9 ed. Rio de Janeiro: LTC editora 2016.

CARVALHO, A. M. S.; FILHO, M. M. M.; MARTINS, D. A. Análise de falha em eixo de motor usado em processamento de cosméticos. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS, 2014, Cuiabá. **Conferencias**, Mato Grosso. 2014, p. 6502-6510.

CASTRO, L. A. S. **Processamento de mostras para microscopia eletrônica de varredura**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2001. 37p.

CASTRO, M. M. **Deteção de defeitos em solda através da Inspeção visual**. 2015. 16f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Mecânica) – Universidade Uninorte, Campos do Jordão, 2015.

CASTRO, R. M. **Efeito do Aporte Térmico na Soldagem de Reparos Embutidos em Minerodutos**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.  
COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 2008.

GARCIA, A. **Ensaio de materiais**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Abril, 2000. 435p.

GUEDES, R. P. **Influencia da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido**. 2009. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Universidade federal do Pernambuco, Recife, 2009.

GOMES, D. P. **Estudo de um Procedimento de Soldagem para liga de Alumínio**. 2017. 69 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

HUGO, G. A. S.; NETO, E. A. R.; ESTEVES, P. D. B.; PAZ, J. V. T. R.; NETO, L. D. C.; DOMINGOS, M. S.; IWAMOTO, M. A. H; SILVA, M. H. P. Caracterização de fraturas frágil e dúctil em microscopia eletrônica de varredura (MEV). **Rev. Mil. Cien. Tec.** Rio de Janeiro, v. 34, n. 3, p. 5-7, mar. 2017.

IMIANOWSKY, G. W.; WALENDOWSKY, M. A. Os principais aços carbono utilizados na construção civil. **Rev. Elet. Cien.**, São Paulo, v. 21, n. 24, p. 118-143, mar. 2008.

LOBATO, J.C.S. **Caracterização Estrutural e de Propriedades Mecânicas da Solda Depositada pelo Processo GMAW- Arame Frio em Chapas de Aço**. 2010. 100f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

LOUREIRO, J. P. **Caracterização do aço inoxidável duplex UNS S31803 pela técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas**. 2010. 101 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUCENA, A. L. A. **Tecnologia para a indústria do Gás Natural e Energias Renováveis**.

2015. 84f. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MALISKA, A. M. Estudo de soldagem na dimensão dos catetos da solda. **Rev. Bras. Sold.** Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p. 128 – 136. jun. 2016.

MICHELS, M. A.; SIEWERDT, D. S.; LAFRATTA, F. H.; BOND, D. Análise da influência do fluxo de soldagem na porosidade da solda obtida por arco submerso IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS, 2014, Cuiabá. **Conferencias**, Mato Grosso. 2014, p. 5312-5319.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia**. 4. Ed. Belo Horizonte: Abril, 2012. 209p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem, Fundamentos e tecnologia**. 2. Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos processos de soldagem**. 1. Ed. Belo Horizonte: Abril, 2000. 152p.

MODENESI, P. J. **Terminologia Usual e símbolos de Soldagem**. 1. Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2008. 100p.

MODENESI, P. J. **Fluxo de Calor em Soldagem**. 4. Ed. Belo Horizonte: Abril, 2003. 301p.

MOREIRA, H. S. **Estudo da influencia dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas em um eixo traseiro veicular**. 2008. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia metalúrgica e de materiais) – Escola politécnica de São Paulo, São Paulo, 2008.

MOUSINHO, T.C.M.; GARCEZ, T.S.; REIS SOBRINHO, J.F.; ALCANTARA, N.G. análise do ciclo térmico de um aço de alta resistência baixa liga utilizando método direto e equações de soldagem. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. 11. 2016, Natal. **Conferencias**, Rio Grande do Norte: 2016, p. 6256-6267.

NOVAIS, P. R. F. Avaliação das Principais Descontinuidades Encontradas nas Juntas Soldadas, Causas e Possíveis Soluções. IN: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA. 8., 2010, Viçosa. **Conferências**, São Paulo. 2010, p. 01 – 17.

OLIVEIRA, W. S. **Análise de resistência de solda**. 2014. 51 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia mecânica) – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2014.

PEREIRA, P. A. S. **Efeito da energia de soldagem na microestrutura de um aço inoxidável duplex e super duplex**. 2009. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009.

POVOA, P. V. N. **Aço inoxidável como material para equipamentos da indústria de alimentos**. 2017. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

REIS SOBRINHO, J. F.; ALCÂNTARA, N. G. Influência dos parâmetros de soldagem na microestrutura da zona afetada termicamente de uma junta soldada de aço de alta resistência IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS. 9., 2000, São Pedro. **Conferências**, São Paulo: 2000, p. 41501-41513.

RIBEIRO, P. P. G. **Influência dos parâmetros de soldagem gmaw e gmaw-cw sobre a diluição e relação reforço/largura em revestimentos**. 2012. 129f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

RIOS, M. C. G.; FARIA, G. A.; FARIA, G. L. Estudo da influência de parâmetros de medição sobre a representatividade e dispersão dos resultados do ensaio de microdureza vickers. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS. 22., 2016, Natal. **Conferências**, Rio Grande do Norte: 2016, p. 6034-6043.

ROCHA, G. B. T.; PEREIRA, L. M.; FARIAS, L. D. P.; GANDUR, N. L.; FLORES, P. M.; OLIVEIRA, R. M.; DASILVA, M. H. P. Análise fractográfica em MEV – fratura dúctil x fratura frágil. **Rev. Mil. Cien. Tec.** Rio de Janeiro, v. 33, n. 2, p. 85-87, mar. 2016.

RODRIGUES, L. M.; DOS SANTOS, C. H. R.; VELOSO, R. R.; LEMOS, M. V.; SANTOS, C. D.; CABRAL, R. F. Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. **Cad. UNI.**, Rio de Janeiro, v. 51, n. 1, p. 39-44 mar, 2015.

ROMEIRO, S.B.B.; **Química na Siderurgia**. 1997. 300f. Tese (Doutorado em Educação Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ROSA, W. F. M. **Comparação de características de soldagem entre fonte inversora e transformadora**. 2014. 32 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia mecânica) – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2014.

SABARÁ, E. W. F. **Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos utilizados em aplicações como Biomateriais**. 2013. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2013.

SALES, V. **Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SANTOS, E.S.; GAMA, E. M.; FRANÇA, R. S.; SOUZA, A. S.; MATOS, R. P. Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas. **Rev. Enc. Bios.** v. 9, n.17; p. 3413-3432. 2013.

SANTOS, T. F. A.; ANDRADE, M. S.; CASTRO, A. L. F. Efeito da taxa de aquecimento na reversão da martensita induzida por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304. **Rev. Esc. Minas.** Ouro Preto, v. 1, n. 62, p. 53-58, mar. 2009.

SAVI, W. L.; COSTA, R. C.; JUNIOR, M. W.; ZAGO, M. R.; MARQUES, F. M.; ROCHA, A. S. Estudo dos parâmetros de soldagem GMAW-MAG em aço **dissimilar**. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS. 9., 2018, Foz do Iguaçu. **Conferências**, Paraná: 2018, p. 4743-4754.

SILVA, E. M.; KITSUDA, E. F.; SANTOS, R. S.; COSTA, A. F. Trincas: Causas e métodos de prevenção em aços estruturais soldados. **Rev. Esc. Minas**. Ouro Preto, v. 1, n. 63, p. 142-173, mar. 2010.

SILVA, C. S. **Formação e reversão da martensita induzida por deformação nos aços inoxidáveis austeníticos 304L e 201LN**. 2017. 190 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, H. C.; GONÇALVES, R. S. Estudo da influência da velocidade de soldagem na dimensão dos catetos da solda. **Rev. Bras. Sold**. Rio de Janeiro, v. 36, n. 4, p. 150 – 170, jun. 2013.

SILVA, J. M. V. L. S. Adaptação de um sistema automatizado para medição de microdureza. 2006. 101f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVEIRA, B.; LOPES, F.; GONÇALVES, M.; SOUZA, M. L.; LOPES, M.; FONSECA, V. Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa IN: SIMPOSIO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECANICA. 11., 2017, Arcos. **Conferências**, Minas Gerais: 2017, p. 05 – 55.

SOARES, J. P.; TERRONES, L. A. H.; PARANHOS, R. Efeito dos Tratamentos Térmicos de Normalização e de Solubilização na Microestrutura de uma Junta Dissimilar Soldada entre um Tubo de Aço API 5L X-52 e o Inconel 625. **Sold. e Insp**. Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, p. 357-373, nov. 2017.

SOMMACAL, L. G. **Análise dos processos de soldagem GMAW, laser e fricção aplicados no reaproveitamento de tubos mecânicos para fabricação de cilindros hidráulicos**. 2015. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

SOUZA, G. C. **Análise da temperatura durante a soldagem circunferencial de tubos de aço utilizando modelos bidimensionais e tridimensionais de elementos finitos**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2016.

SOUZA, A. C. S.; VIANA, M. M.; FLORIAS, M. L. S. Efeito da polaridade na penetração em soldagem de aço com eletrodo revestido. **Rev. Bras. Sold**. Rio de Janeiro, v. 51, n. 1, p. 150 – 172, jan. 2015.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 3. Ed. Barcelona: Edgard Blucher, 1974. 289p.

VENDRAMIM, L.F.; **Análise de tensões residuais de juntas soldadas em Engrenagens de**

**moenda de cana em aço baixa liga.** 2015. 207f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

VIEIRA, F. B. E. **Análise microestrutural e de resistência à corrosão de aço inoxidável ferrítico AISI 430.** 2016. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

VILCHEZ, C. A. Z. **Influência de ciclos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas da junta soldada do aço civil 300.** 2005. 113F. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ZOTTO, A. D. **Influência do metal de adição no processo de soldagem dos aços inox astm a240 e patinável sac 350 aplicado ao segmento ferroviário.** 2016. 71F. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.