



**IGLAN FONSECA DE PAULO**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLDA POR  
DIFERENTES TÉCNICAS DE PRODUÇÃO**

**LAVRAS-MG  
2021**

**IGLAN FONSECA DE PAULO**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLDA POR DIFERENTES TÉCNICAS DE  
PRODUÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Osmar de Sousa Santos  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2021**

**IGLAN FONSECA DE PAULO**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLDA POR DIFERENTES TÉCNICAS DE  
PRODUÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 16 de novembro de 2021.

---

Prof. Dr Leonardo Pratavieira Deo

---

Prof. Dr José Benedito Guimarães Júnior

---

Prof. Dr Osmar de Sousa Santos  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2021**

## RESUMO

Nas últimas décadas, é de grande preocupação da indústria a busca por maneiras de produzirem seus produtos de forma a oferecer um melhor custo-benefício, a fim de se manterem competitivas no mercado mundial. Os processos de soldagem, quando utilizados, representam boa parte dos custos de fabricação de um produto e o controle de qualidade das juntas soldadas exerce influência no desempenho do produto acabado. Uma falha não detectada no processo de controle de qualidade de uma solda, pode gerar sérias consequências ao fabricante, usuários do equipamento e aos consumidores. Deste modo, foram feitos estudos envolvendo técnicas de soldagem em um aço F10 pelos processos a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) e a soldagem a arco elétrico com arames tubulares (FCAW); e em chapas de aço inoxidável 304 pelos processos conhecidos como arco elétrico com gás de proteção inerte (MIG) e a soldagem por gás inerte de tungstênio (TIG). Foram retiradas amostras de cada procedimento de forma a serem analisadas à lupa e em microscópio. Além disso, foram feitos ensaios de dureza Vickers por microindetação de forma a analisar o perfil de dureza na zona de material de base, zona termicamente afetada e zona fundida. Os processos SMAW, FCAW, MIG não apresentaram comportamentos satisfatórios macroscopicamente devido a defeitos grosseiros em que foi possível perceber falta de penetração, falta de fusão e trincas, como os mais graves. Já em relação aos aspectos microestruturais e de durezas, apresentaram grandes heterogeneidades causadas pelos altos ciclos térmicos durante o processo de soldagem. A junta produzida por soldagem TIG apresentou os melhores aspectos macroscópicos sem nenhum defeito grosseiro visível à lupa, também apresentou uma maior homogeneidade microestrutural e de dureza nas regiões estudadas.

**Palavras-chaves:** Soldagem. Defeitos. Qualidade.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das zonas e regiões do material soldado.....	4
Figura 2 - Esquema do processo SMAW. ....	5
Figura 3 - Esquema do processo MIG. ....	6
Figura 4 - Esquema do processo FCAW. ....	8
Figura 5 - Esquema do processo TIG. ....	10
Figura 6 - Material de base utilizado no projeto. (a) F10. (b) aço inoxidável 304.....	12
Figura 7 - Amostras dos processos de soldagem. a) SMAW; b) MIG; c) FCAW; d) TIG. ....	16
Figura 8 - Macrografias do processo SMAW.....	17
Figura 9 - Micrografias do processo SMAW. a) visão geral; b) metal de base (MB); c) zona termicamente afetada (ZTA); d) metal de adição (MA).....	19
Figura 10 - Regiões da zona termicamente afetada. ....	21
Figura 11 - Perfil de dureza do processo SMAW.....	22
Figura 12 - Macrografias do processo MIG. ....	23
Figura 13 - Micrografias do processo MIG. a) visão geral; b) metal de base (MB); c) zona termicamente afetada (ZTA); d) metal de adição (MA).....	25
Figura 14 - Visão geral da zona termicamente afetada. ....	26
Figura 15 - Perfil de dureza do processo MIG .....	27
Figura 16 - Macrografias do processo FCAW. ....	29
Figura 17 - Micrografias do processo FCAW. A) metal de base (MB); b) zona termicamente afetada (ZTA); c) metal de adição (MA).....	30
Figura 18 - Perfil de dureza do processo FCAW. ....	32
Figura 19 - Macrografias do processo TIG. ....	33
Figura 20 - Micrografias do processo TIG. a) visão geral; b) metal de base (MB); c) zona termicamente afetada (ZTA); d) metal de adição (MA).....	35
Figura 21 - Perfil de dureza do processo TIG. ....	37

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e limitações do processo SMAW. ....	6
Quadro 2 - Vantagens e limitações do processo MIG. ....	7
Quadro 3 - Vantagens e limitações do processo FCAW. ....	9
Quadro 4 - Vantagens e limitações do processo GTAW. ....	11

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química teórica do aço F10 e do aço inoxidável 304. ....	12
Tabela 2 - Composição química teórica do eletrodo EN 1600 com alma metálica 316L. ....	13
Tabela 3 - Composição química teórica do eletrodo ER70S-6. ....	14
Tabela 4 - Composição química teórica do eletrodo AWS A5.18/A5.18M: E70C-6MH4.....	14
Tabela 5 - Composição química teórica do material de adição ER316L-SI. ....	15

## **LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS**

FCAW	Soldagem por Arame Tubular
MAG	Soldagem por Gás Ativo
MIG	Soldagem por Gás Inerte
TIG	Soldagem por Eletrodo de Tungstênio
SMAW	Soldagem por Eletrodo Revestido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS E METAS .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>4.1</b>	<b>SOLDAGEM.....</b>	<b>3</b>
<b>4.2</b>	<b>SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO (SMAW).....</b>	<b>4</b>
<b>4.3</b>	<b>SOLDAGEM POR GÁS INERTE (MIG) .....</b>	<b>6</b>
<b>4.4</b>	<b>SOLDAGEM POR ARAME TUBULAR (FCAW).....</b>	<b>7</b>
<b>4.5</b>	<b>SOLDAGEM POR ELETRODO DE TUNGSTÊNIO (TIG).....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
<b>5.1</b>	<b>COLETA E PREPARAÇÃO DO MATERIAL .....</b>	<b>11</b>
<b>5.2</b>	<b>PRODUÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS.....</b>	<b>13</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Junta SMAW .....</b>	<b>13</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Junta MIG .....</b>	<b>13</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Junta FCAW.....</b>	<b>14</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Junta TIG.....</b>	<b>14</b>
<b>5.3</b>	<b>PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E CARACTERIZAÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>6.1</b>	<b>SMAW.....</b>	<b>17</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Análise macrográfica .....</b>	<b>17</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Análise micrográfica .....</b>	<b>18</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Perfil de dureza .....</b>	<b>21</b>
<b>6.2</b>	<b>MIG .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Análise macrográfica .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Análise micrográfica .....</b>	<b>24</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Perfil de dureza .....</b>	<b>27</b>
<b>6.3</b>	<b>FCAW .....</b>	<b>28</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Análise macrográfica .....</b>	<b>28</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Análise micrográfica .....</b>	<b>30</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Perfil de dureza .....</b>	<b>32</b>
<b>6.4</b>	<b>TIG .....</b>	<b>33</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Análise macrográfica .....</b>	<b>33</b>

<b>6.4.2</b>	<b>Análise micrográfica .....</b>	<b>34</b>
<b>6.4.3</b>	<b>Perfil de dureza .....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é considerada o meio mais importante de união entre peças metálicas, sendo utilizada desde os tempos remotos, como demonstram artefatos metálicos produzidos na Pérsia, datados de 4000 a.C, e que hoje encontram-se expostos no museu do Louvre em Paris. A produção de artigos por soldagem de forjamento continuou durante a idade média para a confecção de espadas e utensílios cortantes (MARQUES; MODENESI, 2005).

Essa importância começou a diminuir nos séculos XII e XIII com o desenvolvimento da fundição, enquanto a soldagem por forjamento era substituída por outros processos de união utilizando rebites e parafusos. A soldagem continuou como um processo secundário até o início do século XIX, quando a sua tecnologia começou a mudar radicalmente a partir das experiências de Sir Humphrey Davy com o arco elétrico, e posteriormente com o desenvolvimento do eletrodo revestido (SMAW) (BELTRAN, 2018).

Logo surgiram novos processos de soldagem a arco que superavam em versatilidade e capacidade de produção. O processo utilizando eletrodo de tungstênio (TIG) mostrou-se adequado para a soldagem de peças de alumínio em aviões americanos durante a Segunda Guerra Mundial, enquanto o processo utilizando gases de fonte externa (MIG/MAG) passou a ser um processo amplamente empregado na indústria do pós-guerra especialmente para a soldagem de aços. Por consequência surgiu o processo de soldagem por arame tubular (FCAW), que juntava características do processo SMAW e MIG/MAG.

A indústria do século XXI busca maximizar a produção em contraponto a um menor custo possível, que em conjunto da eficiência energética compõe os grandes desafios da indústria moderna. A necessidade de elevar a produtividade fez com que processos de fabricação mecânica fossem profundamente investigados, e nesse contexto, processos de soldagem que utilizam gases de fonte externa ganharam força nas últimas décadas, uma vez que, são capazes de fornecer elevadas densidades de corrente, controle termoquímico da atmosfera e controle de descontinuidades (MOREIRA FILHO, 2008).

Nesta década os principais mercados ligados à indústria da soldagem são: petrolífero, petroquímico, metalúrgico, indústria naval e construção civil, muitos deles ainda aplicados de forma manual. Quando o processo de soldagem a arco elétrico não é realizado da forma correta, inúmeros prejuízos são gerados que impactam indústria, colaborador e sociedade de forma direta (SILVA et al., 2010; TAHAEI et al., 2016; GONÇALVES et al., 2017).

Neste sentido na literatura encontram-se índices que tentam definir a estabilidade de um processo. Mas sua definição é uma função do objeto investigado, como por exemplo estabilidade do arco, tensão, gás de proteção, tipo de material, composição química, pré e pós aquecimento do material de base, formas de transferência metálica, formação da poça de fusão, rendimento de deposição etc., ou seja, estas características possibilitam inúmeras combinações de parâmetros (AMARAL et al., 2018).

Assim torna-se evidente a importância de se estabelecer critérios que levem em consideração desde o tipo de processamento empregado para a realização da soldagem, às características intrínsecas de cada processo, aço utilizado e seu respectivo metal de adição.

## **2 QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

A busca pela melhoria de desempenho e redução de custos nos processos produtivos aplicados ao setor industrial tem sido foco de pesquisa e desenvolvimento ao longo de toda a história da manufatura, e certamente continuará sendo um dos combustíveis a impulsionar o trabalho de pesquisadores em uma corrida sem fim.

Para os processos de soldagem, a necessidade de aumento de produtividade e redução de custos tem-se mostrado mais latente em comparação com os outros processos de fabricação, especialmente para a indústria brasileira, seja ela em caldeiraria pesada, como o setor de petróleo e gás, construção naval e civil, que em sua maioria tem base em operações manuais totalmente dependente dos soldadores.

Os processos aplicados costumam ser ultrapassados tecnologicamente e é evidente o enorme potencial de aumento de produtividade e redução de custos que seria obtido caso fossem adotadas medidas de inspeção de qualidade.

O controle operacional é de grande importância para identificação de discontinuidades nos processos de soldagem, pode-se destacar: trincas, porosidades, falta de fusão, penetração e inclusão de escória. Na maioria das vezes a união desses materiais tem de ser refeitas promovendo maiores gastos, desperdício de recursos e mão de obra.

O grande desafio da indústria de soldagem é otimizar as variáveis de operação como: ângulo da tocha, velocidade de soldagem, voltagem e corrente da operação para que assim o processo seja dinâmico e conseqüentemente reduza os riscos de falhas durante a trabalhabilidade do material.

### **3 OBJETIVOS E METAS**

Este trabalho teve como objetivo geral realizar um estudo sistemático da soldagem MIG e TIG em aço inoxidável 304, e soldagem SMAW e FCAW em chapas de aço F10 a fim de avaliar as suas propriedades macro e microestruturais além de demonstrar qual técnica é a mais adequada para cada tipo de aço.

Já as metas a serem atingidas ao final deste trabalho são:

- a) Evidenciar a existência de defeitos macro e microestruturais nas juntas produzidas pelas diferentes técnicas;
- b) Avaliar a compatibilidade entre perfil de dureza com a microestrutura da zona fundida, zona termicamente afetada e material de base, para cada rota de produção;
- c) Avaliar se a junta seria aprovada em um teste de qualidade.

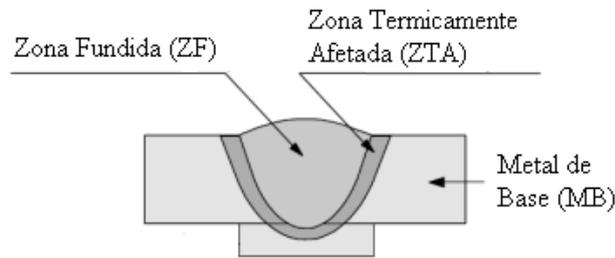
### **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **4.1 Soldagem**

Segundo a American Welding Society - AWS (2004) a definição de soldagem é: “Processo de união de materiais usados para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição”. É importante salientar que não é apenas os metais que possuem a capacidade de serem soldados e que também é possível realizar um processo de solda sem a fusão do material.

Os processos de soldagem envolvendo o calor, resultam em variações de gradiente térmico ao longo da zona afetada, que implicará em heterogeneidades microestruturais e mecânicas. As variações podem ser caracterizadas dentro de diferentes zonas e regiões, conforme a Figura 1 (KCHAOU et al., 2016).

Figura 1 - Representação das zonas e regiões do material soldado.



Fonte: Júnior (2016).

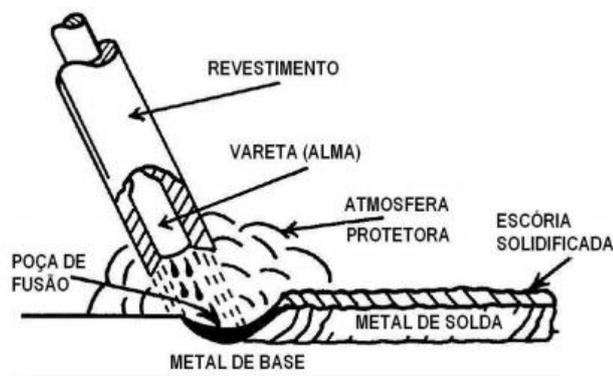
- a) Zona Fundida (ZF): região onde o material a ser soldado e o de adição, este último se houver, fundem-se e posteriormente solidificam-se durante o processo de soldagem. As temperaturas de pico nesta região são superiores à temperatura de fusão dos materiais;
- b) Zona Termicamente Afetada (ZTA): região da solda que não se funde durante a soldagem, porém fica submetida a uma temperatura de pico superior à temperatura crítica do material, resultando em alterações microestruturais e nas propriedades mecânicas, além de transformação de fase, tais alterações são introduzidas pelo calor durante a soldagem;
- c) Metal de Base (MB): região mais afastada do cordão de solda e que não é afetada pelo processo de soldagem. A temperatura de pico é inferior à temperatura crítica para o material.

#### 4.2 Soldagem por eletrodo revestido (SMAW)

A soldagem com eletrodo revestido ou (Shielded Metal Arc Welding - SMAW) é um processo caracterizado por estabelecer um arco elétrico entre a peça a ser soldada e um eletrodo revestido. Este último é formado por uma vareta metálica, em seu interior, que comumente é denominada de alma, que tem por objetivo conduzir a corrente elétrica e fornece o metal de adição para junta a ser soldada. A alma é recoberta por uma misturas de diferentes materiais, que relacionam-se ao aprimoramento da composição química do cordão de solda e proteção gasosa da zona fundida agregando características mecânicas e metalúrgicas pré definidas à junta soldada (CRUZ, 2015).

O calor gerado pelo arco elétrico promoverá a fusão do metal de base, do revestimento e da alma do eletrodo, formando a poça de fusão que permitirá a união entre as peças metálicas, Figura 2 (FORTES, 2004).

Figura 2 - Esquema do processo SMAW.



Fonte: Fortes (2004).

A maneira mais comum de iniciar o arco é através de um curto-circuito, e quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento (JÚNIOR, 2017), que além dessa tem outras funções como:

- a) Manter o arco estável;
- b) Adicionar elementos de liga;
- c) Promover a produção de escória líquida de densidade menor que a do metal fundido, protegendo a poça fundida. Ao término da operação de soldagem a escória se solidifica sendo necessário a remoção da mesma.

Segundo Wainer et al. (2008) os principais tipos de revestimentos empregados nos eletrodos são: ácidos, rútilicos, básicos e celulósicos. Dentre esses o que mais se destaca na produção de juntas de aço é o rútilico que contém quantidade superior a 20% de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ). A escória é abundante, densa e facilmente destacável. São capazes de conferir alta estabilidade ao arco, com tensões comparativamente baixas, pequena quantidade de respingos e bom aspecto superficial do cordão, além de possuir altas taxas de deposição.

Neste processo de soldagem a capacitação do operador influenciará diretamente na qualidade final do produto garantindo ou não um cordão de solda livre de discontinuidades.

Na Quadro 1 são apresentadas as principais vantagens e limitações do processo SMAW.

Quadro 1 - Vantagens e limitações do processo SMAW.

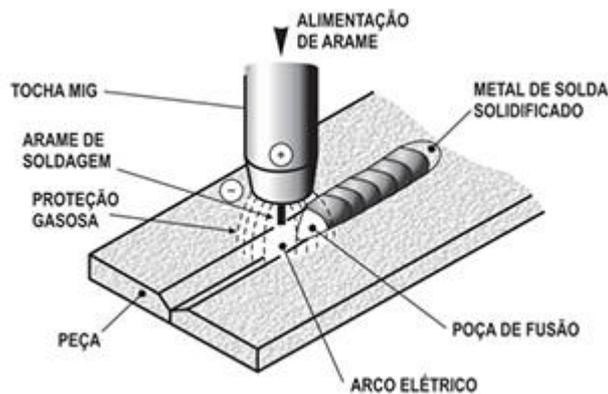
Vantagens	Limitações
Equipamento simples e barato	Baixa produtividade (menor que 1,2 kg/h)
Versatilidade em termos de posições de soldagem e espessuras de material	Grande volume de gases e fuligem gerados no processo
Grande variedade de eletrodos	Processo manual
Portabilidade do equipamento	Exige limpeza após cada passe de soldagem

Fonte: CARRASCO et al., (2017); SAXENA et al., (2018); SHIN; YOU, (2020).

### 4.3 Soldagem por gás inerte (MIG)

Segundo a AWS (2004), a soldagem por gás (Gás Metal Arc Welding - GMAW) consiste em um processo que utiliza um arco elétrico estabelecido entre o material de base e um eletrodo nu e consumível, sendo este alimentado de forma contínua e protegido por uma atmosfera gasosa. O gás fornecido por uma fonte externa, é responsável por criar o ambiente em que se forma o arco e por proteger a poça de fusão e as gotas metálicas em transferência da oxidação, Figura 3. Dentro dessa categoria de soldagem existem dois grupos principais, o primeiro utilizando um gás ativo - (MAG), e o segundo utilizando um gás inerte - (MIG).

Figura 3 - Esquema do processo MIG.



Fonte: ESAB, (2011).

A soldagem envolvendo gás inerte (MIG) utiliza como gás o argônio que pode ser misturado ao gás hélio. Esses gases não reagem com metal de adição e de base, atuando apenas como um protetor gasoso, e auxiliando na manutenção do arco elétrico. O hélio possui uma energia de ionização mais alta, o que resulta em uma maior voltagem do arco e uma maior entrega térmica, que pode ser definida como a maior capacidade de transferir calor ao sistema a ser soldado. Já o argônio proporciona uma maior estabilidade do arco em baixas correntes e permite uma ignição mais fácil, porém a baixa condutividade térmica deste último provoca desvantagens, como: menor penetração e aparecimento de mordeduras que ocorrem quando o chanfro do metal de base funde-se próximo à sua extremidade, e não é preenchido pelo metal de solda (TÁRCIO et al., 2018).

A formação inicial do arco se dá através de um contato/curto-circuito entre o eletrodo e a peça. O curto-circuito promove a passagem de uma elevada corrente, causando a fusão da ponta do eletrodo e da região de contato com a peça (O'BRIEN, 2004).

No Quadro 2 são apresentadas as principais vantagens e limitações do processo MIG.

Quadro 2 - Vantagens e limitações do processo MIG.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Semi-automático	Alta velocidade de resfriamento
Elevada densidade de corrente que chega até (300A/mm <sup>2</sup> ), originando alta deposição	Investimento maior se comparado ao SMAW
Aplicação em diferentes ligas	Pouca ou ausência de escória
Alta produtividade (1,2 a 1,5 kg/h)	

Fonte: YANG, (2015); FILHO; GONZALEZ, (2017); TAMASGAVABARI, (2018).

#### **4.4 Soldagem por arame tubular (FCAW)**

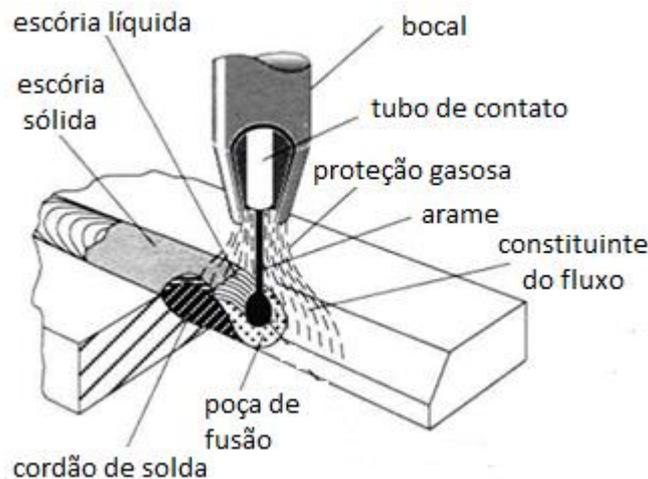
O processo de soldagem utilizando arame tubular, também conhecido pela sigla FCAW (Flux Cored Arc Welding), consiste na utilização de arame consumível contínuo de geometria tubular e que acomoda em seu interior um fluxo compactado.

Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar

elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação (FORTES, 2004).

O modo de iniciar o arco é através de curto-circuito e a medida em que o eletrodo é consumido, este é alimentado de forma automática por uma bobina, Figura 4 (AWS,2004; SOUZA; FERRARESI, 2017).

Figura 4 - Esquema do processo FCAW.



Fonte: Infosolda, (2013).

O processo FCAW pode ser dividido em dois subgrupos, o primeiro é com proteção gasosa adicional, em que pode ser utilizado um gás ativo, dióxido de carbono, ou um gás inerte, argônio. Já no segundo grupo o eletrodo é auto protegido sem a necessidade de gás externo.

Uma vez que o espaço disponível para acomodar o fluxo é limitado, a opção por arames auto protegidos ou não auto protegidos está intimamente relacionada às propriedades metalúrgicas e mecânicas desejadas nos depósitos.

A soldagem com arame tubular é similar em relação ao processo GMAW no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Esta aproximação lhe sugere o alto fator de trabalho e alta taxa de deposição, característicos da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem FCAW é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos (SMAW) promovendo ajuste na composição química da zona fundida (GOMES, 2006).

No Quadro 3 são apresentadas as principais vantagens e limitações do processo FCAW.

Quadro 3 - Vantagens e limitações do processo FCAW.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Facilmente mecanizado	O equipamento é mais caro se comparado ao utilizado para soldagem pelo processo eletrodo revestido
Alta velocidade de soldagem e elevada taxa de deposição (1,2 a 1,5 kg/h)	Necessidade de retirada de escória entre passes
Benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame	São gerados mais fumos do que os processos GMAW
Produz soldas uniformes e de bom acabamento superficial	O arame tubular é mais caro na base de peso do que o arame de eletrodo sólido

Fonte: STARLING et al., (2009); KARATHAPANDI; MURUGAN, (2017); SILVA et al., (2017).

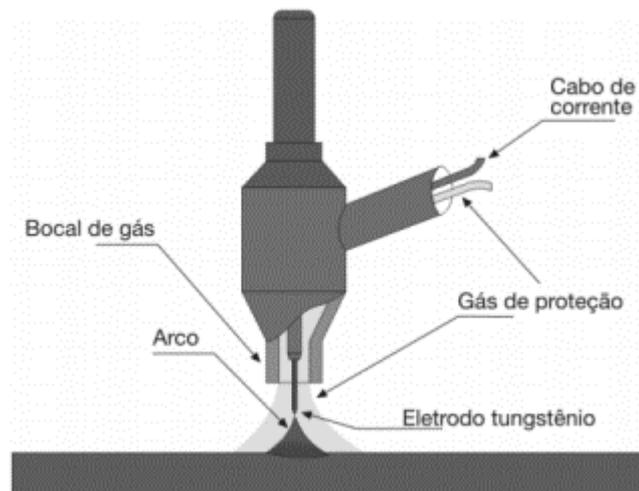
#### **4.5 Soldagem por eletrodo de tungstênio (TIG)**

Segundo Marques (2005), A soldagem por eletrodo de Tungstênio (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) ou TIG (Tungsten Inert Gas) é um processo em que utiliza um arco elétrico formado por um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir, que aquece e sofre um processo de fusão.

A proteção do arco elétrico e da poça de fusão se dá através de um gás inerte, que tem como função a proteção contra a oxidação, tanto do eletrodo de tungstênio como do metal fundido. Podendo ser realizada de forma autógena, sem material de adição, ou este sendo adicionado diretamente na poça de fusão, Figura 5 (MARQUES; MODENESI, 2005; ZOY, et al., 2015).

A necessidade de se adicionar um metal de adição depende de fatores como a forma e o tamanho da junção, finalidade da solda, necessidade de material de enchimento para recompor áreas com desgaste excessivo.

Figura 5 - Esquema do processo TIG.



Fonte: Cunha (2008).

O arco elétrico pode ser iniciado de 3 maneiras:

- a) Scratch start (curto-circuito): Consiste em estabelecer contato físico entre o eletrodo de tungstênio e a junta, arrastar ligeiramente e levantar a tocha para iniciar o arco. A probabilidade de fusão (união entre o eletrodo e a junta) e de contaminação do cordão são mais altos neste método.
- b) Lift arc start: Neste método o eletrodo toca no metal da junta e o arco inicia-se assim que este é levantado. Tal como no scratch start existe contato físico entre o eletrodo e a junta.
- c) HF starte (por pulso de tensão, sem contato): Neste modo a fonte gera um pulso de tensão de 12 kV entre o eletrodo e a junta. Evita a contaminação do cordão com tungstênio. É o método preferível para iniciar o arco, sobretudo quando a contaminação com tungstênio é intolerável.

A profundidade de penetração do processo TIG é considerada inferior quando comparado a outros processos, isso se dá pela falta da capacidade de penetração da soldagem TIG e devido ao fato de que esse processo é livre de escórias e de qualquer outra inclusão (SINGH et al., 2017).

Uma das principais características do processo é o controle da energia transferida para a peça enquanto ocorre a soldagem, esse controle decorre independentemente da forma que o operador tem da fonte de calor e do metal de adição, os quais agem diretamente no processo,

tornando-o adequado para soldas em peças de pequenas espessuras (0,5 - 5 mm). Um bom controle dessa variável gera pouca escória, o que facilita a visão do soldador durante o processo que ajuda a impedir a geração de fuligem. Outro ponto positivo é o arco elétrico estável, concentrado e suave, facilitando para a produção de soldas com boa qualidade e bom acabamento, além disso, o arco elétrico não gera salpicos, pois não há transferência de metal do eletrodo para o material de base (TEIXEIRA, 2011).

Hoje a solda TIG é sobretudo aplicada na indústria aeronáutica e aeroespacial, estruturas mecânicas de precisão, contentores/reatores e outros equipamentos para a indústria química.

As principais vantagens e limitações são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Vantagens e limitações do processo GTAW.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Excelente controle da poça de fusão	Baixa taxa de deposição (1 kg/h)
Aplicável à grande maioria dos metais	Baixa capacidade de penetração
Pode ser completamente automatizada	Requer alta experiência do operador
Cordão de alta qualidade e pouco respingo	Mais caro que os processos SMAW e GTAW

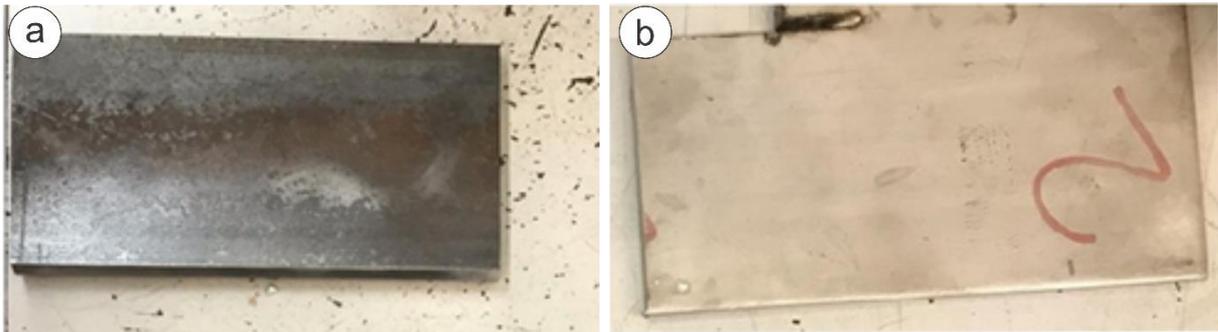
Fonte: BAJPAI, et al., (2015); RAMKUMAR, et al., (2015).

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Coleta e preparação do material**

Para a realização das juntas soldadas foram utilizadas placas de aço de médio carbono F10, Figura 6-a, e chapas de aço inoxidável 304, Figura 6-b.

Figura 6 - Material de base utilizado no projeto. (a) F10. (b) aço inoxidável 304.



Fonte: Do autor (2019).

As placas de aço F10 de tamanho 22 x 9,5 x 1,2 cm foram sujeitas aos processos de soldadura SMAW e FCAW, tal aço foi destinado a essas práticas devido a espessura considerável das placas. Enquanto as chapas de aço inoxidável 304 de tamanho 16 x 8,2 x 0,5 cm foram destinadas aos processos de soldagem MIG e TIG, destinadas para processos que exigiam menor capacidade de penetração. A composição química teórica dos dois materiais é descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química teórica do aço F10 e do aço inoxidável 304.

Aço	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cr(%)	Ni(%)
F10	0,42-0,50	0,50-0,80	0,40	0,035	0,035	-	-
304	0,07	2,00	1,00	0,045	0,030	17,50-19,50	8,00-10,50

Fonte: Ramada aços (2018).  
(%) referente a massa.

Antes de iniciar à realização dos processos de soldagem, as chapas e perfis fornecidos foram presos a um torno metálico e foram sujeitos a uma limpeza utilizando uma escova de aço elétrica pelo período total de 10 minutos para que fossem removidos os óxidos e impurezas presentes na superfície superior, inferior e lateral; a fim de diminuir a possibilidade de contaminação no processo de soldagem.

O material de adição e os eletrodos utilizados nas diferentes técnicas de soldagem também foram sujeitos a uma limpeza com álcool a 96% com posterior secagem utilizando papel toalha e em seguida levado para a estufa a 100° C durante 10 minutos para secagem

completa. A limpeza é necessária para a retirada de gordura e sujeiras que poderiam eventualmente influenciar no resultado final.

## **5.2 Produção das juntas soldadas**

### **5.2.1 Junta SMAW**

No processo SMAW foram utilizadas duas chapas de aço F10 com chanfro em X e com ângulo de soldagem em 45°, elas foram presas em um aporte metálico na posição planar. O arco foi iniciado por meio de um curto-circuito e como material de preenchimento foi utilizado um eletrodo com revestimento rutílico EN 1600 com uma alma metálica de aço inoxidável 316L, sua composição química teórica está descrita na Tabela 2. Foram feitos dois passes de solda para preenchimento do chanfro e a corrente de alimentação durante o processo foi de 95A com corrente contínua e polaridade inversa.

Após a união das chapas, foi necessário remover a escória com o auxílio de uma escova de aço.

Tabela 2 - Composição química teórica do eletrodo EN 1600 com alma metálica 316L.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
% massa	< 0,04	0,4	1,6	18,3	12,6	2,7

Fonte: Esab (2011).

### **5.2.2 Junta MIG**

Neste processo de soldagem foram fixadas no torno duas placas de aço inoxidável 304 com chanfro em V com 45° de abertura, na vertical a fim de que o processo de soldagem fosse descendente e assim pudesse averiguar o comportamento do cordão de solda nessa posição. A abertura do arco elétrico também foi feita por meio de um curto-circuito, e o modo de deposição foi por curto-circuito. O eletrodo utilizado foi o ER70S-6 de composição química teórica descrita na Tabela 3. Foram feitos dois passes de solda para preenchimento do chanfro e a voltagem elétrica durante todo o processo foi de 28,4V com corrente contínua e polaridade inversa. O argônio foi utilizado como gás de proteção.

Tabela 3 - Composição química teórica do eletrodo ER70S-6.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
% massa	0,09	0,95	1,65	0,35	0,012	0,018

Fonte: Weldiare (2020).

### 5.2.3 Junta FCAW

O processo de união de chapas foi feito utilizando o aço F10 com chanfro em X com abertura de 45°, primeiramente as peças foram fixadas em um torno na posição vertical, e o sentido de soldagem foi descendente a fim de averiguar o comportamento do cordão de solda. A soldagem foi realizada com um eletrodo do tipo AWS A5.18/A5.18M: E70C-6MH4, composição química teórica descrita na Tabela 4, com dois passes de solda para preenchimento do chanfro, e com atmosfera protetora utilizando o gás argônio. O valor da voltagem durante todo o processo foi de 24V com corrente contínua e polaridade inversa. Após a união das chapas, foi necessário remover a escória com o auxílio de uma escova de aço.

Tabela 4 - Composição química teórica do eletrodo AWS A5.18/A5.18M: E70C-6MH4.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
% massa	0,06	0,80	1,60	<0,025	<0,025

Fonte: Venun (2017).

### 5.2.4 Junta TIG

O processo de soldagem utilizando a união de chapas foi feito com duas chapas de aço inoxidável 304 com chanfro em V, no qual foram fixadas em um aporte de metal em posição. A abertura do arco se deu por curto-circuito e o material de adição utilizado foi o ER316L-SI, de composição química teórica descrita na Tabela 5. Foram feitos dois passes de solda para preenchimento do chanfro. A intensidade de corrente durante o processo foi de 78 V com corrente contínua e polaridade direta a fim de preservar o eletrodo de tungstênio. O argônio foi utilizado como gás de proteção.

Tabela 5 - Composição química teórica do material de adição ER316L-SI.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
% massa	< 0,02	0,80	1,70	18,40	12,40	2,80

Fonte: Alumaq (2017).

### 5.3 Preparação dos corpos de prova e caracterização

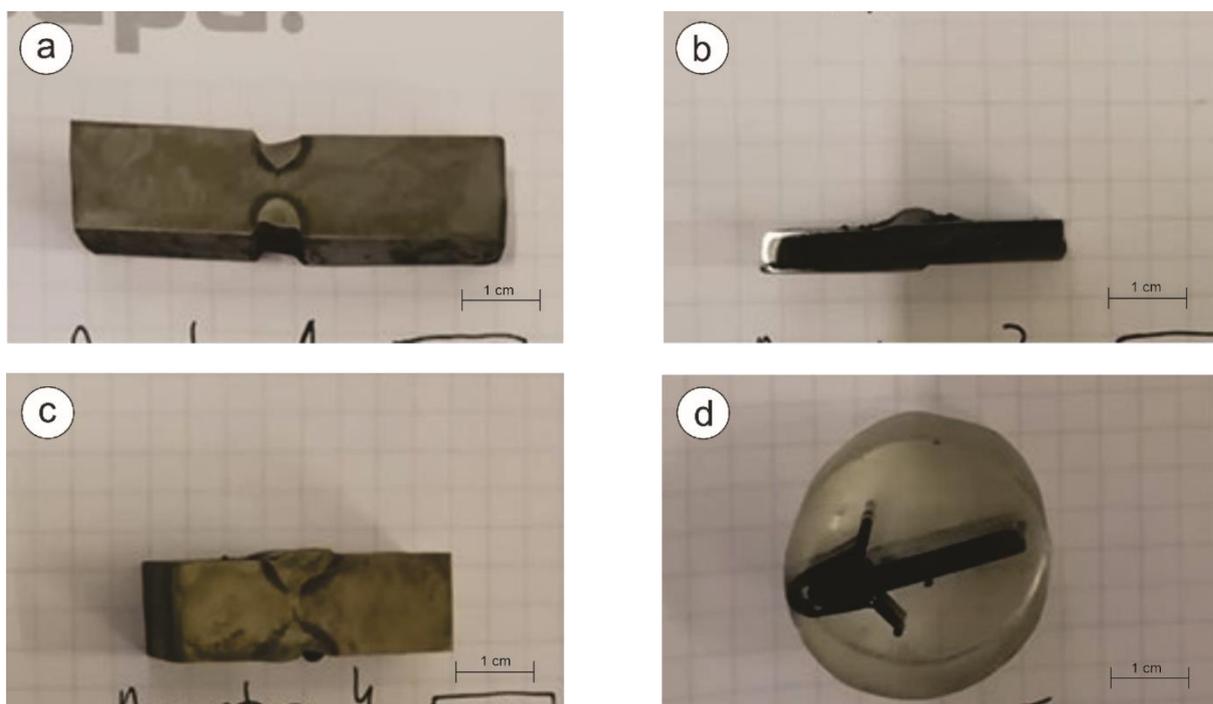
Posteriormente à realização da soldagem e dado o devido arrefecimento a temperatura ambiente, foram efetuados cerca de 3 cortes transversais ao sentido de solda a cada tipo de processo e selecionada as amostras.

Os cortes tinham como objetivo mostrar três zonas: o material de base, o material de adição ou da zona soldada e a zona termicamente afetada. Eles foram efetuados recorrendo a uma serra elétrica tipo Mecatome T300 utilizando um disco abrasivo. A remoção das rebarbas resultantes do processo de corte foram eliminadas com recurso a um esmeril.

Para a amostra referente ao processo TIG foi feito um embutimento em resina acrílica. O procedimento é indicado para a preparação de amostras em que se tem uma seção transversal fina, facilitando seu manuseio, e de modo a evitar possíveis danos ao longo do processo de lixamento e posterior pano de lixamento.

Seguidamente, as amostras foram sujeitas a desbaste com lixas de carboneto de silício, com a seguinte sequência de granulometria: 120, 180, 340, 400 e 600 MESH. O acabamento foi efetuado em panos com pasta de diamante de 6 e 1  $\mu\text{m}$ , respetivamente Figura 7. Entre o desbaste e o acabamento, as amostras foram sujeitas a limpeza com ultrassons, para que fossem removidas as impurezas presentes na superfície.

Figura 7 - Amostras dos processos de soldagem. a) SMAW; b) MIG; c) FCAW; d) TIG.



Fonte: Do autor (2019).

Em seguida, as amostras foram atacadas quimicamente, para que fosse revelada a microestrutura presente em cada uma delas. Para as amostras de aço F10, o ataque utilizado foi o Nital a 3%, enquanto as amostras de aço inoxidável 304 foram atacadas com o reagente Kalling's Número 2.

Por fim, foram retiradas diversas imagens recorrendo ao microscópio ótico e à lupa para que fosse possível observar a microestrutura e a macroestrutura respectivamente, para isso foi utilizado um microscópio ótico Olympus PMG 3. Além disso, foram realizados ensaios de dureza Vickers por microindentação com uma carga de 200 gf, em diferentes zonas representativas de cada amostra. Todos os processos citados neste trabalho (SMAW, MIG, FCAW e TIG) foram baseados na norma PT EN ISO 4063.

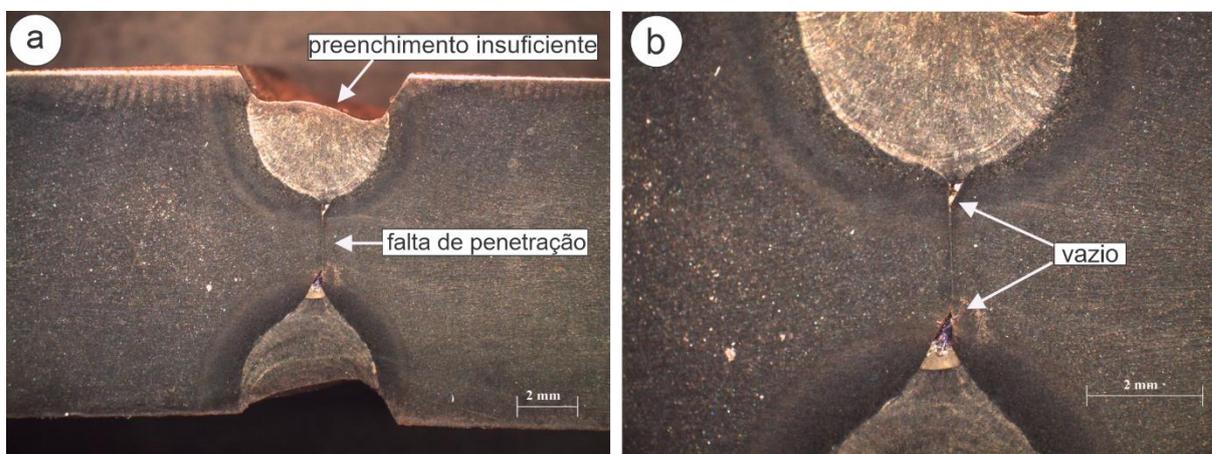
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 SMAW

#### 6.1.1 Análise macrográfica

As macrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 8.

Figura 8 - Macrografias do processo SMAW.



Fonte: Do autor (2019).

Na análise da junta soldada observou-se a presença de alguns defeitos. Dentre eles, é possível destacar a falta de penetração e preenchimento insuficiente do chanfro, Figura 8-a. O primeiro defeito é uma descontinuidade que ocorreu pela fusão incompleta da parte interna do chanfro que não se prolongou através da totalidade da junta que foi soldada, enquanto que o preenchimento insuficiente do chanfro, sendo neste trabalho em X, promoveu uma depressão no metal de solda abaixo da superfície do metal de base.

Segundo Modenesi (2011) estes defeitos podem ser causados por diferentes fatores, destacando-se: projeto inadequado da junta (tipo de chanfro); baixa energia de soldagem; velocidade de soldagem muito alta, sendo este último dependente da experiência do soldador.

O ângulo da tocha também influi sobre os valores de largura, reforço, penetração e área fundida. A falta de penetração percebida na Figura 8-a pode ser justificada pelo fato do ângulo de soldagem empregado, 45°, ser muito pequeno, comprometendo a entrega térmica do arco elétrico na parte mais interna do chanfro.

Indica-se que para soldagem de chapas com espessura de 0,5 cm uma inclinação de tocha entre 70-80°, essa angulação ideal pode ser justificada pelo fato que o jato de plasma empurrar a poça fundida para trás em direção à parte mais interna do chanfro, de modo que o aquecimento da chapa pelo acoplamento do arco com a peça se torna ainda mais eficiente. Além disso, existe a ação das gotas em transferência diretamente para a região mais aquecida da chapa, localizada no fundo da poça (ESAB, 2011; RESENDE, 2015).

Uma outra causa comum seria espessura excessiva da chapa aliada a uma baixa energia de soldagem. Referências na literatura apontam que para um aço médio carbono de espessura 0,5 cm, dado o eletrodo com revestimento rufílico, o valor de corrente sugerido é entre 80 a 150 A, o que ocorre para este trabalho (ESAB, 2011).

Também é possível observar um vazio na zona de encontro dos chanfros no material de base e a zona do cordão de solda, Figura 8-b. Para este defeito há duas causas principais.

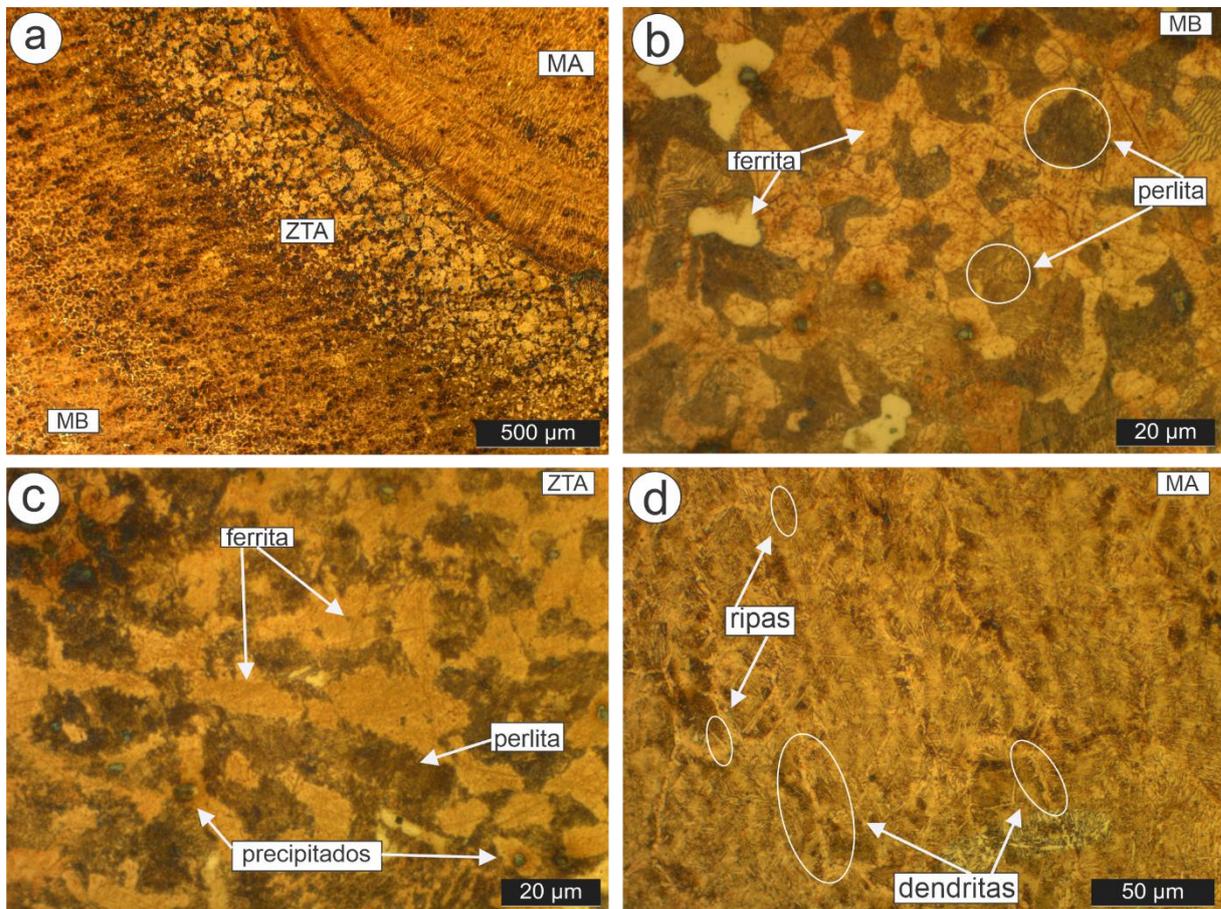
A primeira está atrelada ao aprisionamento de ar, principalmente na abertura e fechamento do arco, e sempre na região mais interna do cordão de solda. A técnica com um pequeno passe na direção inversa, logo após começar a operação de soldagem, permite refundir a área de início do passe, liberando o gás e evitando assim este tipo de defeito (FORTES, 2004).

A segunda causa é que pode ter ocorrido um rechupe, no qual há variação volumétrica durante os ciclos de aquecimento e resfriamento do aço. Segundo Campbell (2003), para limitar este defeito é necessário ter um maior controle térmico da região de solda durante o processo, e posteriormente um resfriamento controlado.

### **6.1.2 Análise micrográfica**

As micrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 9.

Figura 9 - Micrografias do processo SMAW. a) visão geral; b) metal de base (MB); c) zona termicamente afetada (ZTA); d) metal de adição (MA).



Fonte: Do autor (2019).

Uma visão geral das zonas de soldagem é mostrada na Figura 9-a. O metal de base tem a microestrutura típica de um aço F10 classificado como médio carbono, com uma matriz de ferrita em campo claro, e grãos de perlita em escuro, Figura 9-b (MOREIRA, 2013).

Partindo para a zona termicamente afetada, esta pode ser avaliada de acordo com as várias sub-regiões ali presentes. Na Figura 10 é possível identificar a região subcrítica (RS), na qual a temperatura de pico foi aproximadamente 727° C, e como já era esperado não houve nenhuma transformação microestrutural nesse local. A região por ser pouco aquecida promoveu apenas o recozimento local pelo calor gerado durante o processo de soldagem, promovendo a degradação da perlita lamelar e a formação esferoizadas de cementita ( $Fe_3C$ ).

A segunda zona identificada na Figura 10 é a intercrítica (RI) com variações de temperatura entre 727° C – 820° C. Durante a soldagem essa região sofreu uma transformação de microestrutura parcial onde a cementita, parte constituinte da perlita, se transformou

rapidamente em austenita, e com o posterior resfriamento se decompôs em ferrita, perlita, e possivelmente em microestruturas metaestáveis como bainita e martensita.

O aparecimento de estruturas metaestáveis ao longo da discussão dessa técnica se deve ao resfriamento rápido da austenita, que foi promovida pelo choque térmico dos ciclos de aquecimento e resfriamento da junta soldada. Portanto o resfriamento brusco impede a difusão dos átomos de carbono e dos elementos de liga para os seus lugares de preferência, como para formar carbonetos. O resultado dessas microestruturas metaestáveis é a geração de regiões de baixa tenacidade e elevada dureza como suas principais características.

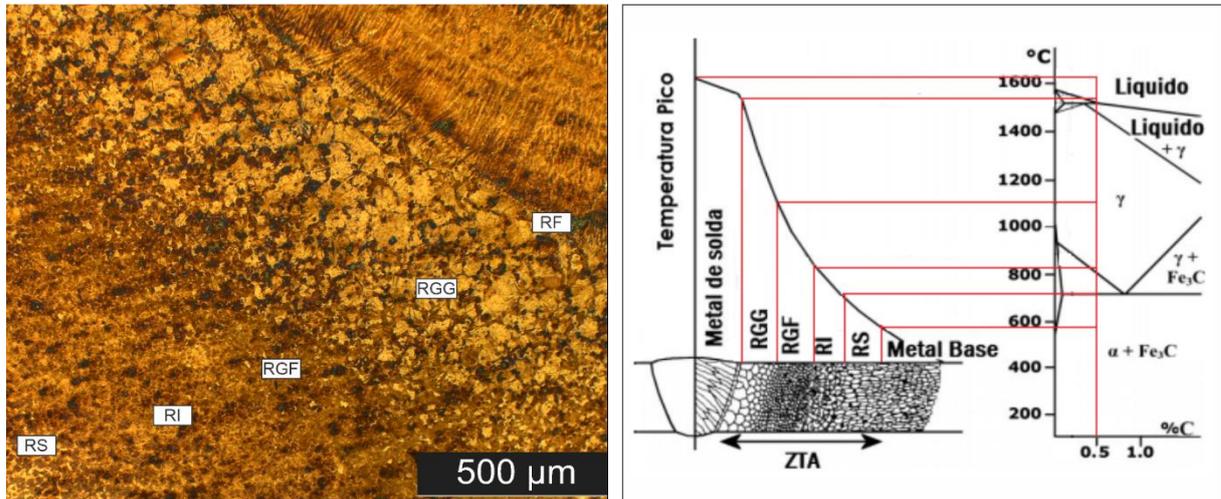
A terceira região observada na Figura 10 é denominada região de grãos finos (RGF). Esta zona foi aquecida até cerca de 1100° C, promovendo um crescimento de grãos austeníticos relativamente lento o que resultou em grãos austeníticos pequenos. Durante o resfriamento a transformação austenita-ferrita formou eventualmente grãos ferríticos, perlíticos, ferríticos-baianíticos e/ou martensítico. A justificativa apresentada por Marques e Modenesi (2005), pela apresentação dessas microestruturas após o resfriamento é que devido ao alto número de contornos de grãos, a ferrita depositadas nessas vacâncias enriquecem a austenita de carbono, transformando esta última em perlita ou bainita/martensita, a depender da taxa de resfriamento, do conteúdo de carbono e elementos de liga do metal de base.

A quarta zona é a região de grãos grosseiros (RGG), Figura 10, caracterizada por uma temperatura de pico entre 1100° C – 1450° C durante o aquecimento houve um grande crescimento de grãos austeníticos, uma vez que deu-se energia suficiente para que ocorresse a difusão de átomos de carbono, originando grãos maiores. Analogamente as outras zonas o resfriamento dessa região aconteceu de forma rápida, promovendo grãos grosseiros de perlita e ferrita, além de possível microestrutura metaestável.

Já a região de fronteira com o metal de base (RF), Figura 10, é localizada junto à linha de fusão. Em função do aumento da temperabilidade proporcionada pelas variações de temperatura ocorrida durante ciclos de aquecimento e resfriamento brusco da chapa metálica. A região é caracterizada por apresentar uma microestrutura rica em constituintes acircular como bainita e martensita. Por ser uma região de interface entre metal de base e metal de adição tende a ser a região de maior desequilíbrio energético e conseqüentemente a mais problemática da zona termicamente afetada podendo apresentar durezas elevadas, perda de tenacidade e um local propício à formação de trincas devido variações volumétricas promovidas pelas transformações microestruturais. Na micrografia da Figura 10 é possível perceber a presença

de grãos e precipitados menores à medida em que se aproxima da linha de fusão (TRINDADE et al., 2016).

Figura 10 - Regiões da zona termicamente afetada.



Fonte: Adaptado Maxwell (2012); do autor (2021).

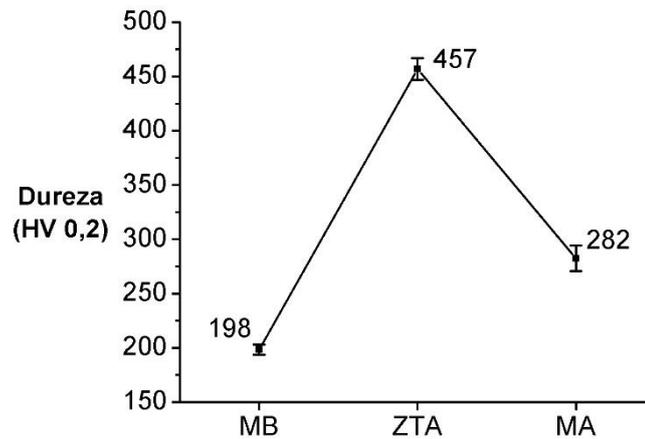
A zona fundida, Figura 9-d, região composta pela mistura entre metal de base e o de adição, tem a estrutura típica de um metal líquido que foi solidificado, com dendritas, levando à nucleação de fases com menores teores de carbono em suas bordas devido à redução de carbono disponível na composição química. Padilha e Guedes (2002) também mostraram em seu estudo a solidificação direcional de dendritas em aços do tipo AISI 304 e 316 em condições semelhantes à deste trabalho.

Segundo Lippold e Kotechi (2005), nesse tipo de solidificação é formada certa quantidade de ferrita via reação eutética com a solidificação, possuindo austenita como fase primária. Ainda é possível perceber a presença de microestruturas metaestáveis com aspecto visual de agulhas (VILELA et al., 2017). Outro fator importante a ser mencionado é o alongamento dos grãos no sentido da inserção de calor, fato que já era esperado devido aos altos ciclos térmicos ao qual o material foi submetido.

### 6.1.3 Perfil de dureza

Na Figura 11 estão apresentados os valores médios do perfil de dureza das três zonas afetadas, sendo elas metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), e material de adição (MA).

Figura 11 - Perfil de dureza do processo SMAW.



Fonte: Do autor (2019).

De acordo com a literatura o perfil de dureza de um aço F10 é em torno de 207 HV, valor próximo ao encontrado para esta prática que foi de 198 HV (MOREIRA, 2013).

Partindo para a zona termicamente afetada percebe-se um crescimento abrupto dessa propriedade, fato que pode estar associado à presença de microestruturas metaestáveis na região como a presença de bainita e martensita como presumidamente citado no tópico anterior. Apesar da técnica com eletrodo revestido possuir como vantagem a produção de escória, essa não foi suficiente para inibir o resfriamento brusco e conseqüentemente a presença de microestruturas metaestáveis, gerando assim áreas de elevada dureza. Concomitante a essa característica um outro fator importante a ser destacado é a elevada condutividade térmica do aço F10, (50 W/m.K), que promove o aquecimento e o resfriamento da peça de forma mais efetiva, o que propicia o aparecimento de microestruturas metaestáveis.

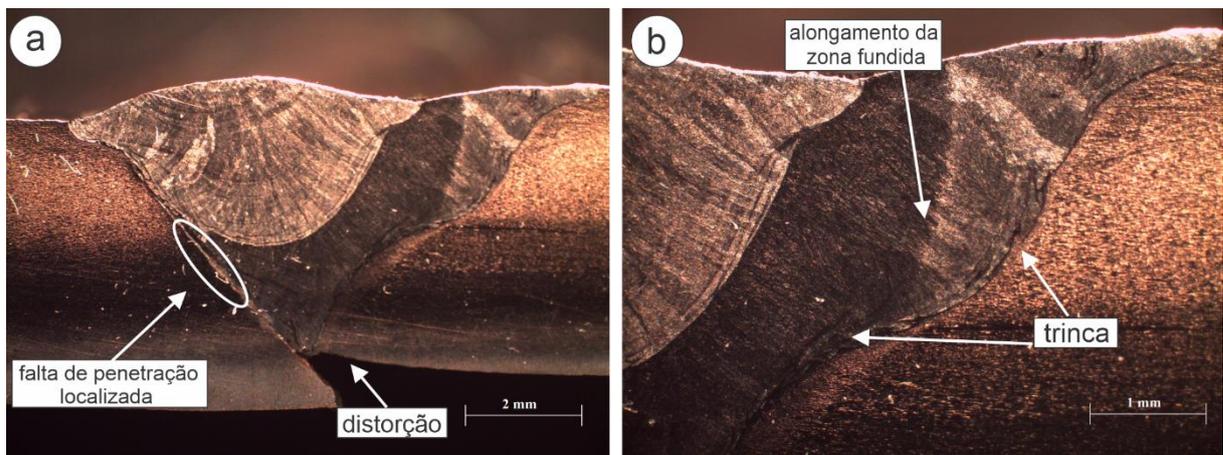
Já a caminho do metal de adição tem-se uma dureza intermediária entre a zona termicamente afetada e o metal de base, tal averiguação já era esperada uma vez que a estrutura nessa região é predominantemente dendrítica, e também é possível observar o aparecimento de agulhas, que podem estar associadas às microestruturas metaestáveis e de dureza elevada. A difícil visualização dessas microestruturas na Figura 9-d se dá pelo fato de que o metal de adição é de baixo carbono, característica que faz com os constituintes metaestáveis apresentem-se em forma de agulhas, diferente de aços com maiores teores de carbono que apresentam em formas de placas (VILELA et al., 2017).

## 6.2 MIG

### 6.2.1 Análise macrográfica

As macrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 12.

Figura 12 - Macrografias do processo MIG.



Fonte: Do autor (2019).

Nesta técnica percebe-se a presença de alguns defeitos na junta soldada como: falta de penetração localizada, trincas, distorção, e alongamento da zona fundida.

Devido às propriedades físicas dos aços inoxidáveis austeníticos, o seu comportamento de solda pode ser diferente do comportamento de outros materiais. O aço inoxidável austenítico 304 possui baixa condutividade térmica (26 W/m.K) em comparação ao aço baixo e médio carbono (50 W/m.K), como o aço F10 descrito no capítulo anterior, o que acarreta num cordão de solda mais largo neste tipo de material do que nos demais considerando um mesmo aporte térmico. Fato que pode ser observado na Figura 12-b, no qual a grande poça de fusão resultou em uma zona fundida mais larga, e conseqüentemente um maior volume de metal a expandir e contrair, aumentando as tensões de trincamento (GOODWIN, 1988).

Porém, é importante salientar que houve uma falta de penetração localizada, Figura 12-a, que pode estar atrelada a falta de experiência do operador. Um método de correção para esse defeito é promover um aquecimento igualitário entre as chapas a serem unidas.

Outro defeito apresentado são as distorções. Elas ocorrem durante a soldagem como efeito dos ciclos não uniformes de expansão e contração do metal de base e metal de adição durante o aquecimento e resfriamento da peça, Figura 12-a, gerando assim pontos concentradores de tensão. Tais distorções são influenciadas pelas propriedades do metal original, como calor específico, coeficiente de condutividade térmica, e da expansão térmica.

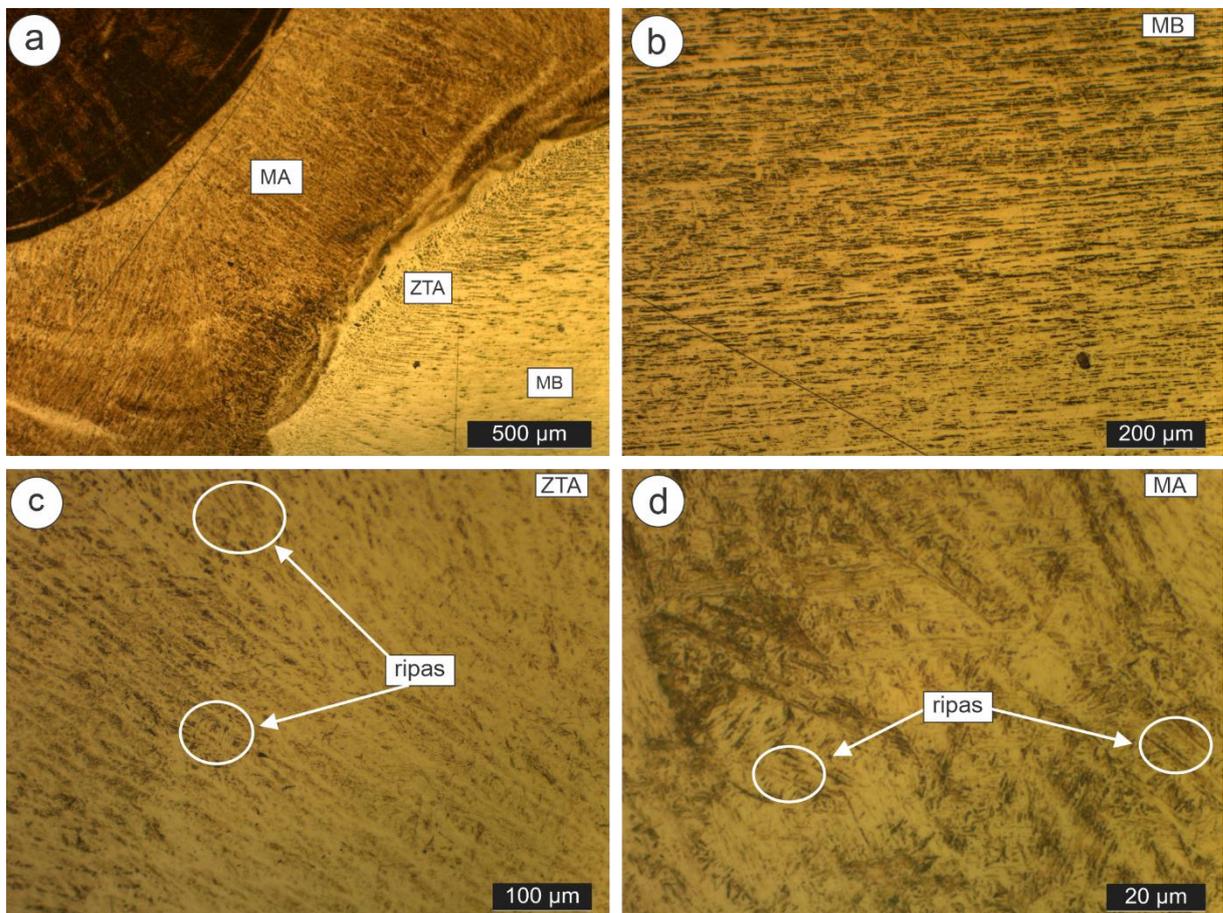
Vicente et al. (2017) ao avaliar o efeito da microestrutura de juntas soldadas através de processo MIG/MAG utilizando uma tensão de 28V para chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304L com 6 mm de espessura, obteve sucesso em seu experimento sem o aparecimento de trincas e/ou distorções. O mesmo sucesso foi alcançado por Yurtisik et al (2013) em que realizou um estudo comparando o processo de soldagem MIG e PCAW, e para isso utilizou um aço inoxidável duplex com uma tensão de 24 V durante a prática e com 11 mm de espessura das chapas. Ambos utilizaram o argônio como gás de proteção. Lundin et al. (1980) evidencia que se pode evitar a formação de quaisquer trincas de soldagem nos aços inoxidáveis puramente austeníticos empregando baixo aporte de calor proveniente de arcos elétricos, reduzindo a dimensão da poça de fusão e a extensão das camadas inferiores atingidas.

Nessa prática foi utilizada uma tensão de 28,4V para chapas com espessura de 5 mm, logo com base na literatura é perceptível uma entrega calorífica maior da que a necessária contribuindo assim para o aparecimento das trincas, distorção, e alongamento da zona fundida.

### **6.2.2 Análise micrográfica**

As micrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 13.

Figura 13 - Micrografias do processo MIG. a) visão geral; b) metal de base (MB); c) zona termicamente afetada (ZTA); d) metal de adição (MA).

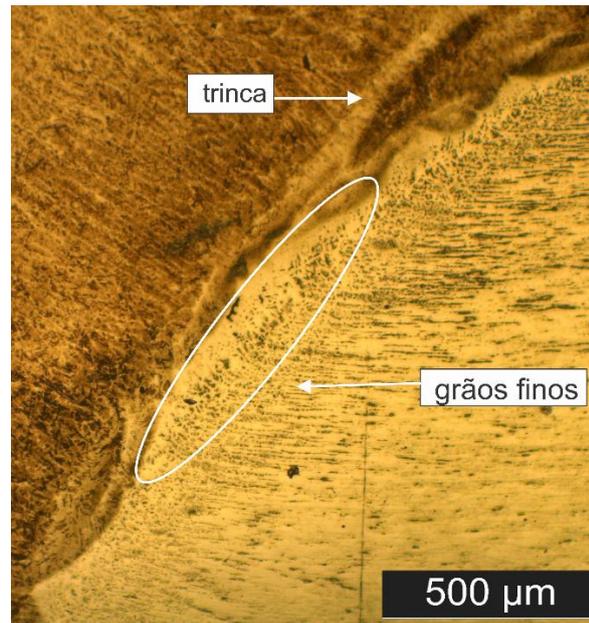


Fonte: Do autor (2019).

Uma visão geral das zonas de soldagem é mostrada na Figura 13-a, evidenciando o material de adição, zona termicamente afetada e metal de base. Na microestrutura apresentada na Figura 13.b, percebe-se que o material de base apresenta grãos alongados e achatados, isso se deve ao processo de laminação que a chapa foi submetida. Os grãos mais escuros são característicos de uma estrutura ferrítica, e estão imersos em uma matriz austenítica de cor mais clara, como previsto na composição química (MESSNER et al., 2013).

A zona termicamente afetada, no geral, apresenta grãos de ferrita, precipitados e ainda possíveis agulhas originárias de microestruturas metaestáveis como a martensita e/ou bainita, Figura 13-c. O aparecimento de novas fases e microestruturas deve-se ao fato de ter havido uma transformação microestrutural, atribuída à distribuição de calor nas zonas de solda e ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento. Um comportamento microestrutural semelhante foi relatado por Kumar (2004), ao evidenciar o efeito causado na microestrutura de aço inoxidável 304 da entrada de calor proveniente de um processo de soldagem.

Figura 14 - Visão geral da zona termicamente afetada.



Fonte: Do autor (2019).

A medida em que se aproxima da linha de fusão observar-se um maior refino da microestrutura, Figura 14. O refino de grão neste caso foi ocasionado pela grande deformação plástica. Esta deformação juntamente com a alta temperatura experimentada é responsável pelo fenômeno de recristalização dinâmica do qual resulta a formação de grãos finos e equiaxiais. No trabalho de Lakshminarayanan e Balasubramanian (2010), foi reportado uma microestrutura semelhante próxima a linha de fusão, utilizando um aço inoxidável 409M.

Entre a zona termicamente afetada e a zona do metal de adição nota-se uma trinca concomitante à linha de fusão. A explicação microestrutural para acontecer esse evento é que durante o aquecimento a microestrutura é austenitizada, possuindo uma estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada), e no momento em que se tem um resfriamento brusco a estrutura passar a ser TCC (tetragonal de corpo centrado), em que o carbono fica retido dentro da célula, embora não haja espaço para acomodá-lo. Isto significa que há uma expansão volumétrica durante a transformação. A expansão causa tensões internas, que são percebidas através da alta resistência mecânica e dureza da martensita, muito embora tenha grande fragilidade e possa ocasionar trincas.

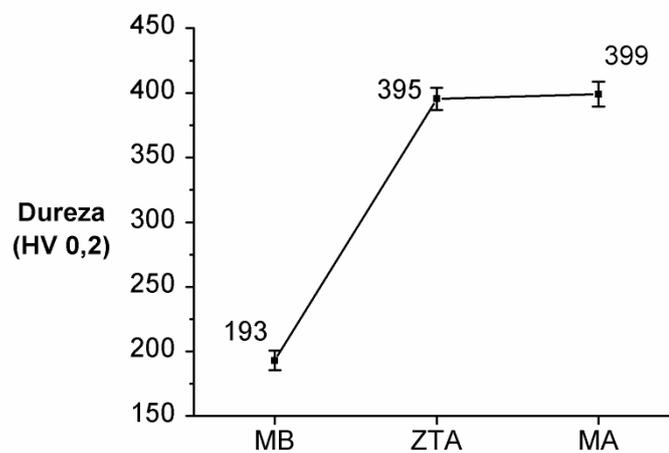
Já na região do material de adição, Figura 13-d, percebe-se a possível presença de ferrita concomitantemente a microestrutura metaestável, típica microestrutura esperada para o eletrodo ER70S-6. Ainda é possível perceber uma orientação específica da microestrutura, a qual é determinada pelo escoamento e resfriamento durante a soldagem (ANDRADE et al.,

2015). Silva (2014), realizou uma solda MIG utilizando como metal de adição o eletrodo ER70S-6, e obteve microestrutura parecida, ele destaca ainda a presença de ferrita além de cementita e bainita nessa região.

### 6.2.3 Perfil de dureza

Na Figura 15 estão apresentados os valores médios do perfil de dureza das três zonas estudadas, sendo elas: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), e material de adição (MA).

Figura 15 - Perfil de dureza do processo MIG



Fonte: Do autor (2019).

Dados da literatura apontam que o aço inoxidável 304 possui a dureza igual a 180HV. A dureza obtida para o material como recebido foi igual 193 HV (BRANT, 2014). O maior valor de dureza encontrado pode ser justificado, uma vez que o material recebido é uma chapa laminada a frio, processo de conformação que resulta no encruamento do material, proporcionando um aumento de dureza.

Para a zona termicamente afetada houve um aumento da dureza, fato que está relacionado ao aparecimento de microestruturas diferentes se comparado ao metal de base. Para esta discussão, é importante destacar que ocorre uma maior homogeneização da austenita durante o aquecimento, e um posterior resfriamento à temperatura ambiente, importa ciclo térmico impostos pelo processo, o que possivelmente origina transformações metaestáveis, como presumidos nas micrografias. Além disso, os ciclos térmicos propiciam as

transformações de fases de ferrita em austenita e de austenita em ferrita, que acarreta em processos de nucleação de crescimento de novos grãos. Isto implica necessariamente em refino de grãos, desde que não sejam alcançadas condições termodinâmicas para o crescimento exagerado dos novos grãos. Assim, pode-se atribuir em parte o refino de grão observado próximo à linha de fusão, a estes fatores e como consequência a maior dureza nessa região se comparado ao valor encontrado no metal de base (ANDRADE, 2015).

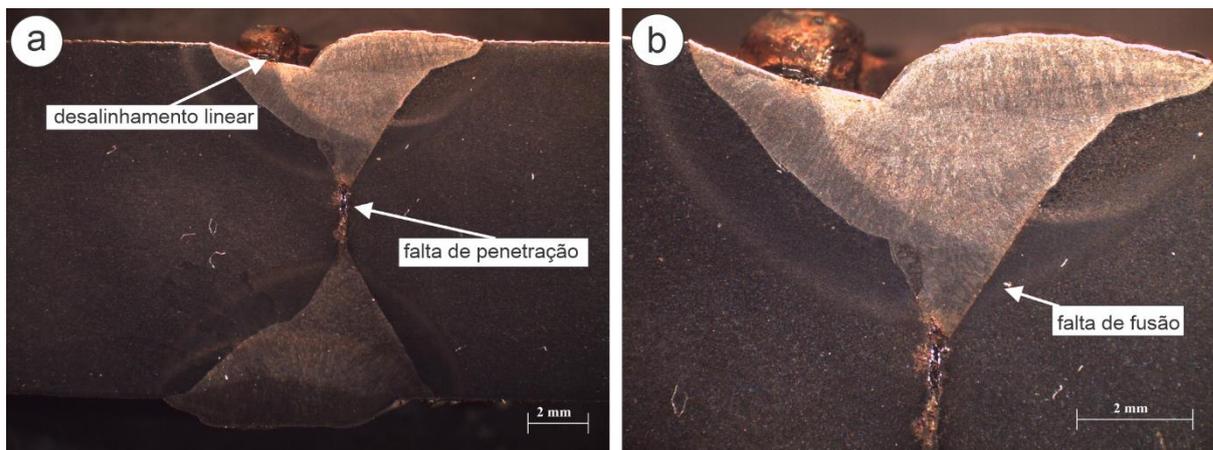
A região do metal de adição tem-se uma dureza bem próxima em termos de valores da apresentada na zona termicamente afetada, 399 HV e 395 HV respectivamente. Este fato pode presumidamente explicado pela presença de precipitados nessa região, principalmente pela presença de carbonetos influenciados pela presença de cromo na composição química do aço austenítico 304, além de uma estrutura refinada, e com as possíveis microestruturas metaestáveis proveniente dos ciclos de aquecimento e resfriamento já citados. Outro fator que deve ser destacado é que a técnica MIG não possui escória, logo a proteção da poça de fusão foi defasada, proporcionando uma perda de calor mais eficiente para o ambiente, e como consequência a formação de microestruturas metaestáveis. Silva (2014) evidencia picos de dureza variando de 300 a 450 HV para a zona parcialmente fundida e para a zona do metal de adição em condições similares a deste trabalho.

## **6.3 FCAW**

### **6.3.1 Análise macrográfica**

As macrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 16.

Figura 16 - Macrografias do processo FCAW.



Fonte: Do Autor (2019).

Na análise da junta soldada observou-se a presença de alguns defeitos. Dentre eles, é possível citar o desalinhamento linear superior, falta de penetração, Figura 16-a; e falta de fusão na zona intermediária aos cordões, Figura 16-b.

O desalinhamento linear superficial está ligado a inexperiência do soldador, uma vez que este defeito pode ser solucionado através da manipulação correta do eletrodo, e/ou com mais de um passe de solda durante o processo.

A falta de penetração e fusão neste capítulo é evidenciada pela insuficiência de aporte térmico na parte mais profunda do chanfro soldado. Uma das causas para esse problema é a manipulação incorreta do arco elétrico, o mais indicado para o processo é que ângulo de inclinação de tocha esteja entre 70-80°, para este trabalho foi utilizado um ângulo de 45° concomitante à norma. A inclinação recomendada promove um aquecimento mais eficiente no fundo do chanfro originando uma melhor penetração e fusão da região. Outro fator que pode ser relacionado a falta de penetração é a utilização do gás de proteção argônio nesta prática, este tem capacidade de manter uma maior estabilidade do arco e promover a facilitação da ignição da tocha, porém o mesmo provoca menor capacidade de penetração, uma vez que possui baixa condutividade térmica.

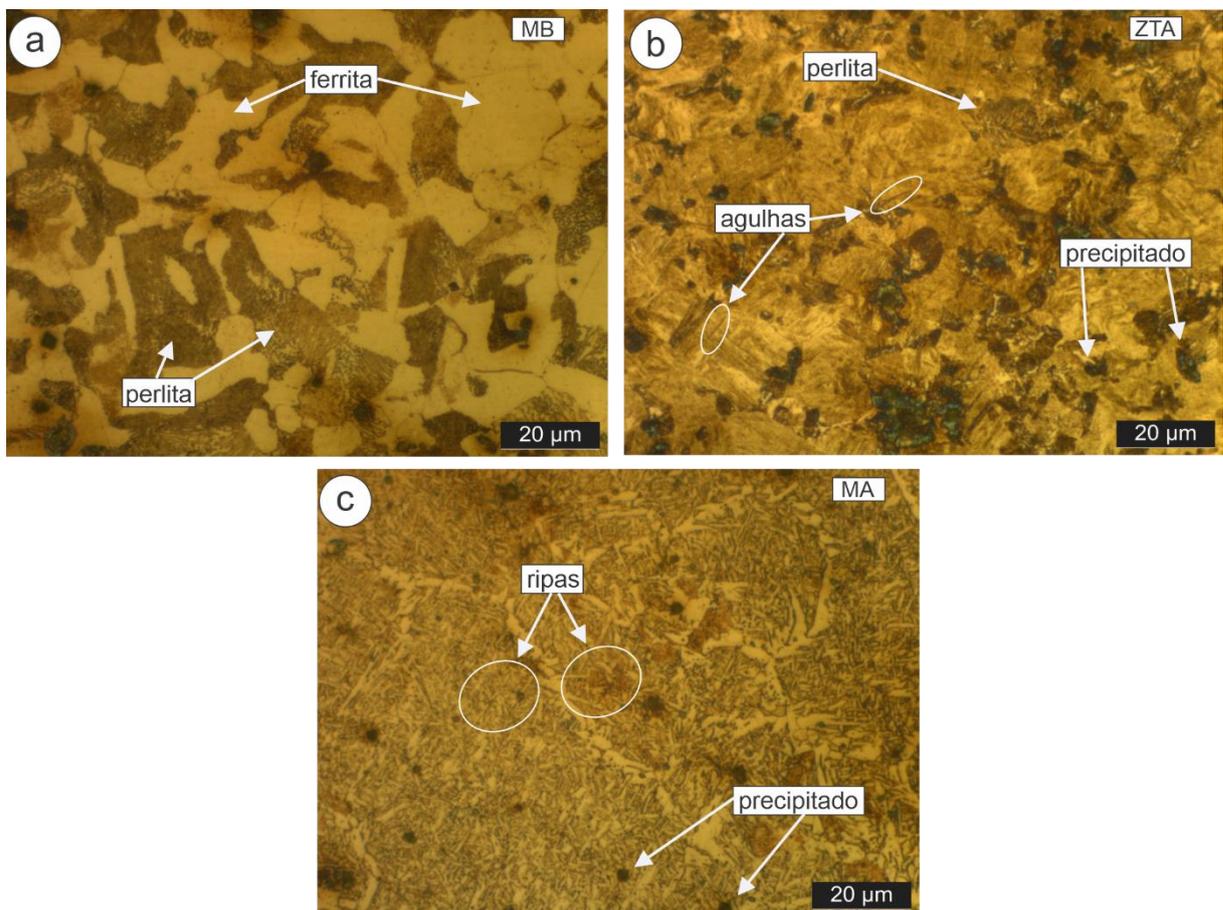
Além disso, outras variantes podem ser citadas como: projeto ineficiente de junta, velocidade de soldagem muito elevada e corrente ou tensão insuficiente. Mohamat et al. (2012) afirma que para chapas com 10 mm de espessura o valor da tensão deve estar entre 22 a 30 V a depender do tipo de aço. Para a prática desse trabalho foi utilizada uma tensão de 24V, que se mostra suficiente quando comparada a literatura (WAINER et al., 2010).

Outros estudos relatam a falta de penetração da zona de solda como ocorreu para este trabalho. Kobe (2015) evidencia que uma inclinação incorreta do eletrodo, ou um comprimento excessivo de arco podem causar falta de penetração, pois o primeiro pode gerar uma não-uniformidade da distribuição de calor, enquanto o segundo uma poça de fusão excessivamente grande o que faz com que o calor seja espalhado e a penetração desejada não ocorra. Entretanto, Ribeiro (2000) afirma que a causa mais frequente para as discontinuidades citadas é um ineficiente projeto de junta, e uma velocidade de soldagem muito alta.

### 6.3.2 Análise micrográfica

As micrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 17.

Figura 17 - Micrografias do processo FCAW. A) metal de base (MB); b) zona termicamente afetada (ZTA); c) metal de adição (MA).



Fonte: Do Autor (2019).

O metal de base é um aço de médio carbono, F10, sendo encontrada a microestrutura esperada, composta por grãos perlíticos, de cor mais escura, dispostos numa matriz ferrítica, em tons mais claros. Na Figura 17-a, além dos componentes já citados, a presença de alguns carbonetos.

Na zona termicamente afetada, Figura 17-b, a microestrutura mais refinada composta por perlita, e eventualmente microestruturas metaestáveis, em forma de agulhas, e precipitados estão dispostos em uma matriz ferrítica. A perlita fina é caracterizada por ocorrer em temperaturas de transformação menores, se comparada à sua forma grosseira, essa menor temperatura gera grãos menores, pois se aumenta gradativamente a taxa de nucleação e reduz-se a taxa de difusão, resultando em lamelas de espessuras menores.

Diniz et al (2011) evidencia microestrutura parecida em seu estudo que foi realizado em um cordão de solda utilizando o eletrodo E70C-3M em chapas de aço carbono comum (ABNT 1010), com 12 mm de espessura e com tensão média de 33V durante o processo. Ele justifica a presença de microestruturas metaestáveis pela variação de temperatura durante o processo de soldagem.

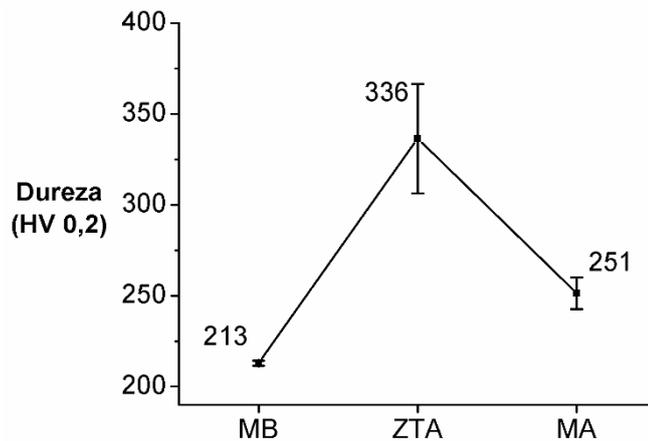
Partindo-se para a zona de fusão, observa-se uma microestrutura lamelar intermediária, se comparada ao metal de base e a zona termicamente afetada. Na Figura 17-c tem-se uma matriz ferrítica e nela há disposta alguns precipitados, além da possível presença de microestruturas metaestáveis. A presença dos precipitados pode ter ligação direta com a presença de manganês no eletrodo, com concentração de 1,6%, uma vez que este tem afinidade química com o enxofre que porventura forma o sulfeto de manganês MnS. Sabe-se que os precipitados nucleiam preferencialmente nos defeitos de rede. Isto ocorre porque quando uma nova fase nucleia, uma interface é formada entre as duas fases. A interface cria um local energeticamente favorável para a precipitação de novas fases durante o resfriamento e solidificação da zona fundida.

Alguns trabalhos verificaram a heterogeneidade de microestruturas envolvendo soldagem de aços médio e baixo carbono. Nunes (2012), utilizando uma tensão média de 31V evidenciou em seu estudo que na solidificação do metal de adição apresentou três diferentes morfologias básicas de ferrita observadas no metal de solda: alotriomórfica, Widmanstätten e intragranular. Chen (2002) verificou que maiores taxas de resfriamento proporcionaram maior formação de ferrita Widmanstätten, apenas pela alteração da energia de soldagem.

### 6.3.3 Perfil de dureza

Na Figura 18 estão apresentados os valores médios do perfil de dureza das três zonas estudadas, sendo elas: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), e material de adição (MA).

Figura 18 - Perfil de dureza do processo FCAW.



Fonte: Do autor (2019).

De acordo com a literatura o perfil de dureza de um aço F10 é em torno de 207 HV, valor próximo ao encontrado para esta prática que foi de 213 HV (MOREIRA, 2013).

Partindo para a zona termicamente afetada tem-se um acréscimo do valor da dureza na região. Esse aumento pode ser explicado pela possível presença de precipitados, microestruturas metaestáveis e também pela formação de estruturas refinadas, como mostrado nas microestruturas. Logo, a região apresentará maior resistência mecânica, 336 HV, quando comparada ao metal de base.

Como exemplo de estrutura refinada, tem-se a perlita que é um microconstituente dado por lamelas de ferrita e cementita, existe entre elas o contorno de fases ferrita-cementita que interagem com as discordâncias, restringindo os movimentos dessas, sendo que, quanto maior a densidade desses contornos gerados pela perlita fina, maior a interação e maior será a resistência mecânica (VARELLA, 2016).

Para a zona do metal de adição, destaca-se uma dureza intermediária, 251 HV. Fato que pode ser explicado pela presença de regiões lamelares mais grossas. A presença de microestruturas mais grosseiras e menos duras no metal de adição é evidenciada pela técnica

de soldagem empregada, no qual uma das suas características é a formação de escoria que protegerá o cordão de solda, e fará com que o resfriamento seja mais homogêneo, assim evitando a presença de microestruturas mais refinadas. Barcedo (2011) utilizando um eletrodo E70C-6M para um aço baixo carbono, encontrou para região uma dureza média de 230 HV, e microestrutura parecida.

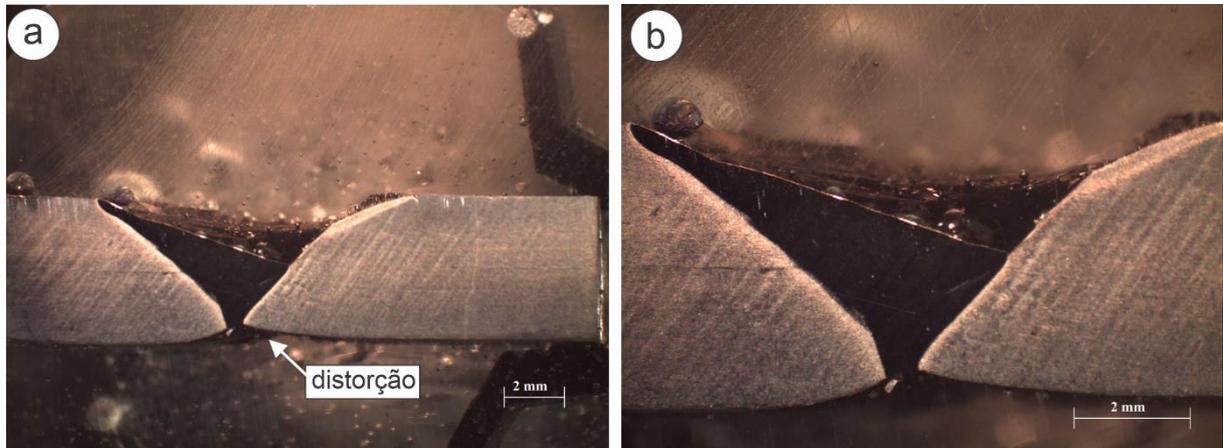
Outro ponto importante a ser destacado é a baixa energia de soldagem empregada (24V), tornando mais fácil o controle desses ciclos térmicos e conseqüentemente da microestrutura.

## 6.4 TIG

### 6.4.1 Análise macrográfica

As macrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 19.

Figura 19 - Macrografias do processo TIG.



Fonte: Do autor (2019).

Na análise da junta soldada observa-se um bom preenchimento do chanfro aço inoxidável 304, além de uma boa penetração e ausência de defeitos grosseiros no metal de adição, houve uma pequena distorção na parte inferior do metal de base situado a Figura 19-a.

A soldagem ocasiona grandes picos de aquecimento no metal a ser unido, seja na zona do material de adição ou na zona termicamente afetada, e muitas das vezes a distribuição de temperatura não é uniforme. Durante o resfriamento a poça de fusão se contrai e solidifica, gerando tensões ao redor do cordão de solda e da zona termicamente afetada. Para esta prática

a tensão produzida pela expansão térmica e contração do volume do material aquecido excedeu o limite de escoamento do metal de base e como consequência ocorreu a deformação plástica localizada, como mostrada na Figura 19-b.

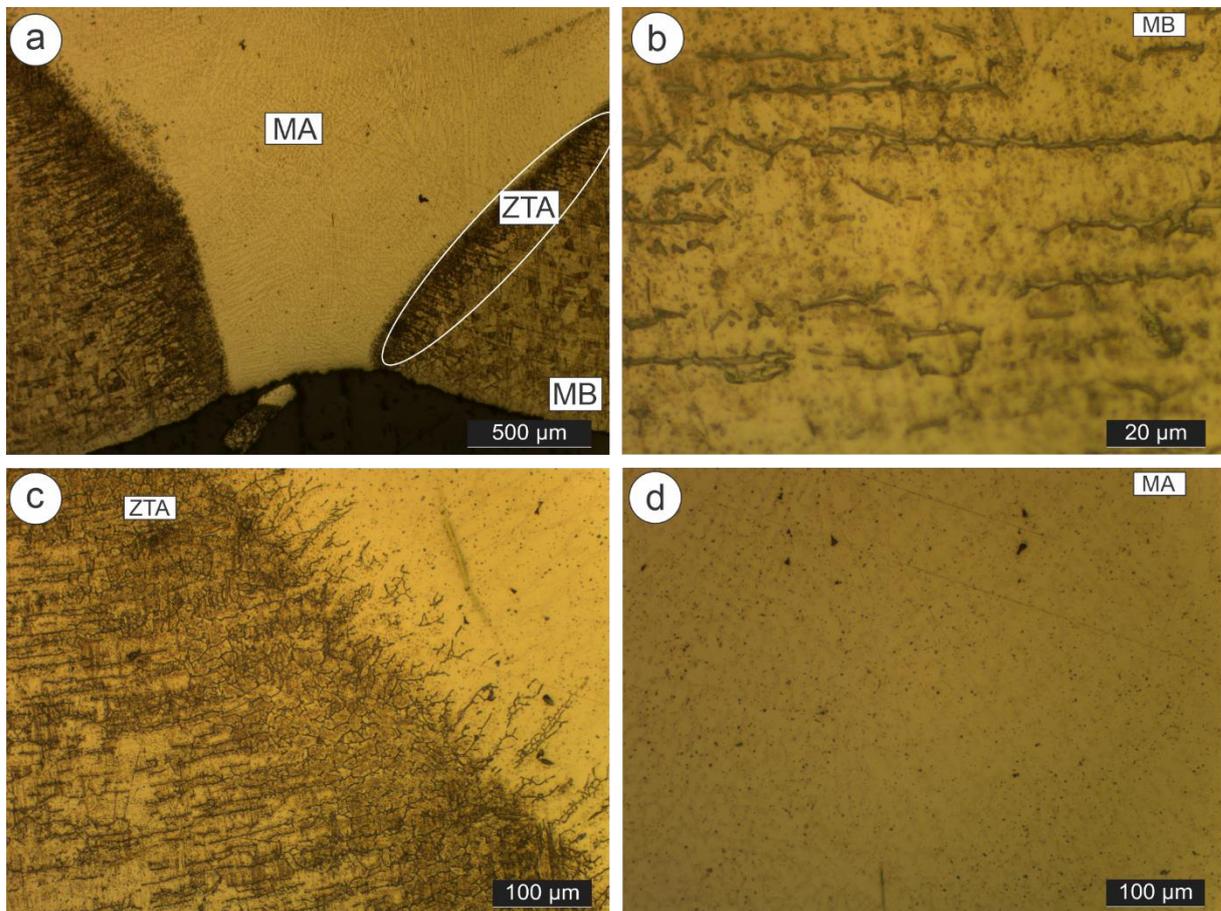
Um dos fatores responsáveis para qualidade macroscópica apresentada neste capítulo é a aproximação da composição química entre o metal de base e metal de adição, sendo ambos aços austeníticos e com teores de carbono e de metais de adição bem próximos em sua composição, o que levará a menores heterogeneidades de composição química, e conseqüentemente menor heterogeneidade microestrutural, uma vez controlada as variáveis do processo, como tensão, velocidade de soldagem, capacidade do operador e outros.

Na Figura 19-a e 19-b, percebe-se a presença de bolhas e uma trinca horizontal na macrografia. Estes defeitos estão localizados na resina de embutimento em que a amostra foi condicionada. O processo se mostra importante para amostras pequenas, pois facilita o manuseio durante as operações de lixamento, polimento e permite uma boa visualização no microscópio.

#### **6.4.2 Análise micrográfica**

As micrografias das zonas de metal de base, zona termicamente afetada e da zona fundida são mostradas na Figura 20.

Figura 20 - Micrografias do processo TIG. a) visão geral; b) metal de base (MB); c) zona termicamente afetada (ZTA); d) metal de adição (MA).



Fonte: Do autor (2019).

Uma visão geral das zonas de soldagem é mostrada na Figura 20-a, contendo o metal de base, zona termicamente afetada e metal de adição. Na microestrutura apresentada na Figura 20-b, já era esperado encontrar grãos alongados e achatados, devido ao processo de laminação que a chapa foi submetida. Uma vez que a chapa utilizada neste processo é do mesmo fabricante em que se fez o processo de soldagem MIG. Os grãos mais escuros compreendem a uma estrutura ferrítica, estes imersos em uma matriz austenítica de cor mais clara.

Partindo-se para a região termicamente afetada, Figura 20-c, observa-se uma maior quantidade de precipitados ferríticos, e grãos mais grossos próximos a fronteira da material de base. Este fato pode ser explicado pela temperatura dada ao sistema, uma vez que o aço austenítico tem menor condutividade térmica, o que implica em menores trocas térmicas com o ambiente, portanto o sistema passa um maior tempo em temperaturas mais altas e assim proporciona uma maior difusão do carbono, o que gera uma microestrutura local mais grosseira.

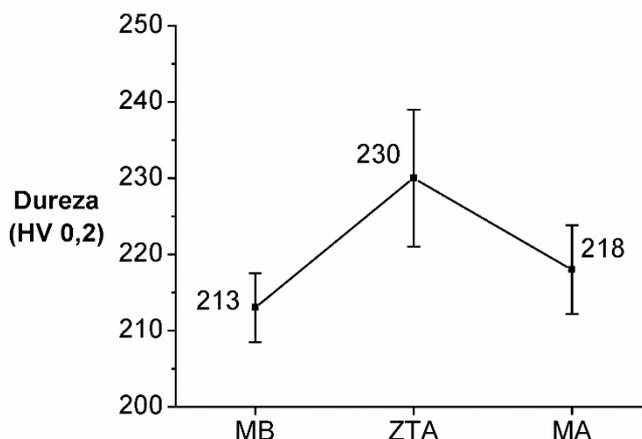
Ao aproximar-se da linha de fusão vê-se uma estrutura mais fina. O mesmo princípio de recristalização citado na prática MIG com o aço austenítico 304, aconteceu para esta, no qual o refino dos grãos foi ocasionado pela grande deformação plástica. Esta deformação juntamente com a temperatura dada ao sistema é responsável pelo fenômeno de recristalização dinâmica do qual resulta a formação de grãos finos e equiaxiais.

É importante salientar que o metal de adição para esta prática possui elementos estabilizadores da austenita como o níquel. Já o manganês, também presente, não amplia o campo austenítico como o níquel mas tem como objetivo principal minimizar e retardar a transformação da austenita em martensita durante o resfriamento. Além do manganês, outro fato que contribuiu para não presença de microestruturas metaestáveis detectáveis nas micrografias foi a baixa condutividade térmica do aço austenítico, o que proporciona uma taxa de resfriamento lento, e com esse fator termodinâmico o carbono tem tempo e temperatura suficiente para que ocorra a difusão e não forme a martensita e bainita. Essa interpretação leva a presumir que a microestrutura presente na Figura 20-d é de matriz austenítica, e os pontos mais escuros são precipitados.

### **6.4.3 Perfil de dureza**

Na Figura 21 estão apresentados os valores médios do perfil de dureza das três zonas estudadas, sendo elas: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), e material de adição (MA).

Figura 21 - Perfil de dureza do processo TIG.



Fonte: Do autor (2019).

A dureza do material de base foi de 213HV, valor superior ao encontrado na literatura, no qual possui valor próximo aos 180HV. Já que o aço utilizado nessa prática é o mesmo utilizado na soldagem MIG, a explicação para esse aumento de dureza é o mesmo, uma vez que a chapa foi laminada a frio, resultando em um encruamento do material, tornando os grãos mais achatados dificultando assim o movimento das discordâncias e consequentemente se traduz em um aumento de dureza.

A zona termicamente afetada é caracterizada por ser a região mais problemática de processos de soldagem. A dificuldade se dá pelas variações dos ciclos térmicos que acometem essa região, o que poderá gerar micrografias variadas. Propondo uma analogia da dureza dessa região, 230 HV, e com a micrografia local, Figura 20-c, percebe-se uma maior quantidade de precipitados, que serviram de barreiras para o movimento das discordâncias, resultando na região de maior dureza quando comparado ao metal de base.

A análise comparativa entre o comportamento de dureza, 218 HV, e o desenvolvimento microestrutural do metal de adição nas condições soldadas evidencia que a matriz dessa região seja predominantemente austenítica, já que possui elementos estabilizadores dessa fase como o Ni, e o Mo. Além disso, é possível notar a presença de pequenos precipitados nos contornos de grão da matriz, o que propõem a explicar uma maior dureza que a apresentada para materiais com essa condição de composição química.

## **7 CONCLUSÃO**

A experiência do soldador e o aporte térmico foram dois fatores determinantes na qualidade final das juntas soldadas, uma vez que o aporte térmico muito baixo resultou em uma falta de penetração e fusão localizada, conforme visto na inspeção macrográfica das técnicas. As juntas apresentaram comportamento insatisfatório neste quesito. As produzidas pelas técnicas SMAW, MIG, FCAW apresentam tais defeitos. Já a junta produzida pelo processo TIG, teve uma melhor qualidade macroscópica.

Nas micrografias foi possível correlacionar e entender as microestruturas presentes em cada região de solda estudada seja metal de base, zona termicamente afetada e zona fundida, e assim compreender como elas foram formadas de acordo com as suas características de produção, composição e temperatura dada ao sistema. Um ponto a ser destacado é que o gás de proteção externo conseguiu demonstrar maior controle térmico e estabilidade do arco, no que gerou regiões de menor dureza na zona termicamente afetada das técnicas que foram utilizadas essa proteção (MIG, FCAW, TIG), em detrimento da técnica em que o gás não foi utilizado (SMAW). Logo torna-se possível otimizar processos para obter as propriedades mecânicas requeridas nas juntas.

O perfil de dureza realizado na seção transversal das juntas revelou propriedades mecânicas de acordo com as microestruturas formadas, no qual foi identificado uma maior dureza na ZTA quando se comparado ao metal de base, fator atrelado às condições termoquímicas da região. Para um maior controle dessas características, é indicado a realização de tratamento térmico, a fim de homogeneizar as propriedades físicas e microestruturais. Já na técnica TIG já houve uma maior homogeneização microestrutural e de dureza.

De modo geral, as juntas produzidas não atendem as normas de qualidade para a aplicação industrial, demonstrando ineficiência operacional do processo de soldagem. Em exceto a solda TIG que teve a menor quantidade de defeitos macroscópicos e heterogeneidades microestruturais, mas para uma aplicação industrial seria necessários testes mecânicos para comprovar a qualidade da junta.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão de trabalhos futuros, podem-se ressaltar:

- a) Avaliar o comportamento das propriedades mecânicas e integridade das juntas soldadas pelo processo TIG, através de ensaios destrutivos e não destrutivos.

- b) Estudar a variabilidade da geometria das chapas de aço e realizar a deposição e transferência metálica pelos modos goticular e pulsado.
- c) Averiguar outros parâmetros de soldagem que não foram abordados nesse trabalho e que podem influenciar no resultado final, como a variação do ângulo de tocha e vazão do gás de proteção.

## 9 REFERÊNCIAS

ALUMAQ. 2017. **BÖHLER ER 316L-Si**. Disponível em: <<https://www.alumaq.com.br/wp-content/uploads/2016/08/bo-cc-82hler-er-316l-si.pdf>> Acesso em outubro de 2021.

AMARAL, F. F. et al. **Aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta para Otimização do Processo de Solda a Ponto no Aço Galvanizado AISI 1006**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 129-142, Junho 2018.

ANDRADE, T. C. et al. **Microestrutura de uma Solda Dissimilar entre o Aço Inoxidável Ferrítico AISI 410S e o Aço Inoxidável Austenítico AISI 304L Soldado pelo Processo FSW**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 467-478, Dezembro 2015.

AWS. **Welding Handbook - Welding Processes**. 9.ed. Miami: American Welding Society, 2004.

AZEVEDO, A. G. et al. **Soldagem de um Aço Inoxidável Ferrítico com o Processo A-TIG**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 002-009, Março 2009.

BAJPAI, A. et al. **Investigations on structure–property relationships of activated flux TIG weldments of super-duplex/austenitic stainless steels**. *Materials Science and Engineering*. Vellore, Índia, v. 638, p. 60-68, Junho 2015.

BARCEDO, N. D. **Avaliação Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW Utilizando Aço ASTM A-36 para Verificar a Soldabilidade, Propriedades Metalúrgicas e Geométricas**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

BELTRAN, M. H. R. **Humphry Davy e as Cores dos Antigos**. *Revista Química Nova*, v. 31, n. 1, p. 181-186, Janeiro, 2008.

BRANT, G. S. **Influência do Aporte Térmico Sobre a Microestrutura em Juntas Soldadas de Aço Inoxidável AISI 304**. 2014. n. 85, - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CAMPBELL, John. **Castings: the new metallurgy of cast metals**. 2. ed. Birmingham: Elsevier, 2003.

CARRASCO, J. C. et al. **Comparative Study of TIG and SMAW Root Welding Passes On Ductile Iron Cast Weldability**. METALURGIJA, Croácia, n. 56, p. 91-93, Outubro 2017.

CHEN, T. H.; YANG, J. R. **Microstructural characterization of simulated heat affected zone in a nitrogen-containing 2205 duplex stainless steel**. Materials Science and Engineering A338 166-181, 2002.

CHOPRA, R. **Optimization of Process Parameters During Multipass Metal Inert Gas Welding of SS 304 Stainless Steel**. Mechanical Engineering Department Thapar, 2005.

CRUZ, A. S. **Estudo dos defeitos no processamento de soldagem por eletrodo revestido – um estudo de caso**. Revista Eletrônica Ciência e Desenvolvimento, v.1, n. 1, p. 48-54, Julho 2015.

CUNHA, T. V. et al. **Ultrassom na Soldagem a Arco – Uma Revisão Acerca dos Métodos de Aplicação e seus Efeitos**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 221-230, Setembro 2014.

DEMARQUE, R. **Avaliação de Parâmetros de Soldagem nas Características de Juntas Dissimilares Inconel 718 - Inox 316L Soldadas pelo Processo TIG Autógeno**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 380-392, Outubro 2018.

DHGATE. 2020. Disponível em <  
<https://www.dhgate.com/wholesale/store.do?act=sellerStore&searchkey=&suppliernum=21470318&groupid=1&stlprm=&searchSource=sort.>>. Acesso em outubro de 2021.

DINIZ, C. M. et al. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular “Metal Cored”**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 285-300, Setembro 2011.

ESAB. 2011. **Welding consumables for joining and cladding stainless steels and nickel-base alloys**. Disponível em:

<[http://www.ozmetalsan.com/images/catalog/629ESAB\\_Paslanmaz\\_celik\\_El\\_Kitabi -  
\\_EN.pdf](http://www.ozmetalsan.com/images/catalog/629ESAB_Paslanmaz_celik_El_Kitabi_-_EN.pdf)> . Acesso em outubro de 2021.

FILHO, A. J. B.; GONZALEZ, A. R. **Estudo dos Parâmetros de Polaridade Negativa na Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável para Revestimento**. Soldagem & Inspeção. Porto Alegre, v.22, n. 1, p. 46-58, Maio 2017.

FORTES. **Apostila Arames Tubulares, ESAB BR**. 2004. Disponível em: Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: outubro, 2021.

FORTES, C. **Eletrodos Revestidos, Catálogo de Soldagem**. 2004. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: outubro, 2021.

GOMES, E. B. **Análise do comportamento da soldagem por curto circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

GONÇALVES, D. C. et al. **Estudo Experimental e Numérico de Tensões Residuais em Juntas Soldadas com e sem Restrição**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 147-162, Junho 2017.

GOODWIN, G. M. **The Effects of Heat Input and Weld Process on Hot Cracking in Stainless Steel**. Welding Journal, v. 67, n. 4, pp. 88-s – 94-s, Abril 1988.

INFOSOLDA. 2013. Disponível em< <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/161-processo-com-arames-tubular-consumiveis>>. Acesso em outubro de 2021.

JÚNIOR, M. L. Disponível em: < <https://www.ufjf.br/profab/files/2016/09/Conceitos-Gerais-em-Soldagem.pdf>>. Acesso em outubro de 2021.

KARATHAPANDI, S.; MURUGAN, R. **An Experimental Investigation of Flat Wire Electrodes and Their Weld Bead Quality in the FCAW Process**. High Temperature Material Processes. Tamilnadu, India, v. 21, n. 1, p. 64-79, Junho 2017.

KCHAOU, Y. et al. **Low Cycle Fatigue behavior of SMAW welded Alloy28 superaustenitic stainless steel at room temperature**. Materials Science & Engineering, Sfax, Tunisia, v. 651, p. 556-566, Janeiro 2016.

- KOBE STEEL LTD. **Weld Imperfections and Preventive Measures**. Tokyo: Kobe Steel, Ltd, 2015.
- KRAUSS, G. **Steel: heat treating and processing principles**. Ohio: American Society for Metals – ASM International, p. 497, 1990.
- KUMAR, S. **On the Influence of Welding Stainless Steel on Microstructural Development and Mechanical Performance**. Materials and Manufacturing Processes, 2014.
- LAMSHMINARAYANAN, A. K.; BALASUBRAMANIAN, V. **An assessment of microstructure, hardness, tensile and impact strength of friction stir welded ferritic stainless steel joints**. Materials & Design. 2010.
- LIPPOLD, J.C.; KOTECHI, D.J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Ohio: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- LUNDIN, C. D. et al. **Hot Cracking Resistance of Austenitic Stainless Steel Weld Metals**, **Welding Journal**. v. 59, n. 8, p. 226-s – 232-s, Agosto 1980.
- MARQUES, P. V.; MODENESI P. J. Bracarense AQ. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora da UFMG; 2005.
- MAXWELL V. R. **Fabricação de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)**. Rio de Janeiro; PUC-RIO 2012.
- MESSNER R. S. et al. **Laminação a Frio de Fios Ortodônticos de Aço Inoxidável Austenítico AISI 304**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, v. 10, n. 1, p. 57-63, Março 2013.
- MODENESI, P. J. et al. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Editora da UFMG; 2012.
- MOHAMAT, S. A. et al. **The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) processes on different parameters**. Elsevier, Selangor, p.1-5, 2012.
- MOREIRA, S. P. **Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Adesivos Estruturais Frágeis e Dúcteis**. n. 168, Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.

NUNES, E. B. et al. **Influência da Energia de Soldagem na Microestrutura e na Microdureza de Revestimentos de Aço Inoxidável Duplex**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 114-122, Junho 2012.

O'BRIEN, A. **Welding Handbook- Welding Process**. Part 1. 9th. ed. Miami: American Welding Society, 2004.

PADILHA A. F., GUEDES. **Aços inoxidáveis: Histórico e desenvolvimento**. In BOTT, I. Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos. p. 129-138, Rio de Janeiro.

RAMADA AÇOS. 2018. Disponível em: <<https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/f10-.html>>. Acesso em outubro de 2021.

RAMKUMAR, K. D. et al. **Studies on the weldability, microstructure and mechanical properties of activated flux TIG weldments of Inconel 718**. Materials Science and Engineering. Vellore, India, v. 639, p. 234-244, Julho 2015.

RESENDE, A. A. **Influência dos Níveis das Correntes, Ângulo de Inclinação da Tocha e Distância entre a Tocha e a Peça sobre a Geometria do Cordão de Solda Usando "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos**. Soldagem & Inspeção, v. 4, p. 501-514, Abril 2015.

RIBEIRO, D. M. **Tecnologia da Solda**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

SAXENA, A. et al. **Study of Tribological Characteristics of Multi-pass SMAW ArmoX 500T Steel Joints**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 27, p. 4300-4307, Agosto 2018.

SHIN, Y. J.; YOU, W. J. **Analysis of the Thermal Characteristics of Welding Spatters in SMAW Using Simplified Model in Fire Technology**. Journal Energies, v. 13, p. 1-15, Maio 2020.

SILVA, M. M. et al. **Caracterização de solda de revestimento de AWS 317L depositados por GMAW duplo arame em aços ASTM a 516 gr 60 para uso na indústria do petróleo**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 225-233, Setembro 2010.

SILVA, R. P. et al. **Microstructure and Mechanical Properties of ASTM A743 CA6NM Steel Welded by FCAW Process**. Materials Research. São Carlos, v. 20, n. 6, p. 1622-1629, Dezembro 2017.

SINGH, A.K.; DEY, V. RAI, R.N. **Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review)**. Fifth International Conference of Materials Processing and Characterization. National Institute of Technology, Agartala, India, 2017.

SOUZA, D. D. B. G.; FERRARESI, V. A. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira**. Revista Matéria, Uberlândia, v.22, n. 1, Fevereiro 2017.

STARLING, C. M. D. et al. **Caracterização do cordão na soldagem FCAW com um srame tubular rutílico**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 298-312, Dezembro 2009.

TAHAEI, A. et al. **Metallurgical Characterization of a Weld Bead Coating Applied by the PTA Process on the D2 Tool Steel**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 209-219, Junho 2016.

TAMASGAVABARI, R. et al. **The effect of harmonic vibration with a frequency below the resonant range on the mechanical properties of AA-5083-H321 aluminum alloy GMAW welded parts**. Materials Science & Engineering , Tehran, Iran , v. 736, p. 248-257, Outubro 2018.

TÁRCIO, C. et al. **Influence of a cobalt-based wire injection in austenitic coating deposited via CW-GMAW**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.40, p.1-11, Agosto 2018.

TEIXEIRA, G.S. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em tandem**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

TRINDADE, V. B. et al. **Efeito dos Diferentes Tratamentos Termicos sobre Microestrutura e Microdureza de um Sistema Aço C-Mn/ Revestimento de Inconel 625**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, p. 1-8, Junho 2016.

VARELLA, R. **Caracterização Microestrutural e Mecânica De Juntas Soldadas a Laser em um aço ARBL**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2016

VENVU 71 TM. 2017. **FCAW - Seamless Metalcored Wire**. Disponível em: <venvulasvenvulas.jimdo.com>. Acesso em outubro de 2021.

VICENTE, A. A. et al. **Efeito dos Gases de Proteção na Microestrutura e nas Cinéticas de Oxidação a Altas Temperaturas ao Ar de Juntas Soldadas de um Aço Inoxidável Austenítico Através do Processo MIG/MAG.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 357-365, Dezembro 2017.

VILELA, L. B. et al. **Efeito da Taxa de Resfriamento Sobre a Formação de Martensita em um Aço Inoxidável Ferrítico com 11 %Cr e Baixos Teores de Intersticiais.** Revista Matéria, Ouro Preto, v. 24, n.1, Julho 2017.

WAINER, E. et al. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo, Editora Bluncher, 2008.

WELDIRE. 2020. **‘ER70S-6’.** Disponível em: [http://www.weldwire.net/weld\\_products/ww70s-6/](http://www.weldwire.net/weld_products/ww70s-6/). Acesso em outubro de 2021.

YANG, T. et al. **Modeling of weld bead geometry for rapid manufacturing by robotic GMAW.** World Scientific Publishing Company, Chengdu, China, v. 29, n. 1, p. 1-7, Março 2015.

YURTISIK, K. et al. **Caracterização de Soldas de Aço Inoxidável Duplex Obtidas por Soldagem Híbrida MIG-Plasma.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 207-216, Setembro 2013.

