



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



MARCELO CARLOS DO CARMO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO
DE CHANFRO DE 15°, 30° E 45° NA INDUÇÃO DE TENSÕES
RESIDUAIS NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM UM
AÇO INOXIDÁVEL AISI 310**

**OURO PRETO - MG
2020**

MARCELO CARLOS DO CARMO
marcelocarlos63@yahoo.com.br

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO
DE CHANFRO DE 15°, 30° E 45° NA INDUÇÃO DE TENSÕES
RESIDUAIS NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM UM
AÇO INOXIDÁVEL AISI 310**

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: MSc. Sávio Sade Tayer

OURO PRETO – MG
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C287a Carmo, Marcelo Carlos do .

Análise da influência da variação do ângulo de chanfro de 15°, 30° e 45° na indução de tensões residuais no processo de soldagem TIG em um aço inoxidável AISI 310. [manuscrito] / Marcelo Carlos do Carmo. - 2020.

75 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Sávio Sade Tayer.

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

1. Soldagem. 2. Soldagem - Processo TIG. 3. Ligas de Aço - Aço Inoxidável AISI 310. 4. Deformações e tensões - Dureza Brinell. 5. Tensões Residuais. I. Tayer, Sávio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

**FOLHA DE APROVAÇÃO****Marcelo Carlos do Carmo**

Análise da Influência de variação do ângulo de chanfro de 15, 30 3 45 graus na indução de Tensão Residual no processo de soldagem TIG em um aço inoxidável AISI 310.

Nome - Dsc Washington Luis Vieira da Silva UFOP

Nome - Dsc Luis Antônio Bortolaia UFOP

Nome - titulação - Instituição

Versão final

Aprovado em 14 de agosto de 2020.

De acordo

Sávio Sade Tayer



Documento assinado eletronicamente por **Sávio Sade Tayer, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/10/2020, às 10:47, 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 **0095889** e o código CRC **5AC6A83D**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008112/2020-58

SEI nº 0095889

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
meus pais e irmãos, pelo apoio.

A minha esposa, pelo carinho e minhas
filhas, pelo amor etc.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Sávio Sade Tayer, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

À minha esposa e filhas que privaram de momentos de lazer para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

“Os únicos limites das nossas realizações de amanhã são as nossas dúvidas e hesitações de hoje”.

Franklin Roosevelt

RESUMO

O processo de soldagem TIG é altamente utilizado em materiais metálicos como nos aços inoxidáveis onde as espessuras variam de 0,2 mm a 8 mm. A soldagem em aço inoxidável costuma ser utilizada no setor alimentício, finalizações sanitárias ou para passagem de raiz em esquemas de dutos. O presente trabalho analisa como a variação do ângulo de chanfro no aço inoxidável AISI 310 contribui na indução das tensões residuais geradas em um processo de soldagem TIG, onde indica qual condição é mais favorável para diminuição das tensões ao longo do cordão de solda. O resultado é obtido através da medição de dureza pelo processo de indentação e verificado pela análise estatística de variância. De acordo com a metodologia aplicada o trabalho pode ser classificado como uma pesquisa experimental, quantitativa e exploratória onde foram confeccionadas amostras de aço inoxidável com ângulos de chanfro de 15°, 30° e 45°, a solda é realizada em um único passe e o ensaio de dureza efetuado nos diversos corpos de prova. O resultado do ensaio foi comparado com o blank e, a influência de cada ângulo foi tratada estatisticamente baseada na análise de variância e no teste Tukey, onde verifica-se uma maior interferência no ângulo de chanfro de 45° para o aparecimento de tensões residuais.

Palavras-chave: Soldagem. Processo TIG. Aço Inoxidável AISI 310. Ângulo de Chanfro. Dureza Brinell. Tensões Residuais.

ABSTRACT

The TIG welding process is highly used in metallic materials such as stainless steels where thicknesses vary from 0.2 mm to 8 mm. Stainless steel welding is usually used in the food sector, sanitary finishes or for root passage in pipeline schemes. The present work analyzes how the chamfer angle variation in AISI 310 stainless steel contributes to the induction of residual stresses generated in a TIG welding process, where it indicates which condition is more favorable for reducing the stresses along the weld bead. The result is obtained by measuring hardness by the indentation process and verified by statistical analysis of variance. According to the applied methodology, the work can be classified as an experimental, quantitative and exploratory research where stainless steel samples are made with chamfer angles of 15°, 30° and 45°, the weld is performed in a single pass and the hardness test carried out on the different specimens. The test result was compared with the blank and the influence of each angle was treated statistically based on the analysis of variance and the Tukey test, where there is a greater interference in the bevel angle of 45° for the appearance of residual stresses.

Key-words: *Welding. TIG process. AISI 310 Stainless Steel. Chamfer Angle. Brinell Hardness. Residual Stresses.*

LISTA DE SIMBOLOS

TIG - <i>Tungsten Inert Gas</i>	C – Carbono
MIG – <i>Metal Inert Gas</i>	He – Hélio
MAG - <i>Metal Active Gas</i>	La – Lantânio
GMAW – <i>Gas Metal Arc Welding</i>	Si – Silício
SMAW – <i>Shielded Metal Arc Welding</i>	S – Enxofre
GTAW – <i>Gas Shielded Tungsten Arc Welding</i>	Ni – Níquel
MMA – <i>Manual Metal Arc Welding</i>	CO ₂ – Dióxido de Carbono
AISI – <i>American Iron and Steel Institute</i>	ZTA – Zona Termicamente Afetada
ASME – <i>American Society of Mechanical Engineers</i>	ZF – Zona Fundida
AWS – <i>American Welding Society</i>	HB – Dureza Brinell
ASTM - <i>Standard Test Method</i>	HV – Dureza Vickers
ANOVA – <i>Analyses of Variance</i>	HRC – Dureza Rockwell
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	CP – Corpo de Prova
ISO – <i>International Organization for Standardization</i>	kgf – Quilograma Força
Fe – Ferro	mm ² – Milímetro Quadrado
Cr – Cromo	N/mm ² – Mega Pascal
Ar – Argônio	V – Tensão
O ₂ – Oxigênio	I – Corrente
Zr – Zircônio	CC – Corrente Contínua
Ce – Cério	CA – Corrente Alternada
Mn – Manganês	dA – Área Infinitesimal
P – Fósforo	dM – Momento Infinitesimal
	σ – Tensão normal
	D – Diâmetro
	k – Fator de carga
	mm – Milímetro
	N – Newton

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união	7
Figura 2 - Terminologia dos elementos que caracterizam um processo de soldagem	8
Figura 3 - Tipos de junta	9
Figura 4 - Tipos de chanfro	9
Figura 5 - Chanfros usados geralmente com os diferentes tipos de junta	10
Figura 6 - Características dimensionais de chanfros usados em soldagem	11
Figura 7 - Equipamento básico de soldagem por eletrodo revestido (SMAW)	12
Figura 8 - Processo de Soldagem Eletrodo Revestido	13
Figura 9 - Processo de soldagem MIG/MAG	14
Figura 10 - Diagrama básico de um processo de soldagem MIG/MAG	15
Figura 11 - Processo de soldagem TIG	16
Figura 12 - Equipamento básico para soldagem pelo processo TIG	18
Figura 13 - Tocha para processo TIG e componentes do processo	19
Figura 14 - Esquema de tensão residual em soldagem	22
Figura 15 - Ensaio de dureza Vickers	27
Figura 16 - Ensaio de dureza Brinell	28
Figura 17 - Tipos de penetradores para ensaio Rockwell	30
Figura 18 - Fluxograma das etapas realizadas no trabalho	35
Figura 19 - Foto do blank e suas dimensões geométricas	37
Figura 20 - Amostra antes do processo de soldagem	38
Figura 21 - Equipamento de soldagem TIG	39
Figura 22 - Corpos de prova após processo de soldagem	40
Figura 23 - Disco flap	41
Figura 24 - Corpos de prova após processo de lixamento	41
Figura 25 - Máquina universal EMCO TEST	42

Figura 26 - Pontos de medição das durezas	47
Figura 27 - Dureza em função do ângulo de chanfro medidos em vários pontos das amostras	48
Figura 28 - Gráfico referente às medidas de dureza nos CP's com ângulo 15° de chanfro	49
Figura 29 - Gráfico referente às medidas de dureza nos CP's com ângulo 30° de chanfro	49
Figura 30 - Gráfico referente às medidas de dureza nos CP's com ângulo 45° de chanfro	50
Figura 31 - Resultado do Teste <i>Tukey</i>	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos processos de soldagem de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção.....	6
Tabela 2 - Classificação AWS do Eletrodo	17
Tabela 3 - Tipos de processos relacionados com tipos de corrente	20
Tabela 4 - Principais métodos de medição de tensões residuais	25
Tabela 5 - Valores da carga F em função do diâmetro da esfera e do fator de carga	29
Tabela 6 - Variáveis e indicadores avaliados	36
Tabela 7 - Quantidade de corpos de prova e seus respectivos ângulos de chanfro	39
Tabela 8 - Variáveis e indicadores avaliados	44
Tabela 9 - Valores de dureza do blank	46
Tabela 10 - Resultados obtidos através do ensaio de dureza	47
Tabela 11 - Resultados da análise de variância	51

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.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Soldagem	6
2.1.1	Terminologia de Soldagem.....	8
2.1.2	Soldagem a Arco Elétrico.....	11
2.1.3	Soldagem com Eletrodo Revestido	12
2.1.4	Soldagem MIG / MAG	13
2.1.5	Soldagem TIG	15
2.2	Tensão Residual.....	20
2.2.1	Tensões Residuais em Soldagem.....	22
2.2.2	Técnicas de Medição de Tensões Residuais.....	23
2.3	Ensaio de Dureza	26
2.3.1	Dureza Vickers	26
2.3.2	Dureza Brinell.....	28
2.3.3	Dureza Rockwell	29
2.4	Análise de Variância.....	30
2.5	Considerações Finais	32
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Tipo de Pesquisa.....	33
3.2	Materiais e Métodos	35
3.3	Variáveis e Indicadores	43
3.4	Instrumentos de Coleta de Dados	45
3.5	Tabulação de Dados.....	45
3.6	Considerações Finais do Capítulo	45
4	RESULTADOS.....	46

4.1	Ensaio de Dureza	46
4.2	Análise de Variância.....	50
4.3	Teste Tukey	52
5	CONCLUSÃO.....	54
5.1	Conclusão	54
5.2	Recomendações	55
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	56
	ANEXO.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A necessidade de união de peças metálicas vem desde a era da pedra para confecção de ferramentas e utensílios, para a fabricação de blocos de grandes dimensões, objetos de ornamentação e armas. A mais de 4000 anos AC, a técnica utilizada para tal era o forjamento. As peças eram aquecidas a elevadas temperaturas e, marteladas até a junção dos componentes (MODENESI *et al*, 2012).

A soldagem é amplamente empregada na união de componentes de estruturas metálicas e de equipamentos para finalidades mais diversas. As grandes vantagens da soldagem sobre os demais processos de união de metais consistem em sua simplicidade e economia, uma vez que a execução das juntas soldadas requer quantidades relativamente pequenas de material. Os processos de soldagem têm um amplo campo de aplicação, inclusive, entre outros, construção naval, construções civis, usinas hidrelétricas, estradas ferroviárias etc. A soldagem também encontra grande aplicação em serviços de reparo e manutenção, como enchimento de falhas em fundidos, reparos de trilhos etc. (GANDRA, 1996).

Soldagem pode ser considerado como um processo que visa a união de materiais, similares ou não, de forma permanente, baseando-se na ação de forças em escala atômica semelhantes às existentes no interior do material.

Para Wainer *et al* (1992) a soldagem pode ser considerada como um processo que vai desde a fabricação de produtos e estruturas metálicas, veículos, prédios, até componentes eletrônicos etc.

Segundo Modenesi *et al* (2011, p.30) a “soldagem é uma operação que visa obter a união de peças, e solda é o resultado desta operação”.

De acordo com Modenesi *et al* (2012, p.6):

A soldagem é considerada como um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais.

O processo TIG iniciou a comercialização em 1942 nos Estados Unidos, onde fazia uso de gás hélio e corrente contínua. Além de apresentar uma solda de boa

qualidade, é mais utilizado na soldagem de ligas de alumínio, magnésio, titânio e aços inoxidáveis, entre outros (BRANDI *et al*, 1992)

Ainda conforme Modenesi & Marques (2000) o processo de soldagem TIG pode ser considerado como uma técnica em que se faz a união de materiais através do aquecimento combinado entre um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça.

Segundo o site ESAB Brasil (2019):

Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) é um processo que utiliza um eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte. Se um metal de enchimento é necessário, ele é adicionado no limite da poça de fusão.

Wainer *et al* (1992, p.60) enfatizam que “o processo TIG utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar. A proteção da solda é feita por um fluxo de gás inerte”.

Neste contexto será considerada uma variação do ângulo de chanfro de 15°, 30° e 45° entre as juntas soldadas de um aço inoxidável AISI 310, onde será analisado o efeito das tensões residuais.

Carbó (2008) define aços inoxidáveis como ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) com um mínimo de 10,50 % de Cr. Existem outros elementos metálicos que compõem a liga, mas o mais importante é o Cr, pois, oferece ao aço inoxidável elevada resistência à corrosão.

Durante o processo de soldagem, as peças são submetidas a ciclos térmicos que afetam as propriedades metalúrgicas e mecânicas do material, devido as variações rápidas de temperatura que estão sujeitos, isso porque está compreendido em um intervalo compreendido entre a temperatura ambiente e a temperatura próxima do ponto de fusão.

De acordo com Modenesi (2012) durante o processo de soldagem os materiais são submetidos a variações bruscas de temperatura, fazendo com que ocorra mudanças nas propriedades metalúrgicas e mecânicas, vindo assim, ocasionar distorções e tensões residuais.

O estado de tensões em um material pode ser definido como, tensões residuais ou tensões internas que agem na peça assim que são retiradas as aplicações externas, as fontes de gradientes térmicos e, também influenciado pelo próprio peso (PUC RIO, 2019).

Segundo Marques *et al* (2011, p.115) “tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as solicitações externas são removidas. Essas tensões podem aparecer em materiais submetidos a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, forjamento etc.)”.

Para Estefen *et al* (2008) as tensões residuais são aquelas que, quando terminada a operação de soldagem, estão em equilíbrio mesmo sem aplicação de carga externa.

Já na opinião de Souza (2012), tensões residuais podem ser consideradas aquelas que, quando retiradas as forças externas e/ou até mesmo os gradientes de temperatura existentes no processo, ainda permanecem na estrutura.

De acordo com o exposto por Leal (2015, p.20), “tensões residuais são esforços internos auto equilibrados, ou seja, são tensões mecânicas que existem sem a aplicação de nenhuma força externa”.

Para que seja feita a medida de inclusão de tensões em um material, é utilizado um método não destrutivo, simples, prático e a baixo custo através da indentação. Isso é possível devido à facilidade de encontrar o equipamento necessário para os ensaios na maioria dos laboratórios metalúrgicos. Com isso é possível analisar as tensões residuais através da medição da variação da indentação durante prova de dureza.

Farias & Demarqui (2017) explica o método de análise de variância (ANOVA) como uma ferramenta que permite a comparação de várias populações que são representadas por variáveis quantitativas, ou seja, o objetivo é a comparação das médias.

Diante do exposto surge a seguinte questão:

Como a variação do ângulo de chanfro 15°, 30° e 45° no aço inoxidável AISI 310 pode contribuir para induzir as tensões residuais provenientes do processo de soldagem TIG?

1.2 Justificativa

Para se ter uma resposta do comportamento dos componentes mecânicos, o estudo das tensões residuais exerce um papel importante que influencia sobre os mesmos. Entretanto, o efeito pode ser benéfico ou prejudicial dependendo da natureza destas tensões.

As tensões residuais trativas podem ser prejudiciais à resistência estática e à corrosão. Podem causar alteração na vida em fadiga e propagação de trincas, mudando a estabilidade estrutural e dimensional. Geralmente, as tensões residuais compressivas podem inibir a nucleação e propagação das trincas, aumentando a vida em fadiga de um componente.

Na soldagem alguns parâmetros tendem favorecer para o aparecimento de tensões residuais, por exemplo, tipo de material, processo de soldagem, comprimento da peça e tipo de junta, ângulo de chanfro (AWS,2004).

Com isso deve-se analisar qual condição mais favorável para a diminuição das tensões residuais ao longo de um cordão de solda. Neste trabalho será avaliado qual ângulo de chanfro gera um estado de tensão residual mais favorável na solda realizada entre duas chapas de aço inoxidável AISI 310.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar a influência da variação do ângulo de chanfro em V (15°, 30° e 45°) para indução de tensões residuais no processo de soldagem TIG em um aço inoxidável AISI 310 a partir da análise estatística de variância.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o processo de soldagem TIG, levando em conta as especificações, tipo de eletrodo, parâmetros operacionais, ângulos de chanfro e tensões residuais que estará sujeito;
- Preparar amostras, variando o ângulo de chanfro (15°,30° e 45°) e executar a soldagem através do método TIG;
- Desenvolver um roteiro da prática para obter os dados;

- Aplicar o roteiro no laboratório onde será realizada medidas no ensaio de indentação Brinell por cada amostra soldada em vários pontos ao longo da secção perpendicular à direção de solda;
- Coletar os dados e comparar com a base teórica para avaliar a influência da variação do ângulo de chanfro que produz um estado de tensão residual menor e estabelecer uma correlação entre os ângulos e as tensões correspondentes.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho apresentado será dividido em cinco capítulos seguindo as normas ABNT e as diretrizes para realização de trabalhos de monografia na área de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto, de acordo com a estrutura mostrada a seguir.

O primeiro capítulo apresenta a formulação do problema, com justificativa, os objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica contendo fundamento teórico para se ter uma melhor compreensão do trabalho.

A metodologia aplicada onde tem-se uma descrição dos materiais e equipamentos utilizados, bem como as ferramentas utilizadas para obtenção dos resultados e coleta dos dados, é apresentada no terceiro capítulo.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e discussões dos valores encontrados.

O quinto e último capítulo são apresentadas as considerações finais e as recomendações para serem abordadas em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica onde tem um aporte técnico que serve para fundamentação teórica do trabalho. Esta revisão bibliográfica apresenta conceitos relacionados ao processo de soldagem e seus efeitos relacionados à tensão residual. Por isso, contribui para comparar e validar resultados através dos ensaios efetuados, tratando do processo de soldagem TIG em um aço inoxidável AISI 310, das tensões residuais e do ensaio de indentação.

2.1 Soldagem

Segundo Brandi *et al* (1992, p.1) “soldagem é o processo de união entre duas partes metálicas, sendo utilizada uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. Os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte de energia ou pela natureza da junta”.

A tabela 1 que é apresentada a seguir, mostra a classificação dos processos de soldagem de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção.

Tabela 1: Classificação dos processos de soldagem de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção

Fonte de Energia		Tipo de proteção				
		Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo (escória)	Sem proteção
Mecânica					N	Explosão Atrito Ultra-som
Química	Chama	N			Oxiacetilênica	
	Reação exotérmica	N			Aluminotermia	
Elétrica	Resistência elétrica	N	N	N	Eletroescória	Topo-a-topo Ponto Ressalto Costura
	Arco elétrico	Eletrodo consumível	N	MIG	Eletrodo tubular	
					MAG	Eletrodo revestido Arco submerso
	Eletrodo não consumível	N	TIG			Eletrodo de carbono
Energia radiante	Eletrômagnética		Lasers		N	N
	Partículas	Feixe de elétrons		N	N	N

Fonte: Brandi *et al* (1992, p.2)

De acordo com a Tabela 1, as fontes de energia usadas nos processos de soldagem são química, elétrica, mecânica e radiante onde o cordão de solda pode ser protegido (desde um

ambiente à vácuo, utilizando um gás inerte ou não, até com uso de escória) ou também sem proteção.

A figura 1 mostra a classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.

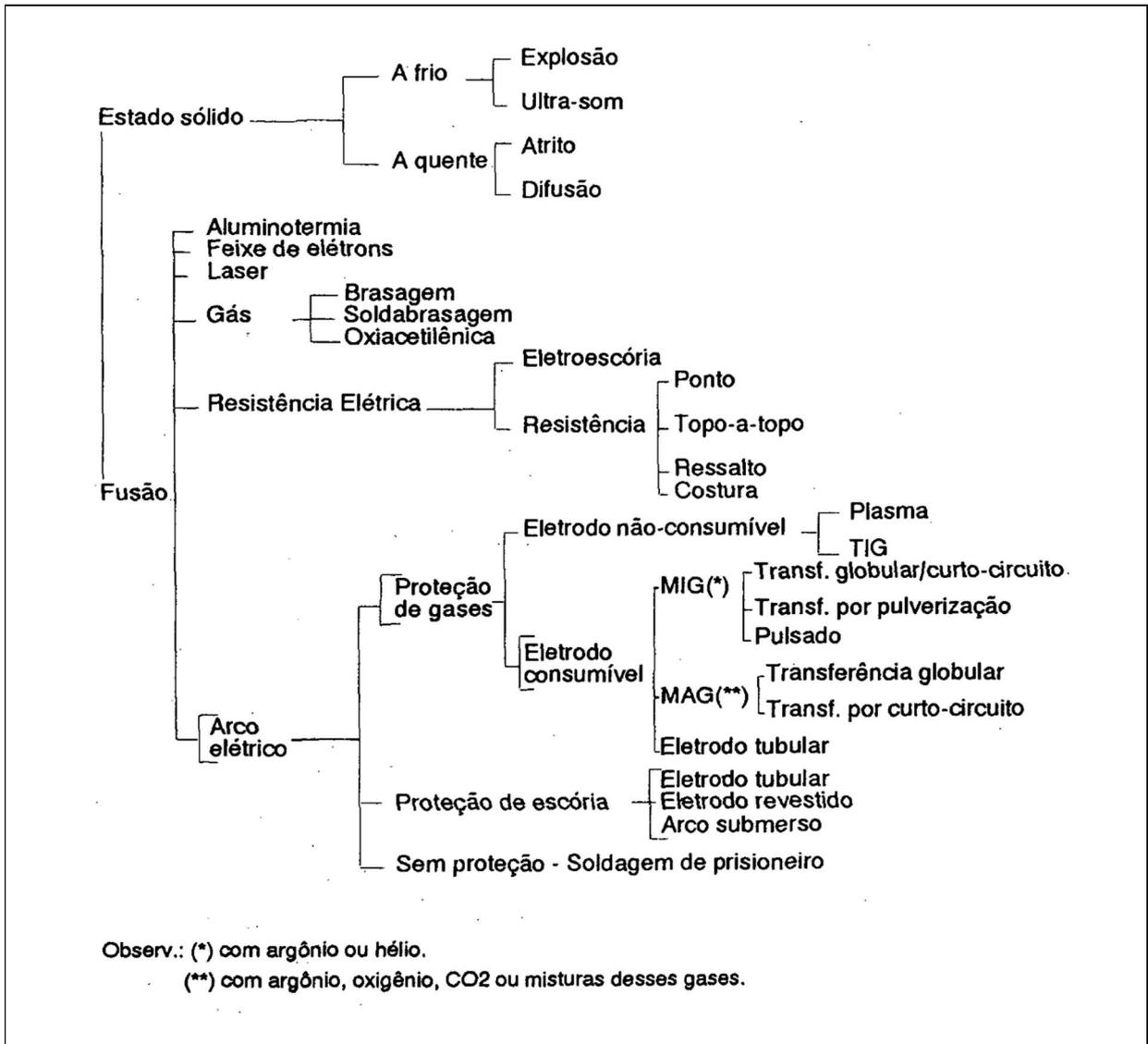


Figura 1: Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união

Fonte: Brandi *et al* (1992, p.3)

De acordo com a Figura 1, o termo soldagem abrange um elevado número de processos, sendo que estes apresentam características operacionais, equipamentos e ferramentas diferentes. Isso permite que a soldagem seja utilizada nos mais diferentes produtos, que vai desde componentes eletrônicos até aviões e naves espaciais e, em outras estruturas de grande porte (Wainer *et al*, 1992).

Para American Welding Society – AWS (2001) soldagem pode ser considerada como a operação que visa a obter a união de materiais produzida através do aquecimento até um determinado nível de temperatura, com ou sem metal de adição ou aplicação de pressão.

De acordo com Modenesi *et al* (2012) o método de união dos metais pode ser dividido em duas categorias principais, aqueles onde aparecem forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e, aqueles baseados em forças microscópicas interatômicas ou intermoleculares. O processo de soldagem enquadra na segunda categoria, onde a união é conseguida através de ligações químicas primárias (metálica, covalente ou iônica) ou secundárias (ligação de Van der Waals).

2.1.1 Terminologia de Soldagem

Como apresentado no capítulo anterior, soldagem é uma operação que visa obter a união de peças, chamadas de materiais base. Podemos destacar outras particularidades que correspondem ao processo de soldagem dentre elas o material de adição, a poça de fusão e a penetração, que são relativamente materiais adicionados em estado líquido durante a soldagem por fusão. A figura 2 indica os elementos característicos do processo de soldagem.

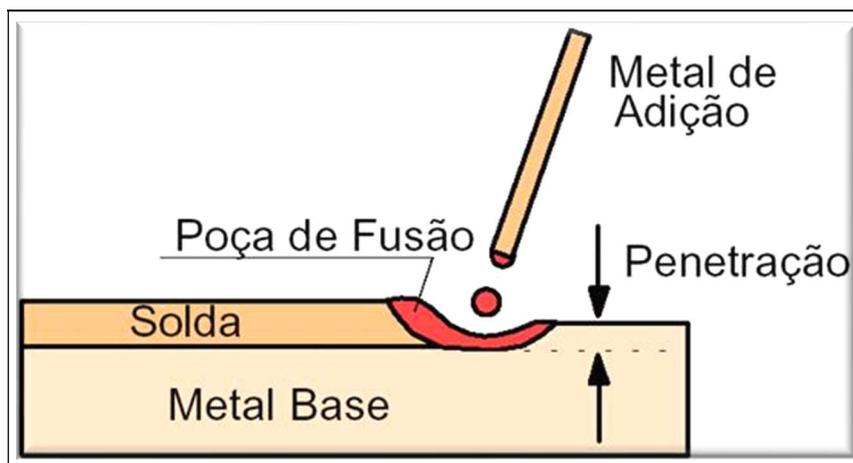


Figura 2: Terminologia dos elementos que caracterizam um processo de soldagem

Fonte: Modenesi (2008, p.1)

Para Marques *et al* (2011) a junta é considerada a região onde as peças são unidas por soldagem que podem ser classificadas de acordo com seu posicionamento. A figura 3 ilustra os tipos de junta comumente usados.

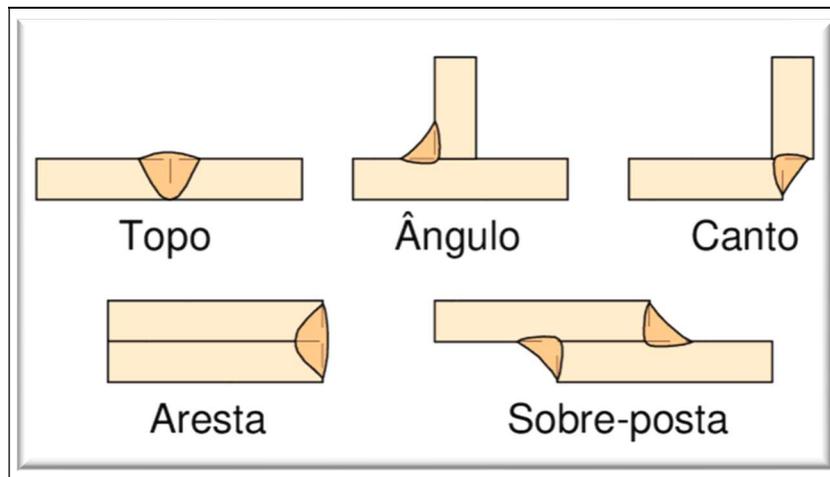


Figura 3: Tipos de junta

Fonte: Modenesi (2008, p.2)

Ainda, conforme Modenesi (2008) as peças podem receber uma preparação das juntas para que possibilite uma penetração melhor da solda, recebendo o nome de chanfro. A figura 4 mostra os tipos mais utilizados.

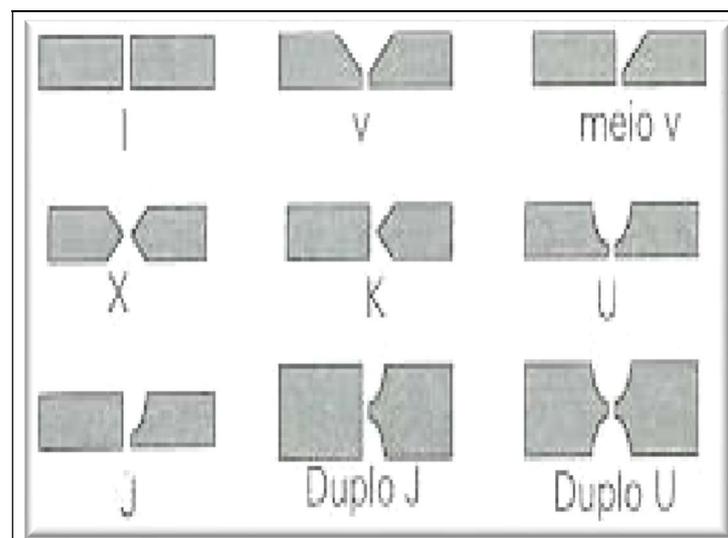


Figura 4: Tipos de chanfro

Fonte: Marques *et al* (2011, p.31)

Pode-se levar em conta a aplicação dos chanfros em diferentes tipos de juntas, conforme demonstrado na figura 5.

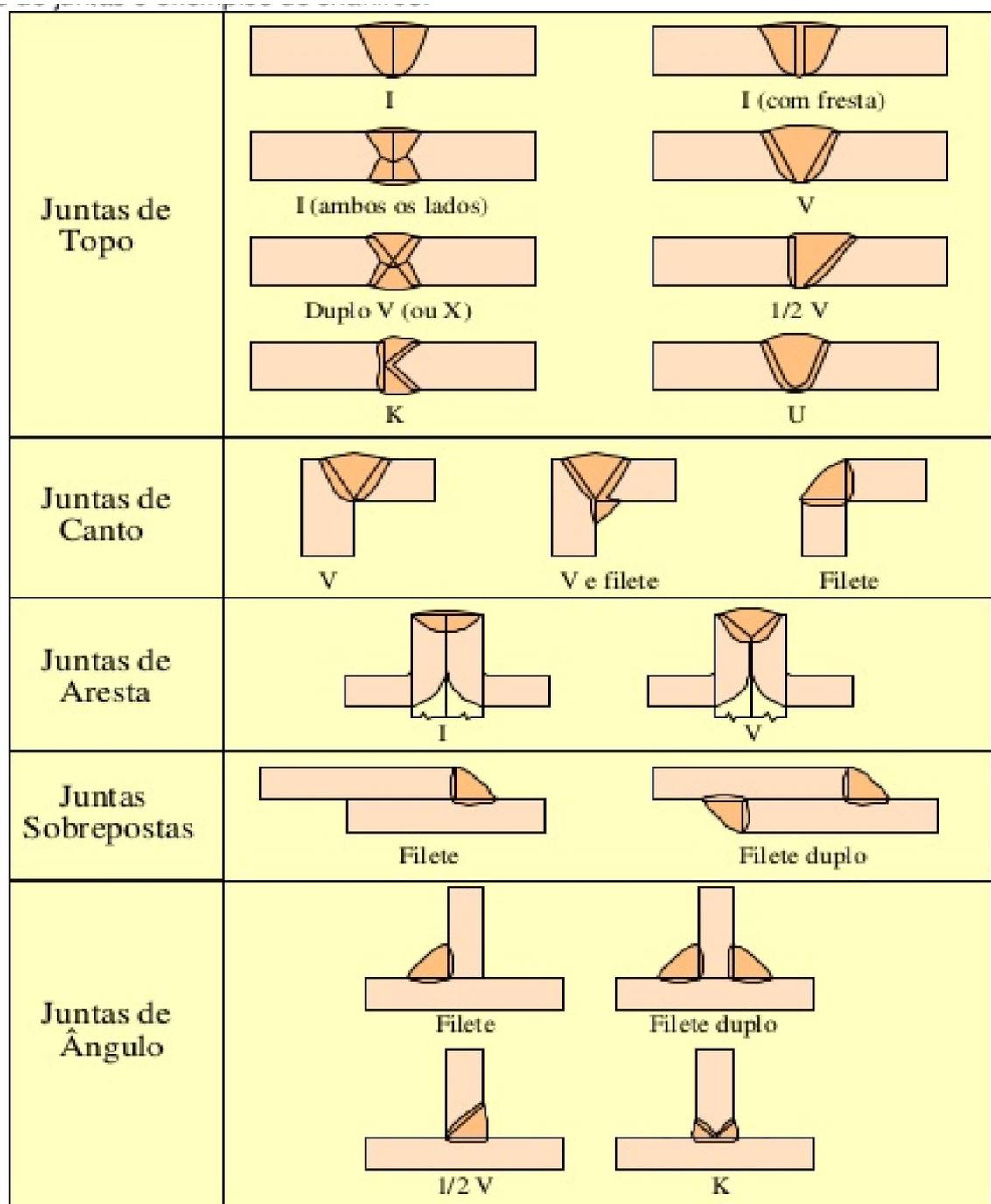


Figura 5: Chanfros usados geralmente com os diferentes tipos de junta

Fonte: Modenesi *et al* (2008, p.3)

Algumas características geométricas principais devem ser levadas em conta no que diz respeito ao chanfro segundo Modenesi (2008, p.3), como mostra a figura 6.

- Encosto ou nariz (s): parte não chanfrada de um componente da junta;
- Abertura da raiz, folga ou fresta (f): menor distância entre as peças a soldar;
- Ângulo de Bisel (β): ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta;
- Ângulo de chanfro (α): soma dos ângulos de Bisel dos componentes da junta.

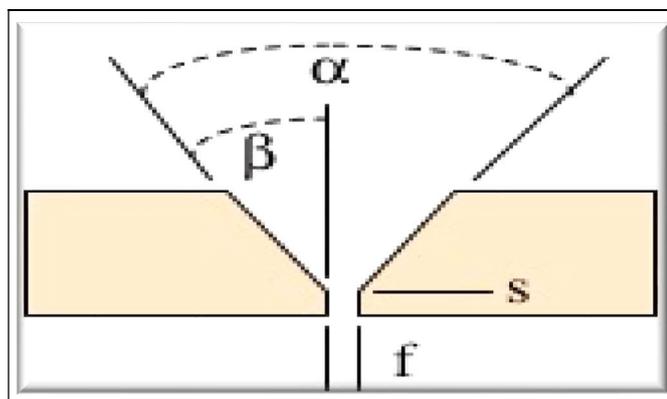


Figura 6: Características dimensionais de chanfros usados em soldagem

Fonte: Modenesi *et al* (2008, p.3)

2.1.2 Soldagem a Arco Elétrico

Segundo Felizardo (2016, p.11) processo de soldagem por fusão a arco elétrico é considerado como “descarga elétrica controlada entre dois eletrodos, sustentada por um gás ionizado a alta temperatura chamado plasma, produzindo energia térmica suficiente para a fusão localizada do material de base e de adição (se existir)”.

Coppola *apud* Almir & Jair (1979) apresenta soldagem a arco elétrico como uma das fontes de energia mais usadas e é definida como passagem de uma corrente elétrica onde há uma atmosfera gasosa entre dois eletrodos que são submetidos a uma diferença de potencial.

2.1.3 Soldagem com Eletrodo Revestido

No processo de soldagem a arco com Eletrodo Revestido também conhecido como Shielded Metal Arc Welding (SMAW) ou Manual Metal Arc Welding (MMA), o arco elétrico ocorre entre um eletrodo revestido consumível e a peça, sendo assim providenciada a fusão do eletrodo e do metal de base que se misturam na poça de fusão (MODENESI & MARQUES, 2000).

De acordo com Neri (2012, p.17), soldagem com eletrodo revestido é definido como “processo de soldagem por fusão a arco elétrico que utiliza um eletrodo consumível, no qual o calor necessário para a soldagem provém da energia liberada pelo arco formado entre a peça a ser soldada e o referido eletrodo”.

Gandra (1996) faz uma referência da soldagem com eletrodo revestido como sendo um processo que depende de uma fonte de energia (transformador, retificador ou gerador) para fornecer corrente elétrica adequada para gerar um arco elétrico entre o eletrodo e o metal base, ocasionando um calor suficiente que leva as peças a serem soldadas ao ponto de fusão.

Na figura 7 são apresentados os elementos necessários para efetuar a soldagem por eletrodo revestido, desde a fonte de energia até o material a ser soldado.

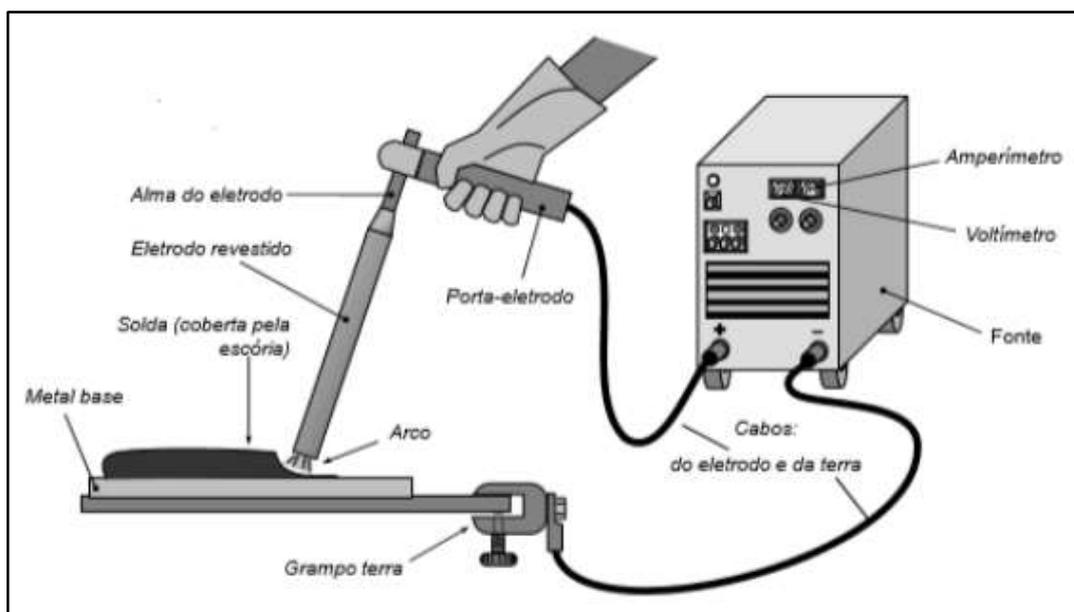


Figura 7: Equipamento básico para o processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW)

Fonte: Site repositório.ufu.br (2019)

Para Okumura & Taniguchi (1982) três funções principais do revestimento destacam-se, que são: estabilizar o arco elétrico, fazer a proteção da poça de fusão através da escória e dos gases gerados no processo e, adicionar elementos de liga no metal depositado.

A figura 8 ilustra o processo básico de soldagem por eletrodo revestido.

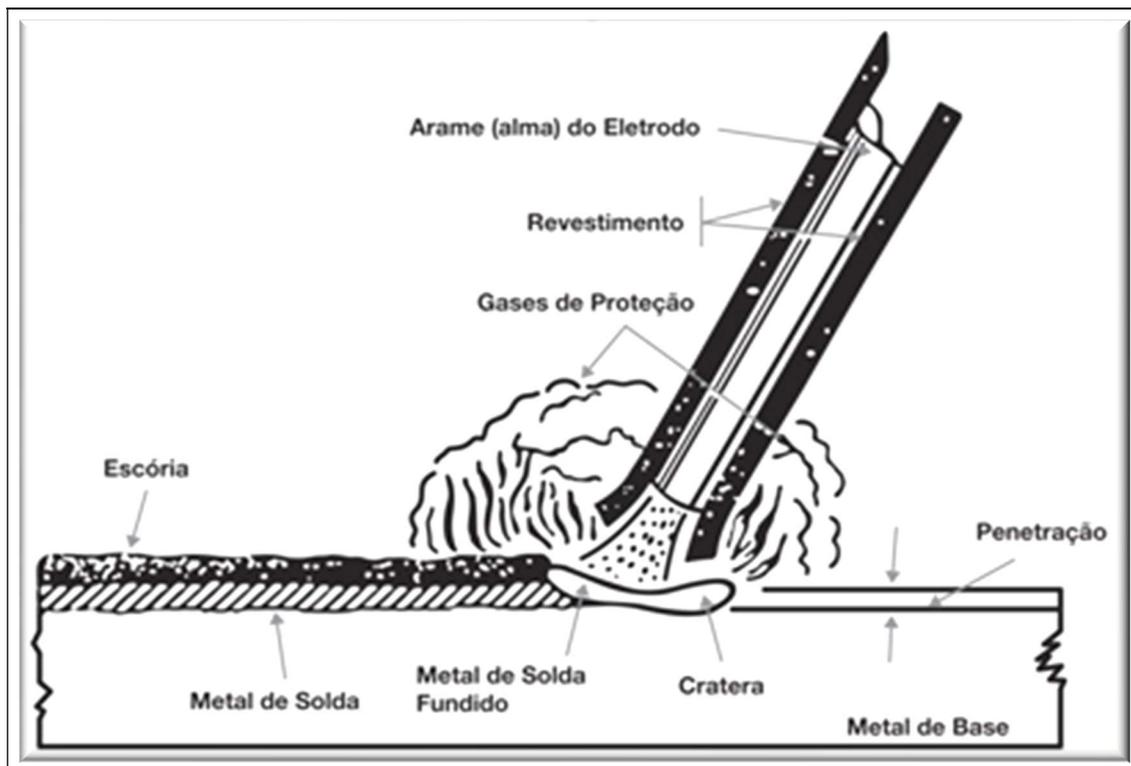


Figura 8: Processo de Soldagem Eletrodo Revestido

Fonte: Site ESAB Brasil (2019)

2.1.4 Soldagem MIG / MAG

Para Brandi *et al* (1992), os processos de soldagem MIG/MAG, podem ser considerados como aqueles que fazem uso de um arco elétrico como fonte de calor mantido entre um eletrodo nu consumível e a peça a soldar. A soldagem pode ser semiautomática ou automática, com a proteção da região sendo feita por um gás inerte (MIG) ou um gás ativo (MAG). A figura 9 ilustra a vista do arco elétrico no processo MIG/MAG.

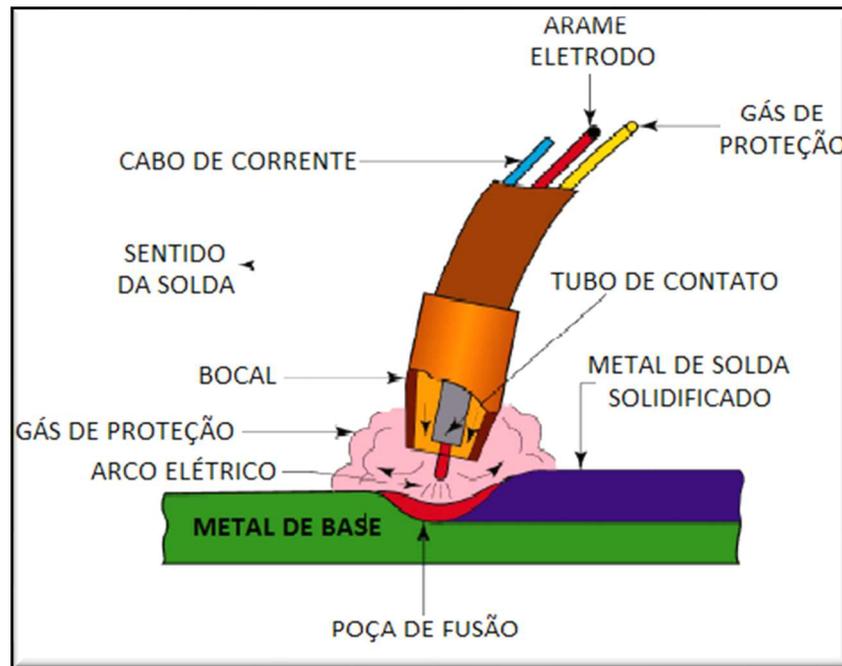


Figura 9: Processo de soldagem MIG/MAG

Fonte: Adaptada do site SUMIG (2018)

Modenesi *et al* (2011) apresentam a soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW) como um processo em que a união das peças é produzida pelo aquecimento delas através de um arco elétrico entre um eletrodo metálico nu e a peça de trabalho.

A proteção do arco e poça de fusão é obtida por um gás ou mistura de gases, sendo inerte (Ar/He) onde o processo é chamado de MIG (Metal Inert Gas), ou gás ativo (CO_2 ou misturas (Ar/ O_2 / CO_2), onde o processo é chamado de MAG (Metal Active Gas). No caso de soldagem de metais e ligas não ferrosas são usados gases inertes puros, para aços ligados, normalmente são usadas misturas de gases inertes com pequenas quantidades de gases ativos, já na soldagem de aços carbonos são usadas misturas mais ricas em gases ativos ou CO_2 puro (MODENESI & MARQUES, 2000).

Segundo Gandra (1996) o equipamento de soldagem consiste em uma tocha de soldagem, um suprimento de energia, um suprimento de gás de proteção (inerte no que se refere a MIG e ativo no que se refere a MAG) e um sistema de acionamento de arame. Na figura 10 está ilustrada o funcionamento básico de um processo de soldagem MIG /MAG.

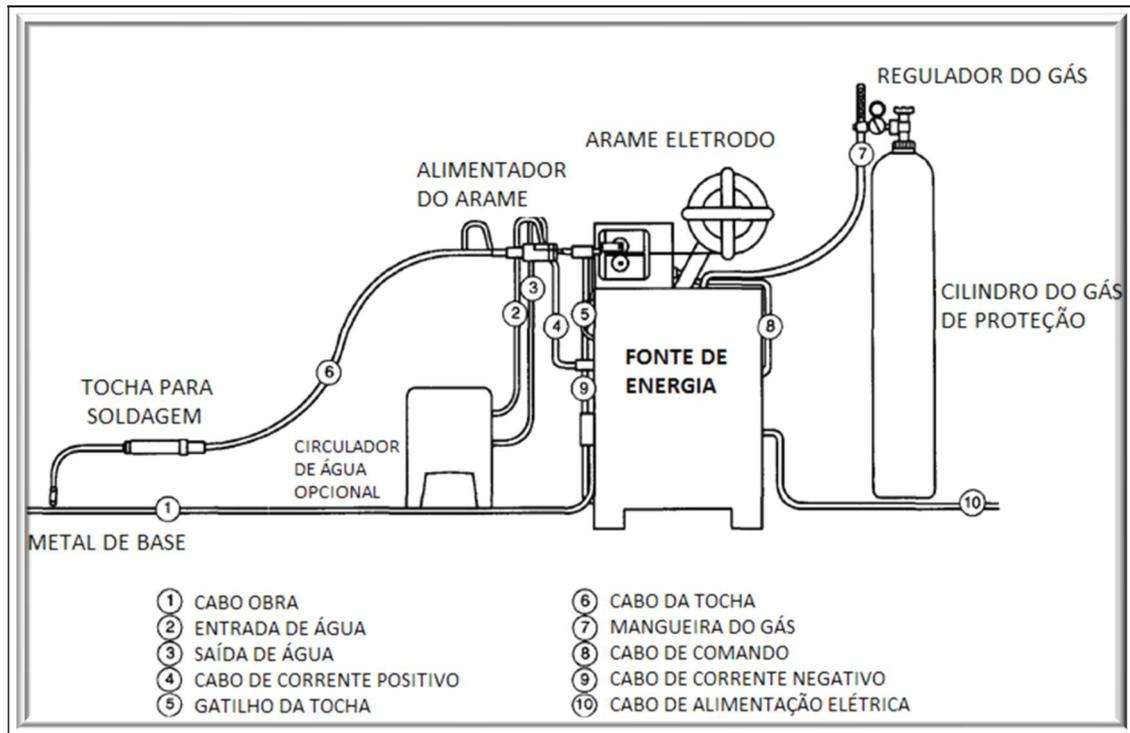


Figura 10: Diagrama básico de um processo de soldagem MIG/MAG

Fonte: Site SUMIG (2018)

2.1.5 Soldagem TIG

Segundo Neris (2012, p.24) soldagem TIG:

É um processo de soldagem por fusão, a arco elétrico que utiliza o calor gerado pelo arco formado entre o eletrodo de Tungstênio não consumível e a peça que se deseja soldar. A proteção da poça de fusão é conseguida com a adição de um gás inerte ou mistura de gases inertes sobre ela, sendo que o gás também tem a função de transmitir a corrente elétrica quando ionizado durante o processo e ainda auxiliar a resfriar o eletrodo; a soldagem pode ser realizada com ou sem metal de adição.

De acordo com Marques *et al* (2011, p.205) “a soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir”. O processo básico de soldagem TIG é ilustrado na figura 11 onde se vê o detalhe da região do arco.

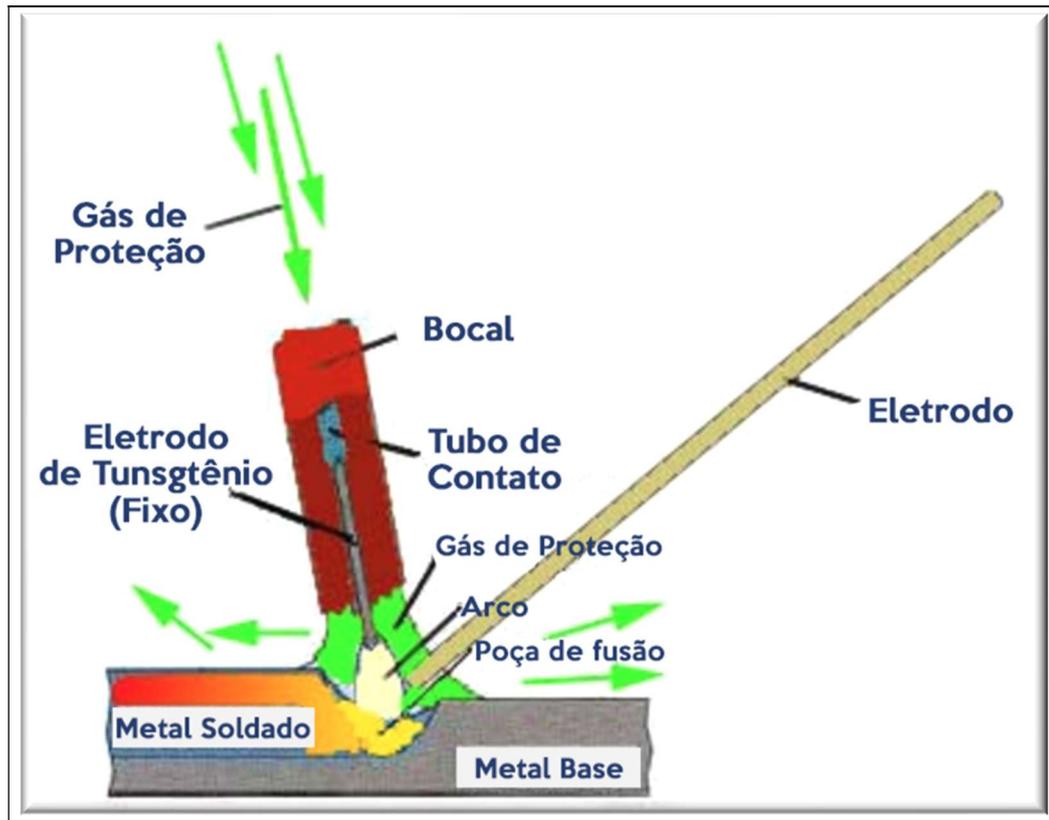


Figura 11: Processo de soldagem TIG

Fonte: adaptada do site AVENTA (2016)

Para Modenesi & Marques (2000, p. 16):

A soldagem a Arco Gás – Tungstênio (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW) ou, como é mais conhecida no Brasil, TIG (Tungsten Inert Gas) é um processo no qual a união é obtida pelo aquecimento dos materiais por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. A proteção do eletrodo e da zona da solda é feita por um gás inerte, normalmente o argônio, ou mistura de gases inertes (Ar/He). Metal de adição pode ser utilizado ou não.

A soldagem TIG pode ser usada em vários metais em um processo manual ou automático, mas geralmente é mais utilizada para solda em alumínio e ligas de aço inoxidável, além de produzir uma solda limpa e de alta qualidade, pois ela não gera escória (ESAB,2019).

Segundo Bracarense (2000, p.6) “no processo GTAW os eletrodos não são consumíveis e tem o papel de servir como um dos terminais do arco que gera o calor para o processo. Ao aproximar-se da sua temperatura de fusão (3410 °C), o tungstênio torna-se termo iônico, como uma fonte disponível de elétrons”.

De acordo com Simei (2012) são classificados de acordo com a composição química existente no eletrodo, que são varetas sinterizadas de tungstênio puro ou ligado ao Tório (Th),

Zircônio (Zr), Lantânio (La) ou Cério (Ce). A classificação do eletrodo encontra-se na norma ANSI/AWS A5.12-92 onde é apresentada na tabela 2 a seguir.

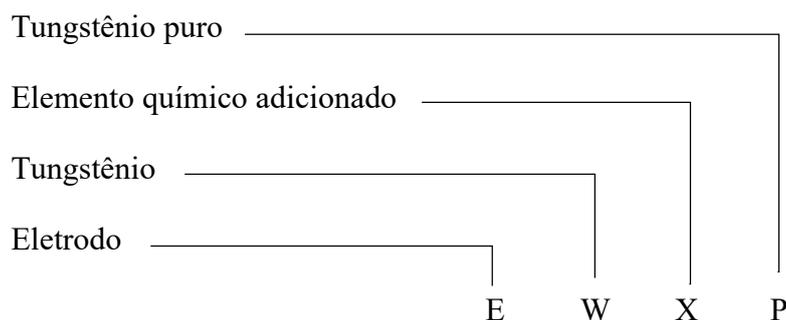
Tabela 2: Classificação AWS do Eletrodo

Classificação AWS	W %	CeO ₂ %	La ₂ O ₃ %	ThO ₂ %	ZrO ₂ %	Outros % (máx.)	Cor da ponta
EWP	99,5	-	-	-	-	0,5	Verde
EWCe-2	97,5	1,8 - 2,2	-	-	-	0,5	Laranja
EWLa-1	98,3	-	0,9 - 1,2	-	-	0,5	Preta
EWTh 1 (1%)	98,5	-	-	0,8 - 1,2	-	0,5	Amarela
EWTh 2 (2%)	97,5	-	-	1,7 - 2,2	-	0,5	Vermelha
EWZr-1	99,1	-	-	-	0,15 - 0,40	0,5	Marrom
EWG	94,5	-	-	-	-	0,5	Cinza

Os números 1 e 2 apresentam a quantidade de material adicionado

Fonte: Site INFOSOLDA (2019)

A norma AWS A5. 12-92 estabelece um código para a identificação do eletrodo de acordo com a sua composição química.



2.1.5.1 Equipamento Básico da Soldagem TIG

Marques *et al* (2011) elucida, que para o processo de soldagem TIG, são necessários alguns equipamentos básicos para efetuar a operação como, fonte de energia elétrica, tocha de

soldagem apropriada, fonte de gás de proteção, dispositivo para abertura do arco, cabos e mangueiras. Estes equipamentos básicos para o processo de soldagem TIG estão ilustrados na figura 12.

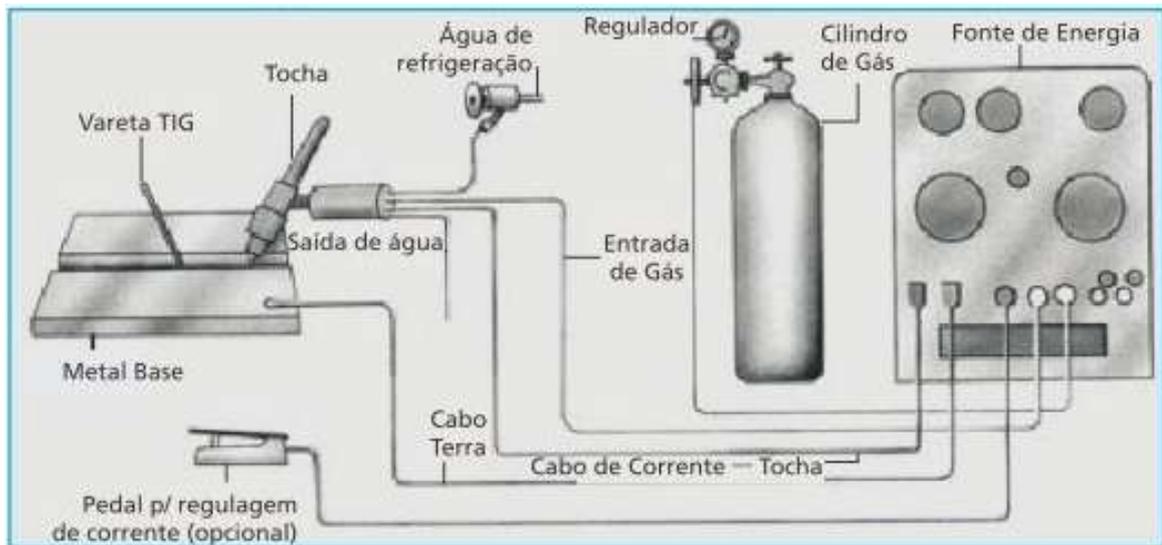


Figura 12: Equipamento básico para soldagem pelo processo TIG

Fonte: Adaptada do site PINIMG (2019)

Wainer *et al* (1992) define os componentes como:

- Fonte de energia: é importante frisar que este componente pode ser um gerador, retificador ou transformador, dependendo do material a ser soldado;
- Unidade de alta frequência: fundamental para soldagem em corrente alternada, onde se regula a intensidade e controla a vazão do gás inerte quando a fonte de energia não exerce essa função;
- Sistemas de refrigeração: no caso da fonte de energia e da tocha utilizar água, onde geralmente é recirculada em um circuito fechado;
- Reservatório do gás para soldagem: equipamento cilíndrico que possui reguladores de pressão e vazão de gás;
- Tocha TIG: é o componente onde o eletrodo de tungstênio fica fixado, conduzindo corrente elétrica e proporcionando a proteção gasosa necessária à região que circunda o arco elétrico e a poça de fusão.

A figura 13 ilustra uma tocha utilizada no processo TIG e alguns elementos importantes no processo de soldagem.

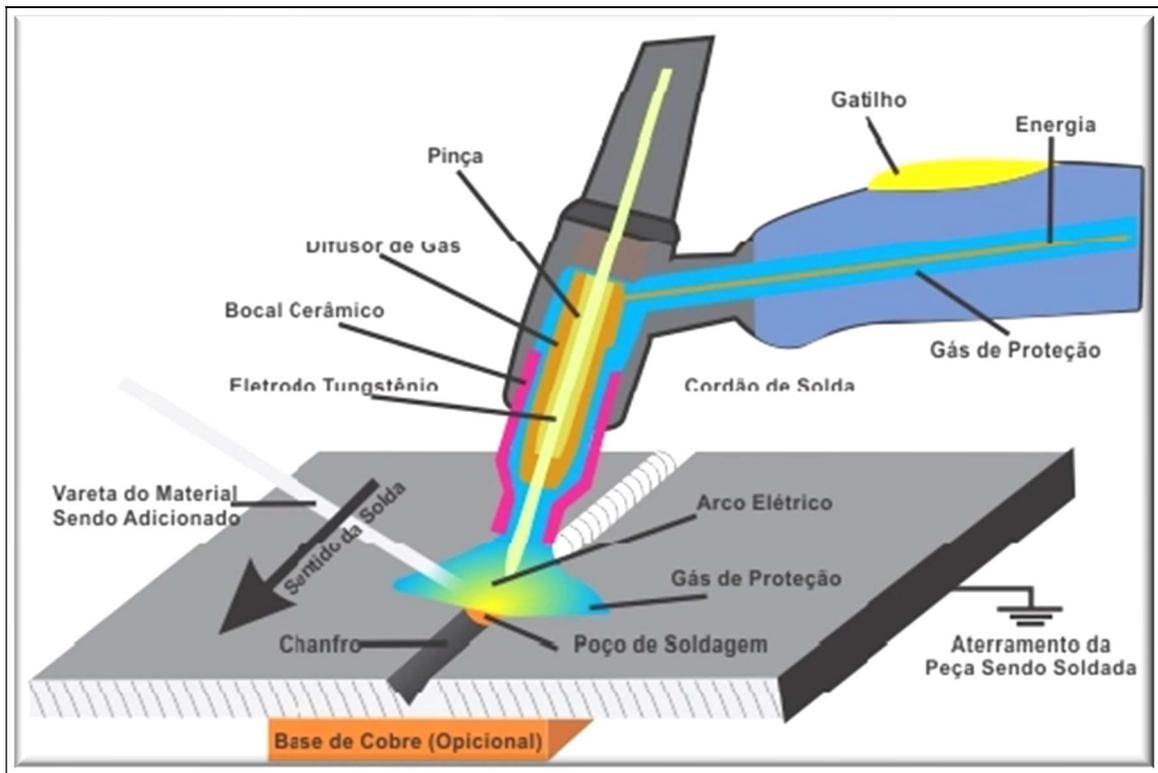
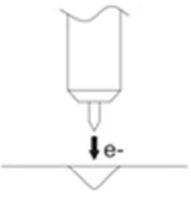
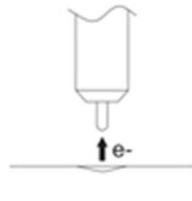
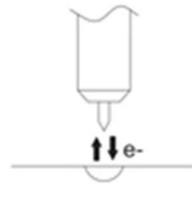


Figura 13: Tocha para processo TIG e componentes do processo

Fonte: Site WORDPRESS (2016)

De acordo com ESAB Brasil (2019), a soldagem TIG pode ser efetuada fazendo uso de corrente contínua (CC- ou CC+) ou corrente alternada (CA), onde cada uma pode influenciar nos mecanismos de emissão de elétrons e conseqüentemente nas características da soldabilidade. A tabela 3 exemplifica as diferentes características do processo de acordo com os tipos de corrente.

Tabela 3: Tipos de processos relacionados com tipos de corrente

TIPO DE CORRENTE	CONTÍNUA		ALTERNADA
	Direta CC-	Inversa CC+	CA
CARACTERÍSTICAS			
OBJETIVO	Penetração profunda e preservação do tungstênio	Penetração "rasa" e efeito limpeza de óxido superficial	Preservação do W e efeito limpeza a cada meio ciclo
APLICAÇÃO	Aços carbono, baixa/alta liga, inoxidáveis, prata e cobre e ligas, revestimentos	Viável para soldagem de pequenas espessuras	Alumínio, magnésio e suas ligas
ELETRODO DE W: CAPACIDADE DE SUPORTAR CORRENTE SEM FUNDIR	Ótima, pode-se usar altos valores de corrente	Pobre, somente para baixos valores de corrente	Boa, pode-se usar valores intermediários de corrente
AÇÃO DE LIMPEZA DO ÓXIDO NA SOLDAGEM DE Al E Mg E SUAS LIGAS	Não	Sim	Sim, a cada meio ciclo
BALANÇO DE CALOR NO ARCO (Aproximado)	70% na peça, 30% no eletrodo	30% na peça, 70% no eletrodo	50% na peça, 50% no eletrodo
FLUXO DE ELÉTRONS - PENETRAÇÃO			

Fonte: Adaptada do site ESAB Brasil (2019)

2.2 Tensão Residual

De acordo com Marques *et al* (2009) quando se trata de soldagem, um aquecimento intenso ocorre na área da união, com isso as regiões aquecidas tendem a dilatar, mas esta dilatação é dificultada por partes onde a temperatura é menor. Com isso aparecem deformações elásticas e plásticas na região da solda, resultando em tensões internas ao final da soldagem que são chamadas de tensões residuais.

Segundo Sousa *apud* Lu (2012), tensões residuais são aquelas formadas pelo estado de tensão interna do material, e estas se mantêm equilibradas quando todas as forças externas e/ou gradientes térmicos são removidos.

Como apresentado por Coppola *apud* Estefen *et al* (2016):

As tensões residuais são causadas por deformação plástica heterogênea, ação térmica e/ou transformações de fase, abrangendo a totalidade dos processos tecnológicos utilizados na indústria moderna. Nos processos de soldagem as principais causas que geram essas tensões residuais são: diferencial térmico nas várias zonas da solda, surgimento de deformação plástica e transformações de fase.

Para Leal (2015), as tensões residuais podem ser consideradas como esforços internos que se auto equilibram, isto é, elas permanecem no material mesmo quando retiradas todas as forças externas. Dessa forma, as tensões geradas por esses corpos produzem forças e momentos resultantes nulos:

$$\int \sigma \cdot dA = 0 \quad (1)$$

$$\int dM = 0 \quad (2)$$

De acordo com Sutério (2005) as tensões residuais são agrupadas em três tipos principais de acordo com a distância em que as tensões podem ser observadas, ou seja, dependendo da área de abrangência e dos mecanismos de sua formação:

- Tipo I (Macroscópicas) - agem no mínimo se estendendo por vários grãos do material, ou seja, varia em diferentes regiões do material (SOARES, 2003);
- Tipo II (Microscópicas) – ocorrem de acordo com a orientação dos grãos, atuando em uma distância entre os grãos ou parte deles, portanto, a região influenciada no equilíbrio destas tensões é restrita a um pequeno número de grãos (SOUSA, 2012);
- Tipo III (Submicroscópicas) – agem de acordo com as distâncias compreendidas entre os níveis atômicos no interior dos grãos, e são relacionadas com os defeitos da rede cristalina, e ocorrem principalmente nas regiões próximas às discordâncias (COPPOLA, 2016).

2.2.1 Tensões Residuais em Soldagem

Para Machado *apud* Marques *et al* (2015), variações de temperatura e deformações plásticas alteram estruturas e propriedades dos materiais na maioria dos processos de soldagem, desenvolvendo tensões residuais de origem térmica.

Segundo Cofiño (2010, p.25), tensões residuais geradas durante a soldagem “são conseqüências da variação de temperatura heterogênea no material decorrentes da realização do processo”.

De acordo com Merlo (2016), o processo de soldagem submete o aço a um gradiente de temperatura, sofrendo expansão ou contração na região aquecida, entretanto, as regiões onde as temperaturas são mais baixas estabelecem restrições ao processo.

Para que se entenda melhor como há formação das tensões, a figura 14 ilustra um esquema entre a variação térmica e as tensões residuais existentes ao longo da peça e cordão de solda.

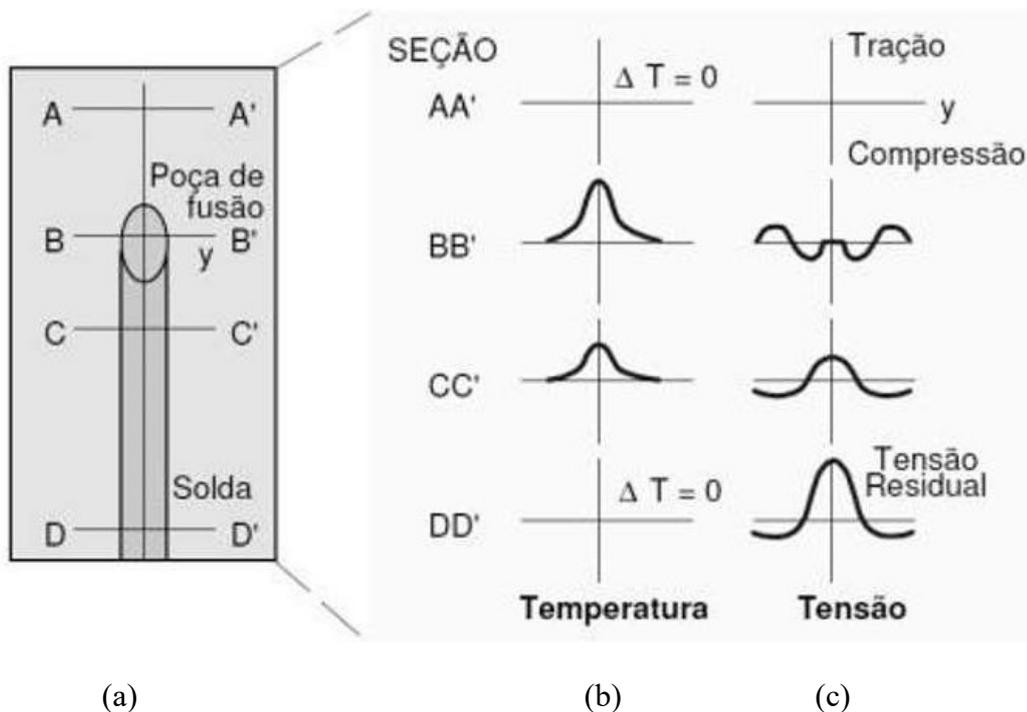


Figura 14: Esquema de tensão residual em soldagem

Fonte: Adaptado de Menezes *et al* (2017, p.49)

A figura 14 (a) ilustra de forma circular a região fundida (poça de fusão), a região termicamente afetada (área mais escura) onde ocorrem deformações plásticas, e a área fora da área escura apresenta apenas deformações elásticas ao longo da soldagem (COPPOLA, 2016).

A figura 14 (b) mostra a distribuição térmica ao longo do processo, já a figura 14 (c) apresenta distribuição de tensões de acordo com o processo na direção x (σ_x), em seções ao longo do processo (LEAL, 2015).

A seção AA' devido à distância da fonte de calor, por ainda não ter sofrido variação de temperatura, apresenta tensões nulas. Na seção BB' as regiões mais frias impedem que o material aquecido expanda por dilatação, gerando tensões de compressão próximo a ZF e tensões de tração nas regiões mais afastadas (COFIÑO, 2010).

Na seção CC' devido o resfriamento e solidificação do metal fundido, são geradas tensões de tração nas regiões da solda e regiões próximas ao metal base. Na região DD', após o resfriamento completo, resultam em tensões residuais de tração no centro da solda muito próximas ao limite de escoamento do material (COPPOLA, 2016).

2.2.2 Técnicas de Medição de Tensões Residuais

De acordo com Sousa (2012), o estudo das tensões residuais ganhou destaque devido à necessidade de monitoramento dos componentes mecânicos ao longo da vida útil, onde se faz necessário desenvolver técnicas, dispositivos e instrumentos de medição experimental baseados em vários princípios.

Para Rodacoski (1997, p.11):

A determinação de compreender melhor os efeitos das tensões residuais proporcionaram o desenvolvimento de uma série de técnicas, dispositivos e instrumentos de medição experimentais baseados em diferentes princípios. Os primeiros métodos utilizados na determinação qualitativa das tensões residuais eram baseados no alívio das tensões pela realização de cortes, ou remoção de camadas por usinagem e pela medição do empenamento resultante no material. Estes princípios de medição ainda hoje são utilizados, no entanto com técnicas de medição das deformações aperfeiçoadas.

Segundo Coppola *apud* Cofiño (2016), as tensões residuais tornam-se difíceis de serem medidas por causa da falta de um esforço externo. Com isso, algumas técnicas de medição de tensões residuais não conseguem perceber estas, pois, mudam de acordo com as propriedades antes e depois da aplicação do carregamento.

De acordo com Soares (2003) é possível classificar as técnicas em duas categorias, dependendo da influência que o método de medição exerce sobre os componentes a serem avaliados.

- Destrutivos ou semi-destrutivos: pode -se considerar como a alteração do estado de equilíbrio das tensões residuais, quando no ponto ou na região de análise provoca alívio destas tensões (SOUSA, 2012);
- Não destrutivos: quando as tensões residuais que provocam as alterações estão relacionadas com variações de parâmetros físicos ou cristalográficos do material em análise (SUTÉRIO, 2005).

Ainda de acordo com Soares (2003) não existe técnica universal que possa ser aplicada para qualquer situação, porém cada método tem suas vantagens e restrições que devem ser analisadas de acordo com cada responsável.

Rodacoski (1997) explica que para determinar tensões residuais através de métodos experimentais são classificados em duas categorias principais: utilização de métodos não invasivos de medição (onde não se altera o estado de tensão já existente) e a utilização de métodos invasivos de medição (aqueles que são baseados nos efeitos causados pelo alívio artificial das tensões residuais).

A tabela 4 apresenta de forma resumida os principais métodos de medição de tensão residual, onde algumas técnicas podem ser combinadas atendendo a maioria das necessidades da indústria.

Tabela 4: Principais métodos de medição de tensões residuais

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	OBSERVAÇÕES
SEMIDESTRUTIVOS	Método do furo cego	Execução de um furo, Ø 0,8 a 3,2 mm, método normalizado pela ASTM-E-837
DESTRUTIVOS	Método de remoção de camadas (Método da Deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método Difração de Raios X (método não destrutivo)
	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças assimétricas (exemplo: cilindros)
NÃO DESTRUTIVOS	Difração de Raios X	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normalizada pela SAE-J784a
	Difração de Nêutrons	Semelhante ao método de Raios X, entretanto, com inspeção em todo volume
	Método Ultrassônico	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material
	Método Magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen
	Método Indentação	Pressionamento de uma esfera ou penetrador cônico de diamante, em uma região da superfície do objeto sob análise

Fonte: Adaptado de Sutério (2005)

Para que seja aplicado qualquer método de medição de tensões residuais devem ser levados em conta alguns parâmetros, que são avaliados de acordo com a natureza do material a ser analisado e o tipo de medição que será realizado (SUTÉRIO, 2005).

- Natureza do material: estrutura cristalográfica, textura, composição química e fase;
- Tipo de tensão residual (macro tensão e micro tensão);

- Gradiente de tensões residuais na parte analisada (gradiente através da espessura ou da superfície);
- Geometria e a região da parte analisada (profundidade, dimensão e forma da superfície);
- Local de realização da medida (em campo ou laboratório);
- Tipo de intervenção (destrutiva ou não destrutiva);
- Tempo (razão de medição), e a extensão da intervenção;
- Incerteza e repetitividade do método;
- Custo da medição e dos equipamentos necessários.

2.3 Ensaio de Dureza

De acordo com o site INFOSOLDA (2019) “a dureza é uma propriedade mecânica largamente utilizada em estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas, e principalmente na especificação e comparação de materiais”.

Segundo Callister (2002) a dureza é considerada uma propriedade mecânica na qual está associada com facilitar ou dificultar deformação plástica localizada, ou seja, é a resistência que o material apresenta para pequenos riscos ou impressões.

Para Sousa (2012) existem diversos métodos de medição de dureza, como Vickers, Rockwell, Brinell, Knoop, dentre outros, o ensaio de dureza é uma técnica geral que tem um objetivo primordial, medir a dureza do material.

Segundo o site INFOSOLDA (2019) os laboratórios utilizam máquinas de dureza ou durômetros, as quais têm finalidades específicas para cada método. Brinell, Rockwell ou Vickers, ou mesmo durômetros universal que permite executar os três métodos de ensaio.

2.3.1 Dureza Vickers

Para o site INFOSOLDA (2020):

O método de dureza Vickers é aplicado em toda gama de durezas encontradas em vários materiais, onde, devido à utilização de cargas relativamente baixas e do tipo de penetrador, o ensaio pode ser aplicado para qualquer espessura, bem como para determinar durezas superficiais. Além disso, é possível utilizar a micro dureza que permite a determinação de dureza individual de microestruturas, de superfícies.

O site (<ftp.demec.ufpr.br>, 2020) define a dureza Vickers como um ensaio baseado na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada com ângulo de diedro de 136° , sendo este comprimido aplicando uma força “F” contra a superfície do material.

Este ensaio é padronizado pelas normas ASTM E92 (*Standard Test Method for Vickers Hardness and Knoop Hardness of metallic Materials*) e ASTM E384 (*Standard Test Method for microindentation Materials*).

Neste ensaio, a dureza Vickers (HV) é dada pela seguinte equação:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F \cdot \operatorname{sen} \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

Onde:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4)$$

Na figura 15 é apresentado um corpo de prova e o processo de indentação pelo método de dureza Vickers (HV).

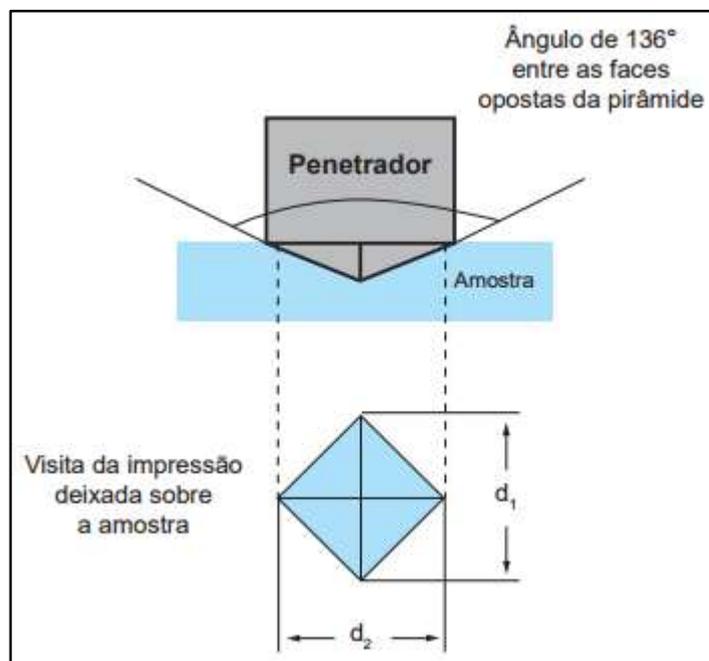


Figura 15: Ensaio de dureza Vickers

Fonte: Site aprovaconcursos.com.br (2020)

2.3.2 Dureza Brinell

De acordo com Copolla *apud* Cramarossa (2016) o primeiro ensaio de dureza reconhecido foi desenvolvido em 1900 por J.A. Brinell, que consiste em um penetrador esférico de aço e com um tempo de permanência da carga de 15 s ou, mais raramente de 30 s. Neste ensaio a dureza é medida através de uma superfície S da impronta que é realizada por meio do punção esférico e é calculada pela equação a seguir.

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5)$$

Onde F é a carga aplicada, D é o diâmetro da esfera e *d* é o valor médio da impronta medido ao longo de duas direções perpendiculares.

A dureza Brinell é regida pela norma ASTM E10 (*Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*).

A figura 16 ilustra um corpo de prova e o processo de indentação pelo método de dureza Brinell (HB).

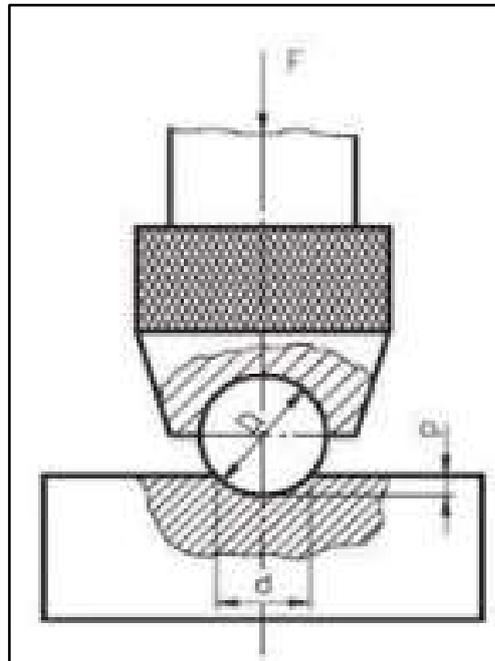


Figura 16: Ensaio de dureza Brinell

Fonte: Adaptado do site labteste.com.br (2020)

De acordo com a figura 16 o diâmetro (D) é determinado em função da espessura do CP ensaiado. No caso da norma brasileira, a espessura mínima do material ensaiado deve ser 17 vezes a profundidade da calota (p) (Site SLIDEPLAYER, 2019).

Na tabela 5 são indicados os diâmetros de esfera mais usados e os valores de carga para cada caso, em função do fator de carga escolhido.

$$k = \frac{F}{D^2} \quad (6)$$

Tabela 5: Valores da carga F em função do diâmetro da esfera e do fator de carga

DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	VALORES DA CARGA F [kgf]			
	k [kgf/mm ²]			
	30 D ²	10 D ²	5 D ²	2,5 D ²
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,25	15,625

Fonte: Adaptado do site SLIDEPLAYER (2019)

2.3.3 Dureza Rockwell

Segundo o site ESSEL (2020) Rockwell desenvolveu um método de ensaio de dureza onde se faz uso de uma pré-carga. Método que apresenta algumas vantagens em relação ao método Brinell, pois avalia a dureza de vários metais, que vão desde os mais moles até os mais duros.

Normas que regem estes ensaios são a ASTM E18 (*Standard methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials*) e a ISO 6508-1 (*Metallic materials - Rockwell hardness test*).

Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade), como ilustra a figura 17.

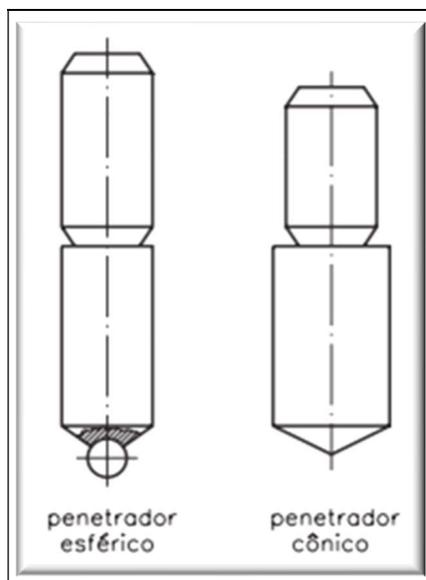


Figura 17: Tipos de penetradores para ensaio Rockwell

Fonte: Site ESSEL (2020)

2.4 Análise de Variância

De acordo com Farias & Demarqui (2017, p.1) o método de análise de variância ou ANOVA é aquele “que permite comparar médias de várias populações representadas por variáveis quantitativas”.

Segundo o site edisciplinas (2019), ANOVA pode ser considerado como um método onde é testada a igualdade entre três ou mais médias populacionais, analisando a variância de cada amostra em questão.

Para Souza (2019) análise de variância faz uso de variáveis contínuas onde diversos grupos podem ser comparados de uma única vez, ou seja, ANOVA compara a variação de acordo com a variável de interesse, normalmente distribuída em todas as populações.

A análise de variância compara a variabilidade entre as médias amostrais dos grupos e a variação dentro dos grupos.

Balieiro (2008, p.26) define a variância como a “média dos quadrados das diferenças entre os valores em relação à sua própria média”.

De acordo com Colosimo (2011) a medida de variância pode ser calculada de dois tipos diferentes quando se trabalha com diferentes populações:

- Variância dentro dos grupos: a variação dos valores dos indivíduos em torno das médias populacionais;
- Variância entre os grupos: a variação das médias populacionais em torno da média global.

As equações a seguir expressam os dois tipos:

- DENTRO DE GRUPOS:

$$s_D^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2 + \dots + (n_k-1)s_k^2}{n-k} \quad (5)$$

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k \quad (6)$$

- ENTRE OS GRUPOS:

$$s_E^2 = \frac{n_1(\bar{X}_1 - \bar{X})^2 + n_2(\bar{X}_2 - \bar{X})^2 + \dots + n_k(\bar{X}_k - \bar{X})^2}{k-1} \quad (7)$$

$$\bar{X} = \frac{n_1\bar{X}_1 + n_2\bar{X}_2 + \dots + n_k\bar{X}_k}{n_1 + n_2 + \dots + n_k} = \frac{n_1\bar{X}_1 + n_2\bar{X}_2 + \dots + n_k\bar{X}_k}{n} \quad (8)$$

s_D^2 – Dispersão dentro dos grupos

s_E^2 – Dispersão entre os grupos

n – Tamanho total da amostra

k – Populações (representa os grupos)

\bar{X} – Média global

A ANOVA diminui a probabilidade de um erro amostral, pois, permite fazer uma analogia global entre várias amostras ou subamostras, sendo que, de acordo com o aumento no número de amostras o total de comparações entre os pares aumenta exponencialmente (Pó, 2012).

Para Colosimo (2011) tem-se as seguintes condições para o uso da ANOVA:

- Para que os resultados da Análise de Variância sejam válidos, existe a necessidade de as variâncias amostrais serem semelhantes nas diferentes amostras;
- A ANOVA por ser um procedimento estatístico robusto, ele fornece resultados confiáveis mesmo com considerável desigualdade de variâncias, desde que os tamanhos das amostras sejam aproximadamente iguais;
- Também é razoavelmente robusto mesmo que a variável em estudo apresente uma distribuição bastante desviada da normal, especialmente se o tamanho das amostras seja grande.

2.5 Considerações Finais

Esse capítulo apresentou, através da literatura, os diversos processos de soldagem, algumas especificações, tipos de eletrodos e parâmetros que podem ser utilizados.

Em relação às tensões residuais, foi abordado sobre os tipos, efeitos nos materiais submetidos à soldagem levando em consideração os efeitos da variação térmica ao longo do cordão de solda.

A literatura mostra ainda os diversos métodos utilizados para medição da dureza de um material, levando em conta as características deste material bem como a finalidade de sua utilização.

Por fim, a revisão da literatura mostrou um dos métodos de avaliação estatística para compilar os dados e apresentar os resultados analisados. Assim, considerando o que foi exposto, tendo os objetivos propostos para esse trabalho como um direcionamento principal, descreveu-se a metodologia que será apresentada no capítulo 3.

3 METODOLOGIA

No capítulo a seguir é definida a estrutura de trabalho, avaliando a essência da pesquisa, onde possibilita elaboração de um método de forma padronizada. Além disso, permite relatar o processo utilizado para a realização da pesquisa, sendo definido através de um fluxograma relatando materiais e métodos necessários ao experimento e, variáveis e indicadores para contribuir na elaboração deste estudo.

Para Gerhardt & Silveira (2008, p.13) “a metodologia se interessa pela validade do caminho escolhido para se chegar ao fim proposto pela pesquisa; portanto não deve ser confundida com o conteúdo (teoria) nem com os procedimentos (métodos e técnicas)”.

3.1 Tipo de Pesquisa

Segundo Marconi & Lakatos (2003) a pesquisa é um método de observação ponderada, um procedimento formal, onde requer um tratamento científico e é constituído de um modo para conhecer a realidade ou para descobrir observações específicas.

De acordo com Gerhardt & Silveira (2008) pesquisa pode ser definida como uma atividade da ciência onde é proporcionado um entendimento da realidade a investigar, sendo processado através de aproximações sucessivas a fim de descobrir e interpretar fatos que estão inseridos em uma determinada realidade.

Para Gil (2008) os critérios para classificação dos vários tipos de pesquisa são de acordo com a sua natureza, abordagem do problema, objetivos e procedimentos técnicos. Os critérios baseados na abordagem do problema e nos objetivos serão abordados para um melhor entendimento.

Considerando classificar pesquisas quanto à abordagem, tem-se:

- Pesquisa Qualitativa: pode ser compreendida como aquela que não se preocupa com a representatividade numérica, preocupa-se apenas com aspectos da realidade que não podem ser quantificados. Ou seja, não faz uso de fórmulas, modelos matemáticos ou métodos estatísticos (GERHARDT & SILVEIRA, 2008).

- Pesquisa Quantitativa: baseia-se em levantar dados executados para compreensão dos fenômenos caracterizados pelas variáveis de difícil relação com as equações matemáticas (SILVA & MENEZES, 2005).

As pesquisas com base nos objetivos gerais podem ser classificadas como:

- Pesquisa Exploratória: possibilita um melhor domínio do problema proposto, visando torná-lo mais compreensível ou estabelecer mais possibilidades para o aprimoramento de ideias (GIL,2002).
- Pesquisa Descritiva: descreve as características de uma população amostral, fenômeno ou de um experimento. Utiliza-se de técnicas padronizadas de coleta de dados, preocupando-se mais com a atuação prática (GIL, 2008).
- Pesquisa Explicativa: tem como principal função identificar os fatores determinantes ou que contribuem para que os fenômenos ocorram, ou seja, porque ocorrem, explicando através dos resultados obtidos (GERHARDT & SILVEIRA, 2008).

Para Silva & Menezes (2005) as pesquisas do ponto de vista dos procedimentos técnicos podem ser: bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso e ex-post-facto.

Segundo Gil (2002, p.47) “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

O desenvolvimento dessa pesquisa pode ser avaliado como experimental, de cunho quantitativo e exploratório, de acordo com os ensaios realizados em laboratório e análise dos dados obtidos, tendo como suporte uma fundamentação teórica através das referências bibliográficas.

Nesse trabalho o projeto é verificar como a variação do ângulo de chanfro (15°,30° e 45°) pode influenciar na redução das tensões residuais após o processo de soldagem no aço inoxidável, partindo da pesquisa experimental, coletando e analisando os dados.

3.2 Materiais e Métodos

O trabalho foi elaborado através de uma pesquisa bibliográfica afim de ter um embasamento teórico necessário para dar apoio à estrutura proposta. Nesse caso foram avaliados os conceitos de soldagem, tensões, análise das variáveis operacionais e medidas as tensões residuais.

A pesquisa sofre interferências que vai desde o equipamento de soldagem a ser utilizado, tipo de material dos corpos de prova, as características dos chanfros (15°, 30° e 45°), tipo de eletrodo até o equipamento para realização do ensaio de indentação, onde a relação de dureza e tensões residuais podem ser alteradas. A figura 18 ilustra o fluxograma com a sequência dos processos a serem aplicados na pesquisa.

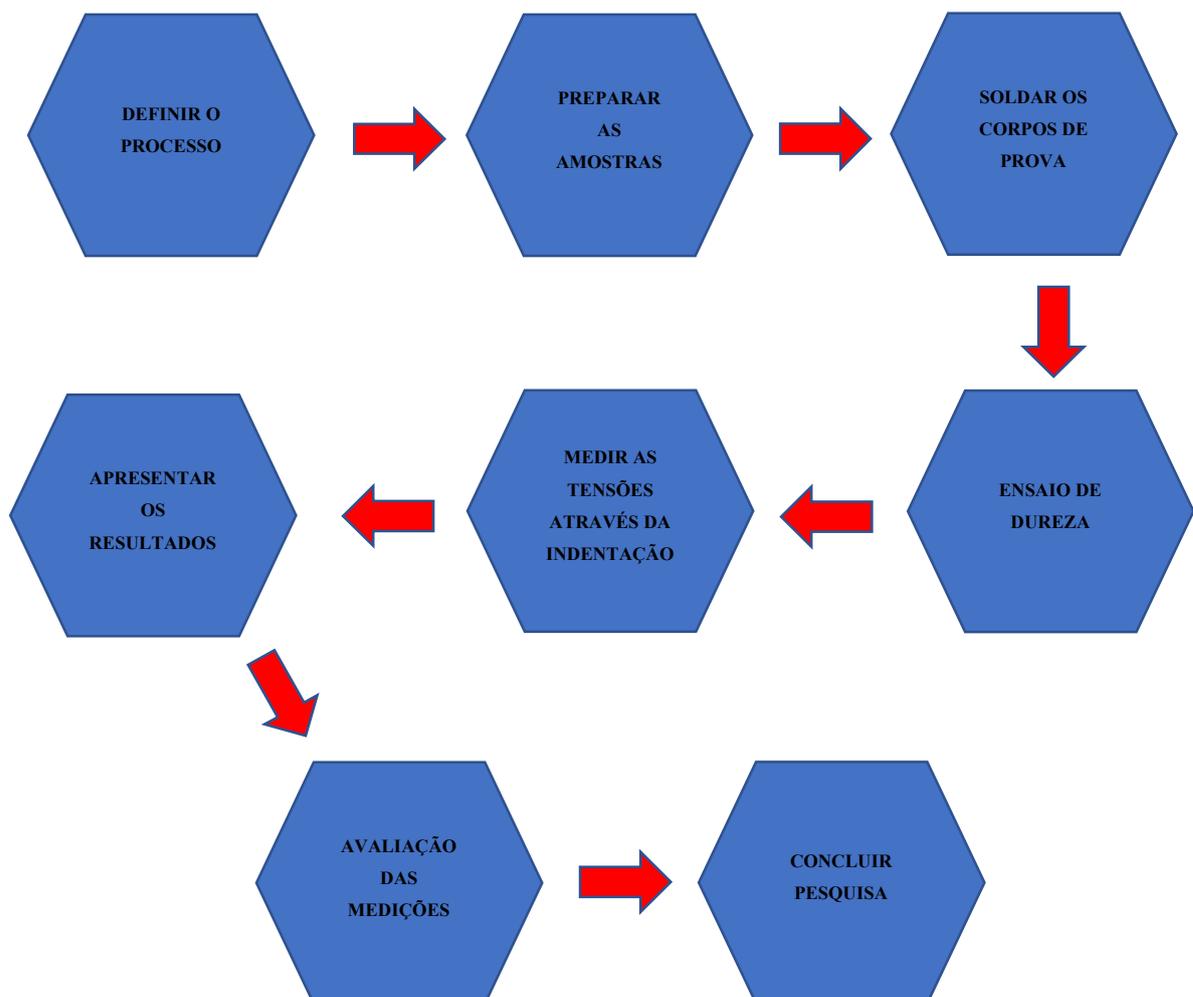


Figura 18: Fluxograma das etapas realizadas no trabalho

Fonte: Pesquisa direta (2019)

De acordo com a figura 18 mostrada anteriormente, a definição do processo se deu estabelecendo o que seria analisado, tema, tipo de material, bem como o processo de soldagem a ser utilizado. Após essa definição, as amostras foram preparadas com a realização dos cortes nas dimensões definidas e preparação dos ângulos de chanfro em V (15°, 30° e 45°) e, em seguida efetuada a soldagem e preparação após o processo. O próximo passo foi a realização do ensaio de dureza medindo através da indentação. Posteriormente as medidas foram avaliadas estatisticamente e os resultados apresentados, chegando finalmente à conclusão da pesquisa.

O material escolhido para a pesquisa foi o aço inoxidável AISI 310 (aço inoxidável austenítico) por apresentar boa estabilidade às temperaturas de solda e alta resistência à corrosão. É muito utilizado em indústrias químicas, esteiras para fornos, estufas, caldeiras, bombas, trocadores de calor, aquecedores de ar etc., além de ser resistente à oxidação até temperaturas de 1050 ou 1100 °C. O alto teor de Cr contribui para a resistência da camada passiva e o teor elevado de Ni reduz o diferencial de dilatação térmica entre a camada passiva e o metal base. A composição química do aço pode ser conferida na tabela 6.

Tabela 6: Composição química do aço inoxidável AISI 310

TIPO DE AÇO	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
AISI 310	0,25 máx.	2,00 máx.	1,50 máx.	0,045 máx.	0,03 máx.	24,00	19,00
						26,00	22,00

Fonte: Adaptado do site POLI (2011)

Inicialmente foi separada uma amostra de controle, que não foi chanfrada, nem soldada, mantendo suas propriedades mecânicas originais, para que seja possível a comparação das possíveis alterações causadas pelo processo de soldagem aplicado. Esta amostra separada é denominada blank e, suas dimensões são: 50 mm de largura, 50 mm de comprimento e 6 mm de espessura, sendo este mostrado na figura 19.

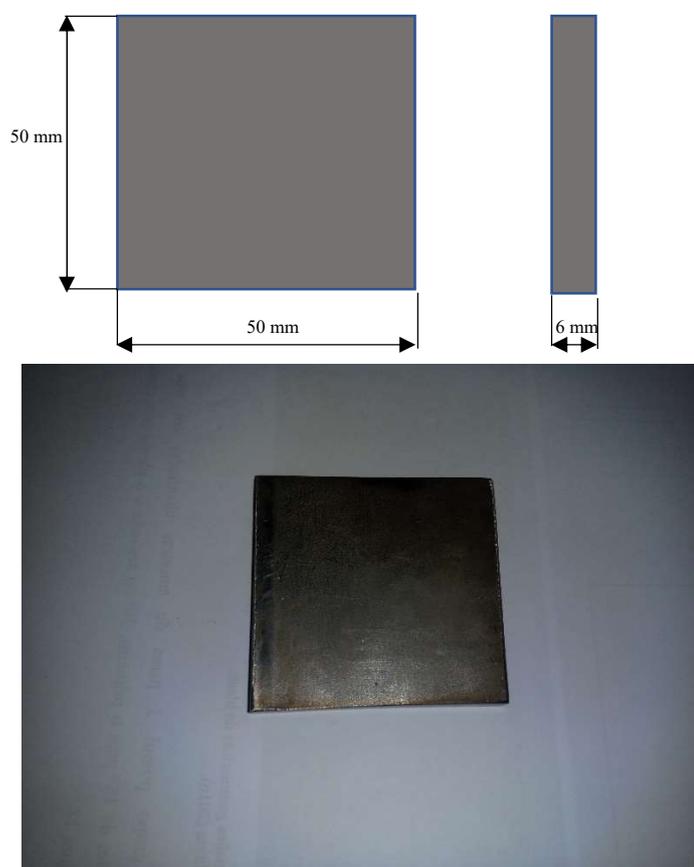


Figura 19: Foto do blank e suas dimensões geométricas

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Para a preparação dos CP's, foram utilizadas 18 amostras de aço inoxidável nas dimensões de 90 mm de largura, 90 mm de comprimento e 6 mm de espessura cada uma, e divididas em 3 grupos iguais e efetuados chanfros de 15°, 30° e 45°.

As amostras com chanfro foram previamente limpas para retirada de impurezas, separadas em 3 pares com angulações diferentes e submetidas ao processo de soldagem TIG. A figura 20 ilustra a amostra de aço inoxidável AISI 310 com suas dimensões iniciais antes que o processo de soldagem fosse efetuado.

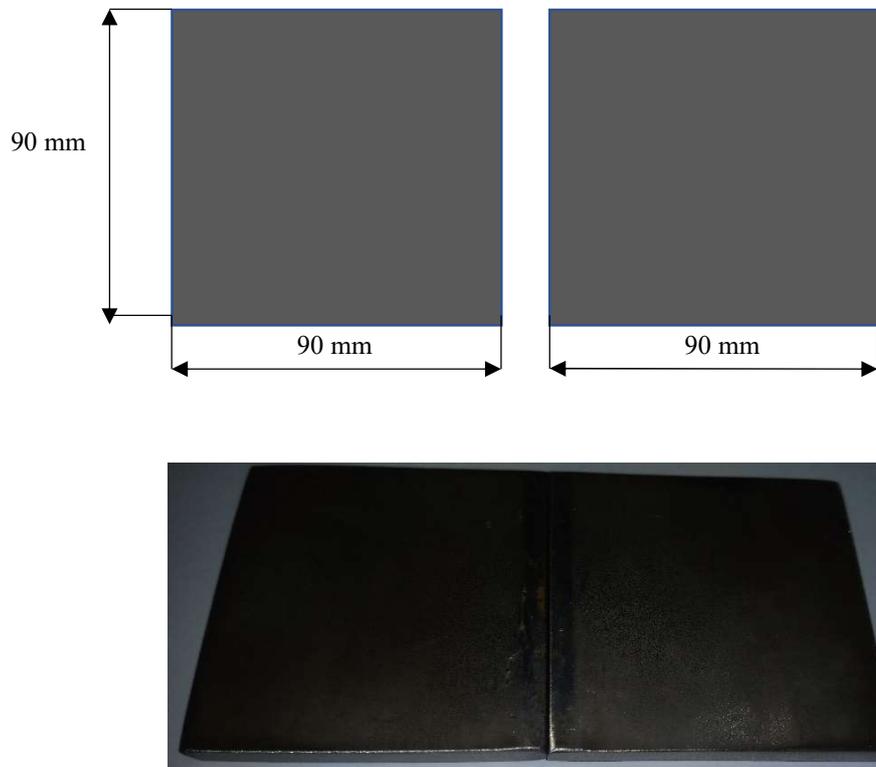


Figura 20: Amostra antes do processo de soldagem

Fonte: Pesquisa direta (2019)

O processo de soldagem utilizado foi o TIG, sendo o gás de proteção o Argônio e o eletrodo utilizado o AWS / ASME E 308L-17. Os parâmetros estabelecidos para o processo foram uma corrente de 225 A e uma tensão de 127 V. Os parâmetros de soldagem são responsáveis pela qualidade do cordão de solda; assim foi necessário conhecer essas variáveis para escolher o procedimento adequado. Estes parâmetros foram definidos em função do comprimento do arco, velocidade de soldagem, vazão do gás e diâmetro do eletrodo. O equipamento de soldagem utilizado pode ser verificado na figura 21.



Figura 21: Equipamento de soldagem TIG

Fonte: Pesquisa direta (2019)

As amostras foram soldadas em um único passe e, ao final do processo foram resfriadas à temperatura ambiente, dando origem a nove corpos de prova, para serem submetidas ao ensaio de dureza como mostra a tabela 7.

Tabela 7: Quantidade de corpos de prova e seus respectivos ângulos de chanfro

CHANFRO	15°	30°	45°
N° DE CP's	3	3	3

Fonte: Pesquisa direta (2019)

As amostras após o processo de soldagem em apenas um passe, que deram origem aos corpos de prova são ilustradas na figura 22.



Figura 22: Corpos de prova após processo de soldagem

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Terminada a fase de soldagem, os CP's foram lixados com disco flap (80 m/s) retirando o excesso de solda para que fosse realizadas medidas o mais próximas da ZTA, pois a proteção do penetrador exigia maior uniformidade das amostras para realização dos ensaios. Em seguida foram separados e enviados ao laboratório para a realização do ensaio de dureza. Primeiramente foi realizada medições no blank, por ser amostra de controle, seguindo as normas ASTM E18 de ensaios de dureza para materiais metálicos.

A figura 23 ilustra o disco utilizado para a retirada do excesso do cordão de solda existente em cada amostra.



Figura 23: Disco flap

Fonte: Pesquisa direta (2020)

As amostras após o processo de lixamento podem ser verificadas na figura 24 ilustrada a seguir.



Figura 24: Corpos de prova após processo de lixamento

Fonte: Pesquisa direta (2020)

O ensaio de dureza foi realizado através da máquina universal EMCO TEST e modelo M4C/025-G3, situada no laboratório da Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto.

O equipamento utilizado para medição da dureza no blank e nas amostras chanfradas já soldadas está ilustrado na figura 25.



Figura 25: Máquina universal EMCO TEST

Fonte: Pesquisa direta (2020)

Para a medição da dureza foi realizado o ensaio pelo processo Rockwell C (HRC), onde o próprio equipamento fez a conversão para Brinell. A pré-carga foi de $98,10 \text{ N/mm}^2$ e, a carga principal foi de 1471 N/mm^2 . O tempo da pré-carga foi de 1,5 segundos e, o tempo da carga principal foi de 3 segundos; sendo utilizada para puncionar um penetrador cônico de diamante (conicidade de 120°) sobre as peças em estudo. A dureza nas amostras foi convertida pelo próprio equipamento para Brinell (HB 30) através da realização de seis medidas em regiões distintas ao longo dos CP's.

A conversão dos resultados é realizada seguindo as normas da ASTM E140 (*Standart Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Sclerose Hardness, and Leeb Hardness*).

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Gil (2008) variável pode ser considerada como qualquer elemento que pode ser classificado em duas ou mais categorias. É considerada como uma classificação ou medida, onde há variação da quantidade, apresentando ou contendo valores, propriedade, aspectos ou fatores, sendo identificado em um objeto de estudo e que seja passível de verificação.

Segundo Marconi e Lakatos (2003), variável pode ser considerado como um termo que se utiliza para definir uma quantidade que varia um conceito operacional onde pode ser mensurável, sendo estas variáveis consideradas como dependentes ou independentes.

Para Gil (2008), indicadores são elementos concretos que indicam valores de forma prática, sendo que somente a partir da medição desses indicadores é possível conhecer o valor da variável, exigindo grande cuidado, pois, vários indicadores podem ser usados para uma mesma variável.

A tabela 8 mostra as principais variáveis e indicadores que foram levadas em consideração para a realização da pesquisa, levando em conta o objetivo do estudo, podendo ser classificados de modo qualitativo ou quantitativo.

Tabela 8: Variáveis e indicadores avaliados

VARIÁVEIS	INDICADORES
Aço Inoxidável	Composição Química
	Ângulos dos chanfros
	Espessura do material
Processo de Soldagem	Eletrodo utilizado
	Gás de Proteção
	Corrente de soldagem (I)
	Tensão de soldagem (V)
	Número de passes
Tensões Residuais	Dureza
	Tipo de tensão
ANOVA	Somatório quadrado dos tratamentos
	Somatório total
	Somatório do erro residual
	F calculado
	F tabelado
	Graus de liberdade

Fonte: Pesquisa direta (2019)

3.4 Instrumentos de Coleta de Dados

Para que se tenha um desenvolvimento satisfatório da pesquisa, os instrumentos de coletas são de suma importância, sendo esses obtidos através de:

- Coleta dos resultados fornecidos pelo equipamento (ensaio de dureza);
- Análise dos resultados através do sistema ANOVA.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos resultados obtidos no ensaio, os cálculos referentes à análise de variância serão realizados no *software Microsoft Excel*®, onde tem-se uma resolução simplificada dos cálculos desta análise estatística. Para melhor entendimento de qual ângulo exerce maior influência sobre as tensões residuais, será aplicado o teste de *Tukey*, realizado pelo *software Past 4.01*®. Após toda análise o *software Microsoft Excel*® será aplicado novamente para gerar gráficos para facilitar a compreensão dos resultados dos ensaios de dureza. Posteriormente o *software Microsoft Word*® será utilizado para relatar as discussões sobre os resultados alcançados.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Esse capítulo apresentou os métodos e suas variáveis, além das ferramentas e os equipamentos necessários para realização das etapas propostas para o cálculo das tensões, relativos aos objetivos, formas de abordagem e procedimentos técnicos utilizados. Foram apresentados também a forma de coleta, tratamento, tabulação e apresentação dos dados coletados.

No próximo capítulo são apresentadas as análises dos resultados gerados e discutidos para um melhor entendimento do trabalho realizado.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no ensaio de dureza aplicados nas amostras, bem como as análises estatísticas de variância e, posteriormente discussão dos resultados.

4.1 Ensaio de Dureza

Como descrito anteriormente o ensaio utilizado para a medição da dureza foi o processo Rockwell C (HRC), onde o próprio equipamento fez a conversão para Brinell (HB) seguindo a norma ASTM E140. A pré-carga foi de 98,10 N/mm² e, a carga principal foi de 1471 N/mm². O tempo da pré-carga foi de 1,5 segundos e, o tempo da carga principal foi de 3 segundos; sendo utilizada para puncionar um penetrador cônico de diamante (conicidade de 120°) sobre as peças em estudo. A dureza nas amostras foi convertida pelo próprio equipamento para Brinell (HB 30) através da realização de seis medidas em regiões distintas ao longo dos CP's.

A tabela 9 apresenta o resultado do ensaio de dureza referente ao blank, pois, serão os valores de referência do estudo, para que posteriormente possa ser verificada a variação da dureza nos CP's soldados.

Tabela 9: Valores de dureza do blank

BLANK	MEDIDAS DE DUREZA (HB)		
	159	156	155

Fonte: Pesquisa direta (2020)

A disposição das indentações podem ser verificadas na figura 26 ilustrada a seguir, onde as posições 3 e 4 são próximas à ZTA e, as posições 1,2,5 e 6 estão a uma distância aproximadamente de 4 mm umas das outras.

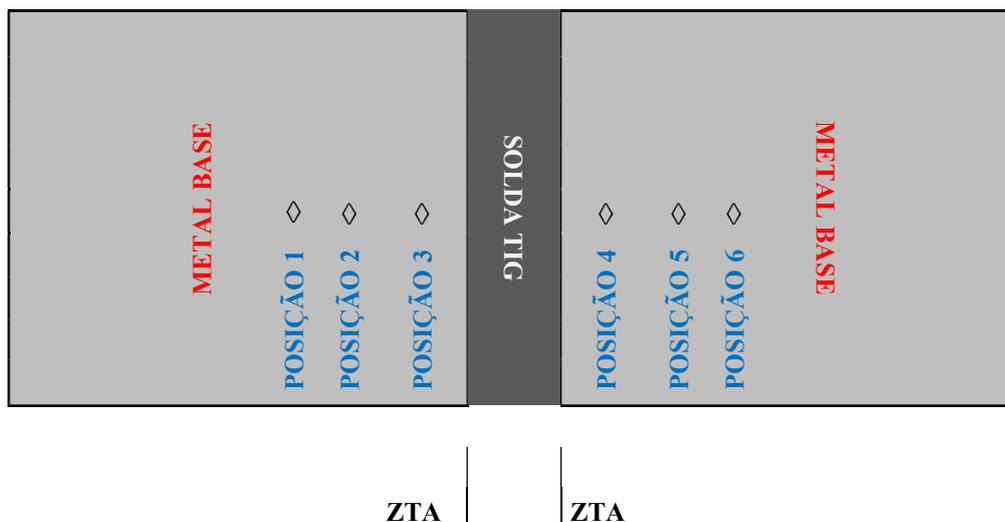


Figura 26: Pontos de medição das durezas

Fonte: Pesquisa direta (2020)

Já na tabela 10 são apresentados os resultados do ensaio de dureza nos diversos CP's com diferentes ângulos de chanfro (15° , 30° e 45°). Pode ser observado que a dureza sofre alterações quando se compara a alteração das posições das indentações para um mesmo ângulo. Agora, em relação à comparação das medições levando em consideração a diferença entre os ângulos de chanfro, sendo as indentações realizadas na mesma posição, pode ser verificado que existem variações de um ângulo para outro.

Tabela 10: Resultados obtidos através do ensaio de dureza

ÂNGULOS	AMOSTRA	MEDIDAS DE DUREZA (HB)					
		POSICÃO 1	POSICÃO 2	POSICÃO 3	POSICÃO 4	POSICÃO 5	POSICÃO 6
15°	1	155	157	164	159	156	156
	2	160	161	159	154	153	166
	3	158	162	167	159	156	159
30°	1	156	165	166	170	154	153
	2	162	158	165	162	156	161
	3	154	164	164	165	163	158
45°	1	167	169	185	173	167	165
	2	169	162	169	168	159	170
	3	163	161	163	166	161	163

Fonte: Pesquisa direta (2020)

Pela tabela vê-se algumas alterações nas durezas em relação aos valores de referência do blank, mas não é possível afirmar qual ângulo de chanfro oferece maior significância, sendo necessária uma avaliação mais aprofundada por outros métodos.

Os resultados coletados e descritos na tabela acima, foram reportados em um gráfico de colunas, onde é possível verificar a tendência da dureza em função da posição de indentação e ângulo de chanfro, oferecendo uma melhor interpretação gráfica, como mostrado na figura 27.

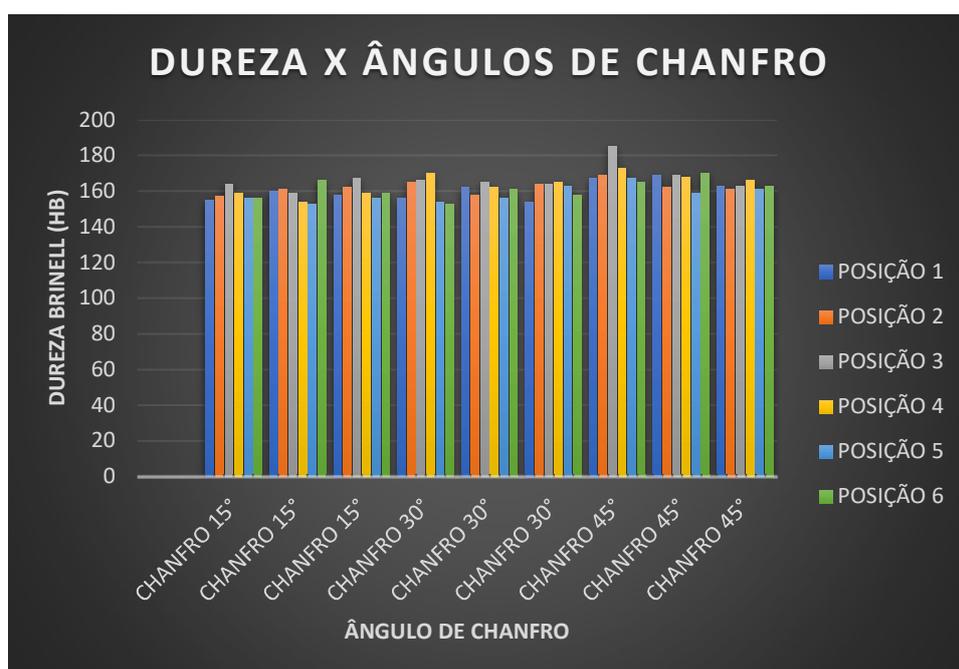


Figura 27: Dureza em função do ângulo de chanfro medidos em vários pontos das amostras
Fonte: Pesquisa direta (2020)

A variação das medições quando comparadas com o blank, indica a presença de tensões residuais. A existência de tensões residuais de tração ou de compressão é evidenciada pela menor ou maior intensidade que o penetrador adentra no corpo de prova.

Para uma melhor avaliação do estudo, as medidas são avaliadas separadamente de acordo com cada valor de ângulo de chanfro (15°, 30° e 45°), conforme ilustrado a seguir nas figuras 28, 29 e 30.

A figura 28 ilustra os resultados encontrados, bem como a distribuição das indentações nas amostras com ângulo de chanfro de 15°.

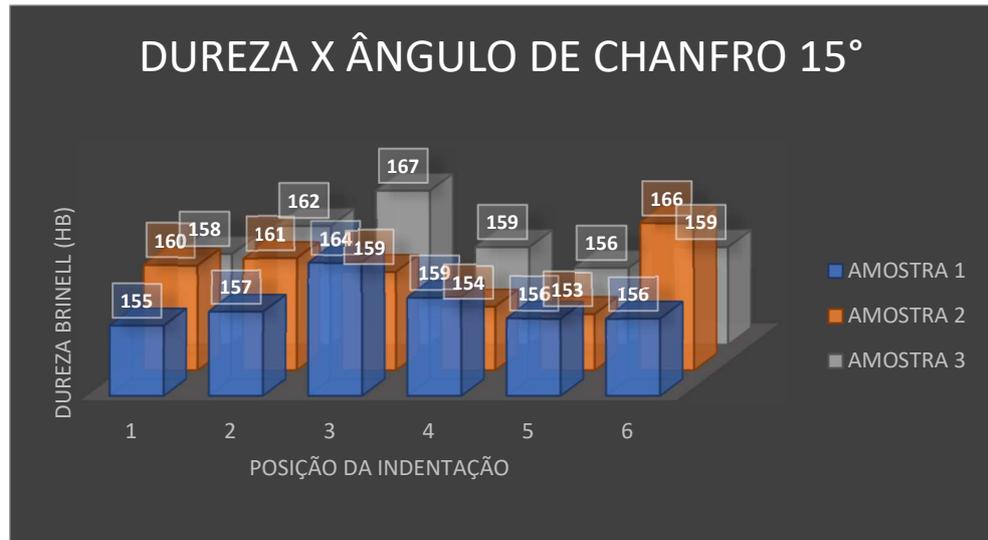


Figura 28: Gráfico referente às medidas de dureza nos CP's com ângulo 15° de chanfro

Fonte: Pesquisa direta (2020)

Como mostra a figura 28, ilustrada anteriormente, os resultados obtidos no ensaio apresentam pequenas variações em relação às medidas feitas no blank, entretanto, apresentam valores um pouco maiores, quando observados os resultados mais próximos da ZTA (posição 3 e posição 4).

A seguir, a figura 29 apresenta os resultados medidos e as localizações das indentações nos CP's com ângulo de chanfro de 30°.

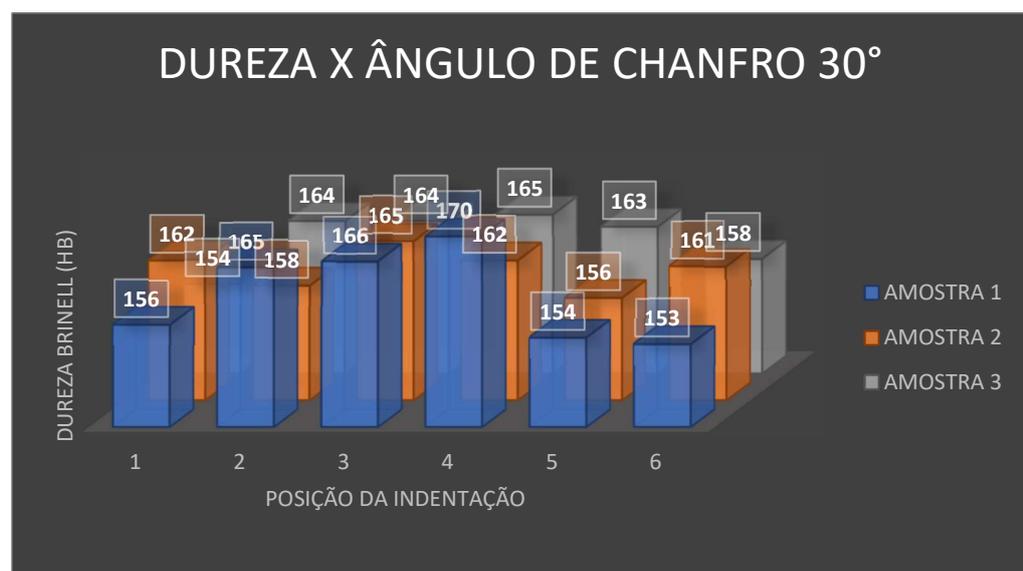


Figura 29: Gráfico referente às medidas de dureza nos CP's com ângulo 30° de chanfro

Fonte: Pesquisa direta (2020)

De acordo com a figura 29, pode-se avaliar um pequeno aumento nas medidas de dureza no ângulo de 30° relacionado com os valores de referência do blank, bem como maiores resultados de tensão no centro das amostras (posição 3 e posição 4).

Já na figura 30, são ilustrados os valores da medida da dureza de acordo com os locais, através da indentação no CP's com ângulo de chanfro de 45°.



Figura 30: Gráfico referente às medidas de dureza nos CP's com ângulo 45° de chanfro

Fonte: Pesquisa direta (2020)

Os resultados obtidos no ensaio de dureza para os corpos de prova com ângulo de chanfro de 45°, são demonstrados na figura 30. Nesse gráfico, pode ser verificado maiores valores da dureza em relação às medidas de referência do blank e também, se comparadas com os CP's de 15° e 30° de chanfro. Assim como os resultados avaliados anteriormente, nota-se valores de tensões maiores próximo à ZTA (posição 3 e posição 4).

4.2 Análise de Variância

A análise de variância permitirá avaliar as informações sobre as médias das distribuições das medidas efetuadas, verificando se existe diferença significativa entre as médias e, se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. É um teste de hipóteses onde será

verificada se há igualdade entre as médias ou, se há diferenças em pelo menos uma delas, trabalhando com um padrão de significância de 0,05 (5%).

Os resultados obtidos através do ensaio de dureza foram verificados pelo processo estatístico da ANOVA com o auxílio do *software* Microsoft Excel®, na qual é estabelecida uma relação entre os ângulos utilizados. Os resultados da análise de variância são apresentados na tabela 11.

Tabela 11: Resultados da análise de variância

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Ângulos	580,7777778	2	290,3888889	12,53878	4,7E-05	3,204317
Amostras	28,7777778	2	14,3888889	0,621302	0,541789	3,204317
Interações	191,7777778	4	47,9444444	2,070206	0,100543	2,578739
Resíduos	1042,166667	45	23,15925926			
Total	1843,5	53				

Fonte: Pesquisa direta (2020)

SQ: Somatório quadrado

gl: Graus de liberdade

MQ: Média do somatório quadrado

F: Valor de F calculado

valor-P: significância

F crítico: Valor de F tabelado para 95% de significância

Pela tabela 11 podemos verificar o seguinte:

Fonte de variação: onde se avalia os resultados entre os grupos e/ou dentro dos grupos (ângulos, amostras, interações → ângulos X amostras, resíduos → variação entre todas as amostras e todos os grupos).

Somatório dos quadrados (SQ): razão entre a média do quadrado de cada medição pela média de todo grupo elevada ao quadrado.

Grau de liberdade (gl): considerado como o número de determinações independentes (dimensão da amostra) menos o número de parâmetros estatísticos a serem avaliados na população. O grau de liberdade pode ser descrito como $k - 1$ e $n - k$ (onde, k → número de grupos e n → número de observações).

Quadrado médio (MQ): é a razão entre a soma dos quadrados e o grau de liberdade.

Variância (F): a estatística F é considerada como a razão entre a variação entre médias da amostra e a variação dentro das amostras.

Probabilidade estatística (valor-P): valores usados para determinar se os resultados das pesquisas estão dentro do intervalo normal de valores para os eventos que estão sendo observados. É calculado automaticamente pelo programa usado.

Distribuição de Fischer – Snedecor (F crítico): valor encontrado em uma tabela de distribuição para fins de comparação com o fator F calculado.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se a interferência no surgimento de tensões residuais causada pelos ângulos de chanfro, pois o mesmo pode ser identificado pelo valor de F calculado ser maior que o tabelado para 95% de significância ou, pelo valor P sendo muito menor que a significância estabelecida de 0,05. Para as demais possibilidades, não foram verificadas nenhuma alteração que evidenciasse a formação de tensões residuais.

4.3 Teste Tukey

Como o ângulo de chanfro tem grande influência sobre a variação de dureza nas amostras, tem-se a necessidade de avaliar qual dos três ângulos estudados influencia mais no aparecimento de tensão residual. Para esta avaliação houve a necessidade de aplicar um teste complementar. O teste de *Tukey* faz uso da comparação de médias através do *software Past 4.01*®.

A figura 31 ilustra o resultado obtido no teste de *Tukey* levando em consideração 95% de confiança. A partir desse resultado verifica-se que as médias correspondentes a cada ângulo têm diferenças significativas. Pode-se interpretar que, estatisticamente, os valores obtidos para o ângulo de chanfro de 45°, sofreram maiores influências nas tensões residuais que os ângulos de 15° e 30°.

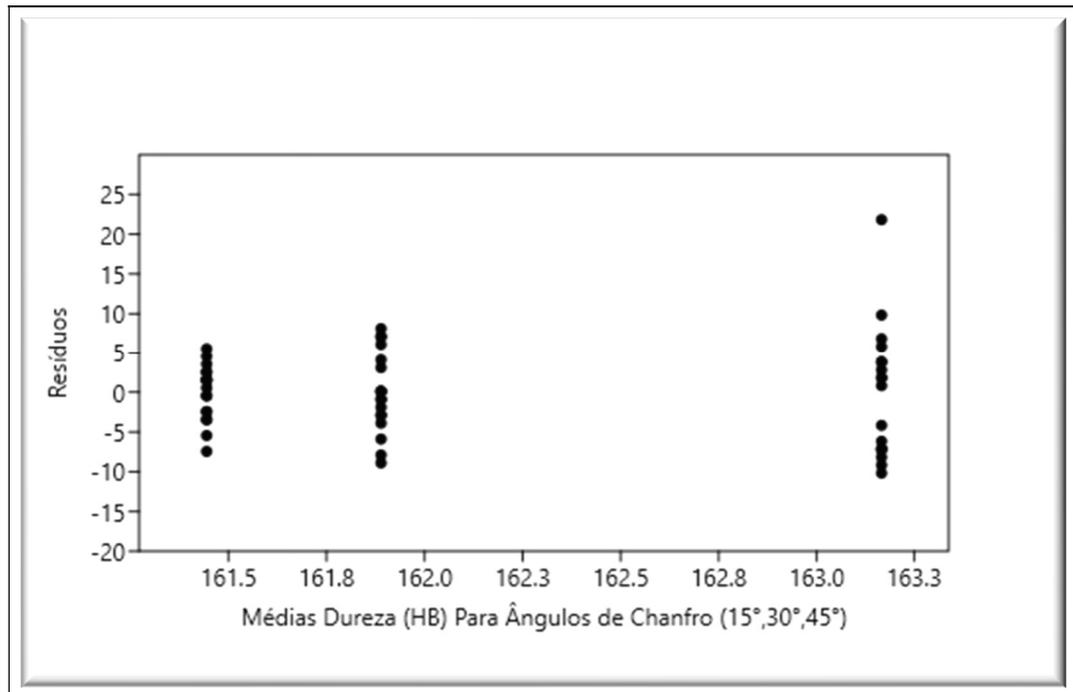


Figura 31: Resultado do Teste *Tukey*

Fonte: Pesquisa direta (2020)

Foi realizada a média amostral entre cada grupo, levando em consideração a média do quadrado dos resíduos e o número de repetições. Nesse caso foi comparado grupo a grupo (entre 15° e 30°, entre 15° e 45°, entre 30° e 45°, entre amostras 1 e 2, entre amostras 1 e 3, entre amostras 2 e 3), encontrando uma diferença mínima significativa (dms).

De posse desse resultado pode ser verificado na figura 31, maiores distâncias entre as comparações dos ângulos de chanfro de 45°, ou seja, as diferenças estão mais longe do zero, mostrando assim a maior influência para induzir tensões residuais provenientes do processo de soldagem TIG.

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos no ensaio de dureza, sendo analisados através de um método estatístico de variância e sendo comparados todas as médias para verificação de quais fatores tem mais influência para o aparecimento das tensões residuais.

As conclusões da pesquisa e recomendações para trabalhos futuros serão discutidas no capítulo a seguir.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusão

Com o término desse trabalho conclui-se que os objetivos propostos foram alcançados com sucesso no intuito de analisar a maior possibilidade de indução de tensões residuais no material estudado, ou seja, verificar como a variação do ângulo de chanfro 15°, 30° e 45° no aço inoxidável AISI 310 pode contribuir para induzir as tensões residuais provenientes do processo de soldagem TIG.

De acordo com a literatura foi possível reunir e compreender informações importantes sobre o processo de soldagem a ser utilizado na pesquisa, as tensões envolvidas e os métodos utilizados para análise dos resultados.

Ao efetuar a soldagem foi necessário ajustar os parâmetros de acordo com a espessura do aço inoxidável, composição química, comprimento do arco a ser formado, velocidade de soldagem, vazão do gás de proteção da poça de fusão e diâmetro do eletrodo, para que fosse realizado um cordão de solda de alta qualidade.

Além disso foi realizada a análise estatística usando o *software Microsoft Excel* onde, através do sistema ANOVA, foi possível detectar que o ângulo de chanfro apresenta maior significância em relação ao aparecimento de tensões residuais. Em seguida fez uso do *software Past 4.0* para realização do teste Tukey, a fim de verificar qual ângulo estudado influenciava mais para o aparecimento de tensões residuais.

Levando em conta a metodologia aplicada na pesquisa, pode-se verificar um crescimento médio na dureza em todas as amostras avaliadas no estudo, depois de transcorrido o processo de soldagem TIG, sendo que, entre as posições das indentações, as diferenças entre as medidas são mínimas.

Conclui-se, no entanto, que apesar das amostras com chanfro de 15° e 30° apresentarem pequeno aumento na dureza após o processo de soldagem TIG, os corpos de prova com chanfro de 45° demonstram um aumento relativo na dureza em comparação com os resultados dos ângulos anteriores. Isso se dá devido estas últimas sofrerem maior deposição de material e, provavelmente um maior aporte térmico, influenciando diretamente na indução de tensões residuais.

5.2 Recomendações

De posse dos resultados obtidos e tendo como base a metodologia aplicada, deixa-se como sugestões para trabalhos futuros:

1. Verificar se a diferença entre os ângulos de chanfro interfere na metalografia do material analisado;
2. Avaliar se a espessura do material influencia na indução de tensões residuais, levando em conta a diferença entre os ângulos de chanfro;
3. Analisar se o material sofre influência significativa, considerando os diferentes ângulos de chanfro, quando submetido à tratamento térmico;
4. Quantificar analiticamente as tensões residuais aplicando os resultados obtidos no ensaio de dureza.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BALDIM, Adriano Cássio et al. Influência da Energia de Soldagem do Processo RSW sobre as Propriedades Magnéticas e Tensões Residuais no Aço AISI 444. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, n. 1, p. 43-51, 2018.

BALIEIRO, Júlio César de C. **Introdução à Estatística**. USP, 2008.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz; HORIZONTE, Belo. **Processo de soldagem TIG-GTAW**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

COLOSIMO, Enrico A. **Princípios de Bioestatística – Análise de Variância**. UFMG: Departamento de Estatística, 2011.

COPPOLA, Giuseppe. **Análise da influência da variação de ângulo de chanfro na indução de tensões residuais em processo de soldagem MIG/MAG**, 2016. Dissertação de Graduação. Universidade Federal de Ouro Preto.

CORREIA, Anderson Luís Garcia. **Soldagem TIG – Processo, Consumíveis, Técnicas e Parâmetros, Defeitos e Causas**, 2017. IFSC. Santa Catarina.

DE BRUM PIANA, Clause Fátima; DE ALMEIDA MACHADO, Amauri; SELAU, Lisiane Priscila Roldão. **Estatística Básica**. Pelotas, 2009.

ESAB Brasil. **Apostila de Metalurgia da Soldagem**. 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.

FELIZARDO, Ivanilza. **Apostila Tecnologia da Soldagem**. CEFET Minas Gerais: Departamento de Engenharia Mecânica. 2016.

GANDRA, Carmos Antônio. **Curso de Soldagem Industrial**. Escritório Piloto dos Alunos da UFOP. 1996

GERHARDT, T.E.; SILVEIRA, D.T.. **Métodos de Pesquisa**. Editora da UFRGS, 2008.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed. São Paulo, Editora Atlas. 2008.

GIL, A.C.. **Como elaborar projetos de pesquisa – 4º edição**. São Paulo: Atlas, 2002

LEAL, Samuel Domingos. **Estudo de tensões residuais em juntas soldadas utilizando o método dos elementos finitos**. 2015.

- LOPES, Luís Felipe Dias. **Apostila Estatística**. Universidade Federal de Santa Maria, 2003.
- MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica** – 5^o edição. São Paulo: Atlas, 2003.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 2011.
- MARTIM, Hélio Cardoso et al. **Avaliação de campos magnéticos emitidos pelos processos eletrodo revestido e TIG**. 2016.
- MEDEIROS, Vítor Silva et al. **Determinação dos parâmetros de soldagem mais adequados para união de tubos de parede fina pelo processo de eletrodo revestido**. 2018.
- MENEZES, André Regis; SILVA, Eládio Edpo Bonfim; JUNIOR, Elvis Carlos Pesconi. **Modelagem e construção de um vaso de pressão**. 2017. Dissertação de Graduação. Centro Universitário Tiradentes.
- MISHCHENKO, Andrii; SCOTTI, Américo. **Tensões Residuais em Soldagem a Arco: Uma Visão Holística**. Soldagem & Inspeção, v. 23, n. 1, p. 93-112, 2018.
- MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: UFMG– Universidade Federal de Minas Gerais, v. 26, 2011.
- MODENESI, Paulo J. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. Belo Horizonte, 2008.
- MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte, 2000.
- MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.
- MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.
- NERIS, Manoel Messias. **Soldagem**. Centro de Educação Tecnológica Paula Souza. São Paulo. 2012.
- OLIVEIRA, George Luiz Gomes de; HÉLIO, C. M.; JESUALDO, P. F. **Avaliação das tensões residuais em tubos de pequeno diâmetro soldados pelo processo TIG orbital**. Soldagem & Inspeção, v. 14, n. 2, 2009.

PÓ, Marcos Vinícius. **Testes de Variância e Análise de Variância (ANOVA) – Introdução à Inferência Estatística**, 2019.

RODACOSKI, Marcos Roberto et al. **Medição de tensões residuais com holografia eletrônica**. 1997.

SARTORI, Diego. **Análise das distorções resultantes do processo de soldagem MAG em chapas finas de HARDOX 450**. 2017.

SENAI. **Noções Básicas de Processos de Soldagem e Corte**. Espírito Santo. 1996.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Ester Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação – 3º edição**. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SIMEI. **Soldagem – GTAW – Soldagem TIG**, 2012

SOARES, Ana Cristina Cosme. **Avaliação dos efeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pela técnica do furo cego**. Rio de Janeiro, 2003.

SOUSA, Diogo Antônio de. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João Del-Rei.

SOUZA, Adriano Mendonça. **Análise de Variância ANOVA**. 2019. Departamento de Estatística – PPGEMQ / PPGEP – UFSM.

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

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1992.

< <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/imagens-artigos/Processos/tig/tig2.jpg> >
Acessado em 23/10/2019

< https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/images/processo_mma.jpg > Acessado em 23/10/2019

< https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm >
Acessado em 06/09/2019

< https://www.sumig.com/_uploads/Noticias/posts-mig-mag-1.png > Acessado em 23/10/2019

<<http://sites.poli.usp.br/geologiaemetalurgia/Revistas/Edi%C3%A7%C3%A3o%2011/artigo11.17.pdf>> Acessado em 15/11/2019

<[http://w3.ufsm.br/adriano/aulas/anova/T\[12\].anova.pdf](http://w3.ufsm.br/adriano/aulas/anova/T[12].anova.pdf)> Acessado em 31/10/2019

<<http://www.scielo.br/img/revistas/si/v23n1//0104-9224-si-23-1-93-gf01.jpg>> Acessado em 02/11/2019

<https://aventa.com.br/sites/default/files/novidade/mig-vs-tig-welding_0.png> Acessado em 23/10/2019

<<https://blogbarragas.files.wordpress.com/2016/05/proceca7o-de-solda-tig-corte.jpg?w=616>> Acessado em 24/10/2019

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3260534/mod_resource/content/1/T%C3%B3pico_13.pdf> Acessado em 31/10/2019

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcRbLMA1wce-Tp9YwTTc0Dy1Ysr0GPmv_MsWubX_NOYs2KQasmfr> Acessado em 24/10/2019

<<https://i.pinimg.com/originals/9b/30/79/9b30792eff4c8289c69e7faffbfa5ffc.jpg>> Acessado em 23/10/2019

<<https://image.slidesharecdn.com/soldagemcomeletoedorevestido-finalizado-120509142545-phppapp02/95/soldagem-com-eletoedorevestido-12-728.jpg?cb=1336573718>> Acessado em 23/10/2019

<<https://slideplayer.com.br/slide/10302933/33/images/10/Dureza+Brinell+%28HB%29+e..jpg>> Acessado em 01/11/2019

<https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm> Acessado em 23/10/2019

<https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm> Acessado em 23/10/2019

<<https://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos-livros-senai/212-ensaio-mecanico-dureza>> Acessado em 01/11/2019

<https://www.researchgate.net/profile/Dheiver_Santos/publication/330468106/figure/fig4/AS:716366151684100@1547806408506/Figura-23-Tensoes-Residuais-em-Soldagem.jpg> Acessado em 29/10/2019

<https://www.sumig.com/_uploads/Noticias/posts-mig-mag-2.png> Acessado em 23/10/2019