



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Curso de Engenharia Mecânica

WILLIAM CUNHA REZENDE MEDEIROS TAVARES

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E
ESTRUTURAIS DO AÇO AISI 304 POR MEIO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM
MANUAL GTAW E SMAW**

SÃO LUÍS

2019

WILLIAM CUNHA REZENDE MEDEIROS TAVARES

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E
ESTRUTURAIS DO AÇO AISI 304 POR MEIO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM
MANUAL GTAW E SMAW**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO WILLIAM CUNHA REZENDE MEDEIROS TAVARES, E ORIENTADA PELO PROF. ME. JOSÉ DE RIBAMAR FERREIRA BARROS JUNIOR.

PROF. ME. JOSÉ DE RIBAMAR FERREIRA BARROS
JUNIOR.
ORIENTADOR

SÃO LUÍS

2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL – UEMA

Tavares, William Cunha Rezende Medeiros.

Análise comparativa das características mecânicas e estruturais do aço AISI 304 por meio dos processos de soldagem manual GTAW e SMAW / William Cunha Rezende Medeiros Tavares. – São Luís, 2019.

74 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior.

1.Soldagem. 2.Aços inoxidáveis. 3.GTAW. 4.SMAW. 5.Propriedades mecânicas.
I.Título

CDU: 621.791

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E
ESTRUTURAIS DO AÇO AISI 304 POR MEIO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM
MANUAL GTAW E SMAW**

Autor: William Cunha Rezende Medeiros Tavares

Orientador: Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta monografia.

Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Wellinton de Assunção
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Esp. Amadeu Santos Nunes Júnior
Universidade Estadual do Maranhão

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís - MA, 27 de junho de 2019.

Dedicatória

*Dedico este trabalho aos meus pais,
porque a eles devo tudo e sem sua
ajuda não teria chegado tão longe.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela oportunidade, privilégio e sustentação, pois sem Ele nada seria possível. À Deus toda honra, toda glória e todo louvor.

A minha eterna gratidão aos meus pais, Manoel e Vanessa, que não mediram esforços para me ajudar a chegar até aqui e por sempre me transmitirem uma educação de qualidade, resultando na pessoa que sou.

À minha irmã Stéphanie, que me apoiou e ajudou em toda minha formação acadêmica.

Às minhas avós, por sempre me incentivarem em tudo que faço. Em especial à minha avó Adélia, que infelizmente não está aqui para presenciar este momento tão importante na minha vida.

Agradeço a Sandrey e Alyne, por me acolherem em sua casa para que eu pudesse dar prosseguimento nesta jornada.

Agradeço em especial ao meu orientador, Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Junior, por acreditar no meu projeto, pois sem sua orientação dificilmente conseguiria chegar até aqui, e por muito ter contribuído para minha formação enquanto engenheiro.

Ao grande amigo Prof. Me. Thiago Aguiar Santos, por gentilmente ter me ajudado no decorrer deste trabalho, me dando todo suporte necessário.

Ao Prof. Washington Silva do Nascimento e ao amigo Vinicius Costa, pelo auxílio durante os trabalhos.

À Carlos Augusto e aos professores, Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha e Prof. Esp. Amadeu Santos Nunes Junior, pela paciência em ouvir minhas dúvidas e esclarecê-las.

Ao meu amigo e colega de turma, Anderson Moreno, pelo companheirismo desde o primeiro período, pelas discussões bastante produtivas e pelo apoio mútuo que foi dado entre nós na conclusão dos nossos trabalhos.

Aos colegas da turma 2014.1, por terem partilhado comigo etapas importantes de aprendizado, pelos momentos inesquecíveis que levarei comigo. Cada brincadeira, conversa e ensinamentos. Tudo nos esquemas sempre.

Agradeço a empresa Metalma Inox e Cia, que cedeu o espaço para a realização do processo experimental deste trabalho.

À Universidade Estadual do Maranhão, que me deu a oportunidade de realizar este curso e crescer em conhecimento.

Aos amigos, Alexandre e Rodrigo, do LABEMM (Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia) da UEMA pelo auxílio na preparação e realização dos ensaios mecânicos, além de muitos conselhos e ajudas. Sem vocês, eu não teria conseguido.

Agradeço a todos os meus professores, desde a educação infantil até a UEMA, que foram incansáveis na arte de ensinar e me acompanharam desde o início da minha vida, marcando assim, meus maiores passos. Obrigado pelo empenho e dedicação.

Finalmente agradeço aos meus amados amigos e irmãos da Igreja Presbiteriana de Vinhais, que sempre torceram por mim e me apoiaram no decorrer do curso.

Epígrafe

*“Não a nós, SENHOR, não a nós, mas
ao teu nome dá glória, por amor da
tua misericórdia e da tua fidelidade.”*

Salmos 115.1

Resumo

Os avanços tecnológicos e as preocupações econômicas para a redução de custos contribuíram para que a soldagem se tornasse uma ferramenta de grande importância no processo de fabricação e produção. Como o mercado de trabalho nos dias de hoje se encontra cada vez mais exigente em relação à versatilidade, qualidade e baixo custo, houve a necessidade de investir mais em processos que possuem essas características. Dos principais e mais comuns tipos de soldagem que existem, temos a soldagem GTAW, também conhecida como TIG e a SMAW, popularmente conhecida como eletrodo revestido. Este trabalho foi concebido através da análise, e comparação dos dados, dos ensaios mecânicos de tração, dobramento, dureza e metalografia, em corpos de prova preparados através dos processos de soldagem GTAW e SMAW manuais. O material utilizado foi o aço inoxidável AISI 304, que é um material com grandes possibilidades de aplicações em peças de máquinas, equipamentos mecânicos, construção civil, indústria alimentícia/hospitalar e arquitetura. Após os resultados dos ensaios e das análises, verificou-se que nas condições empíricas, o que ocorre na maioria das empresas de pequeno e médio porte, que atendem o mercado de nossa região, o processo de soldagem GTAW não apresentou os resultados esperados. O processo de soldagem SMAW, nas devidas condições apresentadas, mostrou-se o mais indicado.

Palavras-chave: Soldagem; Aços Inoxidáveis; GTAW; SMAW; Propriedades Mecânicas

Abstract

Technological advances and economic concerns to reduce costs have contributed to the fact that welding has become a major tool in the manufacturing and production process. As the labor market these days is increasingly demanding in relation to versatility, quality and low cost, there was a need to invest more in processes that have these characteristics. Of the main and most common types of welding that exist, we have the welding GTAW, also known as TIG and SMAW, popularly known as coated electrode. This work was conceived through the analysis and comparison of the data of the mechanical tests of traction, flexure, hardness and metallography, in test bodies prepared by the GTAW and SMAW manual welding processes. The material used was stainless steel AISI 304, which is a material with great possibilities of applications in machine parts, mechanical equipment, civil construction, food/hospital industry and architecture. After the results of the tests and the analyzes, it was verified that in the empirical conditions, what happens in the majority of small and medium sized companies, that serve the market of our region, the GTAW welding process did not present the expected results. The SMAW welding process, in the proper conditions presented, was the most indicated.

Keywords: Welding; Stainless Steel; GTAW; SMAW; Mechanical Properties

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Classificação de alguns dos processos de soldagem mais importantes.....	6
Figura 3.2 – Metal de base, de adição, poça de fusão e penetração	7
Figura 3.3 – Tipos de junta.....	7
Figura 3.4 – Tipos de chanfro.....	8
Figura 3.5 – Elementos de um chanfro.....	8
Figura 3.6 – Regiões de soldas de topo	9
Figura 3.7 – Posições de soldagem para solda de topo	9
Figura 3.8 – Representação esquemática da seção transversal de uma solda de topo.....	10
Figura 3.9 – Processo de soldagem GTAW	11
Figura 3.10 – Processo de soldagem SMAW	12
Figura 3.11 – Representação esquemática do ensaio de tração.....	16
Figura 3.12 – Corpos de prova de (a) secção circular e (b) secção retangular para o ensaio de tração	17
Figura 3.13 – Curva tensão-deformação convencional	18
Figura 3.14 – Representação esquemática do ensaio de dobramento guiado.....	20
Figura 3.15 – Representação esquemática do ensaio de dobramento livre	21
Figura 3.16 – Representação esquemática do ensaio de dobramento semiguiado	21
Figura 3.17 – Representação da ponta do durômetro	23
Figura 4.1 – Fluxograma das atividades realizadas durante o trabalho.....	24
Figura 4.2 – Chapas 300 x 100 mm soldadas com (a) SMAW e (b) GTAW	25
Figura 4.3 – Corte das amostras na tesoura guilhotina.....	27
Figura 4.4 – Realização do ensaio de tração	28
Figura 4.5 – Corpos de prova para o ensaio de tração.....	28
Figura 4.6 – Realização do ensaio de dobramento: (a) antes e (b) depois da deformação.....	29
Figura 4.7 – Realização do ensaio de dureza Rockwell	30
Figura 4.8 – Cortadora metalográfica Arocor 40 da Arotec.....	31
Figura 4.9 – (a) Embutidora metalográfica EM30D da Teclago, (b) posicionamento da amostra e (c) corpo de prova embutido.....	32
Figura 4.10 – Lixamento sendo realizado na lixadeira Aropol 2V da Arotec.....	33
Figura 4.11 – Lixas utilizadas com diferentes granulações.....	34
Figura 4.12 – Polimento sendo realizado na politriz Aropol 2V da Arotec	35

Figura 4.13 – (a) Lavadora ultrassônica e (b) posicionamento da amostra.....	36
Figura 4.14 – Primeira tentativa de ataque químico com água régia	37
Figura 4.15 – Ataque químico com água régia concentrada	38
Figura 4.16 – Amostra sendo analisada no microscópio óptico	38
Figura 5.1 – Corpos de prova após o ensaio de tração; SMAW e GTAW respectivamente ...	39
Figura 5.2 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 1 soldado pelo processo SMAW	40
Figura 5.3 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 2 soldado pelo processo SMAW	41
Figura 5.4 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 3 soldado pelo processo SMAW	42
Figura 5.5 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 1 soldado pelo processo GTAW	43
Figura 5.6 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 2 soldado pelo processo GTAW	44
Figura 5.7 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 3 soldado pelo processo GTAW	45
Figura 5.8 – (a) Posição final dos corpos de prova; detalhe do cordão de solda com o processo (b) SMAW e (c) GTAW	47
Figura 5.9 – Gráfico de distribuição da dureza ao longo da seção transversal das amostras ..	48
Figura 5.10 – Micrografias do aço inoxidável austenítico 304 em (a) 500X e (b) 1000X.....	49
Figura 5.11 – Micrografias da ZF do material soldado com o processo SMAW em (a) 500X e (b) 1000X.....	50
Figura 5.12 – Micrografias da ZTA soldado com o processo SMAW em (a) 500X e (b) 1000X	51
Figura 5.13 – Micrografias do MB do material soldado com o processo SMAW em (a) 500X e (b) 1000X.....	51
Figura 5.14 – Micrografias da ZF do material soldado com o processo GTAW em (a) 500X e (b) 1000X.....	52
Figura 5.15 – Micrografias da ZTA soldado com o processo GTAW em (a) 500X e (b) 1000X	53
Figura 5.16 – Micrografias do MB do material soldado com o processo GTAW em (a) 500X e (b) 1000X	53

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 304.....	25
Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem utilizados.....	26
Tabela 4.3 – Composição química dos consumíveis utilizados nos processos de soldagem ...	26
Tabela 4.4 – Reagente com sua composição química e seu método de ataque.....	36
Tabela 4.5 – Reagente mais concentrado, sua composição química e seu método de ataque..	37
Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados com SMAW	43
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados com GTAW.....	45
Tabela 5.3 – Distribuição média da dureza nas regiões das juntas soldadas.....	48

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI – *American Iron Steel Institute*
ASME – *American Society of Mechanical Engineers*
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
AWS – *American Welding Society*
CFC – Cúbica de Face Centrada
EPI's – Equipamentos de Proteção Individual
ER – Eletrodo Revestido
GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*
LABEMM – Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia
LABUSI – Laboratório de Usinagem
MB – Metal Base
SiC – Carbetto de Silício
SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*
TIG – *Tungsten Inert Gas*
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão
ZF – Zona Fundida
ZTA – Zona Termicamente Afetada

Lista de Símbolos

- α – Ângulo de chanfro
- β – Ângulo de bisel
- θ – Ângulo de dobramento
- D – Diâmetro do cutelo
- f – Fresta
- Q – Força de flexão
- s – Face da raiz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 História da Soldagem	4
3.2 Definição de Soldagem	5
3.3 Terminologia da Soldagem	6
3.4 Processo de Soldagem GTAW	11
3.5 Processo de Soldagem SMAW.....	12
3.6 Aço Inoxidável AISI 304	13
3.7 Ensaios Mecânicos dos Materiais.....	15
3.7.1 Ensaio de Tração	16
3.7.2 Ensaio de Dobramento	20
3.7.3 Ensaio de Dureza.....	22
3.7.4 Ensaio Metalográfico	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 Preparações dos Corpos de Prova.....	24
4.2 Realizações do Ensaio de Tração	27
4.3 Realizações do Ensaio de Dobramento	29
4.4 Realização do Ensaio de Dureza Rockwell.....	29
4.5 Realizações dos Ensaios Metalográficos	30
4.5.1 Cortes dos Corpos de Prova	31
4.5.2 Embutimento do Corpo de Prova	32
4.5.3 Lixamento dos Corpos de Prova	33

4.5.4 Polimentos dos Corpos de Prova.....	34
4.5.5 Limpeza Ultrassônica	35
4.5.6 Ataque Químico	36
4.5.7 Análise Microestrutural.....	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Ensaio de Tração	39
5.2 Ensaio de Dobramento	46
5.3 Ensaio de Dureza	47
5.4 Ensaio Metalográficos	49
5.4.1 Materiais como recebido	49
5.4.2 Materiais soldados com o processo SMAW.....	49
5.4.2.1 Zonas fundida.....	49
5.4.2.2 Zonas termicamente afetada.....	50
5.4.2.3 Metal base	51
5.4.3 Material soldado com o processo GTAW	52
5.4.3.1 Zona fundida	52
5.4.3.2 Zona termicamente afetada	52
5.4.3.3 Metal base	53
6 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A soldagem, ao longo de sua história, tornou-se o processo de fabricação de união de materiais mais utilizado na indústria, onde há sua dependência em praticamente todas as áreas. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009) há indícios de que este processo teve suas primeiras aparições por volta de 4.000 a.C., porém os primeiros métodos de soldagem fundamentados e registrados foram utilizados na Idade Média, como armas, armaduras e utensílios daquela época.

Os primeiros metais utilizados pelo homem foram o cobre e o estanho, e mais adiante a liga desses dois metais, o bronze. Ao decorrer do tempo, o homem começou a dominar a fabricação do aço, que era um material mais escasso e de alto custo, sendo fabricado pela cementação de tiras finas de ferro. Sendo assim, as ferramentas eram fabricadas com ferro e com tiras de aço soldadas nos locais de corte (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Com os avanços tecnológicos, as preocupações econômicas para a redução de custos aumentaram, e com isso, a soldagem se tornou uma ferramenta de grande importância no processo de fabricação e produção. Não seria possível a fabricação de diversos produtos contidos hoje no mercado sem a aplicação da soldagem, desde simples utensílios domésticos até aos mais complexos encontrados no setor aeronáutico e aeroespacial (ROCHA et al., 2017).

Uma vez que o mercado de trabalho nos dias de hoje se encontra cada vez mais exigente em relação à versatilidade, qualidade e baixo custo, houve a necessidade de investir mais em processos que possuem essas características. Dos principais e mais comuns tipos de soldagem que existem, temos a soldagem por arco elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*) e a soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) também conhecida como TIG (*Tungsten Inert Gas*).

O processo por arco elétrico SMAW, desenvolvido pelo engenheiro sueco Oscar Kjellberg em 1904, é o mais utilizado no mundo inteiro até os dias de hoje, graças à sua grande versatilidade, à simplicidade de operação e dos equipamentos necessários e à variedade de eletrodos revestidos encontrados no mercado (ESAB, 2005).

Por sua vez, a soldagem GTAW teve seu desenvolvimento no começo da Segunda Guerra Mundial, com a necessidade de haver processos de soldagem eficientes para materiais complexos que eram utilizados na indústria aeronáutica. Com o seu aperfeiçoamento, o

processo obteve alta qualidade e um custo relativamente baixo, com diversas aplicações (BRACARENSE, 2000).

Neste contexto, este trabalho busca analisar e comparar os efeitos dos processos de soldagem manual GTAW e SMAW realizados no metal de base, e a sua soldabilidade, através dos resultados obtidos nos ensaios, que visam fornecer informações técnicas para a otimização das aplicações do aço AISI 304, que é um material com grandes possibilidades de aplicações em peças de máquinas, equipamentos mecânicos, construção civil, indústria alimentícia/hospitalar e arquitetura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar as propriedades mecânicas e estruturais do cordão de solda obtido nos processos por arco elétrico GTAW e SMAW executados manualmente no aço inoxidável AISI 304, com o eletrodo revestido ER 6130 e a vareta ER 308LSi.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar e definir os parâmetros para a realização da soldagem.
- Verificar a microestrutura e suas propriedades através de ensaios mecânicos.
- Comparar as propriedades mecânicas e estruturais dos materiais soldados com os processos GTAW e SMAW.
- Indicar o processo de soldagem mais adequado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 História da Soldagem

Desde as épocas mais remotas, muitos artefatos já eram confeccionados utilizando recursos de brasagem e forjamento. Existem vestígios que a 4.000 a.C. já se utilizava a soldagem para união de materiais, pois foi encontrado no Museu do Louvre, na França, um pingente de ouro fabricado na Pérsia, com indícios de ter sido soldado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Entretanto, foi apenas na Idade Média que se verificou os primeiros procedimentos de soldagem fundamentados e registrados, como armaduras, armas e diversos utensílios da época.

Inicialmente, os primeiros metais minerados e utilizados pelo homem foram o cobre e o estanho, que posteriormente sua junção resultaria em uma das ligas metálicas mais importantes da época, o bronze. Com o passar do tempo, o homem começou a dominar a fabricação do aço, que era um material mais escasso e de alto custo, sendo fabricado pela cementação de tiras finas de ferro. Assim, as ferramentas eram fabricadas com ferro e com tiras de aço soldadas nos locais de corte (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2009), durante esse período, a soldagem foi um processo muito importante, porém, sua relevância começou a reduzir com o crescimento de novas tecnologias que visavam obter ferro fundido através da energia produzida em rodas d'água, e mais tarde com a invenção do alto-forno, colocando a fundição em um lugar de destaque.

A soldagem voltou a ter evidência na história industrial no século XIX, quando sua tecnologia começou a mudar drasticamente. Em 1810, o químico e físico Sir Humphrey Davy fez algumas experiências elétricas para uma exposição em Paris, fazendo assim, o primeiro arco elétrico. Davy, além de futuramente ter feito toda a diferença na união de metais, também ficou conhecido como vários outros feitos na história da eletroquímica (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Logo depois, veio o processo de soldagem por resistência, desenvolvido em 1856 por James Joule, que foi capaz de fazer a fusão de um pouco de arame de cobre através de um aquecimento por resistência elétrica. Após alguns anos, esse processo foi aprimorado por Elihu Thomson, em 1886, construindo as primeiras máquinas de soldagem por resistência, que foram

usadas inicialmente na soldagem de topo (ESAB, 2005).

Por volta de 1890, Nicolai Slavianoff e Charles Coffin desenvolveram de forma independente, o processo de soldagem a arco eletrodo metálico nu. Em seguida, veio o processo de soldagem que se tornaria o mais utilizado no mundo, a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, em 1904 pelo sueco Oscar Kjellberg (ESAB, 2005).

Já em 1926, H. M. Hobart e P. K. Denver utilizaram gás inerte como proteção do arco, o que resultou em uma melhora na resistência mecânica e no aspecto visual da soldagem de uma forma geral (ESAB, 2005).

A Segunda Guerra Mundial contribuiu para o avanço de diversos setores industriais, pois havia há necessidade de um processo de união metálica para unir metais de liga leve com melhor qualidade para a indústria aeronáutica. Foram feitos diversos experimentos utilizando como proteção gás inerte, até descobrirem o processo de soldagem GTAW, que foi aprimorado em 1940 (ESAB, 2005).

3.2 Definição de Soldagem

Encontra-se na literatura diversas formas de definir o processo de soldagem. Em algumas, é apresentado como o processo de união somente de peças metálicas, enquanto em outras apontam que deve existir um metal de adição na junta de união. Apresentamos algumas dessas tentativas de definição:

“Soldagem é a operação que visa a união de duas ou mais peças, assegurando na junta, a continuidade das propriedades químicas e físicas” (QUITES; DUTRA, 1979). Observa-se que esta definição pode excluir alguns processos onde é soldado diferentes materiais entre si.

“Processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem uso de pressão ou material de adição.” Definição adotada pela AWS (American Welding Society). Esta definição é tratada apenas de forma operacional e não conceitual.

Conclui-se que o processo de soldagem ainda não conseguiu ser precisamente definida, mas que isso não impediu o seu desenvolvimento e aplicação.

Conforme estas definições, os processos de soldagem podem ser classificados em dois grupos, que são baseados de acordo com o procedimento para a produção da solda. São estes,

os processos de soldagem por pressão (ou deformação) e os processos de soldagem por fusão, demonstrados na Figura 3.1 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

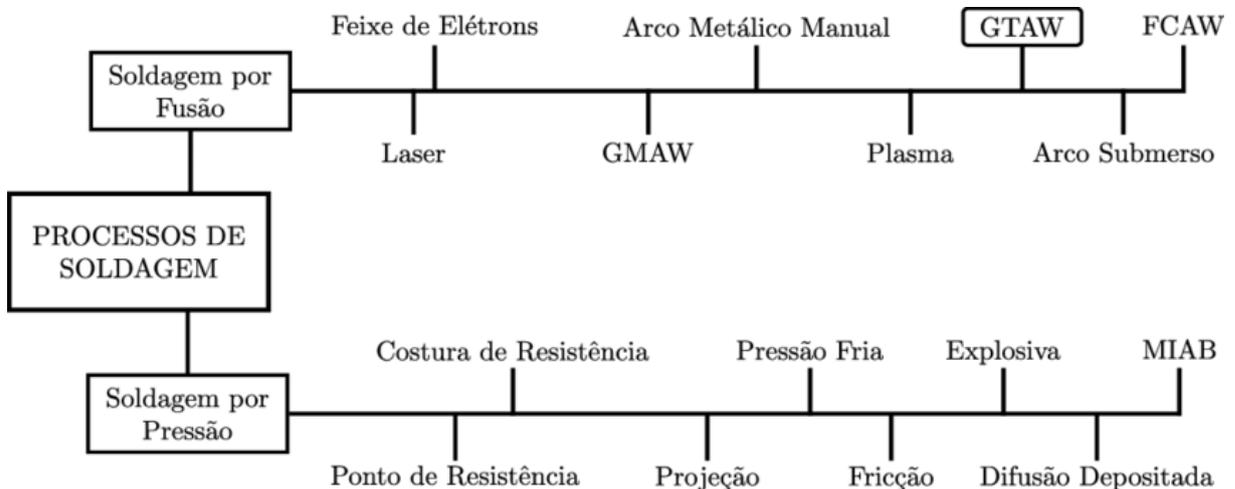


Figura 3.1 – Classificação de alguns dos processos de soldagem mais importantes (Adaptado de VELASCO, 2010).

3.3 Terminologia da Soldagem

No estudo da soldagem encontra-se muitos termos com significados específicos para essa área. Será apresentado a seguir os termos utilizados com mais frequência, de modo a tornar a compreensão do trabalho mais fácil.

Como visto na definição adotada pela AWS, a **soldagem** é o processo de união de materiais e a **solda** é o resultado deste processo.

O **metal de base** é o material da peça que está sendo soldada. É recomendado que a escolha do metal de base tenha uma boa **soldabilidade**, ou seja, um material de fácil soldagem.

Durante a soldagem por fusão, muitas vezes é necessário que um material seja adicionado para que haja a formação da solda, isto é, este **material de adição** é fundido pela fonte de calor e misturado com o metal de base também fundido, formando a **poça de fusão**, que é justamente esta região em fusão. A escolha do metal de adição deve ser de acordo com o metal base, devido as suas características e composições similares (MODENESI, 2008).

A **penetração**, por sua vez, é a distância da superfície primária do metal de base até o ponto onde termina a fusão. A Figura 3.2 ilustra esses termos.

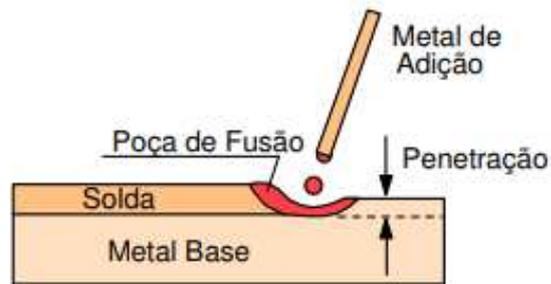


Figura 3.2 – Metal de base, de adição, poça de fusão e penetração (Adaptado de MODENESI, 2008).

A **junta** de solda é a região onde duas ou mais peças serão unidas pela soldagem. Os principais tipos de junta são: de topo, de ângulo, de canto, de aresta ou sobreposta. Elas são apresentadas na Figura 3.3.

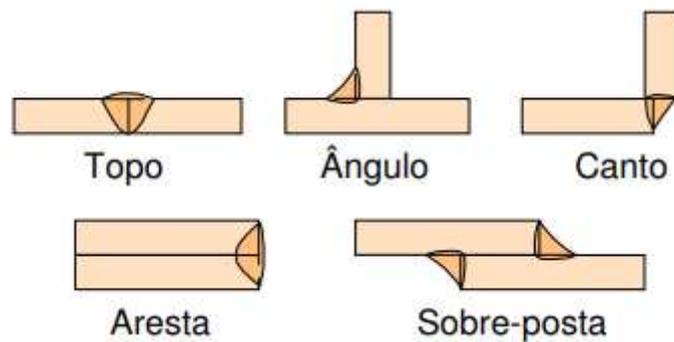


Figura 3.3 – Tipos de junta (Adaptado de MODENESI, 2008).

Os vários tipos de junta são determinados através do posicionamento das peças para a soldagem. Frequentemente, seja pela facilidade que as peças têm de se saírem de lugar ou pela dimensão destas peças, se faz necessário uma adaptação nas peças, na forma de cortes que visam facilitar a solda com a penetração almejada. O **chanfro** são essas aberturas geradas pelos cortes, com a finalidade de conter a solda (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A Figura 3.4 ilustra os principais tipos de chanfro utilizados em soldagem de juntas de topo.

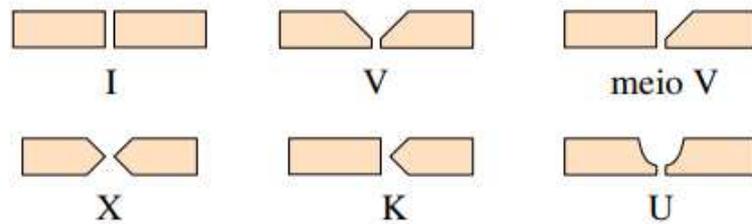


Figura 3.4 – Tipos de chanfro (Adaptado de MODENESI, 2008).

Marques, Modenesi e Bracarense (2009) citam os principais elementos que compõem um chanfro (Figura 3.5):

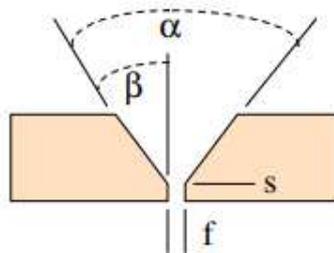


Figura 3.5 – Elementos de um chanfro (Adaptado de MODENESI, 2008).

O encosto, face da raiz ou nariz (s) é a parte não chanfrada de um componente da junta.

A abertura, folga ou fresta (f) é a menor distância entre as peças a serem soldadas.

O ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel (β) é o ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta.

E o ângulo de chanfro (α) que é a soma dos ângulos de bisel dos componentes da junta.

A região mais profunda do cordão de solda é denominada raiz. Normalmente é a região de mais difícil soldagem, possuindo uma maior predisposição à formação de descontinuidades na solda. É a região onde o cordão de solda está junto da fresta e do encosto.

A face é a superfície oposta à raiz da solda; a **margem** é a linha de encontro entre a face da solda e a superfície do metal de base; e a **cobre junta** é uma peça inserida na parte inferior da solda, com a função de conter o metal fundido durante a processo de soldagem (MODENESI, 2008).

O **passe** é um depósito de material obtido por apenas uma poça de fusão. Uma solda pode ser realizada em apenas um passe ou vários. E o **reforço** é definido como a “altura máxima

alcançada pelo excesso de material de adição, medida a partir da superfície do material de base” (MODENESI, 2008, p. 4).

Todas essas regiões presentes em uma solda de topo são mostradas na Figura 3.6.

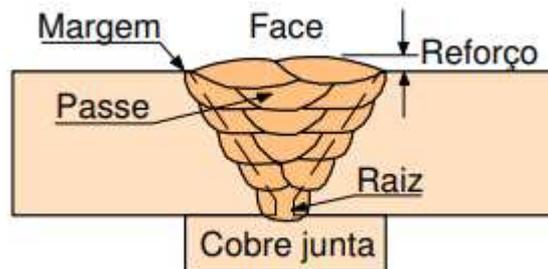


Figura 3.6 – Regiões de soldas de topo (Adaptado de MODENESI, 2008).

Para Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a posição em que a peça será soldada e seu eixo de solda, indica a posição de soldagem. As posições podem ser plana, horizontal, vertical ou sobre cabeça.

A soldagem plana é realizada no lado superior de uma junta e a face da solda é praticamente horizontal.

Na soldagem horizontal, o eixo da solda é praticamente horizontal, porém sua face é inclinada. E na vertical, o eixo da solda é praticamente na vertical, podendo ser na direção ascendente ou descendente.

Por fim, na soldagem sobre cabeça, a mesma é realizada no lado inferior de uma solda de eixo praticamente horizontal.

A Figura 3.7 apresenta as posições de soldagem para uma solda de topo.

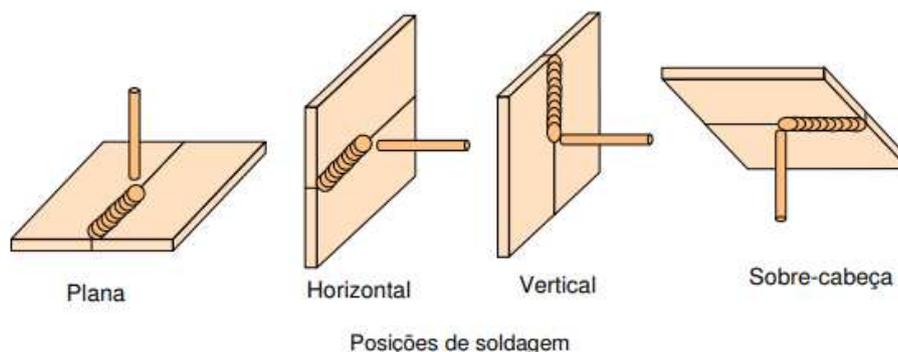


Figura 3.7 – Posições de soldagem para solda de topo (Adaptado de MODENESI, 2008).

Como mostra a Figura 3.8, uma junta soldada por fusão é formada por três regiões: a zona fundida (ZF), a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base (MB), que já foi definido anteriormente.

A **zona fundida** é a região que em algum momento durante o processo de soldagem, esteve no estado líquido. Ela é formada pelo metal de solda, que é composto pela parte fundida do metal de base com o metal de adição.

Já a **zona termicamente afetada** é a região do metal base que foi aquecida durante a soldagem, provocando alterações na microestrutura e propriedades do material (MODENESI, 2008).

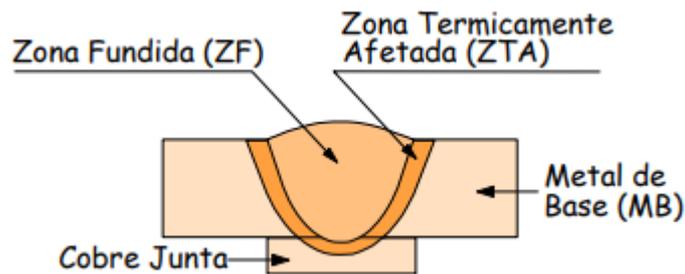


Figura 3.8 – Representação esquemática da seção transversal de uma solda de topo (Adaptado de MODENESI, 2008).

Marques, Modenesi e Bracarense (2009), aponta que a soldagem pode ser classificada conforme o seu modo de execução, podendo ser manual, semiautomática, mecanizada ou automática. Elas se diferem de acordo com o grau de atuação do ser humano no processo.

O processo manual é aquele em que “toda a operação é realizada e controlada manualmente pelo soldador”.

Já a soldagem semiautomática é realizada com o controle automático da alimentação do metal de adição, porém, o posicionamento da tocha e seu deslocamento é feita de forma manual pelo soldador.

O processo mecanizado, assim como o semiautomático, é realizado com o controle automático da alimentação do metal de adição, mas com o acréscimo de ter também o controle do deslocamento do cabeçote de soldagem pelo equipamento. Entretanto, o posicionamento e acionamento do equipamento e a supervisão de toda a operação é de responsabilidade do soldador.

Por fim, a soldagem automática é aquela em há “controle automático de praticamente todas as operações necessárias para a sua execução”.

3.4 Processo de Soldagem GTAW

A soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) ou também conhecida por soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), é um processo de soldagem que consiste na união dos metais por meio do aquecimento e fusão destes por meio de um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a região de soldagem e o eletrodo são protegidos por uma nuvem de gás inerte, geralmente o argônio ou o hélio, soprado pelo bocal da tocha. Neste processo, ilustrado na Figura 3.9, pode-se utilizar metais de adição, e quando utilizada é justamente na poça de fusão. Também pode ser executado de forma manual ou automática.

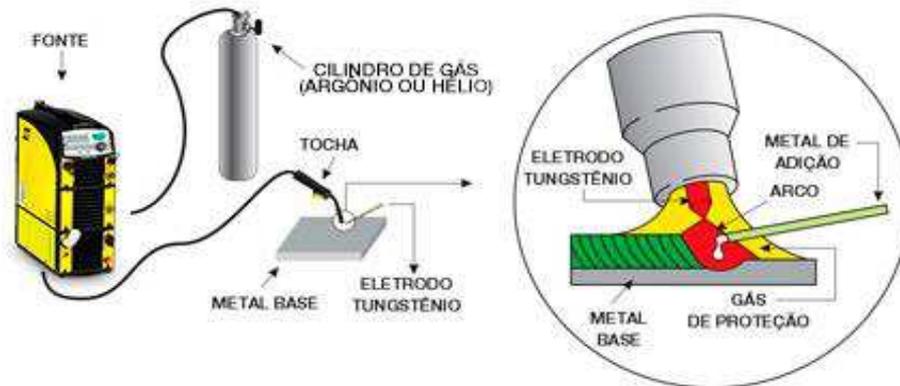


Figura 3.9 – Processo de soldagem GTAW (Adaptado de ESAB, 2019).

As principais variáveis do processo de soldagem GTAW são “[...] a tensão do arco elétrico, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e o gás de proteção. Deve-se considerar que as variáveis não agem especificamente de forma independente [...]” (BRACARENSE, 2000, p.2), sendo assim, cada variável tem influência sobre a outra.

Para Modenesi (2012), a corrente de soldagem é uma das variáveis mais importantes do processo, tendo uma forte influência na penetração da solda. Maiores correntes causam uma maior penetração, permitindo a soldagem de chapas mais espessas ou um aumento na

velocidade de soldagem.

O gás de proteção é, em geral, fornecido por cilindro ou cilindros de alta pressão com regulador de vazão. A vazão de gás depende de sua composição, da velocidade de soldagem, das condições de ventilação no local de trabalho, da distância do bocal à peça, da posição de soldagem e do tipo do metal sendo soldado. Em princípio, a vazão deve ser suficiente para garantir a proteção da região de soldagem contra o ar atmosférico. Por outro lado, uma vazão excessiva aumenta o custo da operação e, em casos extremos, pode tornar ineficiente a proteção, devido à turbulência gerada pela passagem do gás em alta velocidade (MODENESI, 2012).

Os equipamentos básicos utilizados nesta soldagem consistem em uma mesa de soldagem, uma fonte de energia de corrente constante, contínua ou alternada, dependendo do material a ser soldado, cabos, uma tocha de soldagem com eletrodo de tungstênio, uma fonte de gás de proteção e uma unidade de alta frequência, para a abertura do arco (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

3.5 Processo de Soldagem SMAW

O processo de soldagem com Eletrodo Revestido ou SMAW (Shielded Metal Arc Welding) consiste na união dos metais realizada através do calor liberado por um arco elétrico mantido entre um eletrodo revestido, que é consumível, e a peça (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

A Figura 3.10 ilustra o processo de soldagem com Eletrodo Revestido.

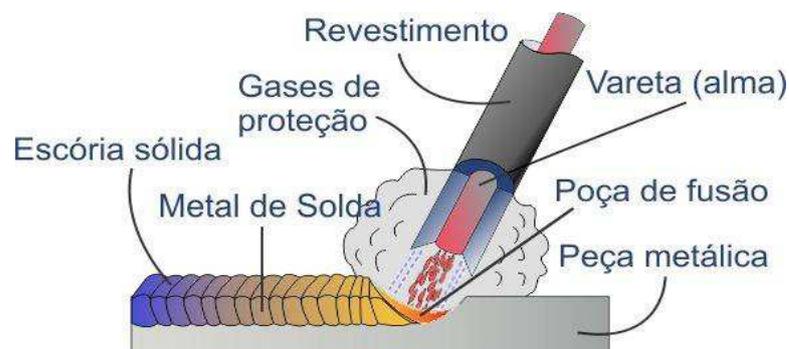


Figura 3.10 – Processo de soldagem SMAW (Adaptado de Heavy Duty, 2019).

O eletrodo revestido consiste de uma vareta metálica, chamada ‘alma’, trefilada ou fundida, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento da junta. A alma é recoberta por uma mistura de diferentes materiais, numa camada que forma o ‘revestimento’ do eletrodo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p.182).

Para Marques, Modenesi e Bracarense (2009), este revestimento tem como principais funções: proteger o metal de solda e a poça de fusão da corrosão durante o processo, estabilizar e direcionar o arco elétrico, isolar a alma de aço do eletrodo, adicionar elementos de liga ao metal de solda e controlar a sua integridade.

Quando comparada aos outros processos de soldagem, há uma grande vantagem do SMAW em relação aos demais, visto que os equipamentos básicos para sua realização são de configuração bem simples e consistem basicamente em uma fonte de energia, um eletrodo, um alicate para fixação dos eletrodos, cabos de interligação, pinças para ligação à peça e equipamentos de proteção individual e limpeza de solda (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Os eletrodos revestidos são definidos de acordo com as especificações definidas pela AWS (American Welding Society) e também é levado em consideração a composição química do metal de solda, as propriedades mecânicas do eletrodo, o tipo de revestimento e a posição da soldagem.

3.6 Aço Inoxidável AISI 304

De acordo com a ISSF (2019), a humanidade utiliza o ferro há bastante tempo. Contudo, apenas nos últimos 150 anos foi que os metalúrgicos aprenderam a fabricar, verificar e analisar os aços e suas propriedades, além de fabricá-los em grande escala com uma certa qualidade.

No decorrer do século XIX, foi descoberto por diversos cientistas, que os aços com liga de cromo apresentavam uma ótima resistência à corrosão e oxidação. Porém, isto não era conhecido até os primeiros anos da década de 1900, quando o primeiro aço inoxidável foi patenteado e fabricado. Esses acontecimentos marcaram o início da indústria do aço inoxidável, que com sua constante evolução ao longo do tempo, segue colaborando consideravelmente para o desenvolvimento mundial (ISSF, 2019).

Os aços inoxidáveis são classificados em três diferentes grupos, de acordo com sua composição química, podendo ser martensíticos, ferríticos e austeníticos. Os martensíticos são compostos por ligas de Fe-Cr, com partes de sua composição austeníticas, sendo desta maneira,

capazes de endurecer através do tratamento térmico de têmpera. Os ferríticos também são ligas Fe-Cr, porém ferríticas na sua essência, o que faz com que eles não possam ser endurecidos por meio da têmpera. E por fim, os austeníticos, que são ligas Fe-Cr-Ni que não são endurecidos por meio da têmpera, e que prevalece a composição austenítica após um tratamento térmico comercial (SILVA e MEI, 1988).

Segundo Fried. Krupp (1912), no início do século XX, a dificuldade de se obter um material resistente à corrosão e oxidação começava a ser resolvida em diversos países simultaneamente, através das descobertas dos aços inoxidáveis ferríticos (1911) e martensíticos (1912). Já no final de 1912, o Dr. Breno Straub e o metalúrgico Dr. Eduard Maurer, desenvolveram em um dos laboratórios da empresa Krupp AG, situada na Alemanha, os aços inoxidáveis austeníticos, que continham na sua composição 20% de Cromo, 7% de Níquel e 0,25% de Carbono (apud SOUZA, 2006).

Existem diversas composições químicas dos materiais que se diferem, de acordo com a norma de cada país, para cada exigência e aplicação. Conforme Padilha e Guedes (1994 apud SOUZA, 2006), a norma americana AISI (American Iron Steel Institute) revela os principais elementos de liga contidos no aço inoxidável austenítico AISI 304, que foi o material de estudo deste trabalho.

Os elementos de liga apresentam atributos específicos que provocam diferentes efeitos nas propriedades do material. Como o aço inoxidável austenítico é basicamente uma liga de Fe-Cr-Ni com a presença de outros elementos, é importante estudar e analisar os efeitos que os principais elementos podem provocar no material.

O Carbono (C) proporciona uma forte estrutura austenítica e melhora consideravelmente a resistência mecânica, porém pode reduzir a resistência à corrosão intragranular (LEFFLER, 2008).

O Manganês (Mn) é utilizado principalmente para melhorar a ductilidade a quente, sendo que também opera em baixas temperaturas como um estabilizador da austenita. Ainda melhora a solubilidade do nitrogênio, sendo empregado para obter altos teores de nitrogênio nos aços austeníticos (LEFFLER, 2008).

O Silício (Si), tanto em altas e baixas temperaturas quanto em soluções oxidantes, promove um aumento da resistência à oxidação (LEFFLER, 2008).

O Fósforo (P), que também é considerado como uma impureza, ainda que melhore a resistência à corrosão e ao desgaste, torna o material mais frágil, além de reduzir a resistência

ao choque (SOUZA, 2006).

O Enxofre (S) é utilizado com a finalidade de aumentar a usinabilidade do material, porém dependendo dos teores aplicados, pode gerar uma redução da resistência à corrosão, ductilidade e outras propriedades, como a soldabilidade do material (LEFFLER, 2008).

O Cromo (Cr) é o elemento mais importante da liga, por ser o grande responsável pelo aumento da resistência à corrosão e oxidação. Porém, a quantidade de Cromo deve ser moderada, visto que a austenita pode ser desestabilizada, podendo formar outras fases (LEFFLER, 2008).

E o Níquel (Ni), que também apresenta um papel muito influente nessa liga, além de aumentar a ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão do material, também é o principal estabilizador da estrutura austenítica (LEFFLER, 2008).

Silva e Mei (1988) destacam que os aços inoxidáveis apresentam uma das melhores propriedades de resistência quando submetidas a temperaturas elevadas. Por possuírem uma estrutura cristalina CFC (Cúbica de Face Centrada), estes aços também apresentam ótimos valores de resistência ao impacto, além de não sofrerem o fenômeno de transição dúctil-frágil, tornando-se essenciais quando há necessidade de uma boa tenacidade.

3.7 Ensaio Mecânicos dos Materiais

A determinação das propriedades mecânicas, dos defeitos e da descontinuidade de materiais é realizada por meio de vários tipos de ensaios.

Segundo Alves e Taniguti (2011), os ensaios mecânicos podem ser classificados quanto à integridade e quanto à velocidade. No que se diz respeito à integridade, podem ser divididos em ensaios destrutivos e não-destrutivos.

Os ensaios destrutivos são aqueles que promovem a ruptura ou inutilização do material a ser ensaiado. Tendo como exemplos o ensaio de tração, dureza, dobramento, entre outros. E os ensaios não-destrutivos são aqueles que não danificam o material a ser ensaiado e são capazes de detectar, durante as diversas fases do processo de fabricação, defeitos ou descontinuidades que dificilmente seriam encontradas por meio de ensaios destrutivos. Dessa maneira aumentam a confiabilidade das propriedades dos materiais e, por consequência, dos produtos finais. Exemplos: raios X, ultrassom, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e outros (ALVES; TANIGUTI, 2011).

Já no que se trata à velocidade, Claudino (2014) classifica os ensaios em estáticos, dinâmicos ou de carga constante. Os ensaios estáticos são aqueles em que a carga é aplicada lentamente, como é por exemplo nos ensaios de tração e compressão. Nos ensaios dinâmicos, a carga é aplicada rapidamente ou ciclicamente, como é visto nos ensaios de fadiga e impacto. E nos de carga constante, a carga é aplicada durante um longo período, como no ensaio de fluência.

Utiliza-se normalmente corpos de prova (amostra representativa do material) para o ensaio mecânico, já que por razões técnicas e econômicas não é praticável realizar o ensaio na própria peça, que seria o ideal (CLAUDINO, 2014).

Geralmente, usa-se normas técnicas para o procedimento das medidas e confecção do corpo de prova para garantir que os resultados sejam comparáveis. Entre as mais conhecidas e usadas temos a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e a ASTM (American Society for Testing and Materials) (ALVES; TANIGUTI, 2011).

3.7.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um dos mais importantes ensaios mecânicos, devido a praticidade de sua realização e facilidade na análise dos resultados. Ele se baseia na aplicação de uma carga ou força de tração, gradativamente crescente, em um corpo de prova (amostra do material), como ilustrado na Figura 3.11, gerando uma deformação na mesma direção da força aplicada (axialmente), de forma que o material tende a esticar-se ou alongar-se (ZOLIN, 2010).

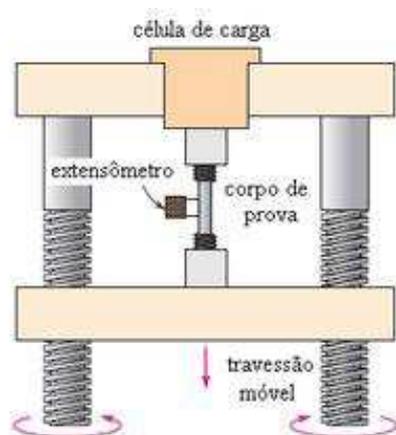


Figura 3.11 – Representação esquemática do ensaio de tração (Adaptado de InfoEscola, 2019).

Para Souza (1982), é a melhor maneira para se determinar as propriedades mecânicas de um metal por tração e ensaiar um corpo de prova retirado da peça. Assim, os ensaios de tração geralmente são feitos em corpo de prova normalizados pelas várias associações de normas técnicas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) indica as formas e dimensões dos corpos de prova para cada caso.

Um corpo de prova pode ter sua parte útil com secção circular ou retangular, dependendo da forma e tamanho do produto acabado do qual foi retirado. Em particular, corpos de prova retirados de placas, chapas ou lâminas têm secção retangular, com espessura igual à espessura da placa ou chapa ou lâmina e corpos de prova circulares serão feitos se o produto acabado for de secção circular ou irregular, ou produzido por fundição, ou ainda, que tenha espessura excessivamente grande que exija um esforço muito grande para rompê-lo (SOUZA, 1982).

A parte útil de um corpo de prova é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do metal e a cabeça do corpo de prova é a parte destinada apenas à fixação na máquina de ensaio, podendo ou não ser rosqueada, conforme o tipo das garras da máquina (SOUZA, 1982).

Souza (1982) cita que esses corpos de prova são usados para quase todos os metais ou ligas metálicas. Uma única exceção é o caso do ferro fundido cinzento, onde a forma e o tamanho do corpo de prova são diferentes dos demais. Uma vez que, para os ferros fundidos cinzentos, a única propriedade mecânica importante é o limite de resistência, a parte útil tem comprimento reduzido, em comparação ao comprimento da cabeça.

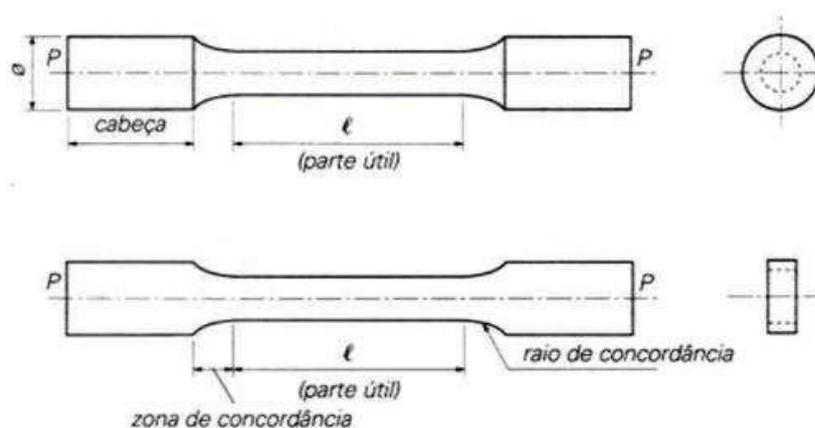


Figura 3.12 – Corpos de prova de (a) secção circular e (b) secção retangular para o ensaio de tração (Adaptado de Infosolda, 2019).

Para Garcia, Spim e Santos (2012), por meio deste ensaio é possível, por meio da curva tensão-deformação, analisar diversas propriedades mecânicas dos materiais, como os limites de escoamento e de resistência à tração, o grau de deformação e o tipo de fratura que ocorreu.

Na curva da Figura 3.13 observam-se quatro regiões de comportamentos diferentes, e cada região caracteriza um determinado tipo de deformação sofrida pelo corpo de prova durante a execução do ensaio (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

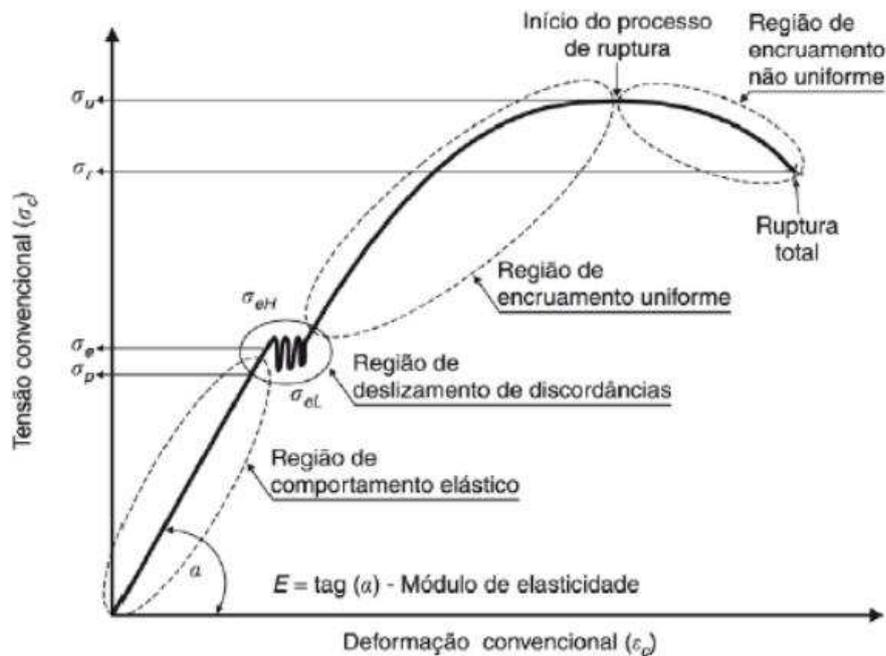


Figura 3.13 – Curva tensão-deformação convencional (Adaptado de GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Região de comportamento elástico: corresponde à primeira região de deformação do corpo de prova. Nessa região observa-se o fenômeno do efeito elástico, em que, ao cessar a aplicação de carga, o corpo de prova retoma suas dimensões originais. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012)

Região de deslizamento de discordâncias: corresponde ao início da deformação plástica do material; nos estágios iniciais dessa deformação, a tensão pode sofrer oscilações que dependerão da acomodação das discordâncias no interior da rede cristalina do material. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012)

Região de encruamento uniforme: corresponde ao encruamento propriamente dito, e, à medida que os planos cristalinos escorregam entre si, estes são gradativamente freados ou travados pelas discordâncias que atingem os contornos de grão, exigindo cada vez mais tensão

para que a deformação continue. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012)

Região de encruamento não uniforme: corresponde à última região de deformação; nesta passa a existir o processo de ruptura do corpo de prova. Para um material de alta capacidade de deformação permanente, o diâmetro do corpo de prova começa a decrescer rapidamente ao se ultrapassar a tensão máxima. Assim, a carga necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura total. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012)

Cada região é definida pelas seguintes tensões:

Tensão proporcional (limite de proporcionalidade): definida como a tensão máxima até a qual vale uma relação linear entre tensão e deformação. Estabelece o limite da deformação elástica. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012)

Tensão de escoamento (limite de escoamento): definida como a tensão de início da deformação plástica. Na prática, pode-se assumir como igual à tensão proporcional. Para alguns materiais, a passagem da região elástica para a plástica ocorrerá com uma oscilação nos níveis de tensão, em que se definem as tensões máximas e mínimas da flutuação (tensão de escoamento inferior e tensão de escoamento superior) (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Tensão máxima (limite de resistência à tração): definida como a máxima tensão que o material suporta sem apresentar nenhum traço de fratura interna ou externa no corpo de prova. Após esse nível de tensão, o material iniciará o processo de fratura (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Tensão de ruptura: definida como a tensão na qual ocorrerá a fratura definitiva do corpo de prova (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Neste experimento, podemos certificar que quase todas as deformações ocorridas no corpo de prova possuem uma distribuição uniforme ao longo do seu material, no mínimo até alcançar uma carga máxima, já próximo ao término do ensaio. Como é possível a aplicação crescente da carga de forma moderada e lenta, este ensaio é capaz de determinar de modo suficiente a resistência do material, além de aferições exatas da variação dessas deformações em função da tensão aplicada (SOUZA, 1982). É por meio da curva tensão-deformação que os especialistas conseguem realizar uma análise das propriedades mecânicas de determinado material.

3.7.2 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento concede dados qualitativos acerca do grau de deformação que um determinado material suporta até o momento da fratura, ou seja, a sua ductilidade. Assim como o ensaio de tração, este ensaio também é bastante executado nos laboratórios de todo o mundo por ser de simples realização.

Este ensaio, ilustrado na Figura 3.14, se baseia no dobramento do corpo de prova de eixo retilíneo e secção circular, tubular, retangular ou quadrada, firmado em dois suportes separados por uma distância específica que depende do tamanho da amostra, mediante um cutelo que emprega uma força de flexão (Q) no seu centro até atingir um determinado ângulo de dobramento (θ) preestabelecido (SOUZA, 1982).

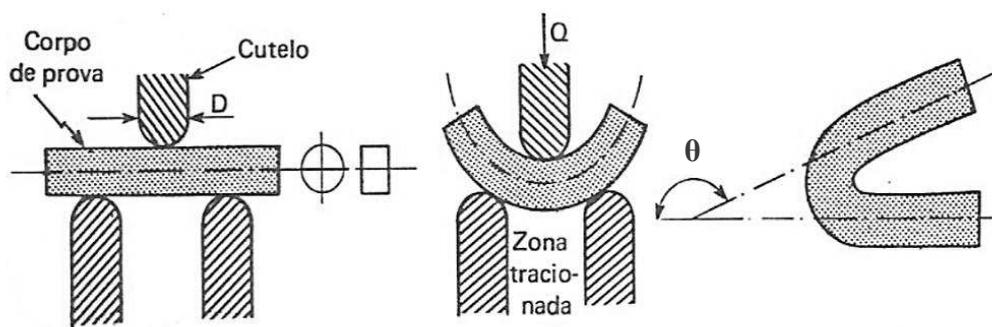


Figura 3.14 – Representação esquemática do ensaio de dobramento guiado (Adaptado de Biopdi, 2019).

De modo geral, a carga aplicada no ensaio não é muito importante e não há necessidade de ser mensurada. O cutelo possui um diâmetro (D) que varia de acordo com a rigorosidade do teste e podendo também ser recomendado nas especificações, normalmente em função do diâmetro ou da espessura do corpo de prova.

Segundo Souza (1982), o ângulo de dobramento, que em geral é de 90° , 120° ou 180° , também estipula a rigorosidade do ensaio. Ao alcançar esse ângulo, é realizada a olho nu, uma análise na zona tracionada da amostra, em que não se deve observar trincas, fissuras ou fendas. Do contrário, o material não obteve um resultado satisfatório no teste.

"Como o dobramento pode ser realizado em qualquer ponto e em qualquer direção do corpo de prova, ele é um ensaio localizado e orientado, fornecendo assim, uma indicação da

ductilidade em qualquer região desejada do material" (SOUZA, 1982, p. 139).

Existem três variações do ensaio de dobramento. O dobramento livre, dobramento semiguiado e o dobramento guiado. No primeiro caso, o dobramento é feito através da aplicação de uma força nos limites do corpo de prova, sem que seja aplicada força na zona tracionada, como mostra a Figura 3.15.

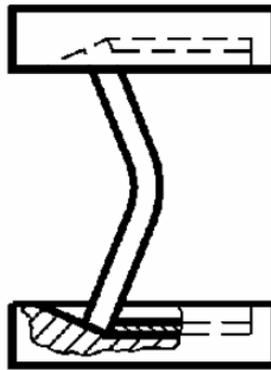


Figura 3.15 – Representação esquemática do ensaio de dobramento livre (Adaptado de ALVES; TANIGUTI, 2011).

Já no segundo, um lado da amostra é engastado e o dobramento é realizado na outra extremidade ou em qualquer outra região do corpo de prova, como indicado na Figura 3.16.

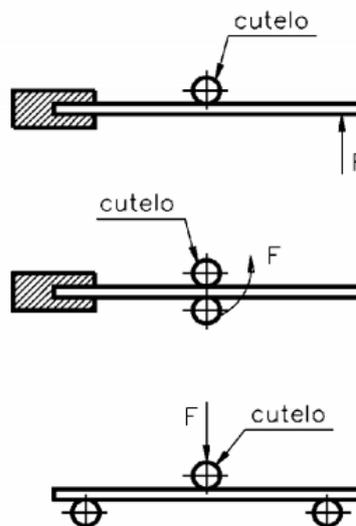


Figura 3.16 – Representação esquemática do ensaio de dobramento semiguiado (Adaptado de ALVES; TANIGUTI, 2011).

Nestes procedimentos, a velocidade não é uma condição crucial, desde que não haja um exagero na velocidade aplicada (SOUZA, 1982).

O ensaio de dobramento em corpos soldados tem a finalidade de avaliar ou qualificar profissionais e é também usado na aprovação de processos na área de soldagem. Nesses casos emprega-se o ensaio de dobramento guiado. No caso específico de avaliação da qualidade da solda empregada no processo utiliza-se o dobramento livre e costuma-se medir o alongamento da face da solda. O resultado serve para determinar se a solda é apropriada ou não para determinada aplicação (ALVES; TANIGUTI, 2011).

3.7.3 Ensaio de Dureza

No princípio, os ensaios de dureza eram feitos em minerais naturais, com uma escala própria para avaliar a capacidade de determinado material em riscar outro mais macio. Ao decorrer dos anos, foram elaborados métodos quantitativos para apontar o grau de dureza, nos quais um penetrador reduzido é submetido a uma força contra a superfície de um material, sob um estado controlado de carga aplicada. Através da medição da profundidade ou tamanho da impressão resultante, esta é associada a um número indicador de dureza. Quanto menor este índice, mais macio é o material testado (CALLISTER, 2002).

Callister (2002) destaca que estes ensaios são os mais utilizados quando comparados aos outros ensaios mecânicos existentes, pelo fato de ser um ensaio não-destrutivo, dado que o corpo de prova não sofre fratura ou grandes deformações, e pela sua simplicidade e custo-benefício, uma vez que as amostras não necessitam de muita preparação.

A dureza é determinada pela diferença na profundidade de penetração da aplicação de uma pré-carga seguida pela carga principal. Essa pré-carga garante uma maior precisão no ensaio.

É necessária a aplicação da pré-carga para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais, ajudar na fixação do corpo de prova no suporte, além de causar uma pequena deformação permanente, eliminando erros devido à deformação elástica.

O valor de dureza corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraídas a recuperação elástica do material, após a retirada da carga maior, e a profundidade decorrente da aplicação da pré-carga, conforme ilustra a Figura 3.17.

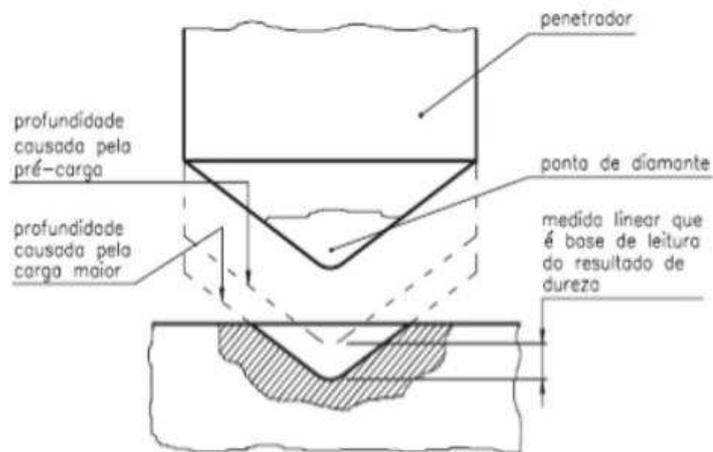


Figura 3.17 – Representação da ponta do durômetro (Adaptado de GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

3.7.4 Ensaio Metalográfico

O ensaio metalográfico é usado para analisar e relacionar as características estruturais do material em questão com as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Ele se divide em duas categorias, a macrografia e micrografia.

De acordo com Colpaert (1974), a micrografia dos metais consiste em analisar os produtos metalúrgicos, com a ajuda de um microscópio, objetivando a definição da composição dos seus elementos e de sua textura. Através do uso de métodos adequados, é possível perceber a textura microscópica do material, destacando assim os diversos grãos que constituem o material.

A relevância deste ensaio se dá pelo fato de que as propriedades mecânicas de um certo material não dependem somente da estrutura de sua composição, como também da sua textura. Analisando-se quimicamente um material, podemos verificar sua composição de elementos. Já nas análises metalográficas, conseguimos dados essenciais acerca de como determinado material obteve as propriedades que ostenta (COLPAERT, 1974).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho envolveu várias atividades, desde a definição do tema até os resultados obtidos, sendo elaborado um fluxograma resumindo todas as atividades realizadas durante este trabalho, o qual pode ser visualizado na Figura 4.1.

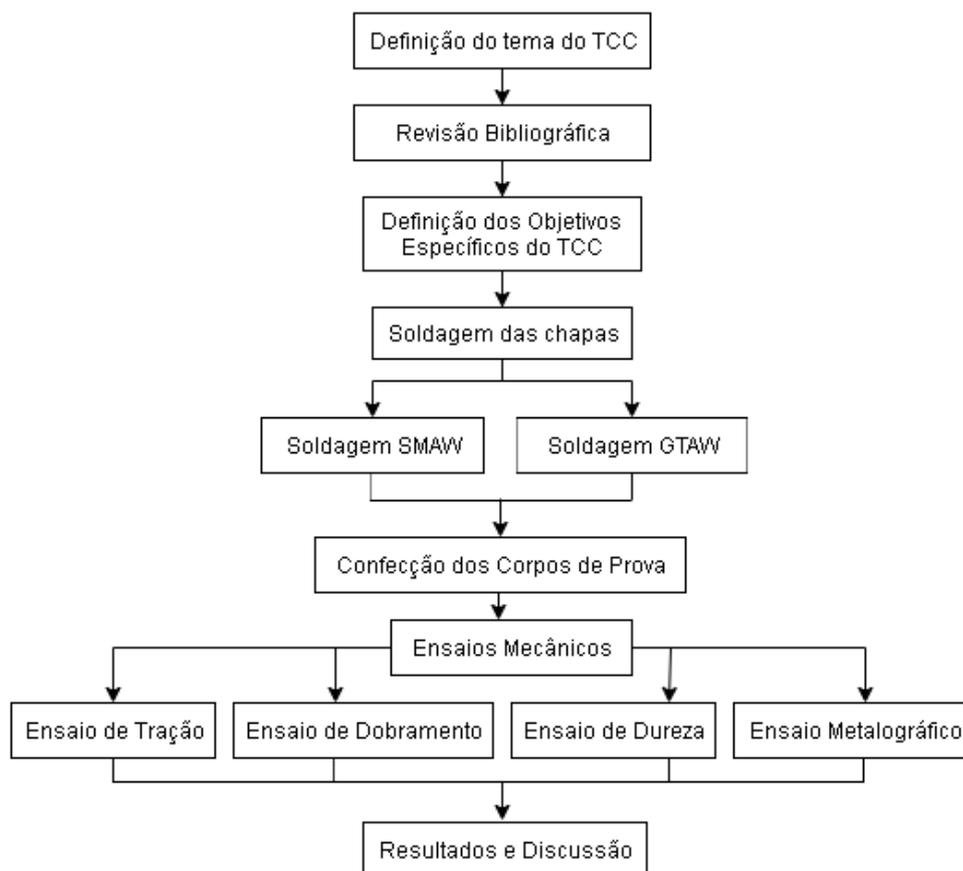


Figura 4.1 – Fluxograma das atividades realizadas durante o trabalho.

Este estudo foi realizado utilizando amostras de chapas de aço inoxidável, com etapas de testes e análises no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalografia – LABEMM, da Universidade Estadual do Maranhão. O procedimento experimental é descrito a seguir.

4.1 Preparações dos Corpos de Prova

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova foram chapas 14 de aço inoxidável AISI 304 com 2 mm de espessura. Sua composição química foi retirada do catálogo

do fabricante. Aperam, que fabrica os aços inoxidáveis da empresa ArcelorMittal, que forneceu o material, e encontra-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 304 (Adaptado de Aperam, 2019).

Composição Química (%)						
C (máx.)	Mn (máx.)	Si (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Cr	Ni
0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	18,00 - 20,00	8,00 - 10,50

Foram utilizadas 4 chapas com as dimensões de 300 x 100 mm, para dois processos de soldagem diferentes. A união de duas destas chapas foi realizada pelo processo de soldagem SMAW e as outras duas pelo processo de soldagem GTAW, conforme mostra a Figura 4.2. A soldagem foi realizada na configuração de junta de topo, com chanfro em I e na posição plana

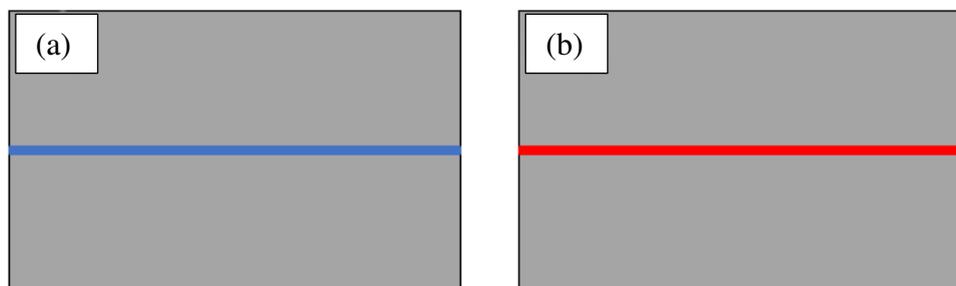


Figura 4.2 – Chapas 300 x 100 mm soldadas com (a) SMAW e (b) GTAW.

Os principais parâmetros de soldagem avaliados foram a tensão e corrente de operação, o consumível e a velocidade de soldagem. Através dos cálculos, foi obtido uma energia de soldagem muito próxima para ambos os processos, podendo assim dizer que os processos estão sob as mesmas condições de calor, sendo este mais um parâmetro de comparação entre eles.

As soldagens das chapas foram realizadas na empresa Metalma Inox & Cia de forma manual, com os parâmetros apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem utilizados.

Parâmetros de Soldagem	Soldagem SMAW	Soldagem GTAW
Tensão de Operação	50 V	50V
Corrente de Operação	55 A	35 A
Velocidade de Soldagem	3,5 mm/s	2 mm/s
Rendimento Térmico	0,85	0,8
Energia de Soldagem	0,67 kJ/mm	0,7 kJ/mm
Consumíveis	ER 6130	ER 308LSi

Na soldagem SMAW foi utilizado o eletrodo com baixo teor de carbono e com revestimento rutilico indicado para a soldagem de aços inoxidáveis, ER 6130 com 2,5 mm de diâmetro, conforme especificação AWS SFA 5.4. O metal de adição utilizado na soldagem GTAW foi o arame inoxidável ER 308LSi com 1,0 mm de diâmetro, conforme especificação AWS SFA 5.9. Suas composições químicas são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Composição química dos consumíveis utilizados nos processos de soldagem (Adaptado de ESAB e Weld-Inox, 2019).

Composição Química (%)							
Consumível	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
ER 6130	0,03	0,80	0,80	19,60	9,90	-	-
ER 308LSi	0,03	1,0 – 2,5	0,65 -1,0	19,5 – 22,5	9,0 – 11,0	0,03	0,03

Após as soldagens das chapas, foi realizado o desbaste do cordão de solda, para a remoção do reforço, com a aplicação de fluido refrigerante para que não houvesse um aquecimento excessivo e assim não afetasse as propriedades mecânicas dos materiais. Logo após este processo, foi feito o corte das amostras (Figura 4.3), respeitando as dimensões requisitadas por cada norma de ensaio.



Figura 4.3 – Corte das amostras na tesoura guilhotina.

Tanto o desbaste quanto os cortes foram realizados no Laboratório de Usinagem – LABUSI da Universidade Estadual do Maranhão. Para o desbaste foi utilizado a fresadora ferramenteira, modelo PK FV3VII da Pinnacle, e para os cortes foi utilizado a tesoura guilhotina para cortar chapas nº 5 da Metalsul.

No total, foram confeccionados 12 corpos de prova com 150 x 15 mm para os ensaios de tração e dobramento, 2 corpos de prova com 60 x 15 mm para os ensaios de dureza e 3 corpos de prova para os ensaios metalográficos, um com 10 x 10 mm e os outros dois com 40 x 15 mm.

4.2 Realizações do Ensaio de Tração

O ensaio de tração, mostrado na figura 4.4, foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão utilizando a máquina universal de ensaios DL 10000 da marca Emic.



Figura 4.4 – Realização do ensaio de tração.

A Figura 4.5 mostra as geometrias dos corpos de prova, que foram usinadas seguindo a norma ASTM A370-92. Eles foram submetidos a uma carga axial ao longo dos seus comprimentos. A resistência à tração foi calculada dividindo a carga máxima pela menor seção transversal do corpo de prova medido antes do ensaio.



Figura 4.5 – Corpos de prova para o ensaio de tração.

Foram realizados três ensaios de tração para cada condição, a fim de se maximizar a confiabilidade dos resultados obtidos.

4.3 Realizações do Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento guiado das chapas, visto na Figura 4.6, foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão utilizando a máquina universal de ensaios DL 10000 da marca Emic. A distância entre os apoios foi ajustada em 40 mm e utilizou-se um cutelo com raio de curvatura de 8 mm, conforme a exigência da norma ASTM E190-92.

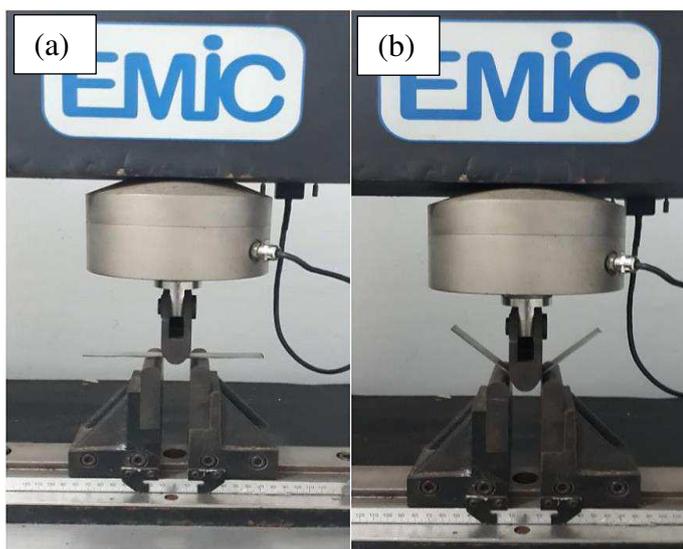


Figura 4.6 – Realização do ensaio de dobramento: (a) antes e (b) depois da deformação.

Os corpos de prova foram posicionados de forma que o cutelo flexionasse o cordão de solda, expondo a sua face, centralizado na chapa e faceando o seu comprimento inteiro. Foram ensaiados três corpos de prova para cada condição (soldagem SMAW e GTAW). A força foi aplicada até que as chapas atingissem um ângulo de 90°.

4.4 Realização do Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell, mostrado na Figura 4.7, foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão utilizando o durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec e seguindo as especificações da norma ASTM E18-15.



Figura 4.7 – Realização do ensaio de dureza Rockwell.

O método de ensaio adotado foi o método Rockwell C com um penetrador cônico de diamante com 120° de conicidade e carga de 10 kgf. Neste ensaio primeiramente foi aplicado uma pré-carga de 3 kgf e em seguida liberada a carga para realizar a penetração do penetrador no material. Após alguns segundos a carga foi retirada e a leitura foi feita na escala externa do mostrador, de cor preta.

A leitura foi realizada na escala externa devido a utilização do penetrador cônico de diamante. Caso fosse utilizado o penetrador esférico, a leitura seria realizada na escala interna, de cor vermelha.

As medições foram realizadas em 16 pontos: 6 medidas para o metal base (MB), 6 para a zona termicamente afetada (ZTA) e 4 medidas para a zona fundida (ZF). As medições foram espaçadas de 2 em 2 mm na ZF, de 3 em 3 mm na ZTA e de 5 em 5 mm no MB de cada uma das amostras.

4.5 Realizações dos Ensaios Metalográficos

A preparação para os corpos de prova para os ensaios metalográficos exige um procedimento rigoroso para que nada influencie os resultados reais das microestruturas. É necessário adotar algumas medidas de segurança para a utilização das máquinas e também para

o manuseio de produtos químicos aos quais os corpos de prova serão submetidos. Os EPI's (Equipamentos de Proteção Individual) que a prática deste ensaio exige são: óculos de proteção, máscara de proteção respiratória, jaleco branco e luvas de borracha. Toda a preparação dos corpos de prova para a realização dos ensaios metalográficos foi realizada no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalografia – LABEMM da Universidade Estadual do Maranhão.

4.5.1 Cortes dos Corpos de Prova

Para o corte dos corpos de prova foi utilizado a cortadora metalográfica Arocor 40 da Arotec, apresentada na Figura 4.8. A amostra foi devidamente refrigerada buscando diminuir a possibilidade de transformações metalúrgicas na superfície da amostra.



Figura 4.8 – Cortadora metalográfica Arocor 40 da Arotec.

Durante a operação de corte, teve-se o máximo de cuidado para não modificar a estrutura da amostra. O corte nunca deve ser contínuo, de modo que não ocorra um aquecimento excessivo por falta de penetração do fluido refrigerante. Deve-se também evitar a rebarba no final do corte para que não dificulte o embutimento, daí a necessidade de usar o disco adequado conforme o material a ser cortado.

4.5.2 Embutimento do Corpo de Prova

As amostras para ensaios metalográfico geralmente são pequenas e de difícil manuseio, tornando necessário fazer um embutimento. Além de facilitar o manuseio da amostra, também evita a danificação da lixa ou do pano de polimento pelas arestas do corpo de prova cortado. Este procedimento consiste em circundar a amostra com um material adequado, formando um corpo único. Ele pode ser feito a frio ou a quente, dependendo das circunstâncias e da amostra a ser embutida.

Depois do corte, a amostra foi levada até a embutidora metalográfica EM30D da Teclago (Figura 4.9). Para a realização do processo a quente, a amostra foi posicionada com a face a ser analisada em contato com o êmbolo inferior da máquina e adicionada a resina de baquelite. Após a adição do referido material, a tampa da máquina foi fechada e deu-se início ao processo de embutimento. A amostra ficou submetida a uma pressão entre 100 e 150 bar até atingir a temperatura de 190°C e, após isto, foi iniciado o processo de resfriamento pela máquina.

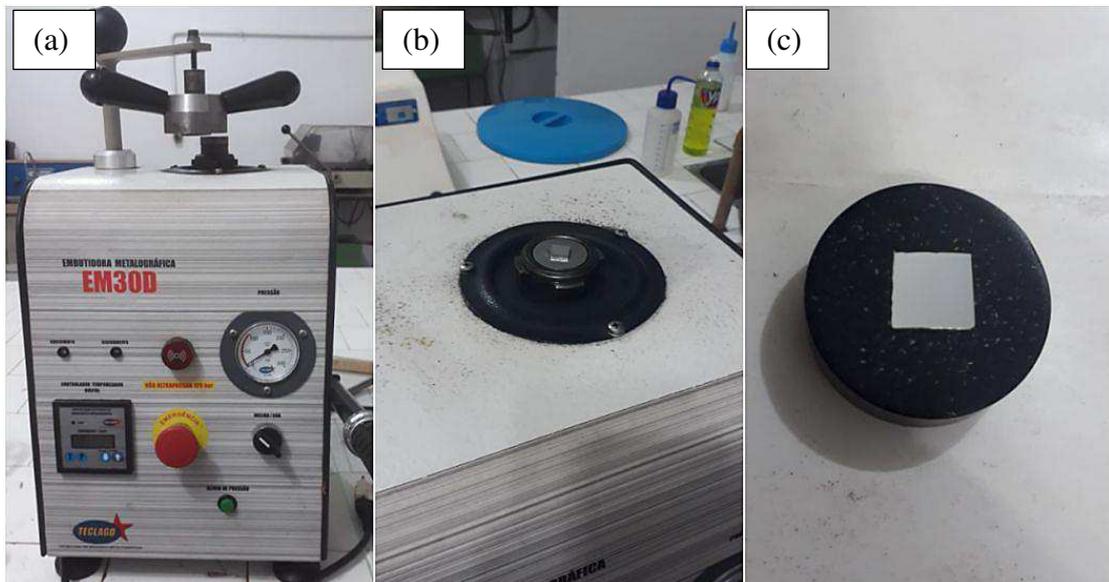


Figura 4.9 – (a) Embutidora metalográfica EM30D da Teclago, (b) posicionamento da amostra e (c) corpo de prova embutido.

Como as dimensões das superfícies a serem analisadas foram grandes o suficiente, o embutimento não foi necessário para as amostras com as juntas soldadas.

4.5.3 Lixamento dos Corpos de Prova

Para o processo de lixamento dos corpos de prova foi utilizado a lixadeira Aropol 2V da Arotec (Figura 4.10). Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica, cada etapa da preparação foi executada cautelosamente. O lixamento é um dos processos mais demorados da preparação de amostras.



Figura 4.10 – Lixamento sendo realizado na lixadeira Aropol 2V da Arotec.

Foram utilizadas lixas abrasivas de SiC com granulometria de #100, #220, #320, #400, #600 e #1200 (Figura 4.11) e água como fluido refrigerante. A granulometria é relatada em números, ou seja, quanto mais baixo for o número, mais grossa é a lixa.



Figura 4.11 – Lixas utilizadas com diferentes granulacões.

As amostras foram posicionadas na lixadeira, começando pela lixa de granulometria #100 e assim sucessivamente até a de granulacão mais fina. Quando as lixas eram trocadas, o sentido de lixamento era invertido em 90° para que os riscos da lixa anterior fossem retirados.

4.5.4 Polimentos dos Corpos de Prova

O polimento é uma operacão que visa um acabamento superficial polido, isento de marcas, em que é utilizado para este fim abrasivos como pasta de diamante ou alumina.

Para o processo de polimento dos corpos de prova foi utilizado a politriz Aropol 2V da Arotec (Figura 4.12), o uso de alumina em suspensão de granulometria de 1 µm como material abrasivo e álcool etílico para lubrificacão.



Figura 4.12 – Polimento sendo realizado na politriz Aropol 2V da Arotec.

Durante o polimento, a pressão aplicada nas amostras foi controlada e as amostras foram movimentadas em sentidos circulares para evitar possíveis defeitos. Após um certo tempo de polimento, as amostras eram limpas com álcool e secadas com ar quente, a fim de verificar se as mesmas já apresentavam uma superfície espelhada.

4.5.5 Limpeza Ultrassônica

Após o polimento, os corpos de prova foram submetidos a uma limpeza ultrassônica através da lavadora ultrassônica UltraCleaner 800 da Unique (Figura 4.13), apenas para complementar o processo de polimento e obter uma limpeza mais profunda.

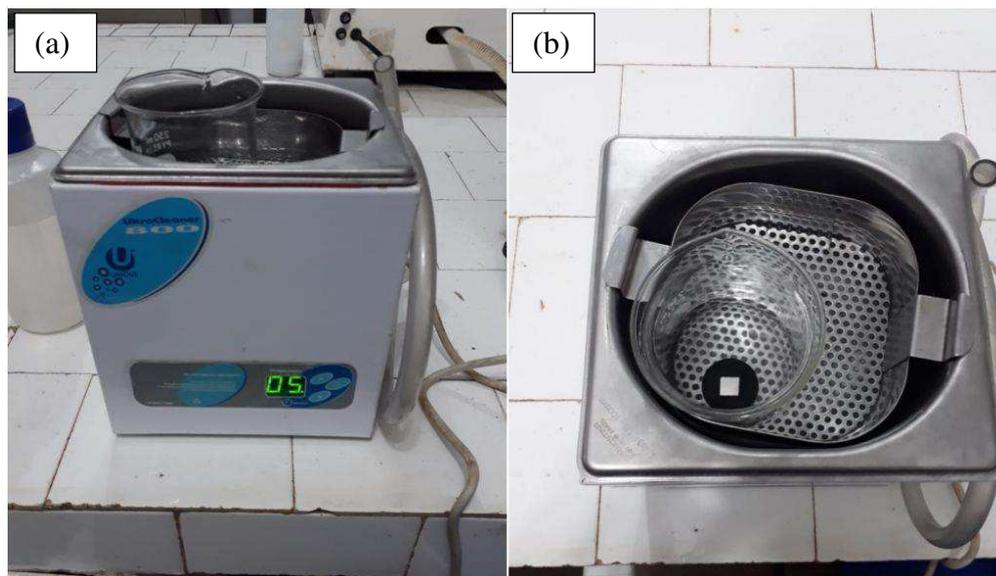


Figura 4.13 – (a) Lavadora ultrassônica e (b) posicionamento da amostra.

O método de limpeza ultrassônica se dá através da cavitação, atuando desde as impurezas da superfície até áreas microscópicas e de difícil acesso. Esse fenômeno consiste no efeito de limpeza por meio de milhões de bolhas, geradas pelo contato entre a água, a solução de limpeza e a frequência do ultrassom, que implodem e criam um vácuo tirando as impurezas.

4.5.6 Ataque Químico

A primeira tentativa foi realizada utilizando uma solução de água régia em uma concentração recomendada pela norma ASTM E407-07 para ataques químicos em metais que tenham o Cromo como elemento principal, como é o caso dos aços inoxidáveis.

O reagente utilizado está listado na Tabela 4.4, assim como sua composição química e o método de ataque realizado.

Tabela 4.4 – Reagente com sua composição química e seu método de ataque.

Reagente	Constituintes	Alíquota	Método de Ataque
Água Régia	Ácido Nítrico	8 mL a 65%	Imersão 1 minuto
	Ácido Clorídrico	12 mL a 37%	
	Álcool Etílico	40 mL a 99,55%	

Conforme mostra a Figura 4.14, a amostra foi imersa na solução de água régia por 30

segundos. Após o ataque a amostra foi lavada em água corrente e álcool para paralisar o processo de corrosão e seca com um soprador de ar quente. Em seguida, foi levada até o microscópio, porém nenhum resultado foi obtido. Desta forma, o procedimento foi repetido por mais 30 segundos, e mesmo assim o resultado obtido foi abaixo do esperado, revelando muito pouco da microestrutura do material.

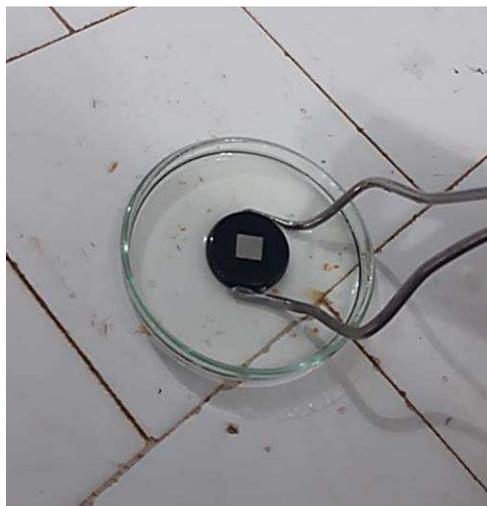


Figura 4.14 – Primeira tentativa de ataque químico com água régia.

Após o primeiro ataque com água régia não apresentar os resultados satisfatórios, foi realizada uma nova tentativa, com o reagente em uma concentração maior, como a Tabela 4.5 mostra. Desta vez, o tempo de imersão da amostra na solução foi de apenas 30 segundos, sendo obtido com esse tempo um resultado satisfatório para se observar a microestrutura do metal de base e da zona termicamente afetada. Contudo, observou-se que esse tempo foi muito longo para a zona fundida, que acabou queimando.

Tabela 4.5 – Reagente mais concentrado, sua composição química e seu método de ataque.

Reagente	Constituintes	Alíquota	Método de Ataque
Água Régia	Ácido Nítrico	40 mL a 65%	Imersão 30 segundos
	Ácido Clorídrico	40 mL a 37%	

Com isso, foi refeito o processo de preparação metalográfica do lixamento, na granulometria #1200, e o polimento da amostra para se realizar um novo ataque. Com a amostra novamente pronta, a mesma foi submetida a uma imersão de apenas 10 segundos (Figura 4.15),

e logo após conseguiu-se obter a microestrutura da zona fundida.



Figura 4.15 – Ataque químico com água régia concentrada.

4.5.7 Análise Microestrutural

Após o processo de ataque químico, as amostras foram analisadas por microscopia óptica (Figura 4.16) no microscópio Axiovert 25 da marca ZEISS com ampliações de 500X e 1000X. As imagens foram obtidas pela reflexão da luz em diversas regiões da amostra, revelando assim, a microestrutura.



Figura 4.16 – Amostra sendo analisada no microscópio óptico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios de tração, dobramento, dureza e análise metalográfica.

5.1 Ensaio de Tração

Nos ensaios de tração realizados, dos seis corpos de prova, apenas em um caso houve o rompimento na região do metal base. Em todos os outros, o rompimento ocorreu na região de solda, como mostra a Figura 5.1.



Figura 5.1 – Corpos de prova após o ensaio de tração; SMAW e GTAW respectivamente.

Estes rompimentos na região de solda não eram esperados, porém possíveis, visto que observou-se falta de penetração total da solda e algumas discontinuidades, possibilitando uma redução da seção útil e uma zona com concentração de tensões.

A curva correspondente ao corpo de prova número 1 soldado através do processo SMAW está apresentada na Figura 5.2.

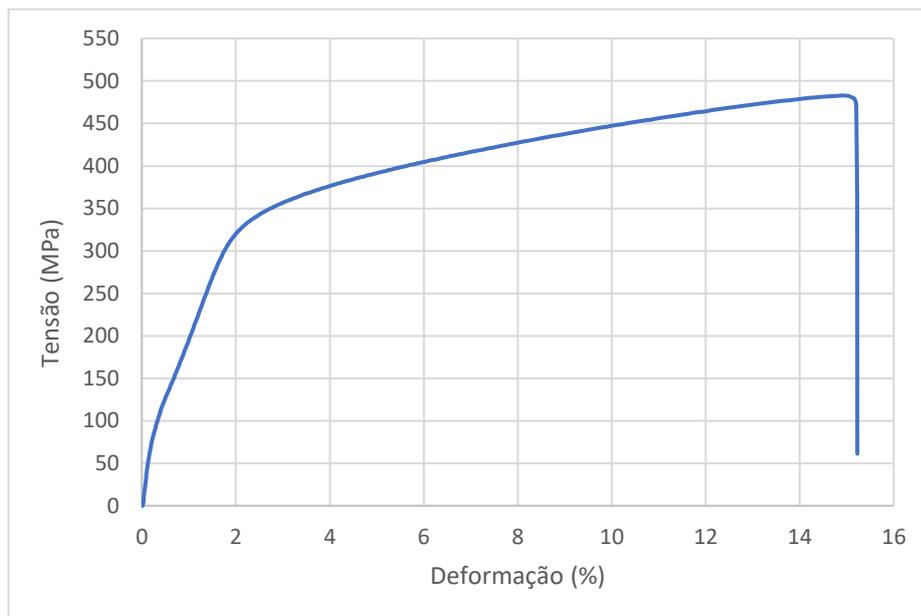


Figura 5.2 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 1 soldado pelo processo SMAW.

Deste ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 483,06 MPa
- Força Máxima = 11.593,43 N
- Limite de escoamento = 123 MPa
- Limite de Ruptura = 474,83 MPa
- Alongamento após a ruptura = 15,19%

A curva correspondente ao corpo de prova número 2 soldado através do processo SMAW está apresentada na Figura 5.3.

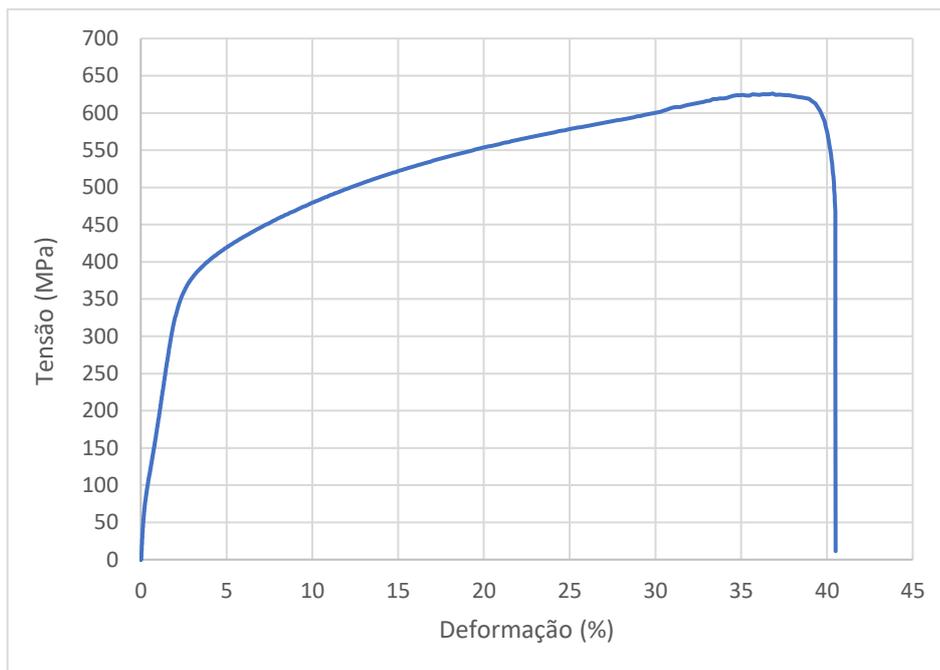


Figura 5.3 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 2 soldado pelo processo SMAW.

Deste ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 626,23 MPa
- Força Máxima = 15.029,45 N
- Limite de escoamento = 121 MPa
- Limite de Ruptura = 588,33 MPa
- Alongamento após a ruptura = 40,48%

A curva correspondente ao corpo de prova número 3 soldado através do processo SMAW está apresentada na Figura 5.4.

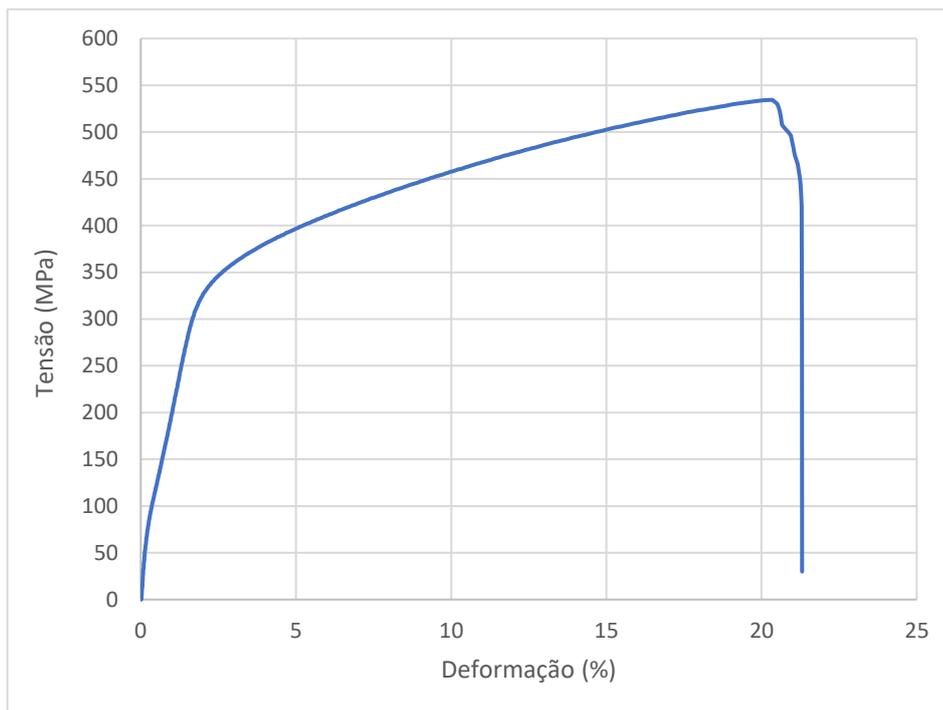


Figura 5.4 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 3 soldado pelo processo SMAW.

Deste ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 534,40 MPa
- Força Máxima = 12.825,51 N
- Limite de escoamento = 124 MPa
- Limite de Ruptura = 525,92 MPa
- Alongamento após a ruptura = 21,29%

A Tabela 5.1 foi elaborada para se ter uma melhor visualização das principais propriedades mecânicas, juntamente com suas respectivas médias, obtidas dos corpos de prova soldados através do processo SMAW.

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados com SMAW.

Processo	Corpo de Prova	Propriedades Mecânicas		
		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
SMAW	1	483,06	123	15,19
	2	626,23	121	40,48
	3	534,4	124	21,29
	Média	547,9	122,67	25,65

A curva correspondente ao corpo de prova número 1 soldado através do processo GTAW está apresentada na Figura 5.5.

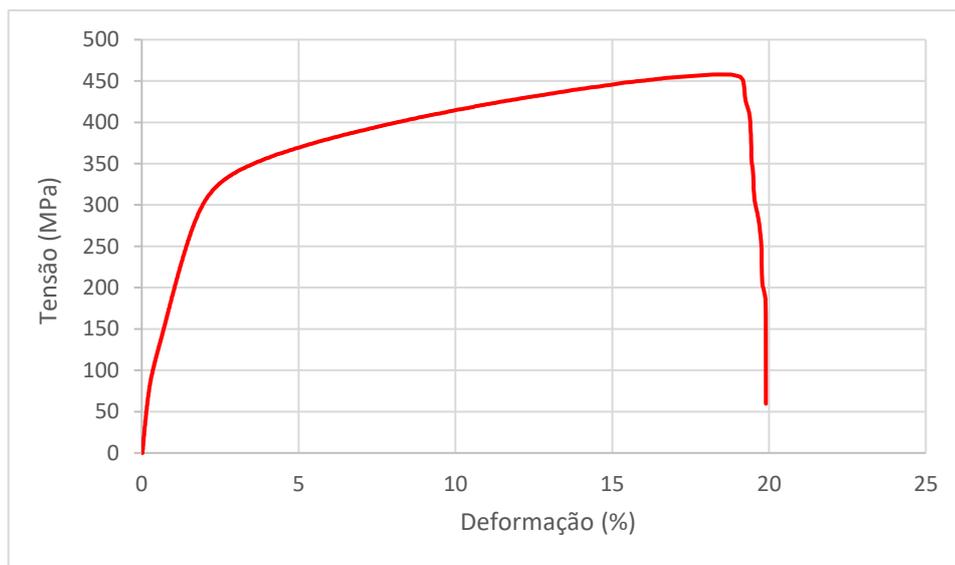


Figura 5.5 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 1 soldado pelo processo GTAW.

Deste ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 457,85 MPa
- Força Máxima = 10.988,37 N
- Limite de Escoamento = 125 MPa
- Limite de Ruptura = 451,33 MPa
- Alongamento após a ruptura = 19,88%

A curva correspondente ao corpo de prova número 2, soldado através do processo GTAW está apresentada na Figura 5.6.

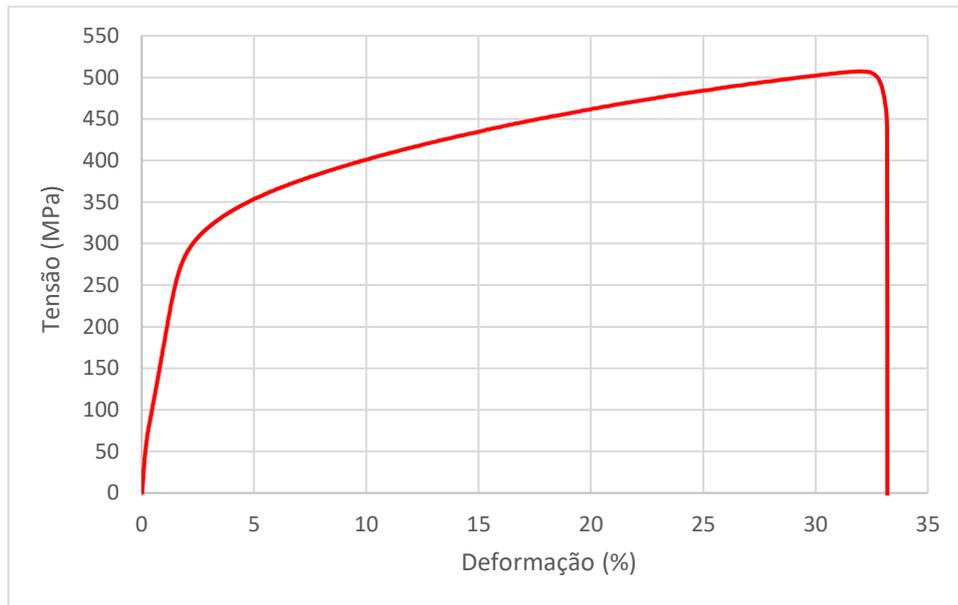


Figura 5.6 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 2 soldado pelo processo GTAW.

Deste ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 507,23 MPa
- Força Máxima = 12.173,42 N
- Limite de escoamento = 105 MPa
- Limite de Ruptura = 495,75 MPa
- Alongamento após a ruptura = 33,18%

A curva correspondente ao corpo de prova número 3 soldado através do processo GTAW está apresentada na Figura 5.7.

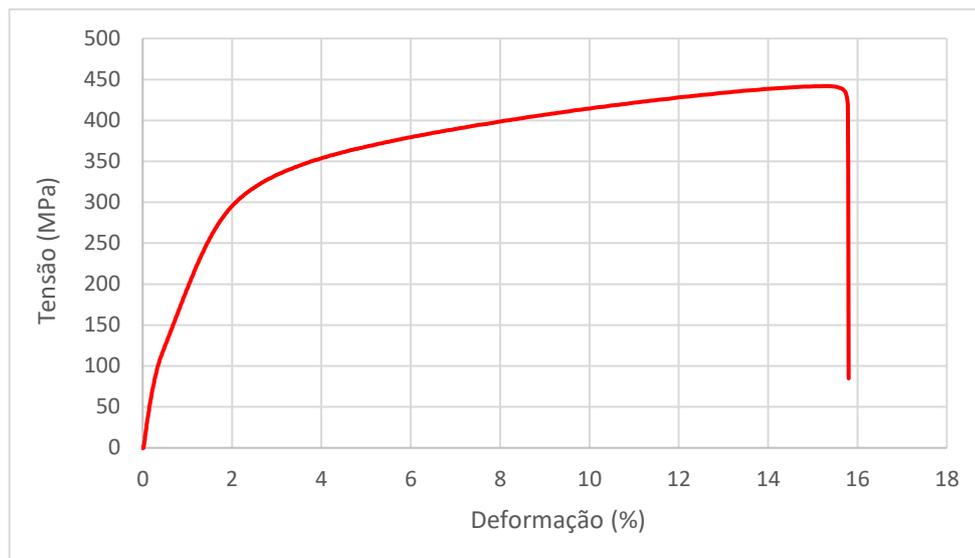


Figura 5.7 – Gráfico da tensão em função da deformação para o corpo de prova número 3 soldado pelo processo GTAW.

Deste ensaio foram obtidos os seguintes resultados:

- Tensão Máxima = 441,91 MPa
- Força Máxima = 10.605,89 N
- Limite de Escoamento = 128 MPa
- Limite de Ruptura = 435 MPa
- Alongamento após a ruptura = 15,78%

A Tabela 5.2 foi elaborada para se ter uma melhor visualização das principais propriedades mecânicas, juntamente com suas respectivas médias, obtidas dos corpos de prova soldados através do processo GTAW.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados com GTAW.

	Corpo de Prova	Propriedades Mecânicas		
		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Processo GTAW	1	457,85	125	19,88
	2	507,23	105	33,18
	3	441,91	128	15,78
	Média	469	119,33	22,95

Os resultados obtidos durante o ensaio de tração quando comparados com as propriedades mecânicas estabelecidas pela norma ASTM A240-07, não foram satisfatórios. De acordo com a norma, o aço AISI 304 deve apresentar um limite de resistência à tração mínima de 515 MPa, um limite de escoamento mínimo de 205 MPa e um alongamento mínimo de 40%.

Segundo a norma ASME IX, que trata da qualificação de soldagem, para uma junta soldada ser considerada aprovada, a resistência à tração da solda deve ser igual ou maior que a mínima resistência à tração especificada para o material.

Se o material se romper na solda e a resistência observada for igual ou maior que a especificada para o material, a solda é aprovada. Caso a resistência observada seja abaixo da especificada, a solda é considerada reprovada.

Com isso, observou-se que os corpos de prova soldados com o processo SMAW alcançaram um limite de resistência à tração médio superior ao valor mínima requerido, obtendo uma solda aprovada. Já no caso dos corpos de prova soldados com o processo GTAW, a resistência mínima não foi alcançada, obtendo um percentual de 8,93% abaixo da requerida, e a solda foi considerada reprovada.

Diante disso, nas condições apresentadas, pode-se dizer que o comportamento em tração do material soldado com o processo SMAW apresentou resistência máxima e escoamento superior ao material soldado com o processo GTAW, enquanto que este obteve uma melhor ductilidade.

5.2 Ensaio de Dobramento

Os corpos de prova foram submetidos a uma análise qualitativa para o surgimento de trincas e descontinuidades, conforme estabelecido pela norma ASTM E190-92.

Os ensaios de dobramento realizados nas duas condições de soldagem (SMAW e GTAW) apresentaram bom desempenho, com todas as soldas aprovadas. A Figura 5.8 apresenta os corpos de prova em suas condições após os ensaios, ilustrando em detalhe o resultado no cordão de solda de cada condição testada.

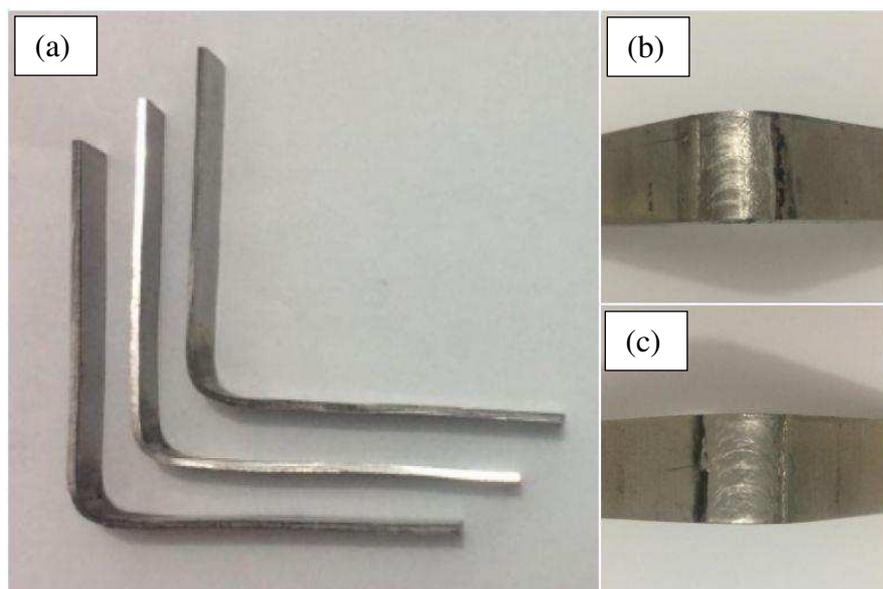


Figura 5.8 – (a) Posição final dos corpos de prova; detalhe do cordão de solda com o processo (b) SMAW e (c) GTAW.

Em nenhum dos corpos de prova ensaiados foi constatado o aparecimento de fendas, fissuras ou ruptura na região da solda, e nenhum defeito que possa ter comprometido o seu desempenho foi percebido no metal base.

5.3 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado para se avaliar as variações de propriedades mecânicas das juntas soldadas. As medições foram realizadas partindo-se do metal base e atravessando a zona onde se encontra o metal de solda. A Figura 5.2 ilustra a distribuição dos pontos medidos ao longo da seção transversal das amostras obtidas com cada processo de soldagem.

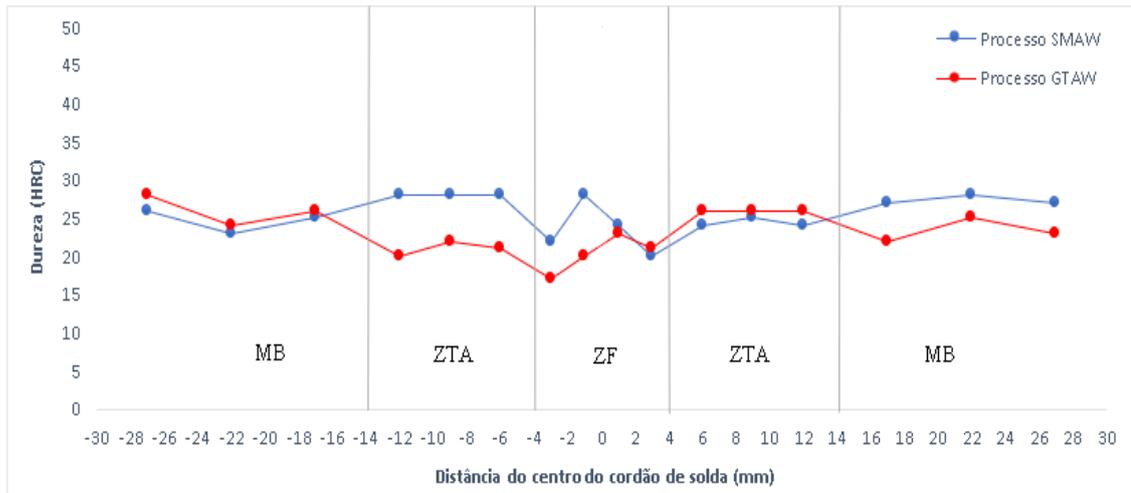


Figura 5.9 – Gráfico de distribuição da dureza ao longo da seção transversal das amostras.

Os valores médios de dureza para cada região das juntas podem ser observados na Tabela 5.3. Percebe-se pela Figura 5.9 e pela Tabela 5.3 que o metal base e a ZTA possuem valores de dureza maiores quando comparados a zona fundida. Essa característica é causada pelas mudanças microestruturais que ocorreram nas chapas devido aos ciclos térmicos impostos pelo processo de soldagem.

Tabela 5.3 – Distribuição média da dureza nas regiões das juntas soldadas.

Processo de Soldagem	Metal Base	ZTA	Zona Fundida
SMAW	26	26,2	23,5
GTAW	24,7	23,5	20,3

O ensaio de dureza, para os dois processos de soldagem avaliados, indicou resultados semelhantes, sem diferenças significativas. Porém utilizando-a como parâmetro de comparação, a soldagem com o processo SMAW apresentou uma dureza levemente maior em relação ao processo GTAW.

A distribuição dos valores de dureza ao longo da seção demonstra que houve uma dureza menor na zona fundida para uma energia de soldagem mais elevada. Esse comportamento é esperado devido à diminuição na velocidade de soldagem da junta soldada, o que diminui a taxa de resfriamento e leva à formação de microestruturas de menor dureza.

5.4 Ensaio Metalográficos

5.4.1 Materiais como recebido

A microestrutura do aço inoxidável austenítico 304, recebido na condição inicial, consiste na microestrutura típica de grãos austeníticos, com morfologias poligonais de tamanhos não uniformes, como mostra a Figura 5.10.

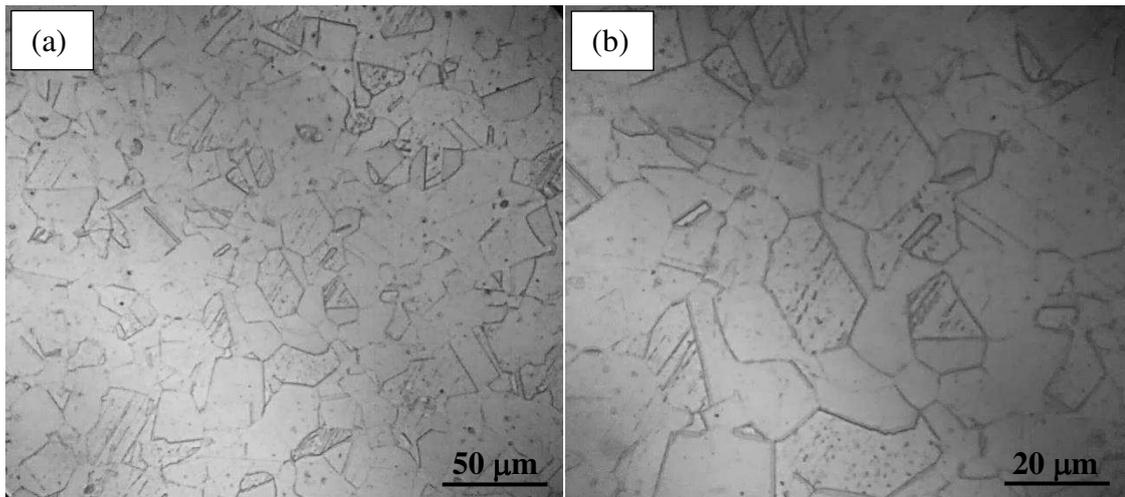


Figura 5.10 – Micrografias do aço inoxidável austenítico 304 em (a) 500X e (b) 1000X.

Também podem ser observadas algumas partículas de carbonetos e contornos de macla, que é um tipo especial de contorno de grão que separa duas regiões com uma simetria tipo "espelho".

5.4.2 Materiais soldados com o processo SMAW

As micrografias foram obtidas no plano perpendicular ao cordão de solda e em cada uma das regiões da zona fundida, zona termicamente afetada e metal base.

5.4.2.1 Zonas fundida

As micrografias da zona fundida do material soldado com o processo SMAW mostram uma estrutura que consiste de ferrita delta com diferentes morfologias em uma matriz de

austenita. As morfologias da ferrita delta identificadas foram: ferrita acicular, vermicular e ferrita de contorno de grão, como mostra a Figura 5.11.

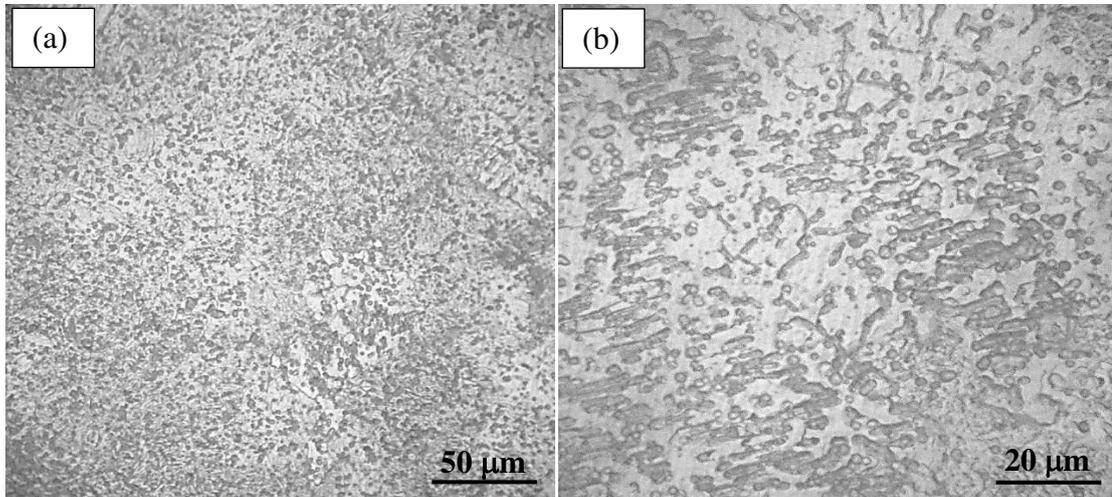


Figura 5.11 – Micrografias da ZF do material soldado com o processo SMAW em (a) 500X e (b) 1000X.

Foi observado uma grande presença de ferrita delta e dendritas nesta região.

5.4.2.2 Zonas termicamente afetada

Quando uma parte do aço é submetida a altas temperaturas, por exemplo durante a soldagem, ocorre, naquela área, uma mudança na microestrutura. Esta área afetada pelo calor recebe o nome de zona termicamente afetada (ZTA). Esse fenômeno é muito conhecido na área de soldagem.

Durante a solda o aço é aquecido à alta temperatura, ficando a austenita com um grão grosseiro. Após a solda, quando o aço começa a resfriar, começam a aparecer a ferrita acicular nos contornos de grãos da austenita.

A microestrutura da ZTA apresenta morfologia diferente da ZF, com um aumento excessivo dos grãos. Ainda assim, essa região também é constituída de ferrita delta distribuída na matriz de austenita, como mostra a Figura 5.12.

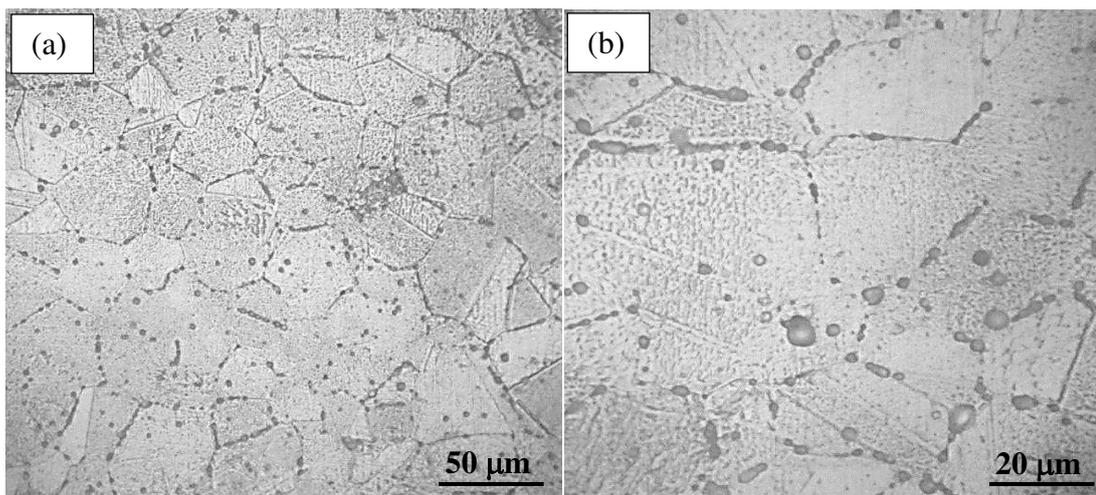


Figura 5.12 – Micrografias da ZTA soldado com o processo SMAW em (a) 500X e (b) 1000X.

5.4.2.3 Metal base

A Figura apresenta a microestrutura do metal base que não foi afetado pelo processo de soldagem SMAW. Observa-se que é similar à microestrutura inicial mostrada na Figura 5.13.

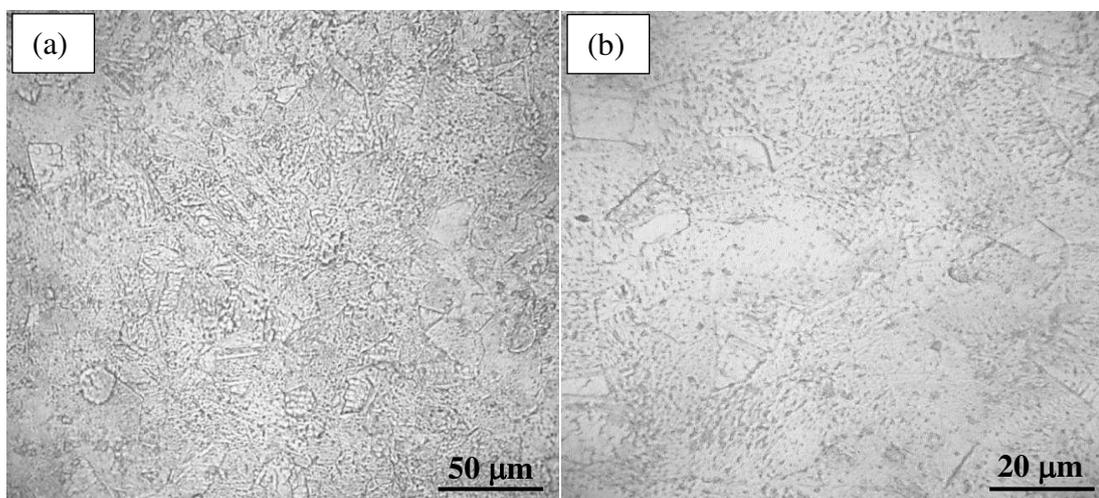


Figura 5.13 – Micrografias do MB do material soldado com o processo SMAW em (a) 500X e (b) 1000X.

Em outros trabalhos sobre os aços austeníticos também foram observados uma microestrutura, após o processo de soldagem, similar, principalmente no que se refere a grande presença de ferrita delta e carbonetos.

5.4.3 Material soldado com o processo GTAW

Assim como no processo SMAW, as micrografias foram obtidas no plano perpendicular ao cordão de solda e em cada uma das regiões da zona fundida, zona termicamente afetada e metal base.

5.4.3.1 Zona fundida

As micrografias da zona fundida do material soldado com o processo SMAW mostram uma estrutura semelhante ao encontrado no material soldado com o processo GTAW. Porém, observou-se um maior tamanho de grão, dendritas mais espaçadas e com granulações mais grosseiras, conforme mostra a Figura 5.14.

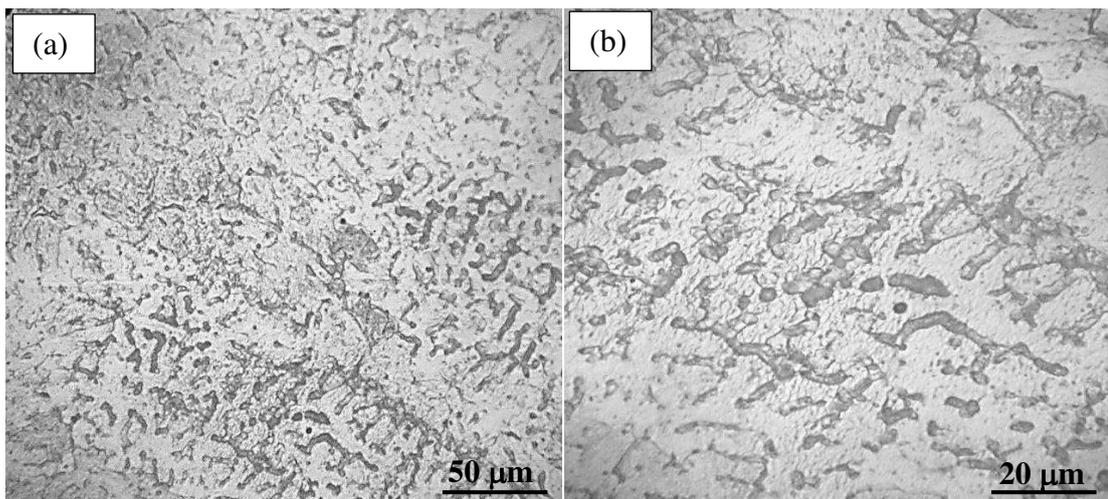


Figura 5.14 – Micrografias da ZF do material soldado com o processo GTAW em (a) 500X e (b) 1000X.

5.4.3.2 Zona termicamente afetada

Assim como no material soldado com o processo SMAW, também foi observado grãos grosseiros de austenita. Em comparação com a ZTA obtida pelo outro processo, este apresentou um crescimento de grão bem superior em relação ao MB, como pode ser conferido na Figura 5.15.

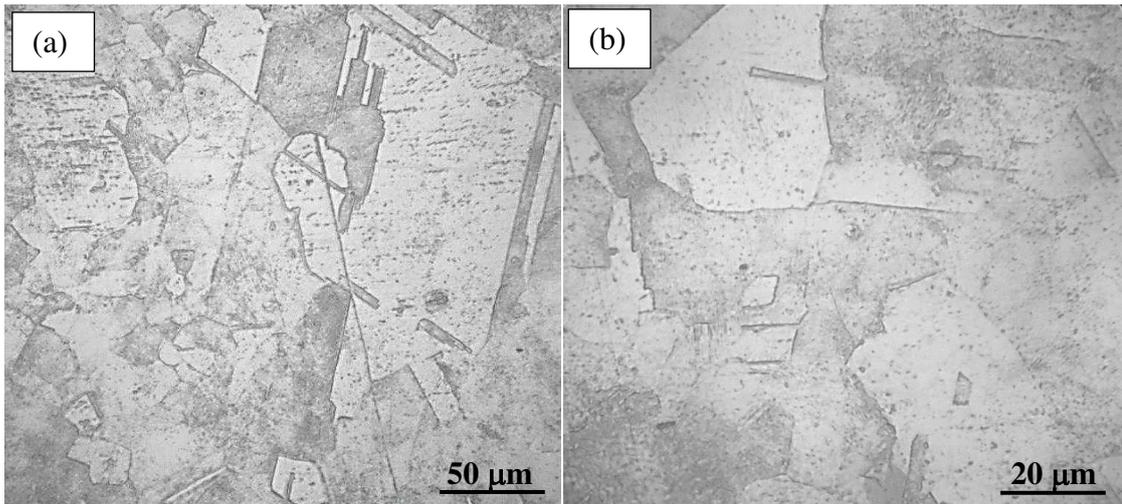


Figura 5.15 – Micrografias da ZTA soldado com o processo GTAW em (a) 500X e (b) 1000X.

Nesta zona, a ferrita delta apresenta-se como fase dispersa em pequena proporção nucleada nos contornos e no interior dos grãos austeníticos

5.4.3.3 Metal base

Assim como foi observado no material soldado com o processo SMAW, a microestrutura do metal base que não foi afetado pelo processo de soldagem GTAW (Figura 5.16) também é similar à microestrutura inicial mostrada na Figura 5.10.

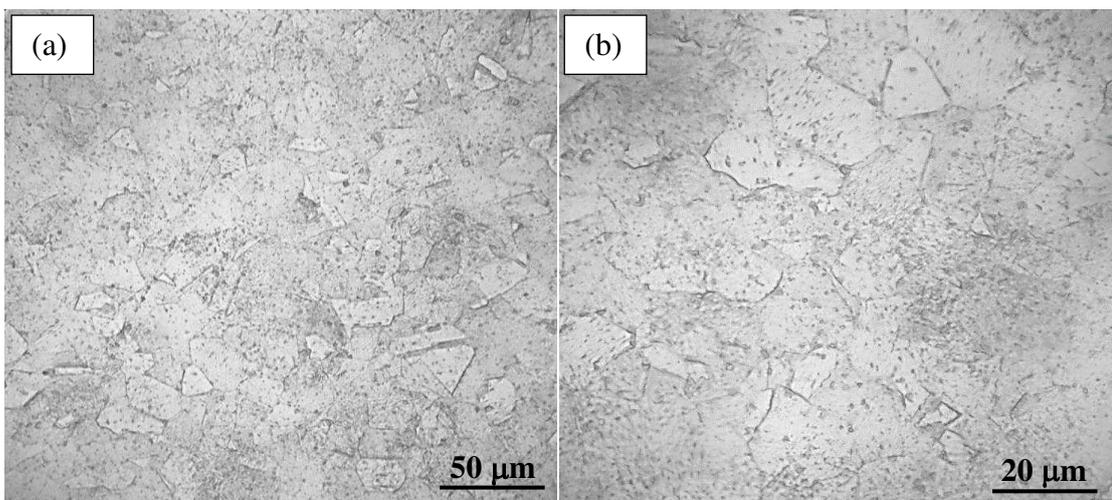


Figura 5.16 – Micrografias do MB do material soldado com o processo GTAW em (a) 500X e (b) 1000X.

6 CONCLUSÃO

Nas condições apresentadas, foi observado que o comportamento em tração do material soldado com o processo SMAW apresentou, resistência máxima e escoamento, superior ao material soldado com o processo GTAW. Em relação as exigências da norma ASTM A240, a solda realizada com o processo SMAW foi aprovada, enquanto que a feita com o processo GTAW foi reprovada, porém, apresentando uma melhor ductilidade.

Os ensaios de dobramento apresentaram bom desempenho, com todas as soldas aprovadas. Não foi constatado, em nenhum dos corpos de prova ensaiados, o aparecimento de fendas, fissuras ou ruptura na região da solda, nem no metal base.

Foi visualizado algumas descontinuidades no cordão de solda dos dois processos, como por exemplo, a falta de penetração total, provavelmente ocasionada por falta de experiência e conhecimento mais aprofundado do soldador, haja vista que o processo de soldagem foi baseado no uso de peças artesanais, sem exigências de resistência mecânica, como é solicitado na indústria civil e metalmeccânica.

No ensaio de dureza, os dois processos avaliados, indicaram resultados semelhantes, sem diferenças significativas. Porém, foi observado que soldagem com o processo SMAW apresentou uma dureza levemente maior em relação ao processo GTAW, provavelmente devido ao aporte térmico maior, às composições químicas dos materiais utilizados e microestruturas diferentes.

Como pôde ser constatado na análise microestrutural, a grande presença de ferrita e dendritas ocasionou uma fragilização do material, especificamente na zona fundida. Isto ocorreu devido a uma grande entrada de calor, gerada pela alta energia de soldagem utilizada, que diminui a taxa de resfriamento e leva à formação de microestruturas mais frágeis.

Quando comparadas entre si, observou-se que a microestrutura da zona fundida do processo GTAW apresentou uma granulação mais grosseira e com um maior espaçamento entre as dendritas, provocando uma fragilidade ainda maior na região, em função dos fatores citados anteriormente.

Diante disso, dentre os processos de soldagem testados, nessas condições, o processo SMAW seria o mais indicado.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. C.; TANIGUTI, J. **Mecânica: projetos e ensaios mecânicos**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

APERAM. **Aço Inox – Resumo Técnico**. Disponível em <https://www.aperamservicos.com.br/aco-inox.php>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

ASME IX. **Welding, Brazing and Fusing Qualifications Standard for Welding, Brazing and Fusing Procedures, Welders, Brazers, and Welding, Brazing and Fusing Operators**. American Society of Mechanical Engineers, 2013.

ASTM A240-07. **Standard Specification for Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**. American Society for Testing and Materials, 2007.

ASTM A370-92. **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. American Society for Testing and Materials, 1992.

ASTM E18-15. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2015.

ASTM E190-92. **Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds**. American Society for Testing and Materials, 1992.

ASTM E407-07. **Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. American Society for Testing and Materials, 2007.

BIOPDI. **Ensaio de Dobramento**. Disponível em: <<https://www.biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-dobramento>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem TIG - GTAW**. Belo Horizonte: UFMG, 2000.

CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CLAUDINO, C. **Ensaio Mecânicos dos Materiais**. São Paulo: FATEC, 2014.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.

ESAB. **Apostila de Eletrodos Revestidos** (2005). Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas>>. Acesso em: 4 abr. 2019.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

ISSF. **Introdução ao aço inoxidável**. Disponível em: <<http://worldstainless.org>>. Acesso em: 6 abr. 2019.

LEFFLER, B. **STAINLESS – Stainless steel and their properties** (2008). Disponível em: <<http://www.outokumpu.com/files/group/hr/documents/stainless20.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2019.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MODENESI, P. J. **Técnica Operatória da Soldagem GTAW**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MODENESI, P. J. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: EDEME, 1979.

ROCHA, A. M. et al. **Análise de Soldagem por Eletrodo Revestido do Tipo Rutílico, Básico e Celulósico**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 02, Vol. 01. pp 684-690. Abril de 2017.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.

SOUZA, J. P. S. **Propriedades Mecânicas de Aços Inoxidáveis Austeníticos Nitretados Submetidos à Hidrogenação Catódica**. 2006. 98f. Dissertação de Mestrado – UFPR, Curitiba, 2006.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

VELASCO, R. H. H. Detecção On-line de Descontinuidades no Processo de Soldagem GTAW usando Sensoriamento Infravermelho e FPGAs. 2010. 85f. Dissertação de Mestrado – UnB, Brasília, 2010.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo, Edgard Blucher, 2004.

ZOLIN, I. Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas. Santa Maria: UFSM, 2010.