



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



ARTHUR CERCEAU NEVES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE
CHANFRO DE 15°, 30° E 45° NA INDUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS
NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO EM
AÇO 1020 UTILIZANDO A ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA**

**OURO PRETO - MG
2023**

ARTHUR CERCEAU NEVES
arthur.neves@aluno.ufop.edu.br

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE
CHANFRO DE 15°, 30° E 45° NA INDUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS
NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO EM
AÇO 1020 UTILIZANDO A ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito para a obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Sávio Sade Tayer

OURO PRETO – MG
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N513e Neves, Arthur Cerceau.

Estudo da influência da variação do ângulo de chanfro de 15º, 30º e 45º na indução de tensões residuais nos processos de soldagem por eletrodo revestido em aço 1020 utilizando a análise de variância anova. [manuscrito] / Arthur Cerceau Neves. - 2023.

55 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Sávio Sade Tayer.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Soldagem - Eletrodos revestidos. 2. Soldagem - Tensão residual. 3. Deformações e tensões - Ensaio de dureza por indentação. I. Tayer, Sávio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Arthur Cerceau Neves

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE CHANFRO DE 15°, 30° E 45° NA
INDUÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR ELETRODO
REVESTIDO EM AÇO 1020 UTILIZANDO A ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 09 de março de 2023

Membros da banca

MSC - Sávio Sade Tayer Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Diogo Antônio de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Sávio Sade Tayer, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de
Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Sávio Sade Tayer, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/03/2023, às 10:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0
, informando o código verificador **0491760** e o código CRC **C74DD9DC**.

A meus pais dedico cada página deste trabalho que conclui uma das etapas que abre portas para minha trajetória profissional.

AGRADECIMENTO

É com imensa gratidão que dedico este texto de agradecimento a todos aqueles que contribuíram em todas as etapas da graduação. Foram muitos os desafios enfrentados ao longo desta jornada acadêmica, mas graças ao apoio e incentivo de vocês, consegui chegar até aqui.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, por todo o amor, carinho e suporte incondicional. Vocês sempre estiveram ao meu lado, me encorajando a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Sem o apoio de vocês, certamente eu não teria chegado até aqui.

Aos meus amigos, agradeço por terem compartilhado comigo os momentos de alegria e descontração, mas também os de tensão e ansiedade. Vocês foram fundamentais para me manter motivado e para me lembrar que, apesar das dificuldades, eu era capaz de alcançar meus objetivos. Muito obrigado pela amizade, pelo companheirismo e pela confiança depositada em mim.

Aos meus professores, em especial ao meu orientador, Sávio, gostaria de agradecer pela dedicação, paciência e competência na orientação do meu trabalho de conclusão de curso. Agradeço também pela formação acadêmica que me proporcionaram ao longo do curso, que foi essencial para o meu desenvolvimento.

Enfim, a todos vocês que fazem parte da minha vida, agradeço de coração por todo o apoio e incentivo que me deram. Este trabalho não é apenas meu, mas também de todos vocês, que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento e desenvolvimento pessoal e profissional.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

A soldagem é uma medida fundamental para a união permanente entre peças, que envolve a fusão parcial das partes a serem unidas. Entre os processos mais utilizados industrialmente está o processo por eletrodo revestido, que se destaca por sua praticidade e baixo custo. No entanto, é comum que as soldagens gerem tensões residuais nas peças, mesmo após a conclusão do processo e a ausência de forças externas ou gradientes de temperatura. Nesse contexto, este trabalho propôs uma variação de três ângulos de chanfros em peças de aço 1020 para avaliar qual deles apresenta o melhor comportamento em relação às tensões residuais. Foram comparados os ângulos de chanfro de 15°, 30° e 45° em 9 corpos de prova que foram soldadas em um único passe. Essas chapas passaram por 6 ensaios de indentação Rockwell B em posições perpendiculares ao cordão de solda, tanto antes quanto depois da soldagem em cada ângulo, a fim de verificar qual condição apresenta a melhor disposição em relação às tensões residuais. Os resultados foram analisados estatisticamente através da ANOVA (análise de variância) para as três condições avaliadas. Esse estudo permitiu uma melhor compreensão dos efeitos dos ângulos de chanfros na soldagem por eletrodo revestido e suas consequências em relação às tensões residuais. Foi observado uma maior influência do ângulo de chanfro de 45° devido a maior deposição de material durante o processo de soldagem e consequentemente maior aporte térmico no processo.

Palavras-chave: Soldagem por eletrodos revestidos, tensão residual, ensaio de dureza por indentação.

ABSTRACT

Welding is a fundamental measure for the permanent joining of pieces, which involves partially melting the parts to be joined. One of the most commonly used industrial processes is the shielded metal arc welding, which stands out for its practicality and low cost. However, it is common for welding to generate residual stresses in the pieces, even after the process is completed and there are no external forces or temperature gradients. In this context, this study proposed a variation of three bevel angles in SAE 1020 steel pieces to evaluate which one presents the best behavior in relation to residual stresses. The bevel angles of 15°, 30°, and 45° were compared in plates that were welded in a single pass. These plates underwent indentation tests, both before and after welding at each angle, to determine which condition presented the best disposition in relation to residual stresses. The results were statistically analyzed through ANOVA (analysis of variance) for the three evaluated conditions. This study allowed for a better understanding of the effects of bevel angles in shielded metal arc welding and their consequences in relation to residual stresses. It also reinforces the importance of systematically evaluating all factors involved in welding to obtain precise and reliable results.

Key-words: *Shielded Metal Arc Welding, residual stress, hardness tests.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de soldagem por fusão.....	6
Figura 2 - Tipos de junta em soldagem Fonte: Adaptado de MARQUES, 2009	7
Figura 3 - Esquema mostrando as zonas de importância na soldagem Fonte: WAINER et al, 1992.	8
Figura 4 - Configuração padrão de soldagem por eletroescória Fonte: VITTAL (2012).....	12
Figura 5 - Esquema do processo de soldagem com arco submerso Fonte: PARANHOS, 1992	13
Figura 6 - Solda com arame tubular com proteção externa e auto protegida Fonte: FORTES, 2005	14
Figura 7 - Esquema da formação da poça de fusão no processo GMAW Fonte: Adaptado de AWS, 2004	15
Figura 8 - Ilustração esquemática do processo de soldagem por eletrodo revestido Fonte: FORTES, 2005	18
Figura 9 - Esquema do processo de soldagem com eletrodo revestido Fonte: PONOMAROV, 2019	20
Figura 10 - Classificação dos eletrodos segundo a AWS Fonte: Adaptado de AWS, 2004	22
Figura 11 - Efeito dos parâmetros de soldagem no aspecto do cordão de solda Fonte: Adaptado de AWS, 2004	24
Figura 13 - Representação esquemática da distribuição de tensões residuais na união de peças livres.	26
Figura 14 – Representação esquemática da relação entre as tensões residuais e o gradiente de temperatura no processo de soldagem Fonte: MODENESI, 2008	27
Figura 15 - Fluxograma com as etapas para realização deste trabalho	36
Figura 16 – Blank (à esquerda) e um par de amostra cortado e chanfrado (à direita).....	37
Figura 17 – Máquina de solda Soldarc R375	37
Figura 18 – Corpo de prova após a soldagem	38

Figura 19 – Pontos de medição de dureza das peças soldadas.	39
Figura 20 - Resultado do teste de Tukey	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais processos de soldagem por fusão	9
Tabela 2 - Variáveis e seus indicadores.....	40
Tabela 3 – Medidas de dureza coletadas dos ensaios de indentação nas amostras soldadas ...	43
Tabela 4 – Resultado da análise de variância ANOVA.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do problema	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Processos de Soldagem.....	6
2.2	Processo de Soldagem por Fusão	8
2.2.1	Processo de soldagem a arco elétrico	10
2.2.2	Processo de Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas – TIG).....	16
2.3	Processo de Soldagem a Eletrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW)	17
2.3.1	Eletrodo	20
2.3.2	Variáveis Operacionais.....	22
2.4	Tensões Residuais na Soldagem.....	24
2.5	Análise de Variância (ANOVA).....	27
2.6	Ensaio de dureza por indentação.....	30
2.6.1	Ensaio Brinell	30
2.6.2	Ensaio Vickers.....	30
2.6.3	Ensaio Rockwell	31
2.7	Aço SAE 1020	31
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	Tipo de Pesquisa.....	34
3.2	Materiais e métodos.....	35
3.2.1	Materiais	36
3.2.2	Métodos	38
3.3	Variáveis e Indicadores	40
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	41
3.5	Tabulação de Dados.....	41
4	RESULTADOS	42

4.1	Blank.....	42
4.2	Soldagem por eletrodo revestido	42
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	48
5.1	Conclusão	48
5.2	Recomendações	49
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do problema

O desenvolvimento dos processos de soldagem foi alavancado pela necessidade de união de peças metálicas a partir da revolução industrial. Anos depois, a primeira guerra demandou ainda mais produtos metálicos, o que contribuiu para o estabelecimento de fabricantes de equipamentos de soldagem e pesquisa e introdução de novos processos (MODENESI, 2000)

A soldagem é um processo que promove a união de peças de metal utilizando a fusão como principal meio, tendo importante aplicação industrial bem como em diversas áreas de engenharia, artesanato, joalheria, dentre outros. Tem como objetivo a união permanente de partes metálicas fazendo com que elas passem a se comportar como uma só mantendo propriedades mecânicas e metalúrgicas desejadas dos materiais de base (MODENESI, 2000).

Marques *et al.* (2009) divide os métodos de união dos materiais em duas categorias principais. Os métodos baseados na ação de forças macroscópicas entre as partes a serem unidas, onde a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento do material mais as forças de atrito e aqueles baseados em forças microscópicas - interações atômicas e moleculares, onde a união ocorre por meio de ligações químicas. Dos métodos de união de materiais dentro desta classificação a soldagem é o mais difundido no cenário industrial.

Chiaverini (1986) define o processo de soldagem como o processo de união de peças metálicas através do fornecimento de calor à superfície de contato das partes de modo a levá-las a um estado de fusão ou plasticidade. Os processos de soldagem são classificados de acordo com a fonte externa de energia utilizada para fusão do material e da condição das superfícies de contato entre as peças a serem unidas.

Kou (2002), define o processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW), do inglês *shielded metal arc welding*, como um processo que efetua a coalescência de partes metálicas aquecendo-as com um arco elétrico entre um eletrodo revestido e o metal a ser soldado.

Segundo Okumura e Tanigushi (1982) a soldagem por eletrodo revestido é o método mais difundido industrialmente e definem de forma mais extensiva o processo que consiste da geração de um arco entre o metal que se deseja soldar e a extremidade de um eletrodo consumível em forma de arame de material adequado coberto com um revestimento que será

fundido e transformado em gotas devido a ação do arco elétrico que serão depositadas entre as peças metálicas de modo a formar a poça de fusão.

Para Fortes (2005), os eletrodos revestidos consistem em apenas dois elementos principais: a alma metálica, normalmente de aço de baixo teor de carbono, e o revestimento. A alma metálica é composta de um fio trefilado no diâmetro adequado para construção do eletrodo que é retificado e cortado no comprimento adequado. O material da alma pode conter elementos residuais, porém o teor de enxofre e fósforo devem ser muito baixos de forma a evitar a fragilização do metal de solda. A alma metálica tem como principal função conduzir corrente elétrica para geração do arco e fornecer material à junta.

O revestimento é uma mistura de diversos ingredientes no qual cada ingrediente deve ser combinado em proporções adequadas para que exerçam a função determinada, como estabilização do arco elétrico, adição de elementos de liga ao cordão de solda, elementos oxidantes e melhoria das propriedades mecânicas do metal de solda. Além disso, a fusão do material de revestimento do eletrodo gera uma atmosfera localizada de gases e escória que auxiliam na proteção da poça de fusão durante a solidificação do cordão de solda (FORTES, 2005).

O aço ABNT 1020 é um aço carbono considerado de baixa concentração. Também chamado de SAE 1020 ou AISI 1020 de acordo com as entidades americanas de classificação dos materiais, este aço apresenta resistência mecânica relativamente baixa, porém seu uso se justifica devido a sua excelente conformabilidade e soldabilidade. É um aço usado comumente em peças extrudadas e conformadas a frio (LUZ, 2017).

Em processos de soldagem de materiais metálicos, devido ao alto aporte térmico envolvido e geração de gradientes de temperatura, é comum aparecimento de tensões residuais nos materiais unidos. (FORTES, 2004)

Tensões residuais são aquelas que permanecem sob um componente na ausência de carregamento externo. As tensões residuais apresentam estado de equilíbrio, ou seja: a resultante de forças e de momentos gerados por estas tensões é zero. Estas tensões internas residuais podem ser produtos gerados por trabalho exercido por esforços mecânicos na peça ou podem ocorrer quando o componente é submetido a um processo de elevado gradiente de temperatura (RODRIGUES, 2011).

De acordo com Antunes (1983), tensões residuais estão sempre presentes em materiais tecnológicos, e apresentam maior ou menor intensidade dependendo das características

físicas, químicas e mecânicas de cada material e dos processos de fabricação a que foram submetidos previamente. É importante portanto avaliar e prever a formação de tensões residuais de para preservar a integridade das estruturas aplicadas em projetos de engenharia, de forma a evitar falhas, seja por deformação, fadiga ou corrosão.

A análise e avaliação das tensões residuais é pertinente para estudos de caso de métodos de soldagem, uma vez que a soldagem é um processo de fabricação de aporte térmico muito elevado onde a escolha dos parâmetros de trabalho pode influenciar na indução de tensões residuais ao material.

As fontes de tensões residuais consideradas na soldagem são: concentração nas regiões onde há diferença no resfriamento, tensões pelo surgimento de deformações plásticas, resfriamento superficial mais intenso, e devido a transformação de fase. (ESTEFEN, 2008)

Um dos parâmetros que pode influenciar na geração de tensões residuais em materiais soldados é a variação do ângulo de chanfro. Segundo Modenesi (2012), a otimização do desenho do chanfro pode ser utilizada para reduzir a indução de tensões residuais na junta soldada diminuindo-se a quantidade de calor fornecida á junta ou a deposição de material.

Os métodos utilizados para medição de tensões residuais são classificados como destrutivas, semi-destrutivas e não-destrutivas. Um método não destrutivo e de baixo custo é através da indentação. A indentação é feita através da aplicação de esforços com um indentador de cabeça cônica, esférica ou piramidal sobre o ponto da superfície em que se deseja avaliar o estado de tensões residuais. “Em torno deste ponto, forma-se uma região plastificada; cuja forma e extensão são influenciadas pelo nível de tensões combinadas que o material apresenta”. (SUTERIO, 2005, p.5).

Diante dos aspectos apresentados, surge o seguinte questionamento:

Avaliar como variação de ângulo de chanfro de 15°, 30° e 45° irá influenciar na indução de tensões residuais nos processos de soldagem por eletrodo revestido de uma chapa de aço 1020?

1.2 Justificativa

Tensões residuais são definidas por Melo *et al.* (2013) como as tensões existentes em um determinado componente quando este está livre de esforços externos e em situação de equilíbrio de temperatura.

Estas tensões tendem a aparecer em processos onde o material é sujeito a esforços mecânicos ou térmicos significativos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, tratamentos térmicos, etc.) e apresentam um potencial problema quanto a nucleação e propagação de trincas, maior propensão a falha por fadiga ou tendência a fraturar o componente (MODENESI, 2005).

De modo geral, as tensões residuais de tração na superfície são consideradas deletérias pois influenciam na nucleação e propagação de trincas que prejudicam a vida de um componente quando este está submetido a fadiga, corrosão e desgaste. Já as tensões compressivas são consideradas benéficas pois tendem a evitar e interromper a propagação de trincas, o que melhora as propriedades do material quando submetido a esforços. As tensões tratativas devem ser evitadas principalmente em componentes a serem submetidos a esforços cíclicos, uma vez que esforços dessa natureza facilitam a propagação e nucleação de trincas (BIANCHI *et al.*, 2000).

A análise de tensões residuais é muito significativa em componentes soldados uma vez que estas podem alterar propriedades mecânicas de interesse, como a resistência a fratura, resistência a corrosão e capacidade de suportar carregamentos diminuindo a vida útil do componente quando submetido a esforços cíclicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar um estudo de como a variação do ângulo de chanfro pode influenciar na indução de tensões residuais nos processos de soldagem por eletrodo revestido em uma chapa de aço 1020 através da análise estatística de variância (ANOVA) para avaliação dos resultados obtidos pela medição de dureza por indentação.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica contemplando o ciclo térmico de soldagem a eletrodo revestido, tensões residuais e técnica de avaliação de tensões pelo método de indentação;
- Executar a preparação e soldagem de amostras pelo método de eletrodo revestido;
- Realizar ensaio de indentação no blank e nas amostras soldadas;
- Analisar os dados obtidos;
- Avaliar a influência da variação do ângulo de chanfro;
- Comparar a indução de tensões residuais para cada ângulo de chanfro adotado perante os resultados obtidos.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho terá estrutura dividida em cinco capítulos, conforme apresentado a seguir.

No capítulo 1 é apresentada a formulação do problema, a justificativa para o estudo do problema e os objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 contempla a fundamentação teórica sobre o tema abordado bem como a definição dos principais conceitos necessários para realização do trabalho.

O terceiro capítulo engloba a metodologia adotada no trabalho, bem como as ferramentas e métodos utilizados para a realização da pesquisa e obtenção dos resultados.

A apresentação e discussão sobre os resultados obtidos a partir da coleta de dados são apresentados no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta a conclusão deste trabalho e recomendações para pesquisas posteriores a partir do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de Soldagem

Marques (2009) classifica o processo de soldagem como o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. A soldagem, quando considerado junto com a brasagem, tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas de grande porte.

De maneira genérica, Messler (2008) define a soldagem como sendo a técnica em que metais que pertencem essencialmente a mesma classe ou tipo são unidos através da ação de calor e pressão, estabelecendo ligações químicas entre eles.

Esta técnica para união de duas ou mais partes metálicas garante a elas a continuidade e as características mecânicas e químicas do material base (WAINER *et al.*, 1992).

Existe no mercado uma gama variada de processos de soldagem utilizados atualmente, e apesar de não haver um consenso quanto a classificação, estes são classificados comumente quanto a fonte de energia utilizada, a transformação física realizada ou as aplicações (OKUMURA e TANIGUSHI, 1982).

Para Okumura e Tanigushi (1982), a categorização dos processos de soldagem pode ser feita em três grandes grupos: soldagem por fusão, soldagem por pressão e brasagem.

No processo de soldagem por fusão ocorre o aquecimento na área na qual se deseja realizar a união com a finalidade de fundir o metal base e o metal de adição (nos casos em que se faz necessário a utilização do mesmo) e a ligação entre as partes é feita a partir do resfriamento do metal fundido. O representante de maior expressividade do grupo de processos de soldagem por fusão é o processo de solda por arco elétrico (MODENESI, 2012).

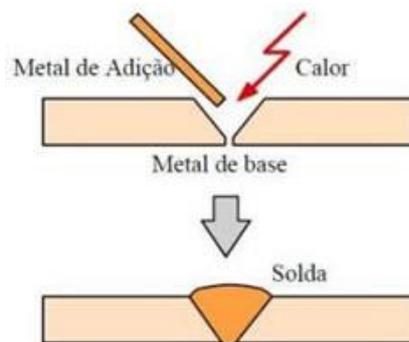


Figura 1 - Esquema do processo de soldagem por fusão
Fonte: MODENESI, 2012

A interface entre as peças as quais se deseja unir através de processos de soldagem é conhecida como junta. E os diversos tipos de junta são classificados de acordo com a disposição de uma peça em relação a outra (MARQUES, 2009).

A figura 2 contempla os principais tipos de junta utilizadas nos mais diversos processos de soldagem.

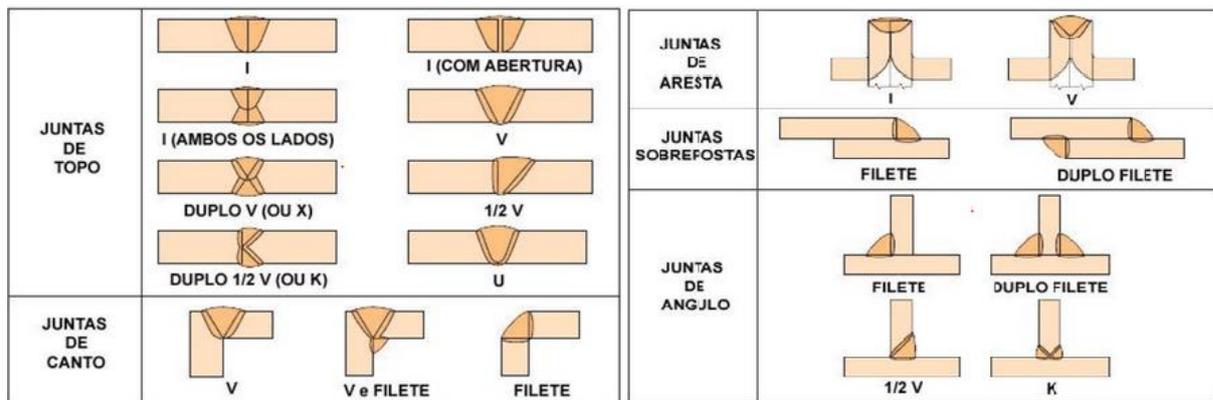


Figura 2 - Tipos de junta em soldagem
Fonte: Adaptado de MARQUES, 2009

Os processos de soldagem por pressão se diferenciam por não dependerem da fusão dos metais. A formação da solda é feita através da aplicação de uma pressão a fim de se obter a junção dos materiais. Os processos que utilizam deste princípio se baseiam em uma deformação plástica localizada dos materiais na região próxima a junta. Destacam-se deste grupo os processos de soldagem por fricção com mistura e a soldagem por resistência (MODENESI, 2012).

Brasagem é o processo em que é realizada a adição de metal de adição fundido na junta de união dos metais base, que por sua vez, permanecem em estado sólido. O metal de adição, cujo a linha *liquidus* é superior a 450°C, abaixo da linha *solidus* do metal base é adicionado à superfície das juntas e em seguida é realizado o resfriamento. Como não há o aquecimento do metal base, o processo de brasagem não implica em grandes distorções dimensionais na peça final, porém não pode ser utilizado em peças de grandes dimensões (MACHADO, 1996).

2.2 Processo de Soldagem por Fusão

O processo de soldagem por fusão consiste na fusão do metal base (MB), e, na maioria dos casos do metal de adição (MA), constituindo a chamada poça de fusão, que, após se solidificar irá formar o cordão de solda (KOU, 2007).

O processo de fusão parcial do metal base, juntamente com o metal de adição, afeta também a área circunjacente à zona fundida (ZF), que é a região onde efetivamente ocorre a fusão do material. Esta região ganha o nome de zona termicamente afetada (ZTA) pela possibilidade de ter suas propriedades mecânicas alteradas em razão do ciclo térmico de rápido aquecimento, seguido de um resfriamento acelerado. A abrangência desta região depende do gradiente de temperatura instaurado pela fusão dos materiais, que, conseqüentemente, é diretamente influenciado por parâmetros como (SOBRINHO e ALCÂNTARA, 2007):

- O processo de soldagem utilizado
- Geometria e dimensões da peça;
- Presença de pré aquecimento/temperatura de pré-aquecimento;
- Propriedades térmicas do metal base.

A figura 3 identifica as áreas de interesse no processo de soldagem por fusão.

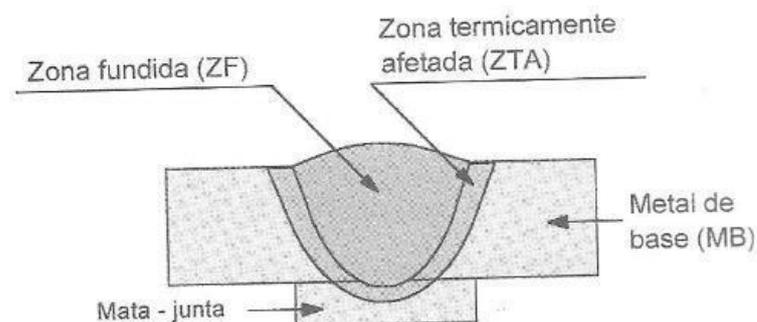


Figura 3 - Esquema mostrando as zonas de importância na soldagem
Fonte: WAINER et al, 1992.

A fusão dos materiais ocorre de forma localizada, através da aplicação de energia localizada por uma fonte de que concentra energia na área onde se deseja realizar a solda, atingindo temperaturas entre 2000°C e 20000°C. Idealmente, é esperado que a fusão ocorra de forma em que acarrete no mínimo de influência por variação de temperatura nas áreas vizinhas (MODENESI, 2007).

Os processos de fusão são numerosos e, por isso se faz necessária a sua categorização em subgrupos. Uma classificação muito difundida é feita de acordo como o tipo de energia utilizada, podendo ser química (reação exotérmica), elétrica (arco elétrico ou resistência), ou feixes de alta energia (KOU, 2007).

A tabela 1 caracteriza os principais processos de soldagem por fusão e suas principais características.

Tabela 1 - Principais processos de soldagem por fusão

Processo	Fontes de Calor	Tipo de corrente e polaridade	Agente Protetor ou de Corte	Aplicações
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem a arco submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com eletrodos revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com arame tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa.	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas.
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₃	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não-ferrosos com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz.
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou mistura destes	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas com tubulações
Soldagem por feixe eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta tensão. Poça +	Vácuo ($>> 10^{-4}$ mmHg)	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de ebulição de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₃	Como acima. Corte de materiais não metálicos.
Soldagem a gás	Chama oxi-acetilênica		Gás (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O)	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte: Adaptado de (MODENESI, 2012).

2.2.1 Processo de soldagem a arco elétrico

A soldagem por arco elétrico é caracterizada como um processo em que o calor requerido para fundir o metal é gerado por um arco formado pela corrente elétrica passando entre um arame de soldagem e a peça de trabalho (FORTES, 2005).

Modenesi (2007) justifica a ampla difusão deste processo devido a simplicidade no controle do mesmo, o custo inferior do equipamento necessário, o nível aceitável de insalubridade ao operador e ao fato de possuir uma fonte de energia adequada ao processo de fusão localizada.

O princípio do arco elétrico é baseado na descarga elétrica gerada na movimentação de elétrons do catodo para o anodo. O arco é mantido então devido a característica iônica adquirida do gás de proteção da poça de fusão quando aquecido (WAINER *et al.*, 1992).

Wainer *et al.* (1992) conceitua ainda alguns termos de importância para entendimento do arco elétrico. Define o **calor** envolvido no processo como o resultado da movimentação e choque de elétrons no arco. A ionização de interesse na geração e manutenção do arco elétrico é a ionização termiônica. Este fenômeno é consequência do choque entre partículas aquecidas e que resulta em um íon positivo e um íon livre, gerando um meio gasoso com propriedades condutoras de eletricidade, ao qual se dá o nome de plasma. A emissão termiônica é o fenômeno de irradiação de elétrons a partir de uma superfície aquecida.

Os eletrodos utilizados podem ser consumíveis ou não, dependendo do processo. Os eletrodos não consumíveis apenas fornecem elétrons e íons negativos, portanto, em casos que necessitem de metal de adição o mesmo deverá ser suprido por fontes adicionais. Além disso, em função das altas temperaturas, é necessário que seja realizada a proteção da poça de fusão da ação da atmosfera e em processos que utilizem eletrodos não-consumíveis esta proteção é feita por um agente proveniente de fonte externa, enquanto para processos com eletrodo consumível o eletrodo pode agir como fornecedor de carga elétrica, material de adição e agente protetor (MESSLER, 2007)

2.2.1.1 Soldagem por eletroescória (Electroslag Welding – ESW)

O processo de soldagem por eletroescória teve início no século passado, dando origem a um processo de soldagem na posição vertical. Os fundamentos do processo de eletroescória já eram conhecidos por volta de 1900, porém só em 1950 o processo de soldagem foi desenvolvido por russos que desenvolveram o princípio do processo no instituto de Soldagem elétrica, Paton (Ucrânia). O processo foi constituído em função da sua eficiência sobre o processo de soldagem a arco submerso na execução de soldas verticais em vasos de pressão. Este processo não depende de calor gerado pelo arco elétrico, o calor requerido é gerado através da resistência à passagem de corrente elétrica por um banho de escória líquida (VITTAL, 2012).

A soldagem por eletroescória é um processo por fusão através do metal de adição e das partes a unir por meio do calor gerado pela corrente elétrica por uma poça de escória fundida. A escória é obtida pela adição de um fluxo granuloso adicionado durante o processo, e este fluxo exerce também a função de proteger a poça de fusão e o metal de adição da contaminação que pode ser gerada pelo ambiente. A liquefação da escória é iniciada por arco elétrico, que é desfeito após o material fundido atingir a temperatura necessária para fundir o metal que será utilizado no preenchimento da junta de soldagem (JONES *et al.*, 1980).

A soldagem ESW é usada na fabricação de peças pesadas, principalmente de aço estrutural. As principais aplicações incluem: fabricação de lingotes, indústria naval (na fabricação do casco de navios, placas pesadas do batente do leme, reforços longitudinais e verticais do casco), vasos de pressão, máquinas pesadas, junções de metais dissimilares, superposição e solda de ferramentas e matrizes (VITTAL, 2012).

Dentre os benefícios da soldagem por eletroescória, pode-se destacar a possibilidade de alcançar a alta produtividade providenciada pela elevada taxa de deposição de material, a inexistência da restrição de espessura das peças a serem unidas e a alta velocidade do processo, que é semi automático (RICCI e EAGAR, 1982)

Por outro lado, a combinação da alta temperatura envolvida e a baixa taxa de resfriamento resulta numa ZTA extensa e um grão grosseiro. E, os tratamentos térmicos geralmente utilizados para melhorar as propriedades da junta soldada (normalização e têmpera seguida de revenimento) geralmente não pode ser aplicado nestes casos devido ao tamanho das peças. O processo ainda é limitado a posição de solda apenas na vertical (RICCI e EAGAR, 1982).

A figura 4 ilustra a configuração padrão de processos de soldagem por eletroescória, contemplando também os principais equipamentos utilizados.

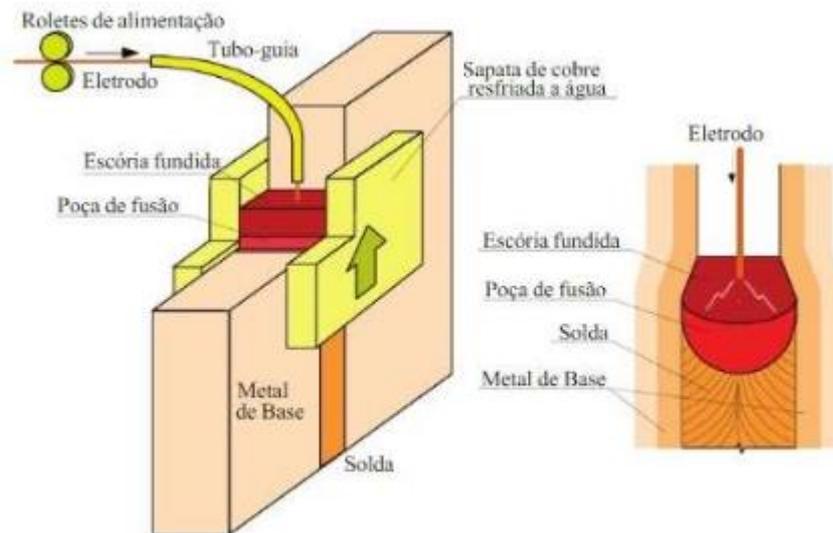


Figura 4 - Configuração padrão de soldagem por eletroescória
Fonte: VITTAL (2012)

2.2.1.2 Processo de Soldagem por Arco Submerso (Submerged Arc Welding – SAW)

Na soldagem ao arco submerso, a união das peças é obtida pela sua fusão localizada com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, geralmente um arame, e a peça de trabalho. O eletrodo, neste processo, permanece enterrado sob uma pilha de material mineral denominado fluxo para soldagem por arco submers. O uso do fluxo limita as posições de soldagem que podem ser usadas e impedem a observação direta da região do arco (AWS, 2004).

Na versão automatizada deste processo, a peça pode permanecer fixa, enquanto o cabeçote que alimenta o arame de solda se movimentava pela região a ser soldada. Ou ainda, o cabeçote pode permanecer fixo enquanto a peça se move por baixo dele (AWS, 2004).

O consumível utilizado é quase sempre um arame sólido, mas recentemente arames tubulares foram introduzidos. A soldagem por Arco Submerso é geralmente realizada com equipamentos automáticos, embora existam pistolas de soldagem manuais para o processo. Para aumentar a produtividade, um arranjo com vários consumíveis pode ser introduzido. Devido à sua elevada taxa de deposição de metal, é um processo particularmente adequado para longas articulações retas de boa qualidade na posição vertical. É amplamente utilizado na fabricação de vasos de pressão, em plantas químicas, em estruturas pesadas, em reparação e na indústria de construção naval (FORTES, 2004)

A figura 5 mostra o esquema de soldagem por arco submerso, identificando os principais componentes.

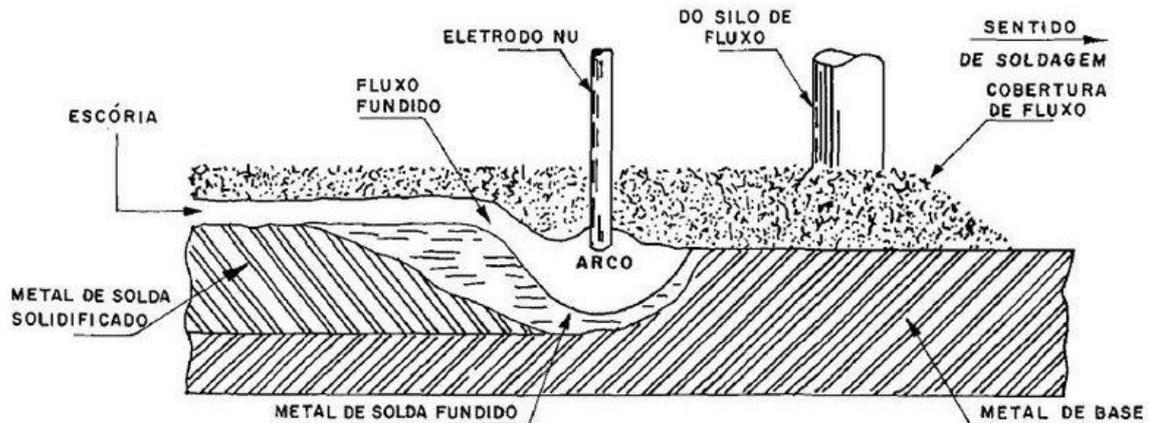


Figura 5 - Esquema do processo de soldagem com arco submerso
Fonte: PARANHOS, 1992

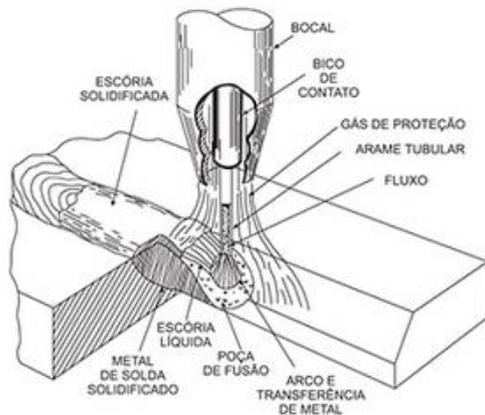
2.2.1.3 Processo de Soldagem com Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding – FCAW)

Assim como outros processos a arco elétrico, na soldagem com arame tubular a união ocorre pela fusão da região de interesse, distinguindo-se dos demais pelo eletrodo utilizado. O eletrodo tubular é um material compósito com interior constituído por fluxo fundente e a carcaça externa de material metálico (MACHADO, 2007)

A solda com arame tubular pode ser subdividida em dois grupos, de acordo com a técnica de proteção da zona fundida. No primeiro subgrupo, utiliza-se o próprio fluxo no interior do arame tubular como agente protetor da zona fundida, dispensando a presença de mecanismos de proteção adicionais. Por outro lado, no processo com proteção gasosa, a zona de fusão é alimentada com gases, como o dióxido de carbono e o argônio, para auxiliar na proteção contra a ação do nitrogênio e o oxigênio presentes na atmosfera (ASW, 1993).

A figura 6 mostra os dois subgrupos de solda com arame tubular e identifica os principais elementos.

Soldagem com arames tubulares com proteção externa



Soldagem com arames tubulares autoprotetidos

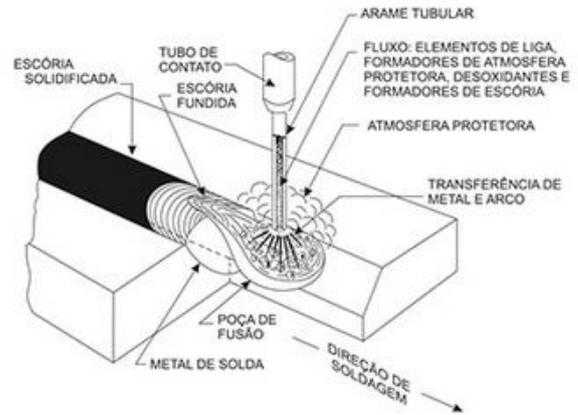


Figura 6 - Solda com arame tubular com proteção externa e auto protegida
 Fonte: FORTES, 2005

O processo de soldagem com arame tubular produz soldas de alta qualidade, arco estável e baixo nível de respingos, além de poder ser utilizado em qualquer posição e com qualquer tipo de junta. As altas taxas de deposição e o desenvolvimento de novos consumíveis têm levado as empresas a migrar para este processo. O arame tubular é utilizado em segmentos como o naval & offshore, nuclear, construção pesada, soldagem de perfis estruturais, pipeline e reparo e manutenção, e fabricação de estruturas e peças de aço carbono, aços baixa liga e aços inoxidáveis (AWS, 2004).

2.2.1.4 Processo de Soldagem com Atmosfera Gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW)

Soldagem por arco elétrico com gás de proteção, sigla em inglês GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), mais conhecida como soldagem MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas*) e (MAG – *Metal Active Gas*), trata-se de um processo de soldagem por arco elétrico entre a peça e o consumível em forma de arame, eletrodo não revestido, fornecido por um alimentador contínuo, realizando uma união de materiais metálicos pelo aquecimento e fusão. O arco elétrico funde de forma contínua o arame à medida que é alimentado à poça de fusão. (FORTES, 2005).

Na soldagem a arco com proteção gasosa, assim como todo processo a arco elétrico, a fusão dos metais base e de adição ocorre em consequência do arco estabelecido entre a ponta do eletrodo e a peça. O arame de soldagem utilizado é alimentado de forma contínua e automática e a proteção atmosférica é realizado por um gás fornecido externamente à zona de

fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera por um fluxo de gás, ou mistura de gases, inerte (MIG) ou ativo (MAG) (CORREIA *et al.*, 2004).

A proteção gasosa é alimentada através da tocha de soldagem e defende a poça de fusão da ação dos contaminantes atmosféricos, além de estabelecer um meio propício ao início e continuidade do arco elétrico. Os gases inertes frequentemente utilizados são o Argônio (Ar) e o Hélio (He), mas pode ser utilizada uma mistura destes dois gases com o objetivo de otimizar as propriedades do cordão de solda. É comum também a adição de elementos como o oxigênio e o dióxido de carbono a esses dois gases nobres para aumentar a estabilidade do arco. Na soldagem MAG, o dióxido de carbono é utilizado como agente protetor da poça de fusão (FILHO *et al.*, 2007)

A figura 7 mostra o processo de soldagem GMAW e a tocha de soldagem.

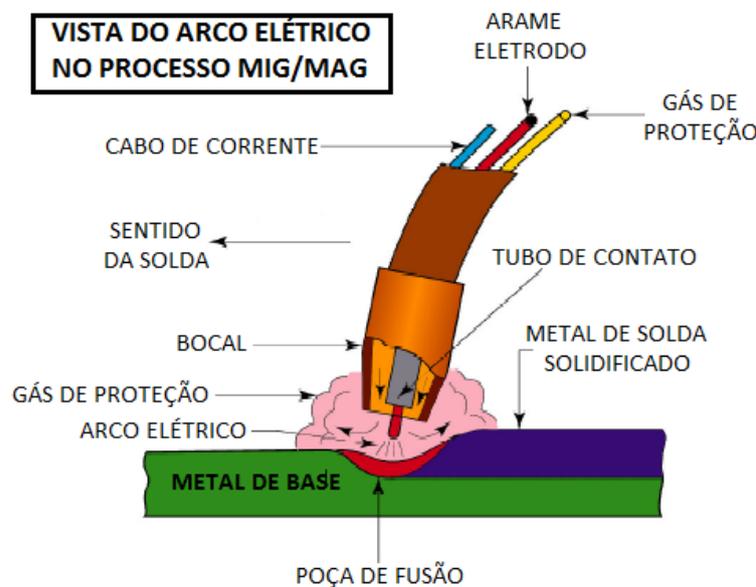


Figura 7 - Esquema da formação da poça de fusão no processo GMAW
Fonte: Adaptado de AWS, 2004

Segundo Moghaddam (2016), o processo de soldagem MIG/MAG proporciona muitas vantagens na soldagem manual e automática dos metais para aplicações de alta e baixa produção. Suas vantagens combinadas quando comparado ao eletrodo revestido, arco submerso e TIG são:

- a soldagem pode ser executada em todas as posições;
- não há necessidade de remoção de escória;
- alta taxa de deposição do metal de solda;

- tempo total de execução de soldas de cerca da metade do tempo se comparado ao eletrodo revestido;
- altas velocidades de soldagem; menos distorção das peças;
- largas aberturas preenchidas ou amanteigadas facilmente, tornando certos tipos de soldagem de reparo mais eficientes;
- não há perdas de pontas como no eletrodo revestido.

O procedimento é excelente para ser empregado na: fabricação de componentes e estruturas, fabricação de equipamentos de médio e grande porte, indústria automobilística, manutenção de equipamentos e peças metálicas, recuperação de peças desgastadas e revestimentos de superfícies metálicas com materiais especiais (MOGHADDAM, 2016).

2.2.2 Processo de Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas – TIG)

O processo TIG ou GTAW teve sua investigação inicial na década de 1920, utilizando hélio para proteção da poça de fusão e foi patenteado no fim da desta década. Sua utilização, porém, foi intensificada com o início da Segunda Grande Guerra aperfeiçoar a soldagem de materiais de fácil oxidação como o alumínio e o magnésio, em bancos de aviões. Atualmente além do alumínio e magnésio, o processo é amplamente utilizado para soldagem de ligas de titânio e aços inoxidáveis (AWS, 1991).

O processo de soldagem TIG utiliza um eletrodo de tungstênio (W) para gerar o arco elétrico entre a peça envolvida em uma atmosfera gasosa de argônio ou hélio. O gás é guiado para a zona de fusão através do bico da tocha de soldagem e auxilia tanto na formação do arco elétrico, devido às características condutoras de eletricidade do gás, quanto na proteção da poça de fusão e do cordão de solda da ação oxidante da atmosfera (LUCAS, 1990)

Na soldagem TIG, pode-se adicionar material ou não, quando não há adição de material, a soldagem é denominada “autógena” (AWS, 1991). A soldagem autógena é adequada na união de tubulações bem como na união de chapas com tubos. Em componentes de pequena espessura permite a realização de soldas com um bom acabamento e um alto nível de qualidade através de ajustes nos parâmetros de soldagem (LUCAS, 1996). O eletrodo de tungstênio não participa da formação da solda, tendo função da manutenção do arco a elevadas temperaturas.

A figura 8 ilustra um esquemático do processo TIG.

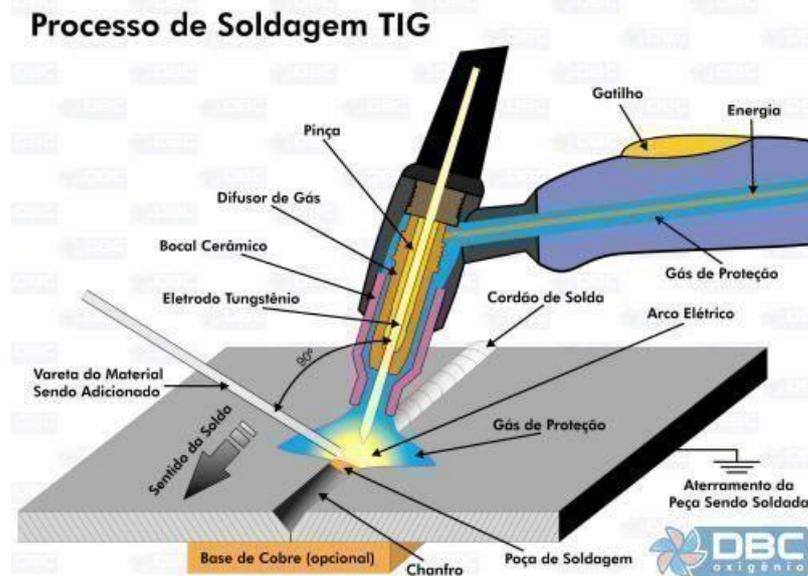


Figura 8 - Esquemático do processo de soldagem TIG
 Fonte: DBC Oxigênio, 2014

Esta técnica tem sido amplamente explorada pois tem o potencial de ser totalmente automatizada e possibilita o monitoramento das características do processo. Em adição, o processo se mostra vantajoso por permitir soldas sem restrição de posição e materiais. O eletrodo não consumível possibilita realizar soldas sem metal adicional e uma solda de excelente qualidade, quase sem defeitos, sem respingos, alta velocidade de soldagem e apresenta cordões de solda de qualidade superior em peças de espessura reduzida (AWS, 2004).

Entretanto, o processo de soldagem TIG apresenta baixas taxas de deposição de material quando comparado a técnicas que utilizam eletrodos consumíveis e possui a desvantagem de ser um processo mais dispendioso. Além disso, possui baixa tolerância à presença de contaminantes no metal base e de adição, requer maior habilidade do soldador e maior controle do ambiente e das propriedades do processo (AWS, 2004).

2.3 Processo de Soldagem a Eletrodo Revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW)

Este método de soldagem foi criado por A. P. Strohmenger e Oscar Kjellberg no início do século 20, a partir da necessidade de criar técnicas de proteção da poça de fusão, com a finalidade de resolver os problemas de fragilidade e porosidade no cordão de solda causados pela interação com o nitrogênio e oxigênio presentes na atmosfera (LOFTING, 2013).

O processo de soldagem utilizando eletrodo revestido ou SMAW (Shielded Metal Arc Welding) é o mais conhecido e empregado processo de união de materiais devido à sua facilidade de uso e equipamentos de custo relativamente mais baixo se comparado a outros processos de soldagem. A soldagem é realizada pelo calor liberado por um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor produzido pelo arco funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Apesar da evolução do processo ao longo dos anos, o princípio de funcionamento da soldagem utilizando eletrodo revestido permanece o mesmo. Um arco elétrico mantido entre o eletrodo e a peça fornece o calor necessário para derreter o material do eletrodo para realizar a solda. O revestimento dos eletrodos é composto por uma mistura de substâncias químicas, minerais e pó de ferro, que formam uma camada protetora de gases durante o aquecimento e um revestimento de escória líquida, que é removida após o resfriamento. O metal contido no centro do eletrodo forma o cordão de solda junto com o pó de ferro, constituinte do revestimento (WEMAN, 2012).

A figura 8 ilustra o processo de soldagem por eletrodo revestido e o processo de formação e solidificação da poça de fusão.

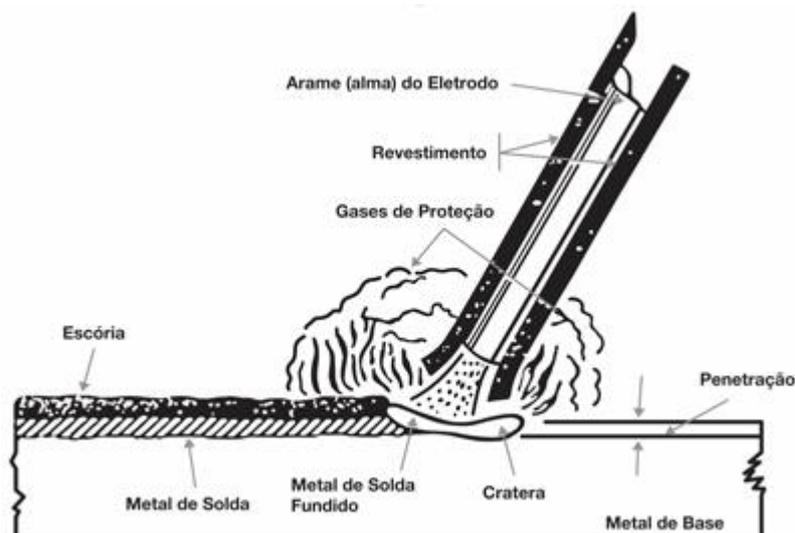


Figura 8 - Ilustração esquemática do processo de soldagem por eletrodo revestido
Fonte: FORTES, 2005

O equipamento básico para soldagem com eletrodo revestido possui umas das mais simples configurações possíveis, em comparação aos outros processos elétricos, consiste basicamente de (ALMEIDA, 2009):

- Fonte de energia;
- Alicate para fixação dos eletrodos;
- Cabos de interligação;
- Eletrodos;
- Pinça para ligação à peça;
- Equipamento para limpeza de solda;

Em todos os processos de soldagem por arco elétrico, a aplicação e utilização dos equipamentos corretos são de grande importância para a garantia de um cordão de solda livre de descontinuidades. O termo parâmetro de soldagem se refere a todas as variáveis do processo de soldagem necessárias para a deposição de material em uma junta soldada. Uma característica importante da soldagem com eletrodos revestidos é que a tensão do arco não é controlada, ou seja, é função dos outros parâmetros de soldagem como a corrente e o comprimento do arco, uma vez que o controle da distância entre o eletrodo e a peça é realizado manualmente, sem grande precisão, a transferência metálica está associada a variações no comprimento efetivo do arco e maiores tensões são requeridas para operação à medida que a corrente de soldagem é aumentada (MODENESI, 2012).

A corrente de soldagem exerce influência sobre praticamente todas as características operatórias do processo; o aspecto do cordão, propriedades da junta da soldada, penetração e geometria do cordão. Fixados todos os outros parâmetros de soldagem, a intensidade da corrente elétrica é determinante na taxa de deposição do material e no aporte térmico fornecido à peça. A velocidade de avanço é a segunda variável mais importante no processo, apesar de seu controle ser impreciso no caso de operações manuais, a altura e a largura do cordão variam inversamente com a velocidade de avanço (WAINER; BRANDI; MELO, 2009).

A figura 9 ilustra os principais equipamentos no processo de soldagem por eletrodo revestido.

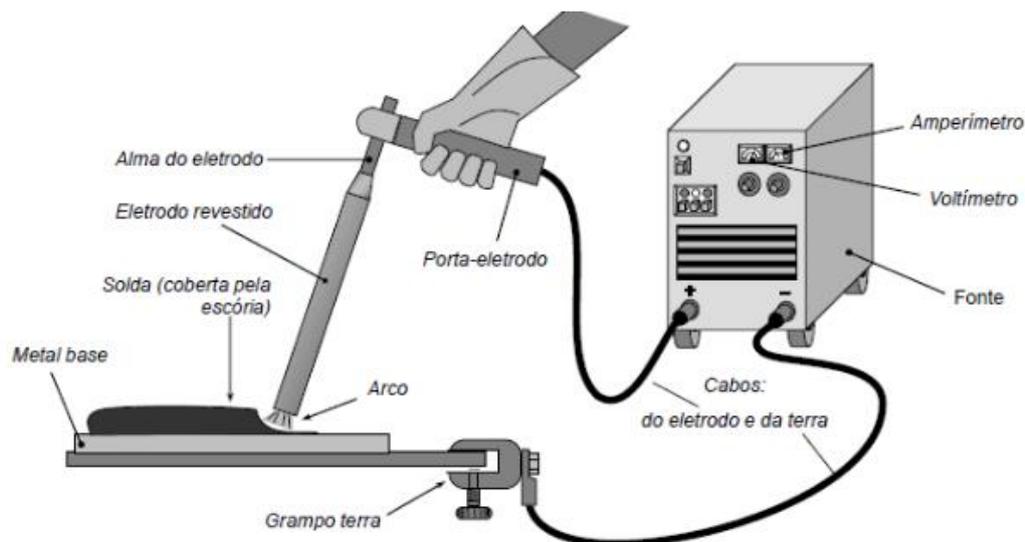


Figura 9 - Esquema do processo de soldagem com eletrodo revestido
 Fonte: PONOMAROV, 2019

2.3.1 Eletrodo

Os Eletrodos Revestidos para soldagem de aços carbono consistem de apenas dois elementos principais: a alma metálica e o revestimento. Os revestimentos consistem de misturas de compostos minerais e/ou orgânicos com a finalidade de proteger a massa de fusão. A alma metálica contém alguns elementos residuais, porém os teores de fósforo e enxofre devem ser muito baixos para evitar fragilização no metal de solda. A matéria prima para a alma metálica é um fio-máquina laminado a quente na forma de bobinas, que é posteriormente trefilado a frio até o diâmetro adequado do eletrodo. A alma metálica tem as funções principais de conduzir a corrente elétrica e fornecer metal de adição para a junta (WAINER; BRANDI; MELLO, 2009).

Segundo Fortes (2005) e Okumura (1982), cada um dos diversos elementos componentes do revestimento do eletrodo desempenha uma função específica bem definida.

Dentre elas, pode-se destacar (FORTES, 2005):

- **Proteção do metal de solda** contra a ação do oxigênio e nitrogênio presentes na atmosfera ao redor do material fundido, que podem causar fragilidade e porosidade no cordão de solda após a solidificação. Esta proteção é feita através da presença de materiais oxidantes e de elementos que ao se volatilizarem, criem uma atmosfera protetora.

- **Elementos estabilizadores do arco elétrico**, como o óxido de titânio (TiO_2), a ilmenita (FeTiO_2) e o silicato de potássio (K_2SiO_3) garantem um arco que abre facilmente, que trabalha com qualquer magnitude de corrente e comprimento de arco.
- **Aglomerantes**, que auxiliam na formação de uma massa plástica capaz de ser extrudada sobre as varetas metálicas e posteriormente secada no forno.
- **Formadores de escória e fluxo**, que atuam principalmente na formação de uma camada extra de proteção contra a ação da atmosfera, absorver elementos contaminantes e transportá-los para a superfície e garantir taxas de resfriamento mais brandas.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2009) os principais tipos de revestimentos encontrados nos eletrodos são os celulósicos, rutilícos, básicos e ácidos, sendo sua classificação baseada no tipo de escória e gases de proteção que são formados após o aumento de temperatura, segue abaixo a descrição de cada um dos principais revestimentos.

- **Eletrodos Rutilícos:** O revestimento destes eletrodos possui mais de 20% de óxido de titânio, obtido através da areia de rutilo ou ilmenita. São capazes de conferir alta estabilidade ao arco, com tensões comparativamente baixas, pequena quantidade de respingos e bom aspecto superficial do cordão. A proteção gasosa do arco contém H_2 , CO , CO_2 e N_2 . A resistência mecânica e a ductilidade obtida são boas e a adição de pó de ferro ao revestimento possibilita a obtenção de altas taxas de deposição e ambas correntes, contínua ou alternada, podem ser usadas;
- **Eletrodos Básicos:** O revestimento é baseado no carbonato de cálcio e fornece depósitos com mais baixos teores de hidrogênio e inclusões que qualquer outro tipo. A proteção gasosa do cordão é devida a formação de CO e CO_2 isento de hidrogênio;
- **Eletrodos celulósicos:** Possuem elevada quantidade de material orgânico responsáveis por uma grande quantidade de gases que protegem a poça de fusão. A quantidade de escória é pequena e o arco gerado é instável causando grande quantidade de respingos, porém, causam alta penetração. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009) o aspecto do cordão não é bom, apresentando aspecto irregulares.

A figura 10 apresenta o sistema de classificação utilizada pela *American Welding Society* (AWS) para eletrodos. (AWS, 2004)

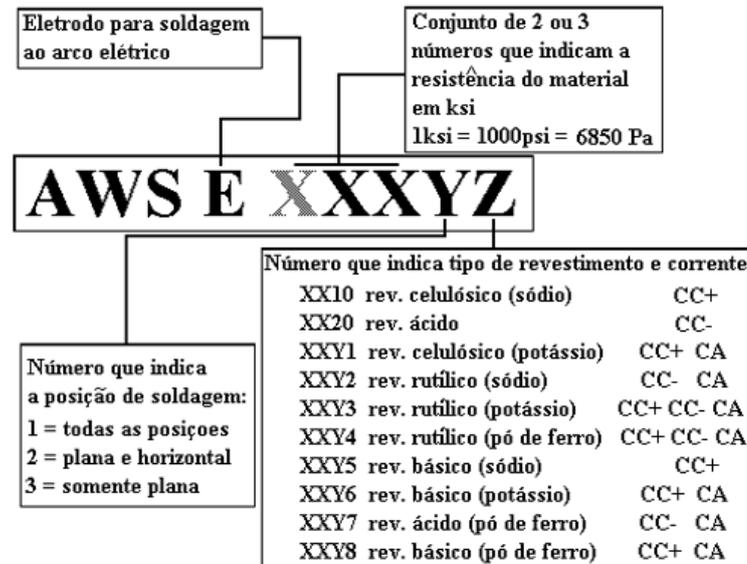


Figura 10 - Classificação dos eletrodos segundo a AWS
Fonte: Adaptado de AWS, 2004

Weman (2012) explica que a escolha do tipo de eletrodo depende de características como: estabilidade do arco, facilidade de remoção da escória, propriedades físicas do cordão de solda, posições de soldagem possíveis, resistência a corrosão, geração de fumos, dentre outros fatores.

2.3.2 Variáveis Operacionais

No projeto de uma junta e durante o processo de soldagem com eletrodo revestido, existem algumas variáveis em relação ao processo de soldagem que devem ser levadas em consideração. O domínio do soldador em relação à seleção do tipo e dimensões do eletrodo, velocidade e posição de soldagem, características da corrente elétrica e comprimento do arco garantem a obtenção de uma solda de qualidade superior (AWS, 2004).

A corrente elétrica é a variável de maior influência no resultado final da solda, e, conseqüentemente, na qualidade do cordão de solda. As características da corrente elétrica afetam o resultado do processo diretamente através do tipo de corrente, da intensidade da corrente e da intensidade da tensão. A corrente de soldagem tem influência na aparência da solda, nas propriedades mecânicas da junta, tem controle sobre a intensidade da energia térmica e sobre a zona termicamente afetada e as transformações metalúrgicas que ali ocorrem (WAINER *et al.*, 1992).

As dimensões do eletrodo determinam a faixa aplicável de corrente elétrica, agindo como um limitador físico ao aumento da densidade de corrente. O aumento da corrente elétrica implica na elevação da taxa de deposição de material, que é o indicador principal de

produtividade, mas o seu aumento excessivo pode causar um sobreaquecimento, culminando em danos ao revestimento. Os valores altos de corrente de soldagem aumentam a taxa de resfriamento da peça e o nível de penetração da solda. Já valores baixos da corrente elétrica implicam em instabilidade do arco (WAINER *et al.*, 1992).

O tipo de corrente elétrica também altera as características da solda. Por exemplo, equipamentos que utilizam corrente elétrica contínua produzem um arco mais estável e a transferência de metal para a junta ocorre de maneira mais suave, pois a intensidade da corrente e a direção do fluxo de corrente não estão em constante mudança como acontece em correntes alternadas. As fontes CC trabalham bem com a maioria dos eletrodos e são amplamente utilizadas em posições sobrecabeça e vertical. A polaridade de corrente positiva (CC+) nas fontes CC asseguram uma maior penetração, enquanto os equipamentos de polaridade negativa (CC-) possuem maiores taxas de fusão do material (AWS, 2004).

Já nas fontes de corrente alternada não ocorre o maior problema das de CC, a explosão do arco, que ocorre durante a soldagem de materiais magnéticos (ferro e níquel). Alguns eletrodos que utilizam pó de ferro no material do revestimento são elaborados especificamente para operação nos valores altos de corrente permitidos pelo uso de CA. O uso destes eletrodos em corrente alternada viabiliza as velocidades de soldagem mais altas atingíveis pelo processo (AWS, 2004).

Outro parâmetro diretamente influenciado pelas características de corrente é o comprimento do arco elétrico. O tamanho do arco é medido entre a ponta do eletrodo e a superfície da poça de fusão, o que torna a sua identificação e mensuração mais complicadas do que sua conceituação, por isto, a tensão de operação do arco é o melhor indicador dessa variável. O comprimento do arco mais adequado para uma dada situação é definido levando em consideração as características do eletrodo (classificação, diâmetro e revestimento), intensidade da corrente e posição de soldagem. Essa variável é controlada exclusivamente pela habilidade do soldador, sendo que, um arco muito curto pode causar aumento da quantidade de respingos e em alguns casos pode inibir a produção dos gases de proteção e causar problemas de porosidade na soldagem. No outro extremo, um arco muito longo irá espalhar o material fundido enquanto o eletrodo se move pela junta, a penetração não será tão profunda devido à fusão insuficiente do metal base, além de gerar respingos (MARQUES *et al.*, 2009).

A velocidade de avanço do eletrodo é outra variável que interfere nas características finais e no aspecto do cordão de solda produzido pelo eletrodo revestido. Este parâmetro é

definido pela velocidade com que o eletrodo é conduzido pela junta e interfere diretamente na geometria do cordão de solda, assim como na distribuição de calor na peça. Assim sendo, velocidades altas diminuem a penetração, mordeduras na borda do cordão e dificultam a remoção da escória, reduzem as dimensões da ZTA e o tempo de resfriamento. Já uma movimentação mais lenta do eletrodo produz um cordão de solda alargado e convexo, com penetração rasa, além de aumentar o tamanho da área termicamente afetada e o tempo necessário para resfriamento (MACHADO, 2007).

A figura 11 mostra os efeitos dos parâmetros de soldagem no aspecto do cordão de solda. Onde: a) Aspecto do cordão de solda ideal; b) Aspecto do cordão de solda com corrente muito baixa; c) Aspecto do cordão de solda com corrente muito alta; d) Aspecto do cordão de solda com arco elétrico muito curto; e) Aspecto do cordão de solda com arco elétrico muito alto; f) Aspecto do cordão com baixa velocidade de soldagem; g) Aspecto do cordão com alta velocidade de soldagem.

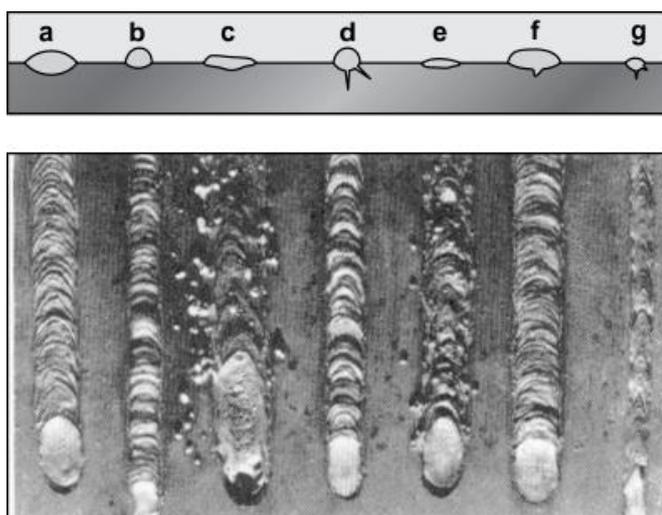


Figura 11 - Efeito dos parâmetros de soldagem no aspecto do cordão de solda
Fonte: Adaptado de AWS, 2004

2.4 Tensões Residuais na Soldagem

Segundo Ogata (2003), tensões residuais são aquelas que permanecem em um sólido quando os gradientes de temperatura e todas as forças externas, com exceção da força da gravidade, cessam de agir sobre este sólido.

Tensões residuais são aquelas que são encontradas no corpo de prova quando este não está submetido a solicitações externas. Elas estão frequentemente presentes em peças submetidas a diferentes tipos de tratamentos térmicos ou mecânicos e apresentam um

potencial para causar diversos problemas como a formação de trincas, problemas dimensionais e aumentam a chance da peça ou estrutura fraturar de forma frágil, reduzindo assim a vida útil do componente, embora existam casos em que estas tensões podem ser benéficas (MODENESI, 2008).

Em geral, tensões residuais compressivas na peça apresentam características mais favoráveis, pois melhoram a vida útil dos componentes, e o contrário ocorre com tensões residuais trativas, pois tendem a propagar trincas quando submetidas a esforços cíclicos (TOTTEN e HOWES, 2003).

A tensão residual tem propriedades elásticas, de modo que o valor máximo que essas tensões podem atingir é a tensão de escoamento local do material. A tensão residual também é definida como ordinárias, ou seja, uma tensão de tração é adicionada a outra tensão de tração, ou uma tensão de tração é subtraída de uma tensão de compressão e vice-versa. É possível aliviar as tensões residuais ao aquecer o material a uma temperatura na qual as tensões residuais são maiores ou iguais a tensão de escoamento do material. Assim, as tensões residuais serão aliviadas, uma vez que causarão fluxo do material (deformação plástica) (DONATO, 2008).

Segundo Cindra Fonseca (2000), as tensões residuais são qualificadas em 3 grupos:

- Tipo I ou macrotensões são aquelas tensões que aparecem no espectro macroscópico. São consideradas quase homogêneas uma vez que mantém o equilíbrio das tensões na escala de múltiplos grãos.
- As tensões de tipo II são chamadas de tensões microscópicas e são equilibradas nos limites dos contornos de grãos ou entre grãos vizinhos.
- Tipo III (submicroscópicas) são as tensões que aparecem na escala interatômica dos materiais e são equilibradas nos limites das células unitárias, são estas tensões que causam defeitos cristalinos nos materiais.

A figura 13 mostra a distribuição de tensões na união por soldagem de duas placas.

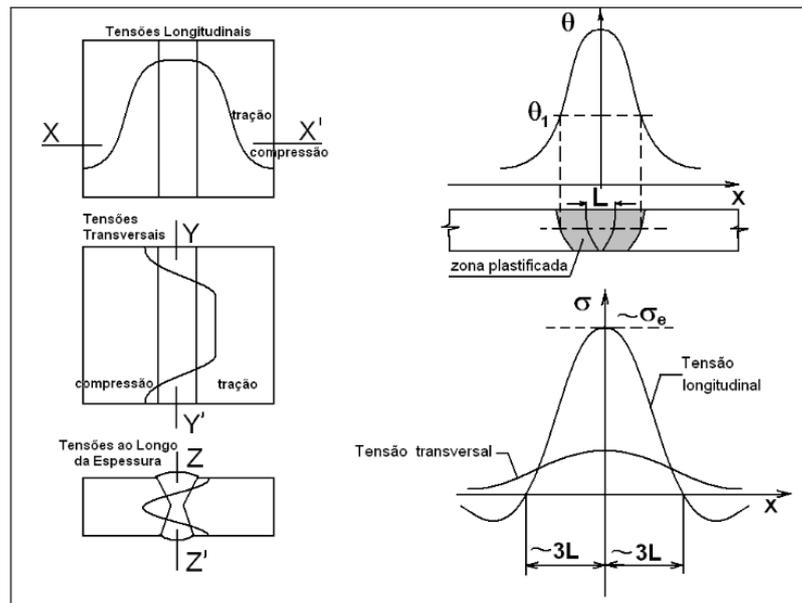


Figura 12 - Representação esquemática da distribuição de tensões residuais na união de peças livres.

Fonte: Adaptado de MACHERAUCH, 1977

A tensão residual de soldagem é o resultado de mudanças desiguais na temperatura do material causadas pelo processo de soldagem. As etapas de aquecimento e posteriormente de resfriamento são de vital importância. Se o objeto for aquecido e resfriado uniformemente, e não houver restrições quanto às suas mudanças dimensionais (expansão e contração), estas não terão um efeito mecânico importante sobre o objeto, ou seja, após o ciclo térmico, o objeto nem mesmo deveria ter resíduos para enfatizar que não há distorção. No entanto, se a temperatura de toda a peça mudar de maneira desigual, ou se a peça não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, pode ocorrer tensão residual e / ou deformação. Portanto, pode-se afirmar que a tensão residual térmica é causada por deformações plásticas não uniformes causadas por variações térmicas desiguais ao longo do material. (AGGEN *et al*,1998).

Durante a soldagem por fusão a arco elétrico, ocorre um aquecimento localizado no material de base, o que leva uma pequena porção desse material a atingir a fusão em um momento específico, formando a poça de fusão. Posteriormente, essa poça solidifica-se e forma a zona fundida. Como há continuidade no material, a região adjacente à zona fundida atinge uma temperatura muito próxima à de fusão. Quando um material metálico é aquecido, ele dilata, mas contrai quando resfriado. Durante a soldagem, o metal aquecido é impedido de se expandir nas regiões mais frias do material, o que resulta em tensões residuais de compressão próximas à zona de fusão e tensões residuais de tração nas regiões mais distantes da zona de fusão e mais frias que impediram sua dilatação. Caso as tensões residuais

ultrapassem o limite de escoamento do material, ele sofrerá deformação plástica para aliviar as tensões. Quando a porção aquecida começa a resfriar, ela tende a se contrair. Inicialmente, a região se alivia da compressão, mas, como não consegue reduzir seu tamanho devido ao restante do material, ela acaba sendo tracionada. As tensões trativas abaixo do limite de escoamento permanecem ao final da soldagem e são chamadas de tensões residuais (MODENESI, 2008).

A figura 14 mostra a relação entre as tensões residuais e variações de temperatura no cordão de solda durante o processo de soldagem.

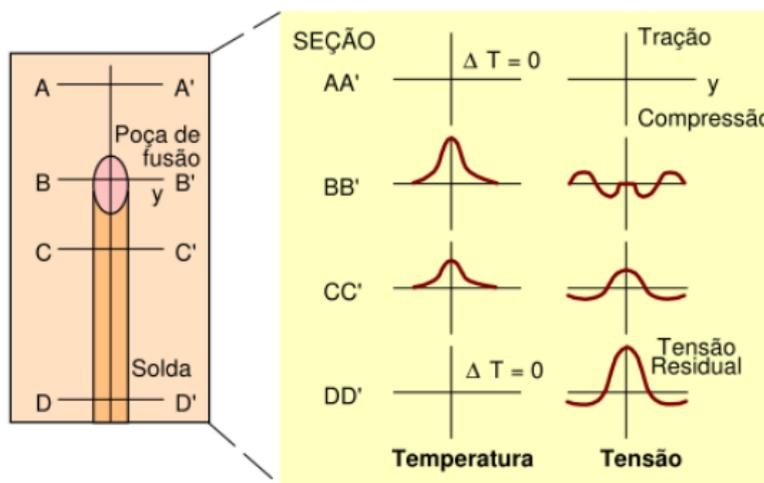


Figura 13 – Representação esquemática da relação entre as tensões residuais e o gradiente de temperatura no processo de soldagem
Fonte: MODENESI, 2008

2.5 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância é uma técnica aplicada em circunstâncias em que se deseja confrontar três ou mais tratamentos. Em razão dos diversos tipos de experimentos que podem ser realizados, existem diversas variações da ANOVA, que são escolhidas de acordo com o tipo de amostragem (DOS ANJOS, 2005).

Dos Anjos (2005) apresenta conceitos que são indispensáveis para o entendimento básico sobre experimentação:

- O **tratamento** pode ser entendido como a condição imposta ao objeto de estudo, podendo, em um experimento, serem utilizados mais de um tratamento. A título de exemplo, pode-se mencionar tamanhos de peças, equipamentos de diferentes marcas e quantidade de lubrificante em um equipamento como tipos de tratamentos. Os tratamentos que podem ser dispostos em uma ordem são

tratamentos **quantitativos**, já os tratamentos que não podem ser ordenados são chamados de **qualitativos**;

- **Unidade experimental** é o objeto alvo da aplicação do tratamento;
- **Repetição** é definida como a quantidade de vezes que o tratamento é executado na unidade experimental. A escolha do número de repetições depende tanto dos recursos disponíveis, quanto do tipo de experimento e da variável resposta;
- **Variáveis** são características do experimento que não são constantes. Entende-se por **variáveis aleatórias** aquelas que não podem ter o seu valor definido antes da execução do experimento;
- **Delineamento experimental** é a forma pela qual a pesquisa é conduzida, e dita a maneira de aplicar os tratamentos às unidades experimentais, com o intuito de amenizar o erro experimental.

A análise de variância busca testar se há diferenças entre as médias dos tratamentos, o que, analogamente, significa realizar o teste das hipóteses propostas pelo experimento (PAESE *et al.*, 2001).

Os pressupostos básicos da análise de variância são:

- As amostras são aleatórias e independentes.
- As populações têm distribuição normal (o teste é paramétrico).
- As variâncias populacionais são iguais.

Na prática, esses pressupostos não precisam ser todos rigorosamente satisfeitos. Os resultados são empiricamente verdadeiros sempre que as populações são aproximadamente normais (isso é, não muito assimétricas) e têm variâncias próximas (MILONE, 2004).

A ANOVA é amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento, como na indústria, na medicina, na agricultura, na psicologia, entre outras. É uma ferramenta importante para a tomada de decisão em situações em que é necessário comparar grupos de dados (Montgomery, 2017).

Existem vários tipos de ANOVA, sendo os mais comuns o ANOVA de um fator e o ANOVA de dois fatores. O ANOVA de um fator é utilizado quando há apenas um fator ou variável

independente a ser estudado, enquanto o ANOVA de dois fatores é utilizado quando há duas variáveis independentes a serem estudadas (Hair Jr. et al., 2014).

Para realizar uma ANOVA, é necessário seguir alguns passos básicos, como:

1. Definir as hipóteses nula e alternativa;
2. Coletar os dados;
3. Verificar as premissas da ANOVA, como normalidade e homogeneidade de variância;
4. Realizar a ANOVA propriamente dita, calculando o valor F e o p-valor;
5. Interpretar os resultados e concluir se há diferenças estatisticamente significativas entre as amostras.

A ANOVA pode ser realizada manualmente, com o uso de tabelas e cálculos, ou utilizando softwares estatísticos, como o SPSS, o R ou o Excel. É importante lembrar que a interpretação dos resultados da ANOVA deve ser feita com cuidado e levando em consideração o contexto em que a pesquisa foi realizada (Bussab e Morettin, 2002).

Página 2: Preparação dos dados para análise de variância (ANOVA)

Antes de realizar uma Análise de Variância (ANOVA), é necessário preparar os dados a serem analisados. Essa etapa é importante para garantir que os resultados da análise sejam precisos e confiáveis (Field, 2013).

Os dados devem ser coletados de forma cuidadosa e organizados de acordo com a estrutura do experimento. É importante que as amostras sejam independentes e que não haja viés na seleção dos participantes ou na forma como os dados foram coletados (Montgomery, 2017).

Uma das etapas mais importantes na preparação dos dados é verificar se eles atendem às premissas da ANOVA. As premissas da ANOVA incluem a normalidade dos dados e a homogeneidade de variância (Hair Jr. et al., 2014).

A normalidade dos dados pode ser verificada por meio de gráficos de histogramas ou pelo teste de normalidade, como o teste de Shapiro-Wilk. Se os dados não forem normalmente distribuídos, é possível aplicar transformações, como a transformação de Box-Cox, para torná-los mais próximos da normalidade (Field, 2013).

A homogeneidade de variância pode ser verificada por meio de gráficos de dispersão ou pelo teste de Levene. Se os dados não forem homogêneos, é possível utilizar uma ANOVA robusta, como a ANOVA de Welch (Montgomery, 2017).

Além disso, é importante verificar se os dados contêm outliers ou dados faltantes, e decidir como lidar com eles. Outliers podem ser removidos ou tratados com métodos estatísticos, enquanto dados faltantes podem ser imputados ou excluídos da análise (Hair Jr. et al., 2014).

2.6 Ensaios de dureza por indentação

Os ensaios de dureza por indentação são métodos amplamente utilizados para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Esses ensaios consistem em aplicar uma carga controlada em uma amostra de material por meio de uma ponta de geometria e dimensões definidas e avaliar a profundidade ou a largura da indentação resultante (DIETER, 1988).

2.6.1 Ensaio Brinell

O ensaio de dureza Brinell foi desenvolvido em 1900 pelo engenheiro sueco Johan August Brinell e é utilizado para avaliar a dureza de materiais de baixa a média resistência mecânica, como ligas de alumínio, cobre, latão e aços macios (SHACKELFORD, 2015). Nesse ensaio, a carga é aplicada por meio de uma esfera de aço endurecido de diâmetro conhecido, que é pressionada contra a superfície da amostra durante um tempo determinado. A dureza Brinell é definida como a carga aplicada dividida pela área da indentação resultante (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

2.6.2 Ensaio Vickers

O ensaio de dureza Vickers foi desenvolvido em 1921 pelo engenheiro britânico George Vickers e é utilizado para avaliar a dureza de materiais de alta resistência mecânica, como aços endurecidos, cerâmicas e materiais compostos (SHACKELFORD, 2015). Nesse ensaio, a carga é aplicada por meio de uma pirâmide de diamante com ângulo de abertura de 136° , que é pressionada contra a superfície da amostra durante um tempo determinado. A dureza Vickers é definida como a carga aplicada dividida pela área da indentação resultante (DIETER, 1988).

2.6.3 Ensaio Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell foi desenvolvido em 1922 pelos irmãos americanos Stanley P. Rockwell e Hugh M. Rockwell e é amplamente utilizado na indústria para avaliar a dureza de materiais metálicos e não metálicos (SHACKELFORD, 2015).

No ensaio Rockwell, a carga é aplicada por meio de um penetrador cônico de diamante ou de metal duro, que é pressionado contra a superfície da amostra durante um tempo determinado. A profundidade da indentação é medida antes e depois da aplicação da carga, e a dureza Rockwell é definida como a diferença entre essas medidas, multiplicada por uma constante específica para cada escala de dureza. Existem diversas escalas de dureza Rockwell, cada uma correspondendo a um penetrador e uma carga específicos (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

O ensaio de dureza Rockwell apresenta diversas vantagens em relação aos ensaios Brinell e Vickers, como maior precisão e facilidade de realização (SHACKELFORD, 2015). Além disso, é possível avaliar diferentes regiões da amostra com diferentes escalas de dureza Rockwell, o que permite uma avaliação mais detalhada das propriedades mecânicas do material (DIETER, 1988).

Porém, é importante ressaltar que o ensaio de dureza Rockwell apresenta algumas limitações. Ele não é indicado para avaliar materiais muito finos, muito duros ou muito macios, já que a indentação pode ser muito superficial ou profunda demais, comprometendo a precisão dos resultados (SHACKELFORD, 2015).

2.7 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020, também conhecido como aço carbono 1020, é um tipo de aço de baixo teor de carbono que apresenta uma composição química balanceada entre ferro e carbono. Conforme mencionado por Jayaraman e Kumar (2012), o aço SAE 1020 possui um teor de carbono de cerca de 0,20%, o que o torna adequado para aplicações que requerem uma combinação de resistência mecânica e ductilidade. É amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades mecânicas e químicas, e é considerado um dos aços mais versáteis e econômicos disponíveis.

O aço SAE 1020 possui uma resistência média e alta ductilidade, o que significa que pode ser facilmente deformado sem quebrar. Essas propriedades mecânicas são de grande importância em muitas aplicações industriais. De acordo com Karimzadeh et al. (2017), a alta ductilidade do aço SAE 1020 permite que ele seja utilizado em processos de conformação a frio, tais como a estampagem e a dobra, sem que ocorra a ruptura do material.

Uma das formas de aumentar as propriedades mecânicas do aço SAE 1020 é através do processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento, que consiste em aquecer o aço a uma temperatura elevada, seguido de um resfriamento rápido e um aquecimento posterior para reduzir a fragilidade do material. Esse processo permite aumentar a resistência do aço sem comprometer sua ductilidade e tenacidade (FAGHIHI-SANI et al., 2018).

De acordo com Nasiri et al. (2016), a adição de pequenas quantidades de elementos de liga, como cromo e molibdênio, pode melhorar ainda mais as propriedades mecânicas do aço SAE 1020. Esses elementos de liga formam compostos intermetálicos que aumentam a resistência e a dureza do aço, sem comprometer a sua usinabilidade e soldabilidade.

Em resumo, o aço SAE 1020 é um tipo de aço carbono de baixo teor de carbono, amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades mecânicas e químicas. Este tipo de aço apresenta uma resistência média, alta ductilidade, boa usinabilidade e soldabilidade, além de ser relativamente barato em comparação com outros tipos de aço. O aço SAE 1020 é utilizado em uma ampla variedade de aplicações na indústria, incluindo na fabricação de peças automotivas, de construção civil e de máquinas e equipamentos. É importante seguir as especificações técnicas e normas de qualidade durante a produção do aço SAE 1020, a fim de garantir a qualidade e a segurança das peças fabricadas (JAYARAMAN; KUMAR, 2012; KARIMZADEH et al., 2017; FAGHIHI-SANI et al., 2018; NASIRI et al., 2016).

Além disso, o aço SAE 1020 apresenta uma boa resposta a tratamentos térmicos, como a têmpera e revenimento, o que permite aumentar sua resistência mecânica sem comprometer sua ductilidade e tenacidade. Como mencionado por Ribeiro et al. (2019), a têmpera e revenimento consiste em aquecer o aço a uma temperatura elevada, seguido de um resfriamento rápido e um aquecimento posterior para reduzir a fragilidade do material. Esse processo permite aumentar a resistência do aço sem comprometer sua ductilidade e tenacidade. O aço SAE 1020 é relativamente fácil de ser usinado e soldado. Segundo Zarei-

Hanzaki et al. (2015), isso se deve à sua baixa liga, o que significa que não contém grandes quantidades de outros elementos que possam afetar negativamente suas propriedades mecânicas e químicas durante os processos de usinagem e soldagem. No entanto, é importante lembrar que a soldagem do aço SAE 1020 deve ser realizada seguindo as normas e especificações técnicas adequadas para garantir a qualidade e segurança das peças fabricadas.

Outra vantagem do aço SAE 1020 é seu baixo custo em comparação com outros tipos de aço. Como mencionado por Adhikary e Sahoo (2018), isso se deve ao fato de que o aço SAE 1020 é produzido a partir de matérias-primas abundantes e relativamente baratas, o que o torna um dos aços mais econômicos disponíveis no mercado. Isso faz com que o aço SAE 1020 seja uma opção atraente para empresas que buscam reduzir seus custos de produção, sem comprometer a qualidade e a segurança das peças fabricadas.

3 METODOLOGIA

Este capítulo trata do desenvolvimento da pesquisa que investigou a influência da variação dos ângulos de chanfro empregados nos processos de soldagem por eletrodo revestido na indução de tensões residuais, com o objetivo de determinar sua natureza. Serão apresentados os métodos e instrumentos de coleta utilizados, bem como as variáveis e indicadores adotados para identificar esses efeitos.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Gil (2008), a pesquisa científica deve ser objetiva, racional e sistemática para que possa seguir um método científico que permita a busca de soluções para um problema através de procedimentos científicos.

Por outro lado, Minayo (1994) destaca que existem duas formas de pesquisa: qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa baseia-se na interpretação, embasando a teoria e sendo desenvolvida através de um conjunto de técnicas que elaboram um conceito. Os dados são coletados por meio de observação, descrição e gravação, investigando características e condições que não podem ser facilmente representadas numericamente.

Silva (2004), por sua vez, define pesquisa quantitativa como todo tipo de informação que pode ser traduzida em números através de métodos estatísticos, assim como os dados e aspectos levantados de acordo com pesquisa de campo e boletins informativos.

Neste trabalho, a pesquisa realizada é classificada como quantitativa, já que envolve dados numéricos, cálculos e processos de análise estatística.

Gil (2008) classifica os objetivos de pesquisa em três tipos: exploratórios, descritivos e explicativos. A pesquisa exploratória tem como propósito esclarecer, desenvolver e transformar ideias e conceitos, visando produzir um material pesquisável para estudos futuros. Ela abrange levantamento bibliográfico, documental, entrevistas e estudos de caso. Já a pesquisa descritiva busca apresentar uma visão geral, ligada a um determinado fato. Por meio da coleta de dados, observa-se, analisa-se e descrevem-se propriedades de uma população, fenômeno ou até mesmo estabelecem-se relações entre variáveis. Por fim, a pesquisa explicativa aprofunda o conhecimento da realidade, resultando em explicações por meio da investigação de fatores que favorecem ou determinam a ocorrência dos fenômenos.

Ao avaliar os objetivos deste trabalho, constata-se que se trata de uma pesquisa descritiva, uma vez que busca observar e analisar o princípio de funcionamento dos processos de soldagem por eletrodo revestido, bem como as causas do aparecimento de tensões residuais. Além disso, apresenta caráter explicativo, já que procura compreender a correlação entre a variação do ângulo de chanfro da junta com a indução de tensões residuais no material.

De acordo com Gil (2008), existem vários métodos de pesquisa, incluindo a pesquisa bibliográfica, a pesquisa documental, a pesquisa experimental, a pesquisa-ação e o estudo de caso. A pesquisa bibliográfica é realizada por meio da busca de informações em livros, teses, dissertações, artigos e fontes digitais disponíveis na internet (SILVA, 2004). Já a pesquisa documental é produzida a partir de múltiplas fontes sem tratamento analítico. A pesquisa experimental, por sua vez, envolve a manipulação de variáveis controladas para observar e compreender as modificações e reações ocorridas no objeto de pesquisa (DA FONSECA, 2002).

Neste trabalho, são utilizados também métodos de pesquisa bibliográfica e experimental. A pesquisa bibliográfica é utilizada para embasar teoricamente o estudo, enquanto a pesquisa experimental é empregada para obtenção de dados por meio de ensaios e análises.

3.2 Materiais e métodos

Para elaboração deste trabalho, foi necessário realizar um estudo bibliográfico com o objetivo de apresentar os parâmetros dos processos de soldagem que influenciam no surgimento de tensões residuais, bem como descrever e detalhar o processo de soldagem analisado.

Além disso, foram revisados os métodos estatísticos de análise de variância e os ciclos térmicos em soldagem. Com base nas informações obtidas no estudo, foram realizadas as preparações das amostras e procedimentos de soldagem, seguidos de ensaios de dureza por endentação. Os dados coletados foram submetidos à modelagem estatística, utilizando as ferramentas Microsoft Excel® e Minitab®, e posteriormente interpretados e discutidos. Por fim, as conclusões do autor serão apresentadas.

O fluxograma apresentado na Figura 15 descreve as etapas necessárias para a realização deste trabalho. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema,

a fim de avaliar sua relevância. Em seguida, as amostras foram preparadas para o processo de soldagem e, posteriormente, submetidas a ensaios de dureza. Com os dados obtidos, foi possível realizar uma análise estatística de variância para avaliar a influência dos tratamentos no surgimento de tensões residuais. Com base nos resultados obtidos, uma interpretação será realizada para apresentar conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

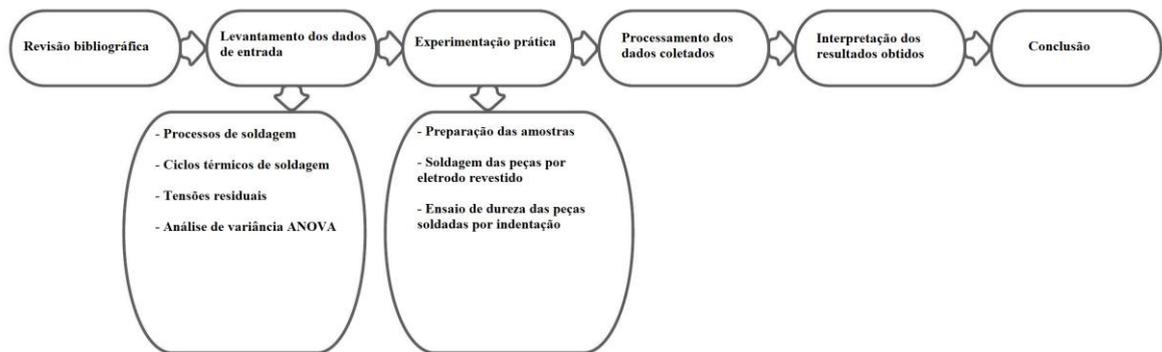


Figura 14 - Fluxograma com as etapas para realização deste trabalho

Fonte: Pesquisa direta (2019)

3.2.1 Materiais

O aço SAE 1020 foi o material escolhido para a realização deste trabalho devido à sua disponibilidade e às suas características como um aço baixo carbono amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos e estruturais. Além disso, esse material pode ser facilmente trabalhado por meio de processos de transformação termomecânica, apresenta boa usinabilidade, pode ser conformado a quente ou a frio utilizando qualquer método tradicional e pode ser endurecido tanto por trabalho a frio quanto por tratamento térmico.

As amostras tem dimensões de 100 mm de comprimento 100 mm de largura e 6mm de espessura. Foram utilizados 9 chapas que foram cortadas e chanfradas com ângulos de 15°, 30° e 45°, totalizando 9 pares de amostras. Além das amostras cortadas e chanfradas foi mantida uma chapa que não foi cortada nem chanfrada, com as propriedades originais, para fins de consulta e comparação posterior. A chapa que manteve suas propriedades mecânicas inalteradas é chamada de *blank*. A figura 16 demonstra o *blank* bem como uma das amostras cortada e chanfrada.



Figura 15 – Blank (à esquerda) e um par de amostra cortado e chanfrado (à direita)

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A confecção dos chanfros se deu no centro de usinagem vertical Discovery 560 da Romi TM, alocado no laboratório de materiais de fabricação da Universidade Federal de São João Del Rei.

Foi utilizado no experimento o eletrodo AWS E 6013 com revestimento rutílico, recomendado para a soldagem de chapas e outros materiais de baixo carbono. Para atender à espessura da chapa, o diâmetro do eletrodo foi determinado como 3,25 mm, enquanto a corrente de soldagem foi estabelecida em 160A e a voltagem em 360V. O equipamento de soldagem utilizado foi a máquina de solda retificadora Soldarc R375 conforme demonstrado na figura 16 abaixo.



Figura 16 – Máquina de solda Soldarc R375

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Para o ensaio de dureza Brinell foi utilizada a máquina universal para teste de dureza da marca EMCO TEST e modelo M4C/025-G3, alocada na Universidade Federal de Ouro Preto.

3.2.2 Métodos

Primeiramente as amostras foram preparadas para a realização da soldagem por eletrodo revestido. As peças foram cortadas e chanfradas e separadas em grupos a serem submetidas ao processo de soldagem.

Após a fresagem dos chanfros, as peças sofreram um processo de lixamento e uma limpeza a base de detergente e álcool como preparativo para soldagem.

Durante o processo de soldagem, a fixação das chapas em uma estrutura foi realizada para prevenir o desalinhamento. Utilizando o método de soldagem por Eletrodo Revestido, a solda foi realizada de maneira manual e pelo mesmo soldador em um único passe, estendendo-se de forma contínua do ponto A ao ponto B, conforme ilustrado na figura abaixo. Após a conclusão da soldagem, as peças foram deixadas para resfriar naturalmente, sem qualquer influência adicional de temperatura.



Figura 17 – Corpo de prova após a soldagem

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Após a soldagem, os corpos unidos foram submetidos a um tratamento adequado para serem preparados para a realização de testes de dureza, semelhante ao realizado no blank.

Essa etapa ocorreu na região de interesse para a medição de dureza e foi conduzida em laboratório.

A norma para dureza Rockwell é regida pela norma ASTM E18. Esta norma estabelece os procedimentos para determinar a dureza de materiais metálicos através do método Rockwell, que é um método de medição de dureza que envolve a aplicação de uma carga sobre a superfície do material e a medição da profundidade da penetração resultante.

Existem várias escalas Rockwell que são utilizadas dependendo do tipo de material e da aplicação. As mais comuns são as escalas A, B e C. A escala A é usada para materiais mais macios, como alumínio e chumbo, enquanto as escalas B e C são utilizadas para materiais mais duros, como aços e ferros fundidos.

Para os ensaios realizados nesse trabalho foi utilizado a escala Rockwell B (HRB) utilizando o penetrador esférico de aço temperado de 1,588 mm de diâmetro e uma carga de 100 kgf (980,7 N), de acordo com a norma ASTM E18.

As posições das medidas de dureza realizadas variam dos pontos 1 ao 6 conforme demonstrado no desenho esquemático da figura 17.

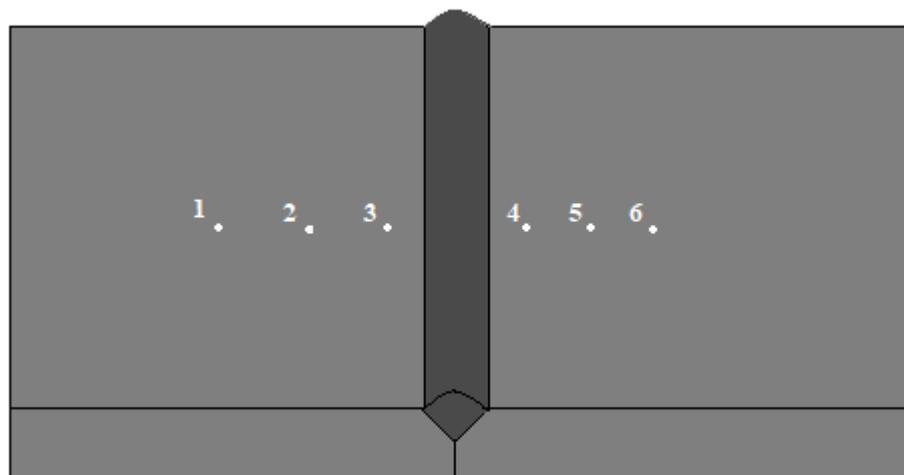


Figura 18 – Pontos de medição de dureza das peças soldadas.

Fonte: Pesquisa direta (2023)

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Gil (2008), uma variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias e pode ser medida ou classificada. É uma propriedade, conceito operacional ou fator que apresenta valores ou aspectos identificados em um objeto de estudo e pode ser verificado.

Para medir cada variável no estudo, são selecionados indicadores que podem ser qualitativos ou quantitativos, dependendo dos objetivos da pesquisa. As variáveis e indicadores relacionados ao objetivo deste trabalho são separados e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis e seus indicadores

Variáveis	Indicadores
Soldagem por Eletrodo Revestido	<ul style="list-style-type: none"> • Corrente de soldagem (A) • Tensão de soldagem (V) • Tipo e dimensões do eletrodo • Fonte de energia • Método de transferência metálica • Comprimento do arco • Velocidade de soldagem • Posição de soldagem • Ângulo de chanfro
Tensões Residuais	<ul style="list-style-type: none"> • Dureza • Aporte térmico
ANOVA	<ul style="list-style-type: none"> • Soma dos quadrados dos tratamentos • Soma dos quadrados totais • Soma dos quadrados residuais • Quadrados médios de tratamentos • Quadrados médios residual • F calculado • F tabelado

	<ul style="list-style-type: none">• Graus de liberdade
--	--

Fonte: Pesquisa direta (2019).

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Nesta etapa acontece a coleta de dados acerca do tema abordado a fim de obter o embasamento necessário para a pesquisa através de revisões bibliográficas, observações e experimentos.

Como já mencionado neste capítulo, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, experimental, quantitativa e descritiva, logo todos os dados necessários para o estudo serão adquiridos através de uma profunda pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações, artigos e catálogos, associada com uma experimentação direta a fim de alcançar dados teóricos e práticos, e também através de um estudo de caso que será realizado posteriormente, com o intuito de conseguir informações úteis para realizar uma comparação entre os dados reais encontrados e dados obtidos por meio de análises estatísticas.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados obtidos no ensaio de dureza, serão realizados os cálculos referentes à análise de variância no *software* Microsoft Excel®, que fornece uma resolução simplificada dos cálculos complexos inerentes desta análise estatística. Em seguida será realizado o teste de contraste *Turkey* do *software* Minitab® para obter um resultado mais aprofundado da ANOVA. Posteriormente, o Excel® será usado novamente para geração de gráficos para facilitar a compreensão dos resultados dos ensaios de dureza e da modelagem estatística. Por fim, o *software* Microsoft Word® será utilizado para produção de relatórios e discussão dos resultados.

4 RESULTADOS

Este capítulo contempla os resultados obtidos nos ensaios de dureza dos corpos de prova bem como a análise estatística de variância.

4.1 Blank

Para avaliar a dureza do Blank, foram realizadas três medições em diferentes posições da peça utilizando o processo de indentação. Os valores obtidos foram então calculados e a média resultante foi adotada como o valor de dureza da peça. A média das três medidas foi de 63 HRB. A utilização de três medições em diferentes posições da peça é importante para obter uma média mais precisa e representativa da dureza da peça como um todo.

Realizar três medições em diferentes posições da peça é uma prática comum para se obter uma média mais precisa e representativa da dureza do blank. A utilização de apenas uma medição pode levar a uma estimativa imprecisa da dureza, pois pode haver variações na dureza do material em diferentes pontos da peça. Realizar três medições em diferentes pontos da peça pode ajudar a minimizar o efeito dessas variações e fornecer uma estimativa mais confiável da dureza média da peça. É importante lembrar que o número de medições pode variar dependendo do tamanho e da complexidade da peça, bem como das especificações do processo de teste.

4.2 Soldagem por eletrodo revestido

Inicialmente, os valores de dureza foram indexados em uma planilha do Excel, com a categorização dos resultados por grupo de ângulo e posição em que a soldagem foi realizada. Esse procedimento permite uma análise mais precisa e organizada dos resultados, possibilitando uma melhor compreensão das variações de dureza em diferentes condições de soldagem. A categorização dos resultados também permite a identificação de possíveis padrões e tendências nos dados.

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell, medidos na escala B, para as amostras soldadas pelo método de eletrodo revestido, são apresentados na Tabela 3. Observa-se que há pequenas variações nos valores de dureza quando comparamos diferentes posições de medição para um mesmo ângulo. Além disso, é possível verificar que há variações nos valores de dureza para as medidas realizadas na mesma posição, mas com ângulos de chanfros diferentes. Essa variação sugere que a geometria do chanfro pode afetar a dureza do material.

A análise cuidadosa dessas variações é importante para garantir a qualidade da soldagem e pode fornecer informações úteis sobre os efeitos da geometria na dureza da junta soldada.

A dureza média das amostras para os grupos de ângulos de 15°, 30° e 45° é igual a 74,39 HRB, 72,60 HRB e 63,25 HRB, respectivamente.

Tabela 3 – Medidas de dureza coletadas dos ensaios de indentação nas amostras soldadas

Ângulos	Amostra	Medidas de dureza (HRB)					
		1	2	3	4	5	6
15°	1	79.08	78.7	76.85	77.59	74.13	72.01
	2	73.26	73.29	68.95	74.57	77.96	67.60
	3	69.85	73.26	77.22	75.01	74.95	74.68
30°	1	75.74	71.61	79.45	84.29	69.85	74.57
	2	57.03	68.5	80.8	69.85	77.22	72.01
	3	75.74	59.31	65.57	79.08	75	71.2
45°	1	64.19	72.01	75.74	72.42	70.3	65.57
	2	50.38	52.70	66.32	72.83	68.5	66.32
	3	44.35	66.32	54.10	54.97	62.93	58.49

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A variação dos valores de dureza dos corpos de prova soldados, quando comparados com a dureza do *blank* podem ser um indicativo de tensões residuais inerentes do processo de soldagem. No caso do ensaio Rockwell a penetração maior ou menor do indentador na peça indica a presença de tensões residuais trativas ou compressivas.

As tensões residuais trativas ocorrem quando o material sofre uma força de tração que o deforma e o estica, deixando-o mais fino e comprido. Essas tensões podem surgir, por exemplo, quando há uma expansão térmica do material em contato com outros materiais ou quando há uma contração do material após a soldagem.

Por outro lado, as tensões residuais compressivas ocorrem quando o material sofre uma força de compressão que o deforma e o encurta, deixando-o mais espesso e curto. Essas tensões podem surgir quando há uma contração térmica do material após a soldagem ou quando há uma compressão do material em contato com outros materiais.

No ensaio de dureza, a penetração do indentador na superfície do material é maior quando há a presença de tensões residuais trativas. Isso ocorre porque o material está mais "esticado", o que torna a sua superfície mais macia e mais fácil de ser penetrada pelo

indentador. Por outro lado, quando há a presença de tensões residuais compressivas, a penetração do indentador na superfície do material é menor. Isso ocorre porque existe uma redução no espaçamento entre os contornos de grãos, o que torna a sua superfície mais dura e mais difícil de ser penetrada pelo indentador.

Dessa forma, a análise cuidadosa das variações de dureza nos corpos de prova soldados pode fornecer informações úteis sobre a presença e o tipo de tensões residuais no material, o que é importante para garantir a qualidade da soldagem e evitar possíveis falhas ou problemas de desempenho do material em serviço.

O tratamento dos dados obtidos dos ensaios de dureza dos corpos de prova soldados por eletrodo revestido podem ser observados de maneira sumarizada na tabela 4. Utilizando a ferramenta Excel, pode-se verificar O resultado da análise é apresentado em uma tabela ANOVA, que fornece informações importantes para a interpretação dos dados.

Os resultados da ANOVA são apresentados em quatro linhas: SST, SSA, SSB e SSAB, além da linha SSErro. SST representa a soma total dos quadrados, ou seja, a variabilidade total dos dados, considerando todos os efeitos. SSA representa a soma dos quadrados dos efeitos da primeira variável independente (referente a variação angular). SSB representa a soma dos quadrados dos efeitos da segunda variável independente (referente a variação entre as 6 posições de medição de dureza). SSAB representa a soma dos quadrados dos efeitos da interação entre os fatores A e B. SSErro representa a soma dos quadrados dos erros, ou seja, a variabilidade não explicada pelos fatores e pela interação.

GL representa os graus de liberdade, que são calculados com base no número de níveis de cada fator. MSS representa a média das somas de quadrados, que é calculada dividindo-se a soma dos quadrados pelos graus de liberdade correspondentes.

O valor de F_{calc} representa a razão entre as médias das somas de quadrados dos fatores e da interação, e a média das somas de quadrados dos erros. Esse valor é comparado com o valor crítico de F (0,05), que é obtido a partir da distribuição F com os graus de liberdade dos fatores e dos erros. Se o valor de F_{calc} for maior que o valor crítico de F, significa que pelo menos um dos fatores tem efeito significativo sobre a variável dependente.

Analisando os valores da tabela, pode-se observar que SST é igual a 3649,803 e que a soma das outras quatro fontes de variação (SSA, SSB, SSAB e SSErro) é igual a 2261,8082.

Isso indica que os fatores e a interação explicam apenas cerca de 62% da variabilidade total dos dados, enquanto os erros explicam os outros 38%.

A fonte de variação SSA tem MSS igual a 644,3803 e GL igual a 2, o que significa que o fator A tem dois níveis. O valor de F_{calc} é igual a 13,98357 e é maior que o valor crítico de F (0,05) para 2 e 36 graus de liberdade (GL dos fatores e GL dos erros), que é igual a 3,116. Isso indica que o efeito do fator A sobre a variável dependente é significativo ao nível de significância de 0,05. O valor da influência do fator A, calculado dividindo MSSA por SST, é igual a 0,3532, o que significa que o fator A explica cerca de 35% da variabilidade total dos dados.

A fonte de variação SSB tem MSS igual a 77,45215 e GL igual a 5, o que significa que o fator B tem cinco níveis. O valor de F_{calc} é igual a 1,680773 e é menor que o valor crítico de F (0,05) para 5 e 36 graus de liberdade.

Tabela 4 – Resultado da análise de variância ANOVA

	SS	GL	MSS	F_{calc}	F (0,05)	
SST	3649,803	53				
SSA	1288,761	2	644,3803	13,98357	3,259446	Influência
SSB	387,2607	5	77,45215	1,680773	2,477169	Sem influência
SSAB	314,8565	10	31,48565	0,683264	2,106054	Sem influência
SSerro	1658,925	36	46,08126			

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Na análise de variância (ANOVA) apresentada na tabela, a influência de cada fator pode ser avaliada pela análise da magnitude de sua soma de quadrados (SS) e sua respectiva significância em relação ao nível de significância escolhido ($\alpha=0,05$).

A partir da tabela, podemos observar que a soma de quadrados para a variação de ângulos é significativa, indicando que há influência significativa do fator A (tratamento) no resultado observado. Já para a variação de posições e a interação e (SSAB), as somas de quadrados não são significativas, sugerindo que esses fatores não têm uma influência significativa no resultado.

No caso específico deste estudo, foi possível verificar que a variação da posição de medição não influenciou significativamente os valores de dureza obtidos. Isso pode ser atribuído ao fato de que as posições de medição foram escolhidas de forma estratégica, buscando maximizar a variabilidade dos resultados. Além disso, as dimensões reduzidas dos corpos de prova podem ter contribuído para minimizar a influência da variação da posição de medição.

No entanto, é importante salientar que, em outras condições experimentais, a variação da posição de medição pode ter uma influência significativa nos resultados obtidos. Portanto, é fundamental avaliar cuidadosamente cada fator que pode influenciar os resultados de um ensaio de dureza, a fim de obter resultados confiáveis e precisos.

O teste de Tukey é um método amplamente utilizado na análise de variância, que é uma técnica estatística utilizada para comparar a média de diferentes grupos. Ele é particularmente útil quando se deseja identificar quais grupos são significativamente diferentes uns dos outros em relação a uma variável específica. Em outras palavras, ele permite determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre grupos.

O teste de Tukey é um teste post-hoc que pode ser usado após a realização de uma ANOVA (análise de variância). Ele compara a média de cada grupo com a média de todos os outros grupos, levando em consideração o tamanho da amostra e a variação dentro de cada grupo. O resultado é um conjunto de pares de grupos que são estatisticamente significativamente diferentes uns dos outros.

O teste de Tukey é considerado confiável porque ele controla o erro do tipo I, que ocorre quando se rejeita a hipótese nula (não há diferença entre grupos) quando ela é realmente verdadeira. Ele também fornece intervalos de confiança para as diferenças entre grupos, o que ajuda a interpretar os resultados e fornece uma estimativa de quão grande é a diferença entre grupos.

No contexto do processo de solda por eletrodo revestido, o teste de Tukey foi utilizado para comparar os resultados obtidos nos ângulos de 45°, 30° e 15°. Os resultados indicaram que os ângulos de 45° tem maior indução de tensões residuais trativas quando comparados com os ângulos de 30° e 15°.

Esses resultados são importantes porque eles indicam que o ângulo de 45° tem a maior influência no resultado da dureza, mesmo que seus valores sejam menores do que os obtidos nos ângulos de 30° e 15°. Isso pode ser explicado pelo fato de que o ângulo de 45° tem uma abertura maior do que nos outros ângulos, resultando em uma deposição de material de adição maior e um aporte térmico mais elevado. Portanto, o teste de Tukey é uma ferramenta confiável para determinar quais fatores têm a maior influência em um processo e ajudar a tomar decisões informadas com base nos resultados.

O resultado do teste Turkey com 95% de confiança para o processo de solda por eletrodo revestido é apresentado na Figura 20.

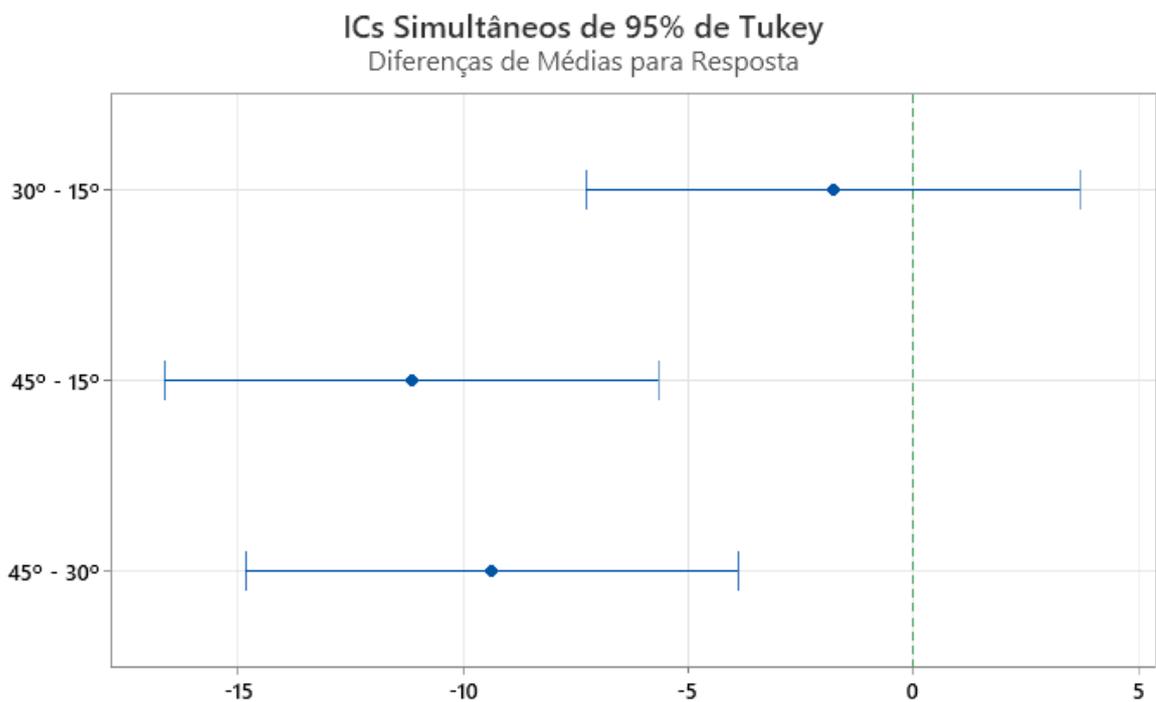


Figura 19 - Resultado do teste de Tukey

Fonte: Pesquisa direta (2023)

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo avaliar a soldagem por eletrodo revestido de um aço ABNT 1020, levando em consideração a variação de ângulos de chanfros para verificar a menor possibilidade de inclusão de tensão residual. Para isso, foram utilizados corpos de prova que passaram pelo processo de soldagem, e foi observado um aumento médio da dureza em todos eles. No entanto, não houve diferença entre as posições de indentação, o que pode ser explicado pelo fato de que as amostras das chapas eram reduzidas e as medições foram feitas próximas umas das outras.

A análise de variância (ANOVA) mostrou que o ângulo de chanfro interfere nos valores de dureza e, portanto, influencia diretamente na indução de tensões residuais. O processo de soldagem por eletrodo revestido foi capaz de evidenciar, através do teste de Turkey, que o ângulo de 45° se difere dos resultados obtidos nos ângulos de 30° e 15°, e que os valores obtidos são estatisticamente menores do que os outros ângulos.

Em particular, o ângulo de 45° apresentou maiores valores de dureza em comparação aos ângulos de 30° e 15°. Isso pode ser explicado pelo fato de que o ângulo de 45° gera maior deposição de material, o que resulta em maior aporte térmico e, conseqüentemente, maior tensão residual.

Com base nisso, pode-se concluir que com um ângulo de chanfro menor, a possibilidade de inclusão de tensão residual é mais remota, uma vez que a deposição de material é menor. No entanto, é importante lembrar que a dimensão das amostras é uma variável de grande importância e influência neste tipo de análise. Por isso, é necessário considerar cuidadosamente todos os fatores envolvidos na soldagem para obter resultados precisos e confiáveis.

5.2 Recomendações

Diante dos resultados favoráveis obtidos por meio da análise da indução de tensões residuais por meio do ensaio de dureza Rockwell neste trabalho, é recomendável que pesquisas futuras sejam conduzidas para aprofundar a investigação desse fenômeno:

- Comparação da indução de tensões residuais entre dois ou mais processos de soldagem com a variação do ângulo de chanfro;
- Elaboração do trabalho contemplando corpos de prova com dimensões maiores para que seja possível analisar a influência da posição da medida de indentação na indução de tensões residuais;
- Análise da influência do tipo de proteção gasosa na indução de tensões residuais em processo de soldagem a arco com proteção gasosa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Adhikary, S., & Sahoo, S. (2018). Effect of load on fatigue strength of AISI 1020 carbon steel. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4.6), 277-281.

AGGEN, G.; AKSTENS, Frank W.; ALLEN, C. Michael; AVERY, H. S.; BABU, P.; BAYER, Alan M.; BELLO, Felix; BHAT, Shrikan P; AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. *ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering*. USA: ASM International. 1998.

ALMEIDA, Ariovaldo Fernandes de et al. Análise experimental de vigas constituídas de perfis formados a frio com emendas soldadas submetidas à flexão simples. 2009.

ALMEIDA, Jorge. *Tecnologias da Montagem Eletromecânica / FURG – CTI*. Rio Grande, 2009.

AMERICAN WELDING SOCIETY. *ASM Handbook*. 1993.

ANTUNES, Augusto Eduardo Baptista. Tensões Residuais na Soldagem, Aspectos Básicos. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas/Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, p. 394-403, 1995.

AWS D1.1/D1.1M: 2004, Structural Welding Code-Steel, AMERICAN WELDING SOCIETY.

AWS, AMERICAN WELDING SOCIETY; WELDING, Gas Tungsten Arc. American Welding Society. **Welding Handbook, 8th**, 1991.

BIANCHI, Eduardo Carlos et al. Análise do comportamento da microestrutura de materiais endurecidos retificados com rebolos de CBN. **Materials Research**, v. 3, p. 147-154, 2000.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz. *Processo de soldagem TIG-GTAW*. **Belo Horizonte: ESAB**, 2000.

Bussab, W. O., & Morettin, P. A. (2002). *Estatística básica*. Saraiva.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais*. 4ª ed. LTC, 2014.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**. McGraw Hill, 1986.

CINDRA FONSECA, M. P. Evolução do estado de tensões residuais em juntas soldadas de tubulação durante ciclos de fadiga. **COPPE, UFRJ**, 2000.

CORREIA, D. S. et al. GMAW welding optimization using genetic algorithms. **Journal of the Brazilian society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 26, p. 28-32, 2004.

DA FONSECA, João José Saraiva. **Apostila de metodologia da pesquisa científica**. João José Saraiva da Fonseca, 2002.

DBC OXIGÊNIO. Processo de Soldagem TIG. *In: Processo de Soldagem TIG*. [S. l.], 2014. Disponível em: <http://guias.oxigenio.com/processo-de-soldagem-tig>. Acesso em: 22 out. 2021.

DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. 3ª ed. McGraw-Hill, 1988.

DONATO, Gustavo Henrique Bolognesi. **Efeitos de heterogeneidades mecânicas sobre forças motrizes de trinca em juntas soldadas: determinação experimental de tenacidade e extensão de metodologias de avaliação de criticidade de defeitos**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DOS ANJOS, ADILSON. Planejamento de experimentos i. **Universidade Federal do Paraná. Curitiba**, p. 98, 2005.

ESTEFEN, Segen et al. Análise de evolução do estado das tensões residuais de soldagem. *In: Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção. Centro de Tecnologia SENAI-RJ-CTS Solda*. 2008.

Faghihi-Sani, M. A., Vajpai, S. K., & Emamy, M. (2018). Experimental study of the effect of deep cryogenic treatment on AISI 1020 steel properties. *Materials Research Express*, 5(3), 036514.

FERREIRA FILHO, Demostenes; DE SAIRRE BÁLSAMO, Paulo Sérgio; FERRARESI, Valtair Antonio. Influência do tipo de gás de proteção da soldagem MIG/MAG na qualidade do cordão de aço inoxidável. *In: 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação COBEF, São Pedro-SP*. 2007.

Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics*. Sage Publications.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, W. Apostila de arco submerso. **Desenvolvimento e Pesquisa-ESAB BR**, 2004.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, W. Metalurgia da soldagem. **Escola Superior Aberta do Brasil (ESAB), Brasil, Apostila**, 2004.

FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio Turani. Apostila de eletrodos revestidos. **Eletrodos Revestidos OK. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: ESAB, 2005.**

GIL, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 2008.

Hair Jr, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). Multivariate data analysis. Pearson Education Limited.

Jayaraman, S., & Kumar, P. R. (2012). Microstructure, texture, and mechanical property evolution during cold rolling of low carbon steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(6), 1011-1018.

JONES, J. E.; JE, JONES; DL, OLSON. METALLURGICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF NON-VERTICAL ELECTROSLAG WELDS. 1980.

Karimzadeh, F., Naderi, M., & Saatchi, A. (2017). Evaluation of mechanical properties and microstructure of AISI 1020 steel welded by friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 421-427.

KOU, S.; YANG, Y. K. Fusion-boundary macrosegregation in dissimilar-filler welds. **WELDING JOURNAL-NEW YORK-**, v. 86, n. 10, p. 303, 2007.

KOU, S.; YANG, Y. K. Fusion-boundary macrosegregation in dissimilar-filler welds. **WELDING JOURNAL-NEW YORK-**, v. 86, n. 10, p. 303, 2007.

KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*, Wiley. **New Jersey**, v. 188, 2002.

LOFTING, Richard. **Welding.** Crowood, 2013.

LUCAS, W.; HOWSE, D. Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes. 1996.

LUCAS, William. **TIG and plasma welding: process techniques, recommended practices and applications.** Woodhead Publishing, 1990.

LUZ, Gelson. Aço SAE 1008 Propriedades Mecânicas e Composição Química. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/09/aco-sae-1008-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 10 de Setembro de 2019.

MACHADO, I.G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre: Editado pelo autor, 2007.

MACHADO, Ivan Guerra. Soldagem & técnicas conexas: processos. 1996.

MACHERAUCH, E. et al. DIFFERENT SOURCES OF RESIDUAL STRESS AS A RESULT OF WELDING. 1977.

MACHERAUCH, E. et al. DIFFERENT SOURCES OF RESIDUAL STRESS AS A RESULT OF WELDING. 1977.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem fundamentos e tecnologia. atual. **da UFMG**, 2009.

MELO, Raphael et al. Avaliação do campo de tensões residuais por difração de raios-X utilizando o método do $\sin^2\psi$ em revestimentos metálicos do aço inoxidável E308-L. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, p. 50-56, 2013.

MESSLER JR, Robert W. **Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy**. John Wiley & Sons, 2008.

MESSLER, R. W. The Weld Heat Affected Zone. **Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy**, p. 514-574, 2007.

MILONE, Giuseppe. **Estatística: geral e aplicada**. Pioneira Thomson Learning, 2004.

MINAYO, Maria Cecília de Souza et al. Ciência, técnica e arte: o desafio da pesquisa social. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**, v. 21, p. 9-29, 1994.

MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, A. Q. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. **Belo Horizonte: UFMG**, 2007.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. Soldagem i introducao aos processos de soldagem. **Belo Horizonte**, 2000.

MODENESI, Paulo José. Técnica operatória da soldagem SAW. **Belo Horizonte: Editora UFMG**, 2012.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2005.

MOGHADDAM, M. Azadi; GOLMEZERGI, R.; KOLAHAN, Farhad. Multi-variable measurements and optimization of GMAW parameters for API-X42 steel alloy using a hybrid BPNN–PSO approach. **Measurement**, v. 92, p. 279-287, 2016.

Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons.

Nasiri, A., Hosseini, M., Hosseini-Toudeshky, H., & Aghdam, M. M. (2016). A numerical and experimental study on the anisotropic behavior of AISI 1020 steel under different strain rates. *Materials Science and Engineering: A*, 659, 70-77.

OGATA, Humberto Toshiaki da Silva. Determinação da influência das tensões residuais nas propriedades de fadiga em aço SAE 8620 processado com diferentes profundidades de camada de cementação.

OKUMURA, T.; TANIGUSHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. A Soldagem na Construção Naval. 1982.

PAESE, Cíntia; CATEN, Carla ten; RIBEIRO, José Luis Duarte. Aplicação da análise de variância na implantação do CEP. *Production*, v. 11, p. 17-26, 2001.

PARANHOS, R. P. R., SOUZA, A. C. Soldagem a Arco Submerso. Rio de Janeiro: Morganite Brasil Ltda, 1992.

REIS SOBRINHO, J. F.; ALCÂNTARA, N. G. Influência Dos Parâmetros de Soldagem na Microestrutura da Zona Afetada Termicamente-Zat da Junta Soldada de um Aço de Alta Resistência. *João Pessoa*, 2007.

Ribeiro, R. R., de Castro, G. R., Gomes, L. P., & Ferreira, R. A. (2019). Microstructure and mechanical properties of AISI 1020 steel after austenitizing and tempering heat treatments. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1089-1099.

RICCI, W. S.; EAGAR, T. W. A parametric study of the electroslag welding process. *Welding Research Supplement*, v. 61, n. 12, p. 397s-400s, 1982.

RODRIGUES, Telmo Viana. Tratamento térmico pós-soldagem para alívio de tensões residuais em chapas de aço soldadas: modelagem e análise experimental. **Mestrado (Dissertação)**. Rio de Janeiro, 2011.

SHACKELFORD, J. F. Ciência dos Materiais. 7ª ed. Pearson, 2015.

SILVA, De Plácido; JURÍDICO, Vocabulário. Atualizadores: Nagib Slaibi Filho e Gláucia Carvalho. **Rio de Janeiro: Editora Forense**, 2004.

SUTERIO, Ricardo et al. Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica. 2005.

TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. Handbook of residual stress and deformation of steel. Ohio: ASM International, 2003.

WAINER, E.; BRANDI, S.D. e MELO, V.O. Soldagem – Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blucher, 2009.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia**. Editora Blucher, 1992.

WEMAN, Klas. Introduction to welding. **Welding Processes Handbook. Sec. Edition**, p. 1-12, 2012.

Zarei-Hanzaki, A., Javadpour, S., & Zarei-Hanzaki, A. (2015). The effect of pulsed current TIG welding parameters on mechanical properties and microstructure of AISI 1020 steel joints. *Materials Science and Engineering: A*, 621, 109-115.