



UFOP

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Bernardo Cesar Erler Mozzer

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE DUREZA E TENSÃO
RESIDUAL DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG/MAG EM UM AÇO ABNT 1020 COM
VARIAÇÃO DO TIPO DE CHANFRO**

OURO PRETO - MG
2021

BERNARDO CESAR ERLER MOZZER
bernardoerler1@gmail.com

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE DUREZA E TENSÃO
RESIDUAL DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG/MAG EM UM AÇO ABNT 1020 COM
VARIAÇÃO DO TIPO DE CHANFRO**

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: Sávio Sade Tayer, Msc.

OURO PRETO - MG
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M939e Mozzer, Bernardo Cesar Erler .

Estudo da correlação entre dureza e tensão residual de juntas soldadas pelo processo de soldagem MIG/MAG em um aço abnt 1020 com variação do tipo de chanfro. [manuscrito] / Bernardo Cesar Erler Mozzer. - 2021.

98 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Savio Sade Tayer.

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

1. Soldagem. 2. Soldagem - MIG/MAG. 3. Tensão Residual - Soldagem. 4. Código-fonte (ciência da computação) - Indentação. I. Tayer, Savio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bernardo Cesar Erler Mozzer

Estudo da correlação entre dureza e tensão residual de juntas soldadas pelo processo de soldagem MIG/MAG em um aço ABNT 1020 com variação do tipo de chanfro

Monografia apresentada ao Curso de engenharia mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de graduação

Aprovada em 20 de abril de 2021.

Membros da banca

Prof. Msc. Sávio Sade Tayer - Orientador(a) UFOP

Prof. Dsc. Diego Antônio de Souza - UFOP

Prof. Dsc Washington Luís Vieira - UFOP

Sávio Sade Tayer, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/04/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Sávio Sade Tayer, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/04/2021, às 14:24, 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 **0164700** e o código CRC **99E2A222**.

Dedico essa etapa vencida à Deus,
meus pais e aos grandes amigos que
fiz durante toda a caminhada.

AGRADECIMENTOS

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

Aos professores do curso de engenharia mecânica pela colaboração para o aprimoramento do trabalho.

A meus pais pelo incentivo.

RESUMO

A soldagem é amplamente aplicada em construções navais, estruturas civis, tubulações e diversos outros setores, além de ser essencial para serviços como: manutenção e reparo. Devido à simplicidade e o fator econômico de sua aplicação, ela é considerada o mais importante método de união de metais na atualidade. As tensões residuais podem atuar benéficamente ou prejudicialmente no desempenho dos componentes mecânicos. Porém, elas representam uma das principais causas para o surgimento de falhas prematuras e distorções na peça. Uma das formas de se determinar as tensões residuais é através do ensaio de dureza, pois ela está relacionada à dificuldade de deformação plástica localizada. No presente trabalho foi analisado se a alteração da geometria do chanfro têm influência sobre as tensões residuais de uma junta feita pelo processo de soldagem MIG/MAG. Utilizou-se na amostra o aço ABNT 1020 como metal base e foi alterado apenas o tipo de chanfro, entre X e V. A propriedade mecânica medida foi a dureza Vickers devido principalmente à ductilidade do aço empregado. A comparação entre as amostras foi realizada através de um estudo pelo método estatístico ANOVA e teste de Tukey, a partir do software Minitab. Os resultados indicaram que o processo de soldagem utilizando o chanfro em V produziu uma junta homogênea, enquanto a soldagem com o chanfro em X produziu uma junta não homogênea. Concluiu-se que o Chanfro em V, nas condições estabelecidas no presente trabalho, se mostrou mais favorável ao surgimento de tensões residuais provenientes do processo de soldagem MIG/MAG.

Palavras-chave: Processos de soldagem, MIG/MAG, tensão residual, indentação.

ABSTRACT

Welding is widely applied in shipbuilding, civil structures, piping and several other sectors, in addition to being essential for services such as: maintenance and repair. Due to the simplicity and the economic factor of its application, it is considered the most important method of joining metals today. Residual stresses can act beneficially or adversely on the performance of mechanical components. However, they represent one of the main causes for the appearance of premature flaws and distortions in the part. One of the ways to determine residual stresses is through the hardness test, as it is related to the difficulty of localized plastic deformation. In the present work, it was analyzed whether the alteration of the chamfer geometry has an influence on the residual stresses of a joint made by the MIG / MAG welding process. ABNT 1020 steel was used in the sample as the base metal and only the type of chamfer was changed, between X and V. The mechanical property measured was Vickers hardness, mainly due to the ductility of the steel used. Finally, the comparison between the samples was carried out through a study using the ANOVA statistical method and Tukey's test, using the Minitab software. The results indicated that the welding process using the V chamfer produced a homogeneous joint, while welding with the X chamfer produced a non-homogeneous joint. It was concluded that the V Chamfer, under the conditions established in the study, was more favorable to the emergence of residual stresses arising from the MIG / MAG welding process.

Keywords: Welding processes, MIG/MAG, residual stress, indentation.

LISTA DE SIGLAS

SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*

GMAW - *Gas Metal Arc Welding*

MIG - *Metal Inert Gas*

MAG - *Metal Active Gas*

ZTA – Zonta Termicamente Afetada

ZF – Zona Fundida

AWS – American Welding Society

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução do número de processos de soldagem ao passar dos anos. .	14
Figura 2: Regiões de uma junta de processos de soldagem.....	15
Figura 3: Desenho esquemático do processo de soldagem por eletrodo revestido.	22
Figura 4: Classificação de eletrodos para aços carbono, conforme AWS.....	24
Figura 5: Esquema básico de interligação do equipamento.....	26
Figura 6: Esquema do processo de soldagem por MIG/MAG.	28
Figura 7: ciclo térmico em um ponto da ZTA de uma junta soldada com 3 passes.	31
Figura 8: Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG.	31
Figura 9: Sequência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto circuito (processo MIG/MAG).....	34
Figura 10: Esquema do modo de transferência metálica globular na soldagem MIG/MAG.....	35
Figura 11: Esquema do modo de transferência metálica globular repelida na soldagem MIG/MAG.....	36
Figura 12: Esquema da variação do volume e número de gotas transferidas por unidade de tempo em função da corrente.	37
Figura 13: Transferência goticular no modo projetado.	38
Figura 14: Formas de transferência goticular: (a) com alongamento (<i>Streaming Spray</i>) (b) rotacional (“Rotational Spray”).....	38
Figura 15: Diagrama de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência de metal	40
Figura 16: Tipos de distribuição de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada, (c) alinhada.....	41
Figura 17: Esquema da descontinuidade mordedura no processo de soldagem.	42

Figura 18: Preparação de chanfro recomendado com valores de θ entre 45 e 60°.	44
.....	
Figura 19: Tipos mais comuns de juntas.	44
Figura 20: Tipos de chanfro mais utilizados.....	45
Figura 21: Chanfros em V frequentemente utilizados em procedimentos manuais.	
.....	46
Figura 22: Tensões residuais em um material temperado.	49
Figura 23: Relação entre tensões residuais e temperaturas durante o processo de soldagem. (a) Região da solda. (b) Variação da temperatura ao longo do cordão de solda. (c) Distribuição de tensões ao longo do cordão de solda.	50
Figura 24: Relação esquemática entre distorções e tensões residuais.	51
Figura 25: Curva do ensaio de dureza Vickers (Força x Profundidade).....	53
Figura 26: Teoria da Anova para experimentos.....	55
Figura 27: Resultado de ANOVA pelo Minitab.	57
Figura 28: Geometria em 2D das amostras após o primeiro corte.....	61
Figura 29: Geometria em 2D das amostras com chanfro em X após o segundo corte.	61
Figura 30: Geometria em 2D das amostras com chanfro em V após o segundo corte.	61
Figura 31: Vista superior das amostras com chanfro em V.	62
Figura 32: vista superior das amostras com chanfro em X.	63
Figura 33: Serra de fita horizontal MRC-340 HVF.....	63
Figura 34: Esmerilhadeira Einhell BT-AG.....	64
Figura 35: POWERTEC LINCOLN ELETRIC 305C.....	64
Figura 36: Amostras antes da realização do processo de soldagem.	68
Figura 37 – Total de materiais a serem trabalhados.	68
Figura 38: (a) chanfro em X ou duplo V (b) chanfro em V.....	69

Figura 39: Comparação estatística de Tukey entre as médias das medidas de dureza. (a) amostras com chanfro em V (b) amostras com chanfro em X 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis e indicadores.....	65
Tabela 2 – Especificações do processo de soldagem realizado.	69
Tabela 3 – Resultados de Dureza das amostras e do blank.	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gráfico de Efeitos Principais com valores de dureza da amostra com chanfro em V.	72
Gráfico 2: Gráfico de Efeitos Principais com valores de dureza da amostra com chanfro em X	72
Gráfico 3: Gráfico de Boxplot das amostras com chanfro em V e o <i>blank</i>	74
Gráfico 4: Gráfico de Boxplot das amostras com chanfro em X e o <i>blank</i>	74
Gráfico 5: gráfico de Intervalo de Confiança entre Médias das durezas da amostras com chanfro em X e o <i>blank</i>	76
Gráfico 6: gráfico de Intervalo de Confiança entre Médias das durezas da amostras com chanfro em V e o <i>blank</i>	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 7: gráfico de Intervalo de Confiança entre Médias das durezas da amostras com chanfro em X e V.....	77

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Formulação do Problema	14
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	19
1.3.1	Geral	19
1.3.2	Específicos	19
1.4	Estrutura do Trabalho	19
2	Revisão bibliográfica.....	21
2.1	Processos de Soldagem	21
2.1.1	Processo de soldagem com Eletrodo Revestido.....	21
2.1.2	Processo MIG MAG	28
2.2	Descontinuidades	40
2.2.1	Porosidade	40
2.2.2	Falta de Fusão/Falta de penetração	41
2.2.3	Mordedura	42
2.2.4	Trinca	43
2.2.5	Inclusão de escória	43
2.3	Juntas e Chanfro.....	44
2.4	Microestrutura dos Aços de Baixo teor de Carbono no processo de soldagem	46
2.5	Tensões residuais	48
2.5.1	Tensões residuais na soldagem por arco elétrico	49
2.6	Ensaio de Dureza	51
2.6.1	Dureza Brinell	51
2.6.2	Dureza Rockwell	52
2.6.3	Dureza Vickers	52
2.6.4	Medição da tensão residual por meio do ensaio de dureza	53
2.7	Testes estatístico	54
2.7.1	Análise de variância	54

2.7.2	Teste de Tukey	56
2.7.3	Análise de Variância no Minitab	56
3	metodologia.....	58
3.1	Classificação do trabalho	58
3.2	Materiais e Métodos.....	60
3.2.1	Roteiro.....	60
3.2.2	Equipamentos.....	63
3.3	Variáveis e indicadores	65
3.4	Instrumentos de coleta e tabulação de dados	65
3.5	Considerações finais do capítulo	66
4	Resultados e discussão	67
4.1.1	Material	67
4.1.2	Cortes	67
4.1.3	Processo de Soldagem MIG/MAG	69
4.1.4	Ensaio de dureza	70
4.2	Análise Estatística.....	73
4.2.1	Análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey	73
4.3	Discussão de resultados	78
5	Conclusões	81
5.1	Recomendações	81
	Referência bibliográfica.....	83
	Anexos	88
	Anexo A: Teste de igualdade de variâncias.....	89
	Anexo B: ANOVA e Tukey para amostra com chanfro em X	89
	Anexo C: ANOVA e Tukey para amostra com chanfro em V	91
	Anexo D – Chanfro em X e chanfro em V	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A soldagem era considerada um processo secundário devido a uma falta de controle de parâmetros. Porém, com o início dos experimentos de Sir Humphrey Davy (1801-1806) sobre o arco elétrico, do descobrimento do acetileno por Edmund Davy e do desenvolvimento de fontes produtoras de energia, a soldagem por fusão foi viabilizada. Juntamente, houve uma expansão da fabricação e emprego do aço, que foi o estágio inicial para o aprofundamento nos processos de união para a fabricação de equipamentos e estruturas, consoante ao gráfico exposto pela Figura 1 (MODENESI & MARQUES, 2000).

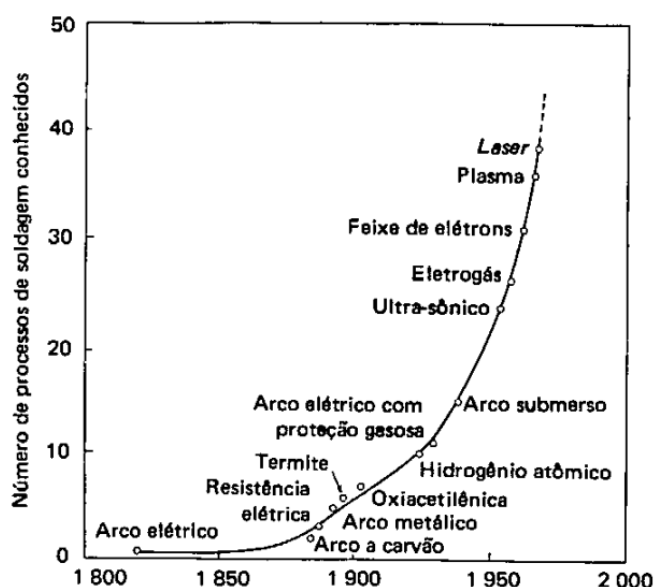


Figura 1: Evolução do número de processos de soldagem ao passar dos anos.
Fonte: Okumura *et al* (1992)

Os meios de união dos metais são separados basicamente em dois setores: Os baseados em forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles em que tal força é microscópica. Nesta, em que se enquadra a soldadura, a distância entre os átomos e moléculas da união é suficiente pequena para se obter ligações químicas primárias (metálica, covalente ou iônica) ou secundárias (ligação de Van der Waals) (MODENESI & MARQUES, 2000).

O processo de soldagem tem a função de unir materiais permanentemente utilizando uma fonte de calor, sendo que a solda é a denominação do fruto de tal processo. Existem vários processos diferentes, de forma que deve escolher o que atende melhor à situação presente (WEINER *et al*, 1992).

Dentre os vários processos de soldagem, destaca-se o MIG/MAG e o eletrodo revestido, devido às suas altas frequências de utilização. O processo de soldagem por eletrodo revestido pode ser descrito como um arame protegido por um revestimento fundente, que é gasto devido ao arco formado entre ele e o metal. Tal arco possibilita a fusão dos componentes, agindo como uma fonte de calor. Esses arames são adequados ao metal base e podem possuir diferentes elementos, diâmetros e tipos de revestimentos (OKUMURA *et al*,1992).

O conceito básico de GMAW foi inicialmente apresentado em 1920 aproximadamente, na sequência, a partir de 1948 se tornou comercialmente viável (ESAB, 2005). Segundo a Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem-FBTS (2009), a soldagem MIG/MAG ou GMAW aplica o arco elétrico com eletrodo consumível sob proteção gasosa. Tal eletrodo é o arame maciço e a proteção gasosa um gás inerte para o MIG e gás ativo para o MAG, ou então uma mistura de gases.

A região onde existe a união das peças pela operação de soldagem é denominada junta e pode ser considerada defeituosa ao apresentar discontinuidades ou propriedades que não estão de acordo com as exigências, precisando assim, de reparos ou substituição. Considera-se descontinuidade como uma falta de homogeneidade de propriedades físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material (MODENESI, 2001).

Como ilustra a Figura 2, uma junta soldada pode ser separada em três diferentes regiões: Zona Fundida (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e metal base. A localidade em que o processo de soldagem não impôs diferença em suas propriedades mecânicas é rotulado como metal base. A Zona Fundida é a extensão em que ocorre ambas fusões do metal base e metal de adição. Por último, a Zona Termicamente Afetada indica a região entre as duas, adjacentes à uma alta temperatura, porém sem ocorrer a fusão do material (GABRIEL, 2016).

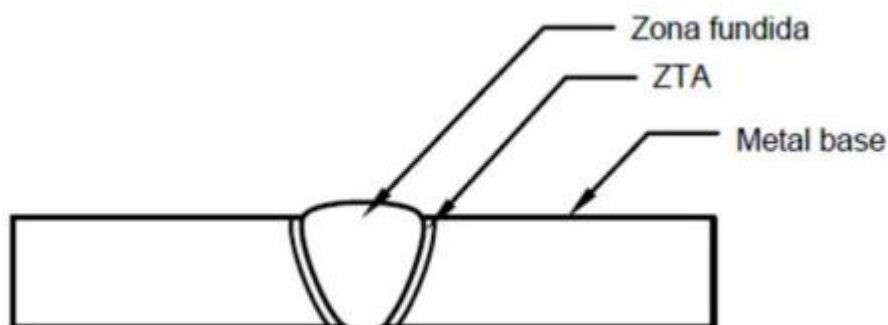


Figura 2: Regiões de uma junta de processos de soldagem.

Fonte: Gabriel (2016)

Garantir a qualidade de uma junta de uma solda é essencial, pois assegura as propriedades mecânicas mínimas para que esta seja utilizada com segurança. Durante o processo por exemplo, se houver uma grande variação na temperatura, de forma que a expansão térmica é restringida, campos de tensões são gerados. Tais deformações resultantes são acompanhadas por plastificação localizada, de forma que as tensões residuais permanecem e as peças podem sofrer empenamento ou distorções como resultado (OKUMURA *et al*,1992; PINTO, 2010).

Por consequência dos processos de fabricação, as tensões residuais são acumuladas no componente. Elas podem ser definidas como tensões remanescentes na peça quando não há mais solicitações externas (COFIÑO, 2010).

Nesse contexto, sabe-se que tensões residuais trativas tem efeitos negativos nos materiais, pois diminuem sua vida a fadiga e resistência a corrosão sob tensão. Porém, tensões residuais compressivas são uma barreira para propagação de trincas, de maneira que as indústrias em geral vêm desenvolvendo técnicas para introduzir tensões compressivas nos componentes e minimizar as amplitudes de suas tensões residuais trativas, principalmente em juntas soldadas (MAIA, 2015).

Outra causa do possível aparecimento de tensões residuais inconvenientes à solda é devido ao aparecimento de transformações microestruturais não homogêneas que implicam alterações volumétricas. Como há altas temperaturas localizadas mais próximo ao centro, cada região se comporta de maneira diferente, com resfriamento desigual e portanto, possíveis diferentes microestruturas (MODENESI, 2008).

Uma das formas de se determinar as tensões residuais é através do ensaio de dureza. Essa propriedade mecânica, está relacionada à dificuldade de deformação plástica localizada, ou seja, é a resistência do material contra riscos e impressões. Ela é medida levando em consideração o tamanho do punção, que promove uma profundidade ao ser pressionada ao corpo de prova, que por sua vez, é relacionada a um número índice de dureza (SOUSA, 2012; CALLISTER, 2002; SUTERIO, 2005).

Entende-se que as tensões térmicas são geradas a partir da contração do material durante o resfriamento. Ainda, é possível imaginar que quanto maior o volume de metal aquecido, maior será essa contração do material. O volume total aquecido é dependente, em suma, dos parâmetros geométrico da junta soldada. Ele é composto pela soma do

volume de metal depositado no chanfro e fundido do metal base (ZF), mais o volume de metal base aquecido pela fonte de calor (ZTA). Apesar dessa variável ser fundamental para a geração de tensões térmicas, o volume em si é administrado por outros fatores, por exemplo: espessura da chapa, geometria e forma do chanfro, posição de soldagem, tipo da fonte de calor e etc (MISHCHENKO, 2018).

Portanto, esse trabalho irá analisar se a alteração da geometria do chanfro influenciará significativamente nas propriedades mecânicas das três regiões de uma junta feita pelo processo de soldagem MIG/MAG.

O ensaio experimental será realizado em corpos de prova do aço ABNT 1020 com chanfros em X ou V. Para o propósito de medir suas respectivas tensões residuais usar-se-á o método de indentação. Diante da problemática, segue a seguinte pergunta:

Como a variação do tipo de chanfro no processo de soldagem MIG/MAG implicará em alterações nas tensões residuais das juntas soldadas em um aço ABNT 1020?

1.2 Justificativa

A soldagem tem se mostrado o mais importante método para união permanente de metais, devido principalmente à sua simplicidade e economia. Além de ser aplicada em construções navais, estruturas civis, tubulações e diversos outros setores, tem-se mostrado essencial para serviços de reparo e manutenção. Apesar de não agir diretamente no objetivo principal de uma estrutura ou equipamento, ela afeta significativamente a segurança e custo da construção, tornando assim, o estudo da qualidade da solda fundamental (OKUMURA *et al*,1992).

Deve ser assegurado para cada ocasião, condições de proteção específicas capazes de evitar contaminação pelo ar atmosférico. Assim, a soldagem pode ser feita sob vácuo, com gás inerte, gás ativo, fluxo (escória) e sem proteção (WEINER *et al*, 1992). Portanto, é evidente que o conhecimento de diferentes resultados nos processos de soldagem são essenciais para o desenvolvimento de novas aplicações.

Os processos de soldagem semi-automáticos e/ou automáticos, por exemplo o MIG/MAG, são amplamente empregados na indústria automobilística devido principalmente à sua alta produtividade, que pode ser aprimorada a partir de estudos sobre os parâmetros de soldagem que serão aplicados em cada condição. Porém, existe uma

falta de dados precisos sobre a influência desses parâmetros na geração de tensões residuais nos processos de soldagem (MAIA, 2015).

As formas e dimensões dentro das tolerâncias indicadas pelo projeto são fundamentais para a fabricação de uma estrutura soldada. As juntas que não atenderem as exigências podem ser consideradas defeituosas, tendo assim, que ser corrigidas antes de sua utilização (MODENESI, 2001).

Portanto, a prevenção de deformações e descontinuidades em juntas soldadas é de fundamental importância e deve-se ao fato das tolerâncias dimensionais e geométricas estarem cada vez mais estreitas nas especificações dos projetos, o que motiva os especialistas em soldagem a desenvolverem cada vez mais processos estáveis com a finalidade de garantir uma solda de qualidade (COSTA *et al*, 2016).

Em geral, as tensões residuais podem atuar benéficamente ou prejudicialmente no desempenho dos componentes mecânicos. Porém, elas representam uma das principais causas para o surgimento de falhas prematuras e distorções na peça, o que compromete seu comportamento e até mesmo diminuem a vida útil do componente (MODENESI, 2008).

Em sequência, as tensões e deformações residuais implicam no comportamento das uniões soldadas de modo a haver possibilidade de fratura. Então, seu estudo é de extrema importância para a segurança de toda estrutura. Através do ensaio de dureza, é possível reconhecer a natureza das tensões residuais, ou seja, se são trativas ou compressivas (OKUMURA *et al*, 1992).

Assim, alterações de processo, por exemplo na geometria da junta, causam variações tanto no acúmulo de calor, quanto na taxa de resfriamento. Tais alterações podem apresentar diferentes transformações metalúrgicas na microestrutura, com distintas propriedades e desempenho mecânico (ZEEMANN e EMYGDIO, 2001).

Marino (2010) e Costa *et al* (2016) concordam que as indústrias sempre estão à procura de possíveis melhorias de processos a fim de garantir uma maior quantidade de seus produtos simultâneo com um menor tempo e custo de produção. Portanto, um chanfro bem definido é fundamental para certificar que as estruturas soldadas estejam adequadas, uma vez que vários materiais quando submetidos a soldagem tornam-se suscetíveis ao surgimento de deformações e trincas.

Nesse contexto, este trabalho irá comparar as tensões residuais do processo de soldagem MIG/MAG de duas chapas de aço ABNT 1020, com uma alteração no tipo de chanfro.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar se a variação do tipo de chanfro em X e em V irá interferir no surgimento de tensões residuais ao longo da junta, provenientes do processo de soldagem MIG/MAG.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico sobre atributos de processos de soldagem e assuntos adjacentes que complementam o objetivo proposto;
- Cortar as chapas de um aço ABNT 1020 conforme a geometria de chanfro;
- Aplicar a soldagem pelo processo MIG/MAG;
- Realizar um ensaio de indentação;
- Analisar e comparar os resultados do ensaio de dureza, conforme a variação do tipo de chanfro e distância do centro da junta.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho é dividido em 5 segmentos, sendo esses:

Inicialmente a introdução, que formula o problema à ser estudado. Nela está incluso informações básicas sobre o que será abordado ao longo do trabalho: processo de soldagem em geral, soldagem por Eletrodo Revestido, MIG/MAG, tensões residuais devido à variação térmica ao longo do processo e ensaio de dureza. Foi apresentado também a justificativa da importância de tal estudo e por final, os objetivos, que indicam o que será feito e analisado.

O segundo tópico será um levantamento de conceitos teóricos sobre processos de soldagem, incluindo uma revisão que explica os aspectos das tensões residuais e como é possível analisá-los utilizando ensaios de dureza.

O terceiro capítulo apresentará as metodologias de estudos adotados, com os respectivos materiais, métodos, indicadores, instrumentos de coleta e método de tabulação dos dados.

Por seguinte, na quarta etapa será apresentado os resultados dos ensaios de dureza, assim como sua análise relacionando-a à tensão residual proveniente do processo de soldagem.

E por último, será apontada a conclusão e recomendações, que apresenta as considerações finais do trabalho e recomendações para novos estudos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de Soldagem

Naturalmente, os processos que envolvem as fusões das partes a serem unidas, requerem energia suficiente para um aumento considerável de temperatura até possibilitar a mudança de estado físico e também manutenção do material em estado líquido, até que a união se materialize. As fontes caloríficas podem ser através de reações químicas (Ex.: combustão), fenômenos físicos em um gás (ex.: plasma ou arco voltaico) ou radiação (Ex.: Laser) (SILVA, 2005).

2.1.1 Processo de soldagem com Eletrodo Revestido

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), ou soldagem manual a arco elétrico, é o processo mais utilizado entre os inúmeros outros. A solda se realiza por um calor do arco elétrico entre a extremidade do eletrodo revestido e a peça trabalhada, que funde o metal, a alma do eletrodo e o revestimento de fluxo (O'BRIEN, 1991; JEFFUS, 1993).

O eletrodo é composto por um núcleo metálico, popularmente denominado como 'alma', que possui um comprimento entre 250mm à 500mm. Além do núcleo, existe uma camada de revestimento, que soma-se a um diâmetro entre 2mm e 8mm (MODENESI & MARQUES, 2000).

Forte e Vaz (2005) mostram que para a solda de aços carbono por eletrodo revestido há dois elementos principais. Primeiramente a alma metálica, composta normalmente de aço carbono com teores de fósforo e enxofre muito baixos para não ocorrer fragilização no metal da solda. Ela tem, principalmente, a função de conduzir corrente elétrica e fornecer metal de adição à junta. O outro elemento principal é o revestimento, que tem como principais funções: proteção do metal de solda, estabilização e direcionamento do arco elétrico, adição de elementos liga e controle de integridade ao metal de solda e etc (QUITES, 2002).

Durante a soldagem, o arco e a poça metálica são protegidos da atmosfera por uma cortina gasosa oriunda da queima do revestimento e a decomposição de seus constituintes. Simultaneamente, a escória líquida, de menor peso do que o metal base, protege a poça de fusão durante a solidificação. Após a soldagem é necessário a retirada desse líquido protetor, que é solidificado em forma de uma escória sólida (FILHO, 2005).

A Figura 3 mostra os componentes do eletrodo, o arco elétrico e o produto de solda, ou seja, a própria solda (metal de adição) e a escória, localizadas no sentido contrário à direção do processo de soldagem.

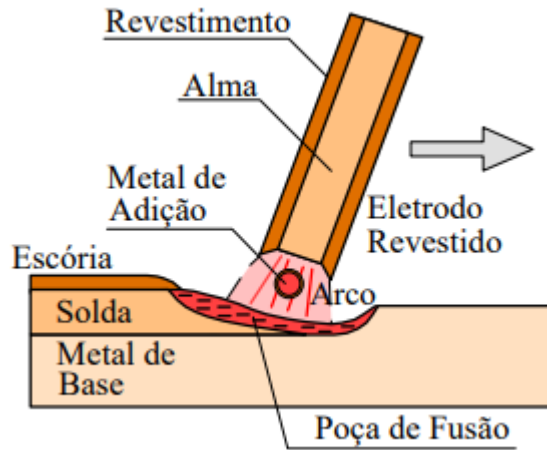


Figura 3: Desenho esquemático do processo de soldagem por eletrodo revestido.
Fonte: Modenesi & Marques (2000)

O desenho da Figura 3 também esquematiza o próprio processo de soldagem: que é realizado a partir do calor de um arco elétrico, mantido entre as extremidades do eletrodo metálico revestido e o metal base. O calor produzido pelo arco funde a alma, o revestimento e o metal base, assim ocorre a transferência de metal fundido através do arco para a poça de fusão, que é protegida pelos gases oriundos do consumo do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície e protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (CAVALCANTI, 2011).

Todas as características operacionais, aspectos do cordão e as propriedades da peça soldada são predominantemente controladas pela corrente de soldagem, ou seja, sua intensidade se transforma em uma variável primordial na taxa de deposição. Ela tem o função controladora mais importante da penetração da solda, largura e reforço do cordão. De maneira similar, ela controla diretamente a magnitude e dimensão de energia térmica disponível no arco elétrico (WAINER *et al*, 1992).

Pode-se operar por corrente contínua (CC) ou alternada (CA), dependendo do tipo de revestimento. No primeiro caso, a polaridade pode ser reversa ou direta. O uso de CC é comumente associado à melhor estabilidade do arco e qualidade de depósitos. Os motivos para usar a CA é a menor susceptibilidade ao sopro magnético e menor queda de tensão ao longo do cabo de ligação, sendo vantajoso onde a soldagem deve ocorrer à distância (WAINER *et al*, 1992).

2.1.1.1 Revestimentos

Conforme diz Filho (2005), os revestimentos podem ser classificados como ácidos, oxidantes, básicas, rútilicos e celulósicos. O tipo de eletrodo influencia consideravelmente nas propriedades do arco e os processos que ocorrem. SANTOS (1995, *apud* FILHO, 2005) caracteriza 3 tipos de revestimento:

- Rútilicos:

Fácil acendimento e manutenção do arco, com poucos respingos. São menos suscetíveis a impurezas presentes na chapa a ser soldada. Possui acabamento plano nos filetes e alto teor de rutila (TiO_2), de forma que a proteção é essencialmente por escória. A tensão superficial é um fator mais significativo do que para eletrodos óxidos.

- Celulósicos:

Alta proporção de celulose, sendo assim, a proteção gerada será de natureza gasosa principalmente. Alta penetração, alta tensão de arco, baixo volume de escória, acabamento de cordão ruim e com muitos respingos. Inadequado para soldas de alta resistência devido ao alto teor de hidrogênio no cordão de solda.

- Básicos:

Proteção mista (gases e escória), forte ação fluxante, bom aspecto superficial nos depósitos, absorvem humidade do ar. Escória de alta tensão superficial, facilitando o controle da poça de fusão. Possui difícil soldagem em corrente alternada.

Dentre os vários tipos de eletrodos, os básicos são os mais usados para soldagem de grande responsabilidade e em estruturas rígidas. Em vista que o metal depositado por esses eletrodos possuem excelentes características mecânicas e minimizam o risco de fissuração a frio e a quente (KOBAYASHI, 1987).

Finalizando de acordo com Wainer *et al* (1995), o revestimento do eletrodo ácido é formado por óxidos de ferro e de manganês e em silicatos. Sua escória tem uma boa destacabilidade, é abundante e possui caráter ácido. Evidentemente, ambos óxidos possuem certa tendência oxidante, logo a designação de eletrodos óxidos lhes é eventualmente atribuída. Ao comparar com outros revestimentos, a resistência a fissuração é considerada como uma das mais pobres, então não se recomenda a utilização desse tipo de eletrodo para soldagem de aços com teores de carbono acima de 0,25% e com enxofre acima de 0,05%.

A especificação AWS A5.1, da American Welding Society, foi desenvolvida a partir de um comitê constituído por membros que representam fabricantes de consumíveis, usuários da indústria de soldagem e membros de universidades e laboratórios (ESAB, 2005).

A classificação de eletrodos para aço carbono são feitas pelos fabricantes de consumíveis, seguindo a nomenclatura exposta pela Figura 2, com base nas propriedades físicas do metal de solda, no tipo de revestimento, posição de soldagem, e o tipo de corrente que pode ser utilizado (CA ou CC). Sua elaboração é feita a fim de fornecer informações sobre o eletrodo e o metal de solda depositado. A especificação da AWS para esse tipo de aço é feita conforme um conjunto de letras e números (Figura 4) (MODENESI & MARQUES, 2000; ESAB, 2005).

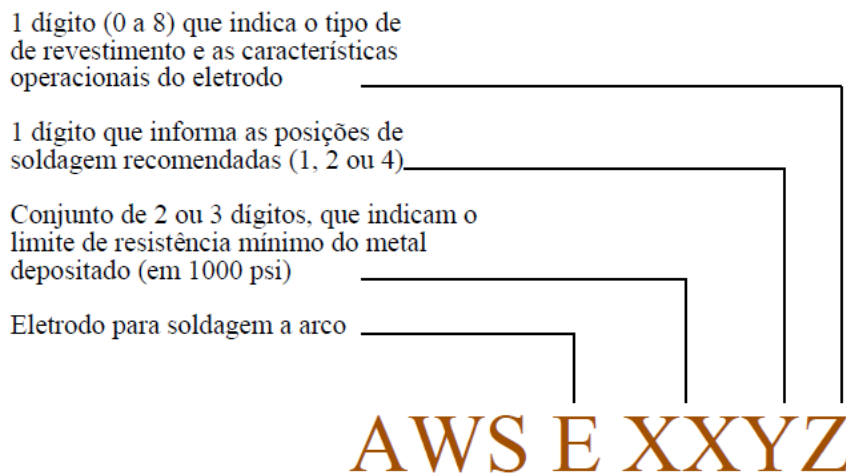


Figura 4: Classificação de eletrodos para aço carbono, conforme AWS.
Fonte: Modenesi & Marques (2000)

Farias (1985) cita e explica diferentes funções do revestimento durante a soldagem por eletrodo revestido:

- Isolante Elétrico:

Graças à sua má condutividade elétrica, o eletrodo é isolado. Assim, aberturas laterais de arco são evitadas.

- Isolante Térmico:

Por possuir alto comprimento e conduzir altas correntes, há intensa geração de calor devido ao efeito Joule. O revestimento contém este calor e diminui sua perda.

- Direcionamento do arco:

Devido à baixa condutividade térmica, o revestimento não se funde tão rapidamente como a alma. Por consequência pode ocorrer o “efeito canhão”. Uma cratera que se forma na extremidade do eletrodo e guia o material fundido para a poça de fusão. Este fenômeno estabiliza o arco e protege o metal fundido do ar ambiente.

- Proteção do metal fundido:

O revestimento fundido forma uma película de escória que encobre as gotas de metal em fusão e também a poça líquida, vedando o contato com o ar. Facilita a soldagem em diferentes posições por modificar as tensões superficiais do processo.

Em alguns casos, a proteção do metal fundido provém de uma cortina gasosa, por exemplo para eletrodos celulósicos. Estes revestimentos, durante sua fusão, dão início a uma liberação de grande quantidade de gases, que em alta temperatura sofrem expansão.

- Função ionizante:

Os gases provenientes da queima do revestimento são muito mais ionizáveis do que o ar. Logo, a abertura do arco e sua manutenção torna-se muito mais simples.

- Função metalúrgica:

No revestimento dos eletrodos, pode-se adicionar alguns elementos para se obter diversos resultados. Elementos desoxidantes são um deles, pois devido à dissociação do gás carbônico ou o vapor d'água (umidade do revestimento ou sua composição) há a presença de oxigênio no processo. Alguns revestimentos possuem componentes (manganês, óxidos de silício e etc.) que retiram inclusões e impurezas, como o enxofre e o fósforo.

Uma outra função metalúrgica é o tratamento térmico realizado pela escória solidificada acima do metal, que evita resfriamentos bruscos na superfície. O revestimento também pode conter elementos de liga, que quando fundidos permanecem no metal de solda, por exemplo o pó de ferro, utilizado para conseguir um maior rendimento de deposição e um melhor acabamento no cordão de solda (FARIAS, 1985).

2.1.1.2 Equipamentos

O equipamento básico para soldagem por eletrodo revestido se consiste em uma fonte de energia de característica estática de corrente constante, um alicate para a fixação dos eletrodos, cabos de interligação, materiais de segurança, equipamento para limpeza

da solda e do eletrodo revestido. A forma de interligar os componentes para o funcionamento está exposto na Figura 5 (WAINER *et al*, 1992).

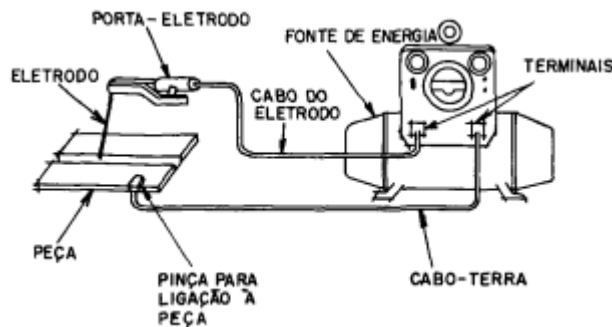


Figura 5: Esquema básico de interligação do equipamento.
Fonte: Wainer *et al* (1992)

O processo de soldagem por eletrodo revestido é manual. O soldador controla o comprimento da poça de fusão e do arco através do manuseio do eletrodo ao longo da junta. Quando ele é completamente consumido, ocorre uma interrupção da soldagem para a troca de eletrodo e remoção de escória da região onde for prosseguir (MODENESI & MARQUES, 2000).

2.1.1.3 Transferência metálica

Independente da polaridade ou tipo corrente, a transferência de metal se dará sempre do eletrodo ao material de base. A principal diferença é o fluxo do revestimento do eletrodo, que influi em mudanças no comportamento da transferência metálica e nas propriedades mecânicas da poça de fusão (FARIAS, 1985; NORISH, 1998).

Sendo assim, a maneira a se processar a transferência metálica do processo de soldagem por eletrodo revestido influi diretamente na qualidade da junta de solda (OKUMURA *et al*, 1992).

Pokhodnya *et al* (1990) expôs os modos mais comuns de transferência metálica encontrados para o processo de soldagem por eletrodo revestido: grandes gotas, de explosões e de pequenas gotas.

Típicas de revestimentos ácidos ou orgânicos, transferências metálicas por explosão formam intensos respingos. As gotas fundidas na ponta do eletrodo ao atingir certo diâmetro sucumbem devido a força gravitacional e atingem a poça de fusão. As transferências metálicas por gotas podem estar ou não associadas a curto-circuito, sendo que, neste caso a gota atinge a poça de fusão por voo livre (POKHODNYA *et al* 1990).

Para fim de análise, pode-se empregar técnicas de visualização diretas e indiretas, exemplos são (VAZ, 2014):

- Diretas: Fotografia, Filmagem em alta velocidade, deposição em chapas de metal, deposição com dois eletrodos e deposição contra eletrodos de carbonos.
- Indiretas: Variação de corrente e tensão durante a soldagem, armazenadas para montagem de oscilogramas.

Para realizar um estudo detalhado, Vaz (2014) recomenda a utilização de mais de uma dessas técnicas, pois cada uma possui suas vantagens e limitações.

2.1.1.4 Aspectos Econômicos

Um dos maiores fatores limitantes da faixa útil de corrente de soldagem é o diâmetro do eletrodo, pois ele influencia a densidade de corrente elétrica por unidade de área de seção transversal da alma. Em contrapartida, o comprimento do eletrodo não influencia as características dos depósitos significativamente, sendo que sua principal interferência é no tempo limite de arco em aberto (WAINER *et al*, 1992).

Sendo assim, para um ponto de vista exclusivo de produtividade, o ideal é utilizar o maior diâmetro possível, a fim de maximizar a taxa de deposição. Sobretudo, o diâmetro do eletrodo é limitado por fatores como posição de soldagem, formato de chanfro, revestimento, uma vez que tais variáveis tem influência nas características do arco e limites de controle da peça fundida (WAINER *et al*, 1992)

Entretanto, durante o processo de soldagem, busca-se características no cordão solda adequadas ao propósito a que se destina, por exemplo resistência a tração, resiliência e etc. Porém, a fim de otimizar essas propriedades, é essencial que os eletrodos tenham características operacionais e econômicas compatíveis (KOBAYASHI, 1987).

Para se analisar os aspectos econômicos do processo de soldagem com eletrodo deve-se pensar em consumo, produção e rendimento de deposição. Tais aspectos, dependem em geral, do tipo de eletrodo, parâmetros de soldagem e tipo de fonte de energia (FILHO, 2005).

Pode-se dizer que o consumo real do eletrodo é, de certa forma, maior do que a produção do material de adição ou taxa de deposição, existem perdas na transferência de massa, principalmente na formação de respingos Os fatores que mais intervém no

consumo do eletrodo são o seu diâmetro, composição química da alma, polaridade e a intensidade da corrente (FILHO, 2005).

Ao manipular a composição do revestimento, a fim de garantir o efeito “canhão”, é possível reduzir as perdas devido aos respingos. Outra solução é ajustar a indutância da fonte de soldagem, para que não haja um crescimento excessivo na temperatura da região do “pescoço”, 1995).

Uma propriedade muito importante à economia da soldagem e também às propriedades mecânicas de uma junta soldada é a destacabilidade da escória. Kobayashi (1987) supôs que cerca de 12 a 18% do tempo total gasto na soldagem de tubulações, na posição horizontal, sem rotação, é devido a operação de remoção de escória. Levando em consideração a degradação das propriedades mecânicas, pode-se citar a inclusão de escórias para o caso de passes múltiplos.

2.1.2 Processo MIG MAG

Também conhecido como GMAW – *Gas Metal Arc Welding*, o processo de soldagem por MIG/MAG consiste em um processo que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo e consumível com a peça. A proteção do arco de fusão é obtida através de um gás ou mistura de gases. Se esse for é inerte (Ar/He), o processo também é chamado MIG (*Metal Inert Gas*). Por outro lado, se o gás for ativo (CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂), o processo é chamado MAG (*Metal Active Gas*). A Figura 6 expõe o processo e uma parte da tocha de soldagem (MODENESI *et al*, 2009).

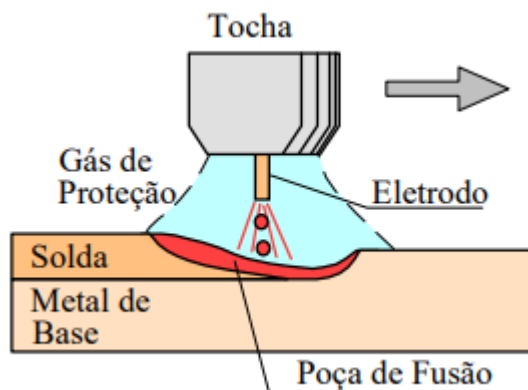


Figura 6: Esquema do processo de soldagem por MIG/MAG.
Fonte: Modenesi & Marques (2000)

Em suma, a diferença entre os dois processos (MIG e MAG) se resume ao tipo de gás utilizado, já que os outros componentes são os mesmos. Entretanto, a simples mudança no gás encadeia várias alterações no comportamento da soldagem (SANTOS, 2013).

Os gases nobres (processo MIG) são selecionados por motivos metalúrgicos, enquanto o CO₂ é preferido por possuir vantagens econômicas. Muitas das vezes impossibilitados tecnicamente por um lado e economicamente por outro, opta-se pela mistura dos dois tipos de gás, como por exemplo Argônio (inerte) com Oxigênio (ativo), Argônio com CO₂ e outros tipos (SANTOS, 2013).

Exemplos de gases para uma soldagem MIG conforme a FBTS (2009) são:

- Argônio
- Hélio
- Argônio + 1% de O₂
- Argônio + 3% de O₂

Exemplos de gases para uma soldagem MAG conforme a FBTS (2009) são:

- CO₂
- CO₂ + 5 a 10% de O₂
- Argônio + 15 a 30% de CO₂
- Argônio + 5 a 15% de O₂
- Argônio + 25 a 30% de N₂

Indica-se o processo MAG apenas para a soldagem de materiais ferrosos, enquanto o processo MIG pode ser utilizado em matérias ferrosos ou não ferrosos, por exemplo: Alumínio, Cobre, Magnésio, Níquel e suas ligas (SANTOS, 2013).

Os eletrodos devem ser determinados conforme os requisitos mecânicos e metalúrgicos de cada situação. As bitolas dos eletrodos utilizados nesse processo geralmente são disponíveis em diâmetros de 0,8 – 1,0 - 1,2 e 1,6mm, sendo que ainda existem outras bitolas especiais (MARINO, 2010).

Para dois eletrodos nus com diâmetros distintos, porém utilizados nas mesmas condições de soldagem, o de menor diâmetro dará maior taxa de deposição e penetração. Por outro lado, maiores diâmetros originam cordões mais longos. A espessura do metal-base também é um fator que influencia na escolha do diâmetro do eletrodo, de forma que

para metais bases mais espessos é necessário um eletrodo de maior diâmetro (WAINER *et al.*, 1992)

Esse tipo de processo de soldagem é regularmente usado de maneira semiautomática, porém pode ser mecanizado ou automatizado. Apresenta alta produtividade, pois trabalha com arame contínuo e altas densidades de corrente no eletrodo, ou seja, alta taxa de deposição de metal de adição. Por esses e diversos fatores é considerado o processo de soldagem mais aplicados em robótica industrial (MODENESI & MARQUES, 2000).

O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O processo quando funciona em Corrente Contínua (CC), normalmente o arame fica no pólo positivo, sendo conhecida como polaridade reversa. A polaridade direta é raramente utilizada devido à má transferência do arame fundido à peça. Costuma-se empregar correntes de soldagem entre 50A e 600A junto com tensões de soldagem de 15V a 32V. Um arco elétrico autocorrigido e estável é feito com o uso de uma fonte de tensão constante e velocidade de alimentação do arame também constante (ESAB, 2005).

Em concordância com FOUNDATION, THE JAMES F. LINCOLN ARC WELDING (2000), a corrente influencia na fusão e é regulada pelo diâmetro e alimentação do eletrodo. Caso for muito alta, ocorre uma fusão excessiva. Se muito baixa, fusão incompleta ou falta de penetração. Variar a tensão pode ocasionar uma alteração no comprimento e energia do arco, mas sua influência na taxa de fusão não é considerável (MARINO, 2010).

2.1.2.1 Multipasses

O ajuste de parâmetros se torna ainda mais complicado em soldagens multipasse, onde encontra-se diversos ciclos térmicos no enchimento das juntas, que conseqüentemente, pode influenciar em precipitações de fases intermetálicas mesmo com a aplicação de um baixo nível de energia de soldagem. O ciclo térmico representa a variação da temperatura pelo tempo em um determinado ponto da junta (BATISTA, 2012).

A Figura 7 representa o ciclo térmico de um ponto A na ZTA utilizando 3 passes de soldas. Percebe-se no gráfico que esses casos introduzem uma nova variável: temperatura de interpasso, tal qual é definida como a temperatura máxima entre os passes em um definida posição da solda. Por exemplo, na soldagem das ligas duplex e

superduplex é recomendado um limite de temperatura de interface de 200°C (BATISTA, 2012).

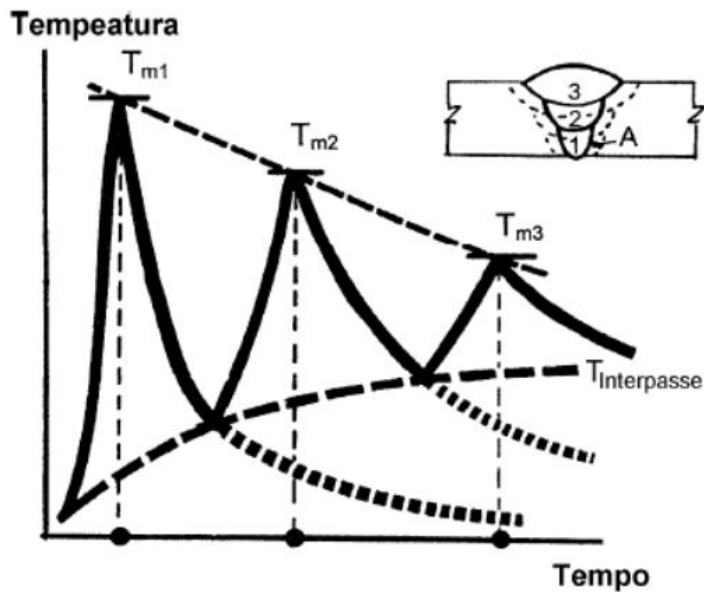


Figura 7: ciclo térmico em um ponto da ZTA de uma junta soldada com 3 passes.
Fonte: Batista (2012)

As condições de fluxo de calor durante a soldagem é o que determina os ciclos térmicos experimentados pelas regiões da junta soldada. Sendo assim, conforme as propriedades do material, a espessura e as condições de contorno (temperatura inicial, temperatura do ambiente e etc.) esses ciclos são capazes de acarretar transformações microestruturais que podem ser críticas às propriedades do material (BATISTA, 2012).

2.1.2.2 Equipamentos

Os equipamentos básicos são mostrados na Figura 8:

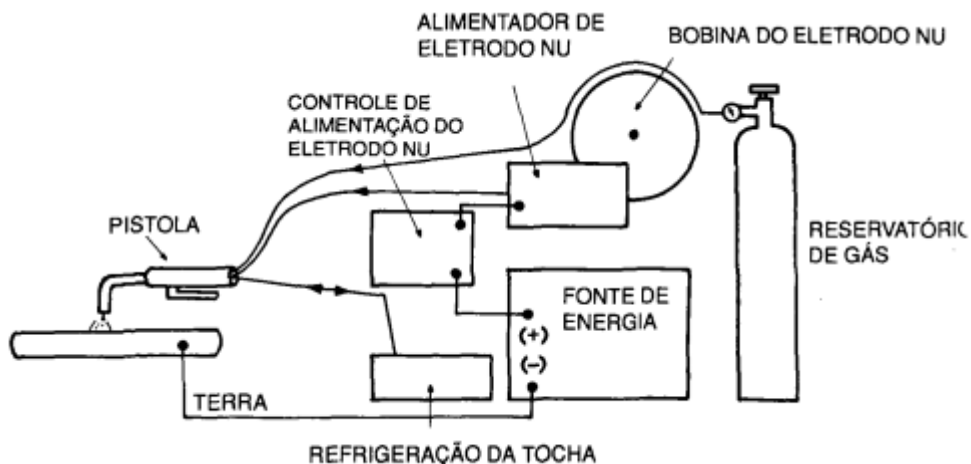


Figura 8: Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG.

Fonte: Weiner *et al* (1992)

A tocha, ou pistola, guia o arame e o gás de proteção para a região a ser soldada. Existem tipos diferentes de tocha para proporcionar o máximo desempenho de cada situação. Elas variam desde tochas para ciclos de trabalho pesado, com alta corrente, até tochas leves para menores correntes e soldagem fora de posição. Elas podem ser refrigeradas a água ou secas, de modo que a refrigeração ocorre pelo gás de proteção (ESAB,2005).

O motor de alimentação do arame tem a função de puxar o arame do carretel e alimentá-lo ao arco. O controle de soldagem mantém a velocidade do arame predeterminada de acordo com a aplicação. Ele também regula o início e o fim da alimentação do arame a partir do sinal obtido do gatilho da tocha. O gás de proteção, a água e a fonte de soldagem são normalmente enviados a tocha pela caixa de controle. Os fluxos de água de gás são coordenados pelo fluxo da corrente de soldagem. Ele também permite um pré e pós-fluxo de gás (ESAB,2005).

A polaridade reversa é a mais utilizada no processo de soldagem MIG/MAG. O pólo positivo é conectado à tocha, enquanto o negativo à peça. Já que a alimentação do arame é controlada pela caixa de controle, assim como a corrente, o ajuste básico feito pela fonte de soldagem é no comprimento do arco, através da tensão de soldagem (ESAB,2005).

2.1.2.3 Transferência metálica em soldagem com arco elétrico

Desde a introdução dos processos de soldagem com eletrodos consumíveis a transferência metálica é estudada. O estudo de tal fenômeno em soldagem a arco e especialmente os mecanismos que os governam foi ampliado nas décadas de 1950 e 1960, ao mesmo tempo que as técnicas de filmagem em alta velocidade, embora ainda limitadas, permitiram um melhor acompanhamento do arco elétrico do processo MIG/MAG (LIU & SIEWERT, 1989 e PANDEY *et al*, 1995, *apud* GROETELAARS, 2005).

O conhecimento dos fenômenos envolvidos na transferência metálica da solda é de extrema importância para o controle do processo de soldagem, de modo a obter cordões de solda sem defeitos, diminuir respingos, prever a penetração do passe, controlar a distorção da estrutura, etc. (WEINER *et al*, 1992).

Dependendo do resultado que se deseja obter, do tipo de material, da fonte disponível e do gás a ser utilizado, o processo de soldagem MIG-MAG possui algumas possíveis opções para tipo de transferência de metal de adição (MARINO, 2010).

Conforme Weiner *et al* (1992) pode-se classificar os tipos de transferência metálica principalmente em: globular, pulverização, curto circuito e arco pulsado.

- Na transferência globular, o metal é transferido por glóbulos com diâmetro aproximadamente igual a alma do eletrodo, não sendo adequado para soldagem fora de posição.
- Na transferência por pulverização, também conhecida como goticular ou *spray*, ela ocorre com gotas bem menores que o eletrodo nu, podendo ser aplicada na soldagem plana ou horizontal.
- A transferência por curto circuito pode ser utilizada em todas as posições, pois o meio de transferência metálica é o contato direto entre o eletrodo e a poça de fusão através de uma gota.
- A transferência por arco pulsado é similar à por pulverização, porém a gota é transferida por pulso. Pode ser soldadas em todas as posições.

2.1.2.3.1 Transferência metálica por curto circuito

Conforme Figueiredo (2000), a transferência por curto circuito ocorre quando a velocidade de alimentação é maior do que a taxa de fusão, até entrar em contato com a poça de fusão. Assim, a gota metálica formada na ponta do eletrodo é transferida para a poça de solda e no momento em que elas se encostam, um curto circuito é produzido, por consequência, ocorre um aumento na corrente e posterior atração da gota para a poça, devido à ação da tensão superficial. Por final o arco se reestabelece, o que abaixa a corrente abruptamente (Figura 9).

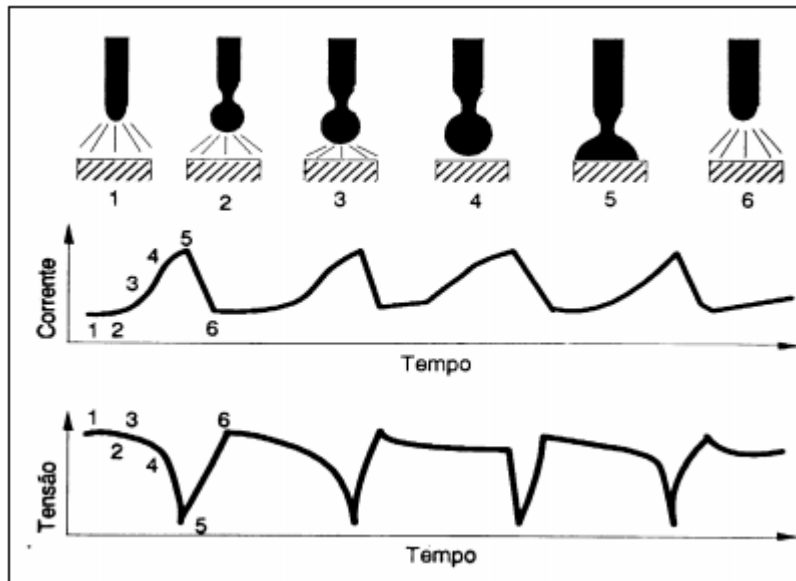


Figura 9: Sequência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto circuito (processo MIG/MAG).

Fonte: Figueiredo (2000)

Pelo ponto de vista industrial, utiliza-se amplamente a transferência metálica por curto circuito para soldagens de aços carbono. Esse tipo de transferência metálica produz uma poça de fusão relativamente pequena, com rápida solidificação e é indicada para soldagem de pequena espessura em qualquer posição (MENESES, 2013).

Devido aos baixos valores de corrente e tensão durante o arco aberto, em conjunto com o fato de que o arco tende a se apagar durante parte do processo, o calor transferido para a peça é reduzido. Portanto, pode ocorrer falta de fusão para a soldagem de chapas grossas. Outra grande dificuldade envolve a soldagem de alumínio, pois com a alta condutividade térmica, a poça resfria e solidifica rapidamente, o que dificulta a fusão do metal de base a aprisiona gases, originando porosidades (ROSA & ALMEIDA, 2014).

2.1.2.3.2 Transferência metálica globular & globular repelida

Nesse modo de transferência metálica, o eletrodo não entra em contato com a poça de fusão. Sendo assim, o arco é mantido de maneira contínua entre o arame de enchimento e a peça de tal forma que o metal é transferido através do arco em feitiço de gota (NORISH & RICHARDSON; 1988 e STENBACKA & PERSSON, 1989, *apud* GROETELAARS, 2005).

A transferência metálica globular envolve valores intermediários de corrente de soldagem e tensão e resulta em uma maior estabilidade de arco ao comparar a transferência metálica por curto circuito, por sua vez, a transferência é mais caótica e

imprevisível. A variação do diâmetro médio das gotas é inversamente proporcional à corrente, mas em geral é maior do que o diâmetro do eletrodo (ROSA & ALMEIDA, 2014).

Por seguinte, o destaque do metal de adição ocorre sobretudo devido a ação da gravidade, o que restringe a operação à posição plana (Figura 9). É típica da soldagem com proteção de CO₂, para tensões elevadas e uma extensa faixa de corrente. Por outro lado, para soldagem com mistura de gases rica em Ar, a transferência envolve corrente baixa e tensão elevada. Um alta quantidade de respingos e grande flutuação da corrente e tensão são comuns (MODENESI & MARQUES, 2000).

As Figuras 10 e 11 trazem um esquema dos tipos de transferência metálica globular e globular repelida, respectivamente, a partir de fotografias de alta velocidade.

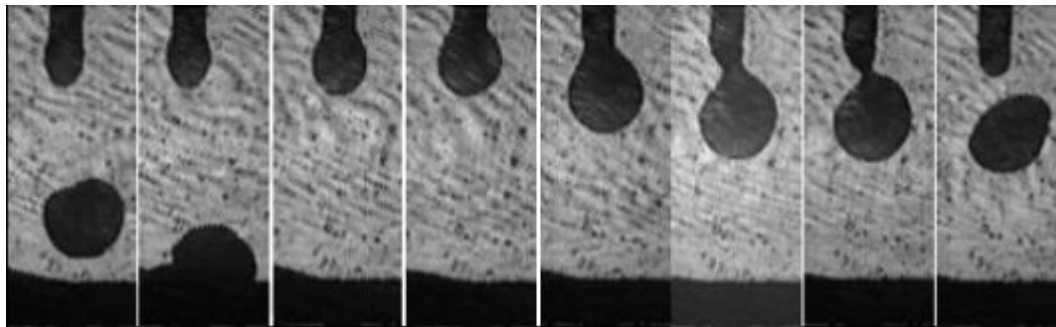


Figura 10: Esquema do modo de transferência metálica globular na soldagem MIG/MAG.
Fonte: Resende (2013)

A literatura cita algumas características das referidas transferência metálica: a transferência de pequeno aporte de calor à junta, que resulta em uma baixa penetração na solda; as velocidades de soldagem são muito baixas, mesmo quando empregados em materiais de pequena espessura; deposição de grandes gotas. Na soldagem de aços pode ocorrer o fenômeno, mostrado pela Figura 11, em que a gota formada na ponta do eletrodo é defletida para o lado ou ainda ser forçada para fora da peça. Denominada transferência globular repelida, observa-se tal fenômeno em soldagem MAG com eletrodo negativo e com eletrodos tubulares auto protegidos (MARQUES, 1991; NORISH e RICHARDSON, 1988; PÓVOA, 1988, BILONI *et al*, 1981 *apud* FIGUEIREDO 2000).

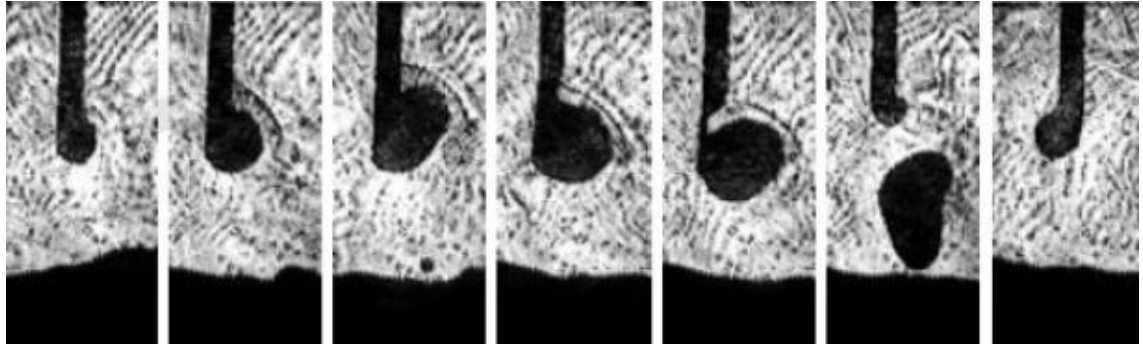


Figura 11: Esquema do modo de transferência metálica globular repelida na soldagem MIG/MAG.
Fonte: Resende (2013)

Essas situações ocorrem principalmente em soldagem MIG/MAG com polaridade positiva que utilizam gases de proteção que favorecem o aumento das forças de reação, que contrapõem as forças favoráveis à transferência, por exemplo o CO₂ puro e o He. Por fim, o destaque da gota ocorre a partir do momento que a força da gravidade supera a força de reação, para melhor entendimento, assim que a gota atingir um grande volume (ROSA & ALMEIDA, 2014).

2.1.2.3.3 Transferência metálica goticular

A transferência metálica goticular é mais conhecida pela sua denominação inglesa, “*spray*”. Como já foi abordado, a partir do aumento da corrente, o diâmetro médio das gotas de metal líquido transferido para a peça diminui. Em certo ponto, existe uma mudança no modo de transferência, que torna-a de globular para goticular. Essa faixa de corrente é conhecida como “corrente de transição” e é apresentada pela Figura 12 (MARQUES, 2001; NORISH e RICHARDSON, 1988; BILONI *et al*, 1981 *apud* FIGUEIREDO, 2000).

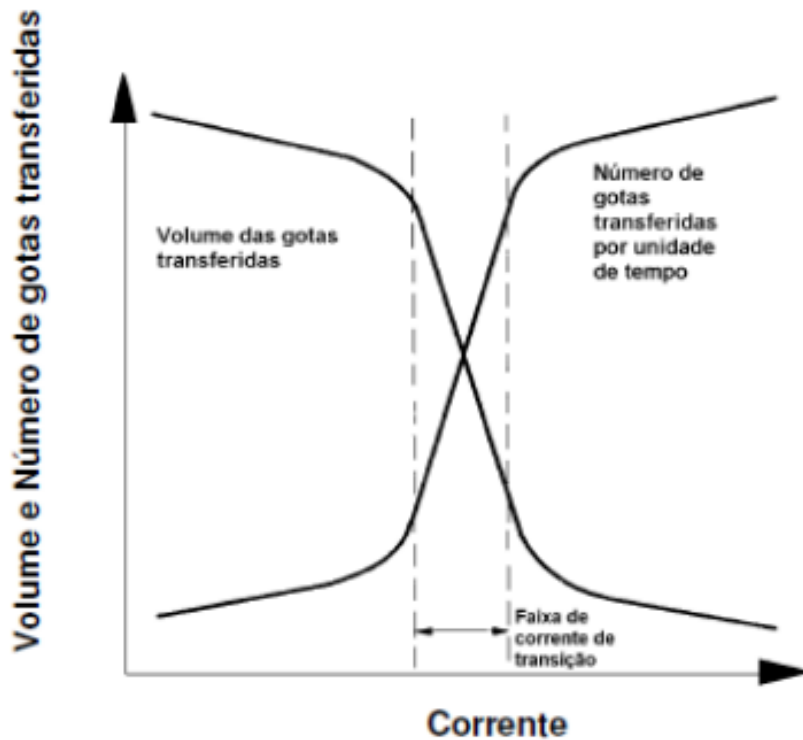


Figura 12: Esquema da variação do volume e número de gotas transferidas por unidade de tempo em função da corrente.

Fonte: Marques (1991) *apud* Ferreira (2018)

Marques (1991) *apud* Ferreira (2018) aponta que a Figura 12 mostra que: para valores menores do que a corrente de transição, o volume das gotas transferidas são grandes, enquanto seu número transferido por unidade de tempo é pequeno. Ainda, suas variações com o aumento da corrente são pequenas ao comparar com a faixa de transição, que as variações são bruscas e consideráveis. Portanto, um pequeno acréscimo na corrente interfere em um grande aumento na frequência de transferência das gotas e uma queda elevada no seu volume. A partir da faixa de corrente de transição, as variações voltam a ser pequena como anteriormente.

Ao contrário da globular, as gotas de metal são pequenas e com número bastante elevado. Considera-se o arco como estável, não há presença de respingos e o cordão de solda é suave e regular. Entretanto, devido as altas correntes empregadas, a utilização desse tipo de modo transferência em soldagem de chapas finas e fora da posição da posição plana é problemática (NORISH e RICHARDSON, 1988 *apud* FIGUEIREDO, 2000).

É possível se obter diferentes tipos de destacamento das gotas da transferência em *spray* ao variar a corrente de soldagem. Observa-se o modo projetado, Figura 13, em correntes próximas da faixa de transição, suas gotas possuem diâmetro igual ou um pouco

menor do que o do eletrodo, com maior taxa de transferência ao comparar com o modo globular (MODENESI e NIXON, 1994 *apud* FERREIRA, 2018).

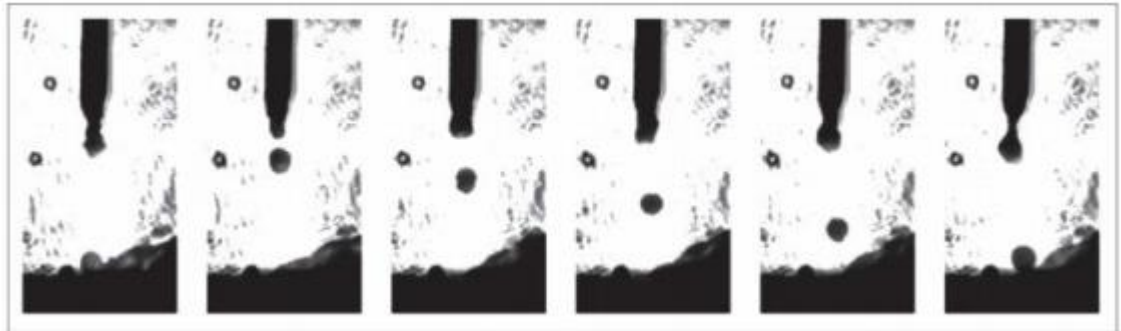


Figura 13: Transferência goticular no modo projetado.
Fonte: Souza (2010) *apud* Ferreira (2018)

Exemplos de suas principais aplicações são a união e o enchimento de chanfros em chapas mais espessas, recorrente em caldeirarias pesadas e construção naval. A elevada estabilidade do arco, diminuta presença de respingos, boa penetração de solda, bom aspecto de cordões, alta taxa de deposição e alta velocidade de soldagem fazem com que a transferência goticular seja uma das mais desejadas (ROSA & ALMEIDA, 2014).

Por seguinte, ao aumentar a corrente obtém-se os modos de transferência goticular com alongamento e transferência goticular rotacional, esquematizados na Figura 14 (ROSA & ALMEIDA, 2014).

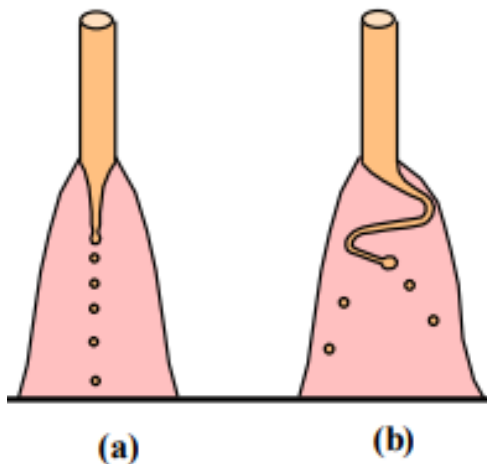


Figura 14: Formas de transferência goticular: (a) com alongamento (*Streaming Spray*) (b) rotacional (*Rotational Spray*).
Fonte: Modenesi (2012)

Na transferência goticular projetada, a ponta do eletrodo torna-se afunilada durante a formação de gotas, porém seu comprimento é menor ou igual ao diâmetro do eletrodo, sendo assim, muito pequeno. Em correntes maiores o arco começa a escalar a

superfície do eletrodo, o que a superaquece e o torna pastoso, com comprimento de superfície cilíndrica. Então, como mostra a Figura 14 (a), com a ajuda das forças eletromagnéticas a ponta do eletrodo no modo de transferência goticular com alongamento fica “alongada” (ROSA & ALMEIDA, 2014).

Para correntes ainda maiores, a transferência não é mais axial, isto é, o filamento líquido passa a girar. A transição para a transferência rotacional, esquematizada na Figura 14 (b), depende consideravelmente do comprimento do eletrodo, sendo que com o seu aumento a tendência é aproximar da transição entre os modos com alongamento e projetados. Devido a existência do longo filamento líquido no arco, acredita-se que o nível de fumos e temperatura da gota de metal aumente nas formas de transferência de metal de maior corrente (MODENESI, 2012).

2.1.2.3.4 Transferência metálica pulsada

A tecnologia de transferência por arco pulsado tem a ideia inicial de alternar a corrente com uma certa frequência entre dois níveis durante o processo. A cada pulso da corrente, uma gota de metal fundido do eletrodo é transferida para a poça de fusão (FISCHER, 2011).

As perturbações controladas na corrente de soldagem tem como objetivo obter uma transferência de metal de adição com as características desejáveis da transferência goticular. Com o intuito de aplicar em chapas finas ou fora de posição plana, os níveis de corrente média deverão ser mais baixos (MARQUES, 1991).

A introdução dos pulsos de correntes com frequência e amplitude pré-determinada (Figura 15) permite que a transferência de gota seja de maneira contínua em alto número e utiliza uma menor energia de soldagem, levando como referência o processo por curto-circuito (MARINO, 2010).

Fischer (2011) afirma que esse processo de transferência pulsada permite uma transferência do metal sem curto-circuito e sem formação respingos, assim como, uma alta qualidade de propriedades mecânicas e aspectos visuais satisfatório. Além disso, permite um aumento na velocidade de soldagem ao comparar com transferência por curto circuito e globular. Para soldagem de chapas finas, é possível a utilização de arames com maior diâmetro.

Para a execução deste método de transferência controlada é necessário fontes de energia específicas, capazes de fornecer corrente pulsada, com parâmetros de pulso

monitorável. A introdução de novas variáveis no processo MIG/MAG dificulta ainda mais a seleção e otimização de parâmetros para soldagem (FIGUEIREDO, 2000).

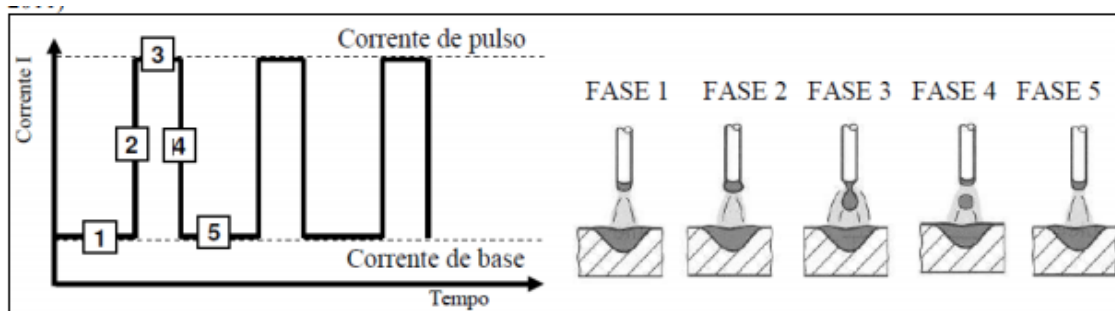


Figura 15: Diagrama de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência de metal .
Fonte: Fischer (2011)

A Figura 15 apresenta a forma teórica de uma onda por corrente pulsada (FISCHER, 2011):

- Fase 1 - Tem a função principalmente de manter o arco aberto e pré-aquecer o material base, assim como o eletrodo;
- Fase 2 – Subida da corrente ao nível de corrente de pulso;
- Fase 3 – Estrangulamento do material fundido na ponta do eletrodo;
- Fase 4 – Descida da corrente e separação da gota do eletrodo;
- Fase 5 – Transferência da gota à poça de fusão.

2.2 Descontinuidades

Descontinuidades são definidas como interrupções na estrutura típica da soldagem e podem estar presentes no metal de base, no metal fundido e nas zonas termicamente afetadas. Considera-se como defeito quando atuam no material de forma a não satisfazer as requisições do trabalho a ser realizado (BRACARENSE,2000).

Barra *et al* (1999) informa que para analisar a significância de uma definida descontinuidade de forma segura deve-se estabelecer primeiro quais são os modos de falha que estão sendo afetados por ela. Temperatura, condição de serviço, estado de tensão e dependência com o tempo são fatores que ajudam a determiná-los.

2.2.1 Porosidade

A porosidade é originada no metal de solda devido a aprisionamento de gases ou vapores dissolvidos na poça de fusão durante o processo de solidificação. São consideradas como agravantes quando ultrapassam valores propostos em normas.

Porosidades abertas resultam em um efeito de concentrador de tensão (BARRA *et al*, 1999).

As principais causas operacionais do desenvolvimento das porosidades estão relacionadas com a oxidação, contaminações de sujeira e umidade na superfície do metal de base, consumíveis de soldagem ou por perturbações na proteção da poça de fusão. Corrente excessiva e um arco muito longo também causam a formação de porosidade, particularmente na soldagem de arco elétrico por eletrodo revestido (MODENESI, 2001).

Sobre a distribuição da porosidade na solda, é possível classificá-las conforme Modenesi (2001) em:

- Uniformemente distribuída (Figura 16a);
- Agrupada (Figura 16b) – mais presente em situações onde houve interrupção do arco ou com pontos de abertura;
- Alinhada (Figura 16c) – Ocorre em geral no passe de raiz.

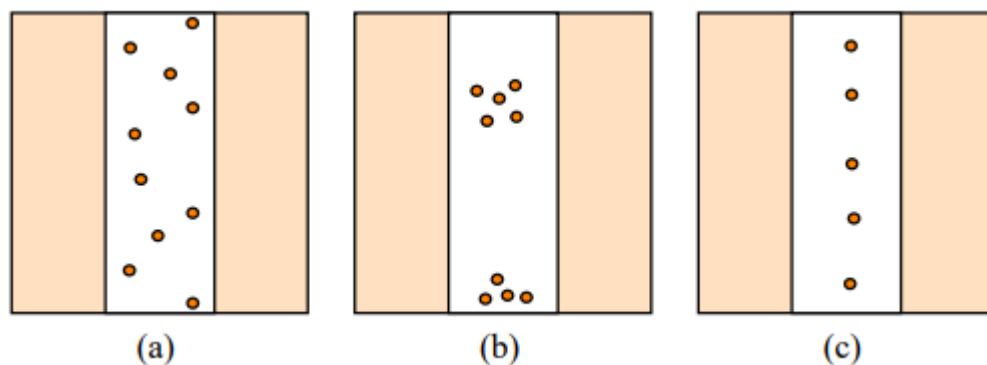


Figura 16: Tipos de distribuição de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada, (c) alinhada.
Fonte: Modenesi (2001)

Costuma-se detectá-las através de testes executados, por exemplo: ultrassom, radiografias, líquido penetrante e partícula magnética. As correções de porosidade em geral não são muito eficientes, pois é difícil de se corrigir o débito de propriedades mecânicas. Assim, o cordão se torna mais frágil e tende a reter mais umidade, possibilitando corrosão (LIMA, 2015).

2.2.2 Falta de Fusão/Falta de penetração

A falta de fusão é consequência de um aquecimento inadequado no processo, resultado de uma má manipulação do eletrodo, energia de soldagem insuficiente ou então da falta de limpeza da junta. Esse tipo de descontinuidade costuma agir como um grave

concentrador de tensão, facilitando propagação de trincas, além de diminuir a seção efetiva da solda (MODENESI, 2001).

Pode proporcionar também uma diminuição na estanqueidade para a junta, visto que a descontinuidade entre o cordão de solda e o metal base pode desempenhar o papel de uma via para determinado fluido. Como não existe uma correção prática, o cordão deve ser refeito, o que evidencia a necessidade de preveni-la, com uma boa limpeza e dimensionamento da junta associado com boas práticas de soldagem (LIMA,2015).

A falta de penetração se associa ao cordão de solda. Quando parte de sua raiz não é completamente fundida, as parcelas soldadas ao longo da espessura tendem a não se unir de maneira satisfatória. Entre as diversas possíveis soluções para ambas descontinuidades, pode-se citar mudanças nos parâmetros de soldagem (NOVAIS, 2010):

- Aumento na voltagem e na velocidade de alimentação do arame;
- Redução na velocidade de soldagem;
- Redução do diâmetro do arame;
- Redução da dimensão de cada cordão de solda.

2.2.3 Mordedura

A mordedura é definida pela fusão da superfície do molde do metal de base adjacente à margem do cordão de solda, apontada pela Figura 17. Em alguns casos, pode ser uma descontinuidade bastante perigosa, visto que pode-se criar um entalhe na zona de ligação e concentração de tensão nessas localidades (NOVAIS, 2010).



Figura 17: Esquema da descontinuidade mordedura no processo de soldagem.

Fonte: Modenesi (2001)

Ao se formar na última camada do cordão de solda, a mordedura é capaz de ocasionar uma redução da espessura da junta, atuando como concentrador de tensão. Enquanto que, quando formada no interior da solda pode se desenvolver uma falta de fusão ou inclusão de escória (MODENESI, 2001).

As mordeduras costumam ser originadas pela má manipulação do eletrodo, comprimento excessivo do arco e por velocidade ou corrente de soldagem muito altas (MODENESI, 2001).

2.2.4 Trinca

Por ser uma forte concentradora de tensão, que favorece a fratura frágil, a trinca é considerada como a descontinuidade mais grave no processo de soldagem. Simplificadamente, ela pode ser definida como a desqualificação do material em responder as solicitações decorrentes impostas pelas tensões provocadas pelo processo de soldagem (NOVAIS, 2010).

As trincas longitudinais podem ser classificadas como:

- Trinca a quente;
- Trinca a frio.

As trincas a quente decorrem da temperatura de fusão do cordão de solda, quando está entre a temperatura de fusão e de solidificação. Nesse intervalo de temperatura, o cordão está em um estado “pastoso”. Normalmente ocorrem devido ao uso incorreto do arame de solda. Qualquer condição que resulte em um cordão de solda de formato excessivamente côncavo é capaz de conduzir à fissuração (ESAB, 2005).

Trincas que processam-se após a solidificação do cordão de solda são referidas como trincas a frio. Elas podem ocorrer quando a seção reta do cordão de solda é muito estreita, incapaz de suportar as tensões atuantes, ou até mesmo devido a presença do hidrogênio, dentre outras causas (ESAB, 2005).

Superficiais ou internas, as trincas podem ser detectadas visualmente ou em testes como raio X, líquido penetrante, ultrassom e partícula magnética. Por ter capacidade de se formar após o resfriamento do cordão, ou até mesmo após a soldagem, a inspeção logo após o processo de soldagem pode ser insuficiente (LIMA, 2015).

2.2.5 Inclusão de escória

Inclusão de escória pode ser definido como materiais diferentes do metal base e metal adicionado, que solidificam-se no cordão de solda. É comum a escória produzida, principalmente quando a taxa de resfriamento da junta é alta, ser encoberta pelo metal de solda, ou então permanecer à frente da poça, solidificando-se junto ao metal de solda (RIBEIRO, 2015).

Na soldagem com múltiplos passes, caso haja a não completa remoção da escória depositada em algum outro passe, é possível que no próximo não seja refundida e fique presa sob este passe. O uso de um chanfro muito fechado ou irregularidade na formação do cordão são fatores que podem dificultar sua remoção (MODENESI, 2001).

Chanfros em formato de “U” costumam dificultar a saída da escória, por isso o ideal é utilizar formatos em “V”, que facilitam a transição da escória para a superfície. A norma 47 *Shipbuilding and Repair Quality Standard*, da *International Association of Classification Societies* (IACS) indica uma angulação entre as superfícies de 45 a 60°, indicadas pela Figura 18 (LIMA, 2015).

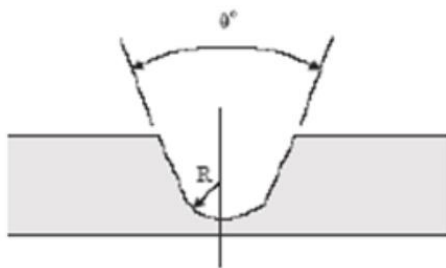


Figura 18: Preparação de chanfro recomendado com valores de θ entre 45 e 60°.
Fonte: IACS (2013)

2.3 Juntas e Chanfro

Chama-se de junta a região onde ocorrerá a união das peças por soldagem. O posicionamento delas é o que determina o tipo de junta. Observa-se na figura 19 os mais utilizados (MODENESI *et al*, 2009).

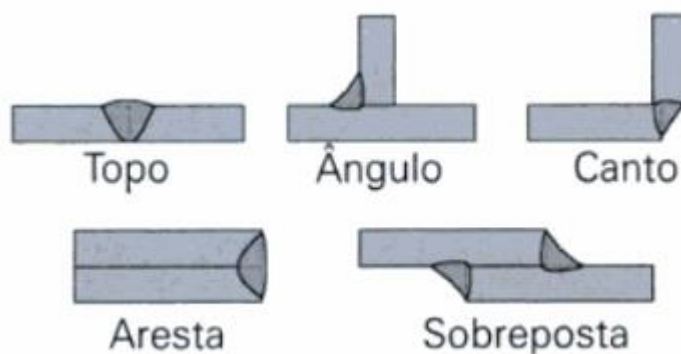


Figura 19: Tipos mais comuns de juntas.
Fonte: Modenesi *et al* (2009)

Em conformidade com Marques *et al* (2007), diferentes posicionamentos para a aplicação dos processos de soldagem formam vários tipos de juntas, porém, um ajuste na

peça normalmente é necessário, a fim de auxiliar a penetração do metal de adição. A figura 20 expõe diferentes tipos de chanfros, através do qual, os ajustes são feitos.

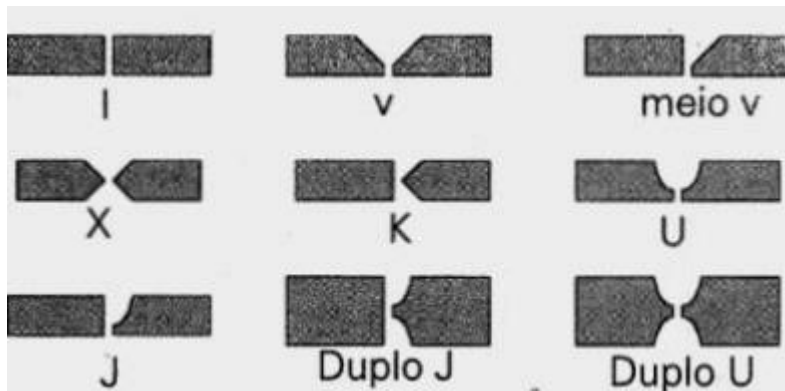


Figura 20: Tipos de chanfro mais utilizados.
Fonte: Marques *et al* (2007)

A junta de topo é o tipo de junta que apresenta maior eficiência ela pode ser dividida de acordo com o tipo de preparação de chanfro, ou seja, juntas com penetração total ou parcial. Quando se utiliza a penetração total, pode ou não inserir a chamada cobre-junta, sendo que ela pode ser temporária ou permanente, de forma a se integrar permanentemente na junta de topo ou não (OKUMURA *et al*, 1992).

Por sua vez, o formato do chanfro influencia no comportamento, eficiência e confiabilidade da junta de topo, sendo assim, sua geometria deve ser selecionada conforme o tipo de aplicação (OKUMURA *et al*, 1992).

Por não necessitar de uma usinagem ou corte mais elaborado, a preparação em “I” é a que tende a ter o menor custo inicial, sendo comum para ocasiões onde a junta é de pequena espessura. Quando não é possível obter a penetração desejada, torna-se necessária a utilização de um outro tipo de chanfro. É importante estar alerta às suas particularidades, por exemplo: chanfros em V ou meio V são contraindicados para ocasiões onde é presente juntas espessas, pois ambos necessitam de um grande volume de metal de adição para o seu enchimento (MODENESI *et al*, 2009).

Ainda sobre o chanfro em V, Pigozzo (2015) indica que sua aplicação é frequente em procedimentos manuais. A existência do espaçamento entre as peças é denominado *gap* (Figura 21). A aplicação do *gap* garante a penetração da solda total no passe de raiz, no entanto, para ângulos muito acentuados o volume a ser preenchido do material torna-se elevado, o que exige passes adicionais por camada de solda.

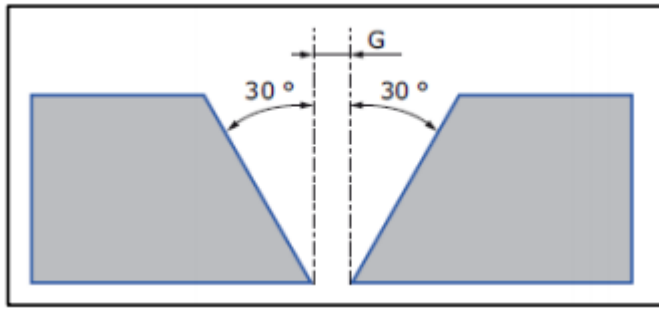


Figura 21: Chanfros em V frequentemente utilizados em procedimentos manuais.
Fonte: Pigozzo (2015)

Portanto, indica-se a utilização dos chanfros U e J para os casos em que a espessura da junta a ser soldada é muito grande, embora tenham um maior custo de preparação. Se for necessária a soldagem dos dois lados, é recomendado os chanfros X e K, que possuem a vantagem de melhor equilíbrio de tensões térmicas geradas durante a soldagem, apresentando menor chance de distorção (MODENESI *et al*, 2009).

2.4 Microestrutura dos Aços de Baixo teor de Carbono no processo de soldagem

O ferro e o carbono são os principais elementos do aço. Porém, é comum a existência de elementos secundários, provenientes dos processos de fabricação ou então com o intuito de acrescentar alguma característica desejada. Em suma, o carbono é primordialmente o fator endurecedor do aço, porém deve-se levar em consideração esses outros elementos (manganês, silício, fósforo e entre outros) que também participam do ajuste do seu nível de resistência (RODRIGUES *et al*, 2014).

A quantidade de carbono presente no aço é o que define sua classificação. Os aços de baixo carbono possuem um máximo de 0,3% desse elemento e por isso apresentam grande ductilidade e baixa resistência mecânica. São recomendados para o trabalho mecânico e soldagem, não sendo temperáveis, utilizados na construção de edifícios, pontes, navios, automóveis, dentre outros usos (POLINSKI, PARIS, 2014).

Por seguinte, a classificação médio carbono indica a presença de 0,3% até 0,6% e possui maior resistência mecânica e menor tenacidade e ductilidade. Da mesma forma, alto carbono está entre 0,6 e 1% desse elemento e possui maior resistência e mecânica e menor tenacidade e ductilidade do que o de médio carbono (RODRIGUES *et al*, 2014).

Na prática, o sistema de classificação mais conhecido é o SAE-AISI, onde o aço carbono está localizado no grupo 10xx, sendo os dois últimos dígitos o que representa a

porcentagem de carbono do aço. Por exemplo, o aço 1020 apresenta 0,2% desse elemento (baixo carbono) e o aço 1060 contém 0,6% (alto carbono) (RODRIGUES *et al*, 2014).

Conforme Callister (1991), os aços produzidos em maior quantidade são os de baixo teor de carbono, contendo menos que aproximadamente 0,25% de C. Ele não responde a tratamentos térmicos com objetivo de obter martensita para obter aumento de resistência, de forma que este propósito é alcançado através de trabalho à frio.

Conforme Modenesi (2012), poças de fusão dos aços com baixo teor de carbono costumam solidificar-se sob a forma de ferrita, sendo que em alguns casos ocorre uma reação que favorece a formação de austenita. Ao passo que a temperatura da zona fundida diminui, a ferrita remanescente transforma-se em austenita. Em temperaturas inferiores a 900 °C a austenita se decompõe, o que resulta em diferentes microconstituintes.

Anna & Nacari (2006) afirmam que com o objetivo de facilitar a identificação desses microconstituintes, que devido a grande diferença de aparências em relação ao metal base é ainda dificultada, foi estabelecido diferentes terminologias para a descrição da microestrutura do metal de solda. Um desses sistemas de classificação foi desenvolvido pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

Quando visualizados por microscopia ótica, classifica-se os microconstituintes do metal de solda (IIW, 1998):

- Ferrita Primária (PF);
- Ferrita Acicular (AC);
- Ferrita com segunda Fase (FS);
- Agregado de Ferrita Carbono (FC).

Ao considerar uma solda de um só passe, a microestrutura da zona fundida será o produto da decomposição da austenita em ferrita durante o resfriamento, sendo que a ferrita é capaz de assumir formas distintas. Para soldas multipasse, devido ao processo dinâmico da formação do cordão de solda, a formação das microestruturas resultantes do ciclo de resfriamento será mais complexa, uma vez que existem regiões reaquecidas e alteradas pelos ciclos térmicos dos demais passes. Tais variações no ciclo térmico da região do cordão de solda são fundamentais para a determinação das propriedades da zona fundida (MODENESI, 2012).

2.5 Tensões residuais

As tensões residuais são aquelas permanentes em um componente na inexistência de forças externas ou gradientes de temperatura. Elas são originadas sempre que há deformação plástica localizada ou deformação elástica não-homogênea no componente e podem ser classificadas como macro ou microtensões residuais, dependendo da escala na qual se distribuem (STROHAECKER, 2004).

As tensões residuais do tipo 1, também chamadas de macroscópicas, se estendem ao longo do componente por vários grãos. Elas são provenientes de condições ou fontes térmicas, mecânicas ou químicas que afetam uma parte considerável em relação a dimensão do equipamento (SOARES,1998).

As tensões residuais do tipo 2, comumente chamado de tensões microestruturais, está presente em um grão ou uma parte deste, estando equilibrada em alguns grãos vizinhos. Sua origem é a partir de deformações plásticas microscópicas (SOARES,1998).

As chamadas de tensões microlocalizadas, ou tensões residuais do tipo 3, abrangem distâncias interatômicas, dentro de uma pequena porção de um grão. Se equilibram em uma pequena parte do grão e aparecem devido a defeitos cristalinos (discordâncias) (SOARES,1998).

Como o tipo 2 e 3 não podem ser evitadas em materiais policristalinos e são mais importantes para o estudo de comportamento microestrutural, o tipo 1 mostra ser de fundamental importância para avaliações de projetos mecânicos e estruturais e devem ser analisadas através de métodos confiáveis (SOARES,1998).

Por apresentar caráter elástico, o valor máximo que as tensões residuais podem atingir é a tensão de escoamento local do material. Ao aquecer o material até uma temperatura em que a tensão de escoamento é menor do que as tensões residuais presentes, ele será deformado plasticamente e as tensões residuais serão aliviadas (DONATO,2008).

Elas são auto equilibrantes, de forma que qualquer remoção de material ou aplicação de carregamentos térmicos ou mecânicos é suficiente para causar alterações em seu estado e redistribuí-las até as tensões internas se equilibrarem (PAIVA,2015).

Sousa (2012) afirma ser possível gerar tensões residuais através de três maneiras, que podem atuar de forma conjunta ou individual:

- Carregamentos mecânicos: podem surgir através de ensaios mecânico (tração, torção, compressão, flexão, etc), jateamento por partículas sólidas, dentre outros;
- Transformações Metalúrgicas: fundição, forjamento, trefilação, extrusão, entre outros;
- Efeitos Térmicos: principalmente têmpera e soldagem.

A têmpera busca a obtenção de uma microestrutura que proporcione dureza e resistência mecânica elevada. Após o aquecimento até a região de austenitização, o aço é resfriado bruscamente. Nesta etapa, surgem as tensões residuais, pois a superfície esfria muito mais rápido do que o centro. Então até o resfriamento total do corpo, ele tenta expandir, enquanto a superfície o comprime. Quando o material é resfriado completamente ocorre uma inversão de tensões, onde o centro apresenta tensões residuais de tração e a superfície de compressão, indicadas pela Figura 22 (SOUSA, 2012).

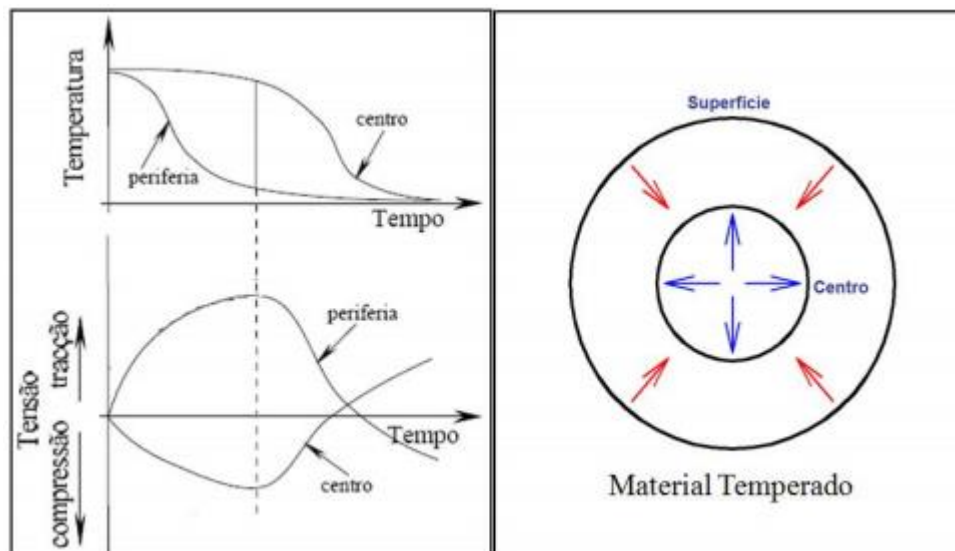


Figura 22: Tensões residuais em um material temperado.
Fonte: Sousa (2012)

2.5.1 Tensões residuais na soldagem por arco elétrico

Para se obter a união das peças no processo de soldagem, é necessário um severo aquecimento das partes a serem trabalhadas. Como o aumento da temperatura é localizado e sofre um subsequente resfriamento, mudanças geométricas são inevitáveis e geram tensões e deformações no componente (PAIVA, 2015).

Durante a soldagem por fusão a arco elétrico, a poça de fusão se solidifica formando a zona fundida e região adjacente atinge uma temperatura bem próxima à de fusão do material, porém menor. Por estar em temperaturas mais elevadas do que as

regiões ao lado, o material aquecido é impedido de se expandir, resultando em tensões residuais de natureza compressiva na região próxima à zona de fusão e trativas nas que impediram a dilatação (zonas mais frias) (COFIÑO, 2010).

A mesma que porção que antes foi aquecida, tende a se contrair devido a refrigeração e é impedida pelo restante do material. Inicialmente, ela se alivia das tensões compressivas e como não consegue reduzir o tamanho, acaba sendo tracionada. As tensões inferiores ao limite de escoamento permanecem no término da soldagem, tornando-se residuais (COFIÑO, 2010).

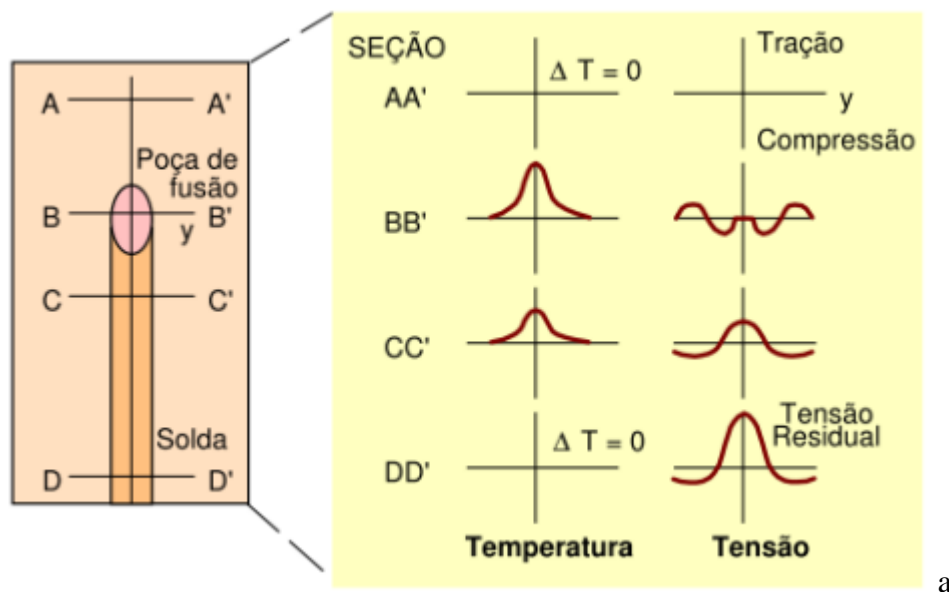


Figura 23: Relação entre tensões residuais e temperaturas durante o processo de soldagem. (a) Região da solda. (b) Variação da temperatura ao longo do cordão de solda. (c) Distribuição de tensões ao longo do cordão de solda.

Fonte: (Modenesi, 2008 *apud* Cofiño, 2010)

A origem do sistema de coordenadas da Figura 23, representado por uma elipse apresenta metal fundido, que apresenta tensões nulas por estar em estado líquido. Na seção BB' o material é impedido de se expandir por dilatação pelas regiões vizinhas mais frias e geram tensões de compressão próxima a poça de fusão e tensões de tração nas regiões mais afastadas. A seção CC', por estar resfriando e solidificando, indica tensões de tração junto ao cordão e de compressão ao redor pois o material tenta contrair, mas é impedido pelas regiões mais afastadas. A região DD' mostra o término da soldagem (resfriamento total) e exibe tensões residuais de tração no centro próxima do limite de escoamento do material (MODENESI, 2008 *apud* COFIÑO, 2010).

As tensões residuais também podem ser provenientes de transformações de fase e se sobrepõem ao fenômeno de contração. Sua magnitude e natureza dependem fortemente

da temperatura na qual a transformação ocorre. No caso dos aços, a transformação de austenita para ferrita, bainita ou martensita implica em uma expansão volumétrica, que é restringida pelo restante do material (PAIVA, 2015).

Conforme Bezerra (2006) e Radaj (2003) além das tensões residuais, a soldagem também provoca deformações, que possuem características transientes durante o processo e permanentes após o resfriamento, que são popularmente intituladas como distorções. Na maior parte dos casos, as distorções não são resultado das tensões residuais. Pode-se até dizer que são antagônicas, já que altas tensões residuais surgem quando as deformações são restringidas (Figura 24).

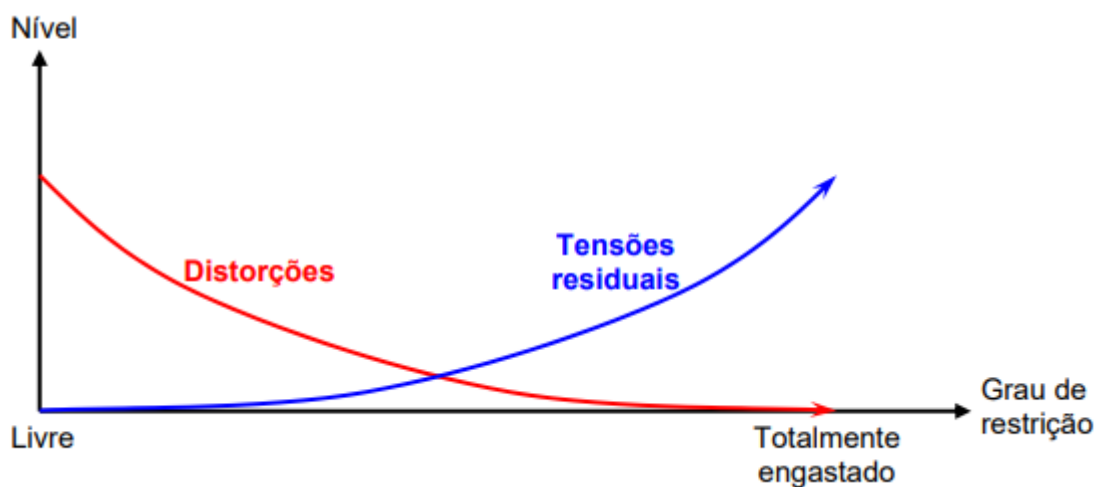


Figura 24: Relação esquemática entre distorções e tensões residuais.
Fonte: Bezerra (2006)

2.6 Ensaio de Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica amplamente utilizada nas pesquisas metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Alguns ensaios foram desenvolvidos a fim de quantificá-la, sendo os realizados por penetração os mais empregados na medição da dureza de metais. Entre eles, os ensaios Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop e Meyer são os mais citados nas especificações técnicas (SOUZA, 1982).

2.6.1 Dureza Brinell

Inicialmente proposto por James A. Brinell em 1900, o Ensaio de Dureza Brinell foi o primeiro ensaio de penetração padronizado e reconhecido industrialmente. Ele consiste em comprimir uma esfera metálica na superfície do material a ser ensaiado e assim, gerar uma calota esférica. O diâmetro da esfera pode ser determinado em função

da espessura do corpo de prova a ser ensaiado, sendo que a espessura mínima é indicada em normas técnicas de métodos de ensaio (GARCIA *et al.*,2012).

Esse é o único ensaio utilizado e aceito para ensaios de metais onde sua estrutura interna não é uniforme. Ele também é feito por equipamentos de fácil operação, porém há uma limitação decorrente da esfera empregada. Por exemplo, utilizando esferas de aço temperado só é possível medir a dureza em até 500HB, pois maiores danificariam a esfera (GUIBERT *et al.*,2000 *apud* BERTOLDI, 2014).

A dureza Brinell é o quociente da carga normal aplicada, pela área de superfície côncava após a retirada da força. Portanto, percebe-se que a dureza corresponde a uma tensão, o que permite estabelecer relações entre a dureza e outras propriedades mecânicas dos materiais (GARCIA *et al.*,2012).

2.6.2 Dureza Rockwell

O ensaio de Dureza Rockwell é considerado o mais utilizado internacionalmente e faz uso da profundidade de impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga em dois estágios para indicar a medida da dureza. A partir da pré-carga e carga suplementar utilizada pode-se classificar a Dureza Rockwell como comum ou superficial, sendo que seu valor não tem relação com a área de impressão (GARCIA *et al.*,2012).

Aplica-se a pré-carga a fim de de eliminar eventuais defeitos superficiais, eliminar erros provenientes da deformação elástica do material e auxiliar na fixação do corpo de prova no suporte. O penetrador em si pode ser um diamante esferocônico com angulação de 120° e ponta ligeiramente arredondada ou uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio. Porém, para a utilização das esferas a norma ASTM E18:2007 recomenda as esferas de aço apenas em casos de medições superficiais e materiais extremamente dúcteis (GARCIA *et al.*,2012).

2.6.3 Dureza Vickers

Conforme a norma ABNT 6507-1 (2008) e Souza (1982), o ensaio de dureza Vickers é realizado com um penetrador de diamante que tem um formato piramidal de base quadrada e com um ângulo de 136° entre as faces opostas do vértice. Quando pressionado contra o corpo-de-prova, o comprimento da diagonal da impressão deixada na superfície é medido após a remoção da força de ensaio.

Para uma medida ser considerada de microdureza Vickers, deve-se utilizar cargas abaixo de 1kgf, podendo chegar até 10gf. Essas medidas proporcionam uma impressão microscópica do material e são utilizadas para a medição de dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, determinação da profundidade de superfícies carbonetadas, de têmpera e entre outras aplicações (GABRIEL, 2016).

2.6.4 Medição da tensão residual por meio do ensaio de dureza

Por estar presente em componentes isentos de qualquer carregamento externo, a medição de tensões residuais é particularmente difícil. As técnicas convencionais de medição de tensões em geral se baseiam na mudança de determinada propriedade antes e depois da aplicação de um carregamento, sendo assim, não são capazes de perceber as tensões residuais (COFIÑO, 2010).

É possível obter determinar as tensões residuais comparando as propriedades do componente tensionado com as do componente isenta de tensões. Um material deformado a frio, quando submetido a um ensaio de dureza superficial, é esperado apresentar um resultando diferente do que se aplicado o mesmo ensaio no material não deformado (SOUSA, 2012).

Se a natureza das tensões residuais na superfície forem trativas, o ensaio de dureza exibira um valor menor para a dureza superficial em relação ao material não deformado. Analogamente, se a natureza de tais tensões residuais na superfície for compressiva a penetração será dificultada, apresentando maiores valores à dureza superficial do material (SOUSA, 2012).

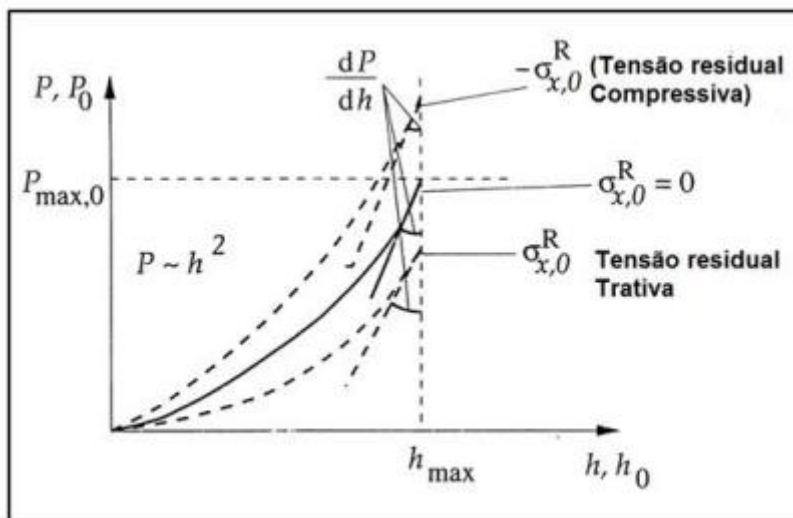


Figura 25: Curva do ensaio de dureza Vickers (Força x Profundidade).

Fonte: (SURESH; GIANNOKOPOULOS, 1998 *apud* Sousa, 2012)

A figura 25 indica o comportamento do material quando está submetido a uma tensão residual. É observado que amostras que apresentam maior dureza (menor penetração) em relação ao material livre de tensão, contêm tensão residual compressiva e se a dureza for maior, tensão trativa (WANG; OZAKI; ISHIKAWA; NAKANO; OGISO, 2005 *apud* SOUSA 2012).

2.7 Testes estatístico

Diversos problemas na engenharia necessitam de uma análise profunda e estratificada das anomalias. Portanto, aplica-se os testes de hipóteses a fim de auxiliar nas tomadas de decisões (NETO, 2014).

2.7.1 Análise de variância

Também conhecida como Anova (*Analysis Of Variance*), a análise de variância foi introduzida por Fisher na década de 1920 e corresponde até a atualidade como uma das técnicas mais empregadas para a análise de experimentos. Adotando que a variável resposta varia de parcela para parcela, o objetivo principal da Anova é verificar a causa dessa variabilidade, que pode ser devidas ao tipo de delineamento exercido, aos tratamentos utilizados no experimento e ao erro experimental (NUNES, 2004).

O termo delineamento em planejamento de experimentos representa uma estratégia amostral e é definido pela estrutura de parcelas e pela casualização do experimento. Estrutura de parcelas refere-se à existência de controle local (NUNES, 2004 *apud* RAMOS, 2019).

Como é discutido por Hogg e Ledolter (1987) *apud* Bower (2000), algumas pré-suposições são feitas antes da realização da ANOVA, elas são:

- Os valores em cada grupo seguem uma distribuição normal;
- As variâncias são as mesmas em cada grupo.

Bower (2000) afirma que para pequenas quantidades de dados não é necessário rejeitar a hipótese nula devido à normalidade.

O método da Anova decompõe a variabilidade total de um conjunto de observações, medida como a soma dos quadrados de suas diferenças (relacionadas à media), em uma soma dos quadrados dos componentes associados a fontes específicas definidas de variação (MONTOMERY; RUNGER, 2009, *apud* NETO, 2014).

A análise de variância compreende a variabilidade total, aos graus de liberdade, as somas de quadrados em torno da média, aos quadrados médios e ao teste F. A representação da análise de variância para um experimento é apresentada pela Figura 26 (NUNES, 2004).

Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrados das Médias (SQM)	F
Entre populações/ grupos	SQ_e	$gl_e = k-1$	$MQ_e = \frac{SQ_e}{gl_e}$	$\frac{MQ_e}{MQ_d}$
Dentro das populações/ grupos	SQ_d	$gl_d = n-k$	$MQ_d = \frac{SQ_d}{gl_d}$	
Total	SQ_t	$gl_t = n-1$		

Figura 26: Teoria da Anova para experimentos.

Fonte: Nunes (2004) *apud* Ramos (2019)

As soma de quadrados total, expostas na Figura 26, corresponde à soma das outras duas, o “k” equivale ao número de tratamentos do experimento e o “n” a quantidade de parcelas. Por seguinte, o termo grau de liberdade do erro (dentro das populações), introduzido por Fisher, refere-se a uma constante que caracteriza a distribuição da soma dos quadrados e seu aumento é desejável devido a duas razões (NUNES, 2004 *apud* RAMOS, 2019):

- Um maior grau de liberdade do erro auxilia a sensibilidade do teste F, ou seja, diferenças mínimas entre os tratamentos passam a ser mais significativas.
- Quanto maior o grau de liberdade do erro, melhor a estimativa relacionada ao erro experimental

Utiliza-se o teste F de Fisher para testar a hipótese nula (não há diferença significativa entre os tratamentos), contra a hipótese alternativa (há diferença em pelo menos um dos tratamentos). Sempre que o resultado de F for relevante, existem indícios de que pelo menos um dos contrastes dos tratamentos seja significativo ao nível de significância adotado (SANTOS; GHEYI, 2003 *apud* SILVA 2010).

A análise de variância é um procedimento que pode comparar três ou mais tratamentos e devido às grandes possibilidades de diferentes experimentos, existem

diversas variações da ANOVA. Busca-se avaliar se existem diferenças consideráveis entre os grupos investigados e possíveis fontes de variação (NUNES, 2004).

2.7.2 Teste de Tukey

O teste de Tukey pode ser usado para comparar todo e qualquer contraste entre duas médias de tratamentos. Ele é exato e relativamente simples para situações onde o número de repetições é o mesmo em todos os tratamentos. Porém, para casos em que os números de repetições são diferentes, apesar de ainda poder ser usado, ele é apenas aproximado (PIMENTEL GOMES, 2000 *apud* OLIVEIRA 2008).

No caso de comparações múltiplas entre amostras de tamanho iguais o método com melhor performance é o de Tukey, que se baseia na amplitude total “estudentizada” (“*studentized range*”), que é um valor “q”, tabelado em função do grau de liberdade e número de tratamentos (COSTA NETO, 1977 *apud* OLIVEIRA 2008).

Esse procedimento permite a formação de intervalos de confiança para comparação em pares, conforme uma distribuição de amplitude e tem como base a diferença mínima significativa, equação 1, que é calculada na forma:

$$d. m. s = q * \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (1)$$

Onde “q” é o valor dado na tabela no nível de significância pretendido, “QMR” é o quadrado médio do resíduo da análise de variância e “r” é o número de repetições de cada um dos tratamentos (RAMOS, 2019 & OLIVEIRA, 2008).

No entanto, existe uma pequena possibilidade de que embora o teste F não tenha sido significativo na análise de variância, obtenha-se um ou mais contrastes significativos pelo teste de Tukey (PIMENTEL GOMES, 2000 *apud* OLIVEIRA, 2008).

2.7.3 Análise de Variância no Minitab

Como expõe a tabela na Figura 27, obteve-se um valor de F de 8,29. Tradicionalmente a solução seria comparar tal valor estatístico com valores críticos de uma tabela. Porém, pelo software são feitos todos cálculos e comparações necessárias e obtém-se um valor de *p* automaticamente. Como seu valor é bem pequeno (0,008), o suficiente mesmo para uma significância de 1% (0.01), existe uma evidência bem forte de que as médias não são iguais, então rejeita-se a hipótese nula. O teste de Tukey está

incluso na parte inferior e nele é pertinente encontrar em quais grupo, suas médias divergem significativamente (BOWER, 2000).

General Linear Model: Uniformity versus Position

Factor	Type	Levels	Values
Position	fixed	4	1 2 3 4

Analysis of Variance for Uniformity, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Position	3	16.2198	16.2198	5.4066	8.29	0.008
Error	8	5.2175	5.2175	0.6522		
Total	11	21.4373				

Unusual Observations for Uniformity

Obs	Uniformi	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	2.76000	4.30667	0.46626	-1.54667	-2.35R
2	5.67000	4.30667	0.46626	1.36333	2.07R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Tukey Simultaneous Tests
Response Variable Uniformity
All Pairwise Comparisons among Levels of Position

Position = 1 subtracted from:

Level Position	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
2	-2.533	0.6594	-3.842	0.0206
3	-2.380	0.6594	-3.609	0.0283
4	-2.990	0.6594	-4.535	0.0083

Position = 2 subtracted from:

Level Position	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
3	0.1533	0.6594	0.2325	0.9952
4	-0.4567	0.6594	-0.6926	0.8971

Position = 3 subtracted from:

Level Position	Difference of Means	SE of Difference	T-Value	Adjusted P-Value
4	-0.6100	0.6594	-0.9251	0.7928

Figura 27: Resultado de ANOVA pelo Minitab.
Fonte: Adaptado de Bower (2000)

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação do trabalho

Muitos fatores determinam o rumo e o modo de obtenção dos resultados de uma pesquisa científica. Sendo assim, classificam-se as razões para sua realização em dois grupos: razões de ordem intelectual e razões de ordem prática. A intelectual provém da própria satisfação do conhecimento, enquanto a outra decorre da intenção de otimizar algo, ou seja, deixá-lo mais eficaz ou eficiente (GIL, 2002).

Toda e qualquer classificação se faz mediante a algum critério. Para as pesquisas, normalmente baseia-se conforme os seus objetivos gerais. Dessa forma, elas são classificadas em três grupos: exploratórias, descritivas e explicativas (GIL, 2002).

As pesquisas exploratórias possuem como objetivo obter uma maior familiaridade com o problema, tendo em vista torná-lo mais explícito ou constituir hipóteses. O objetivo principal é o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento pode ser bem flexível, de modo a possibilitar a consideração de diversos aspectos relacionados ao assunto. Elas normalmente são compostas por: levantamento bibliográfico e documental, entrevistas e estudos de caso (GIL,2002).

Em geral, as pesquisas exploratórias são aplicadas na primeira etapa de uma investigação mais extensa, onde o tema é um tanto vago. Assim, torna-se necessário revisões da literatura, discussões com especialistas e outras técnicas, para que o resultado seja o mais esclarecido possível (GIL,2008).

Por seguinte, as pesquisas descritivas têm como fundamento a descrição de características de determinada população ou fenômeno, ou ainda, o estabelecimento de relações entre variáveis. Esse tipo de pesquisa é, juntamente com as pesquisas exploratórias, a que é utilizada quando existe um interesse na atuação prática (GIL, 2008).

As pesquisas explicativas por sua vez, possuem a intenção de identificar fatores que influenciam na ocorrência de fenômenos. Portanto, é a que mais o conhecimento da realidade é aprofundado, já que ela é o tipo de pesquisa que explica a razão por trás do fato. Sendo assim, a chance de cometer erros é aumentada consideravelmente. Nas ciências naturais, as pesquisas explicativas valem-se quase sempre do método experimental (GIL, 2008).

Partindo para o ponto de vista da forma da abordagem do problema, as pesquisas podem ser separadas entre qualitativa ou quantitativa. A quantitativa considera que informações e opiniões podem ser transformadas em números para a análise e requer a utilização de técnicas estatísticas. A qualitativa envolve uma relação entre a realidade e o sujeito de uma maneira que não pode ser traduzida em números, sendo que o processo e o seu significado podem ser considerados os focos principais de abordagem (SILVA & MENEZES, 2005).

Embora a classificação das pesquisas em exploratórias, explicativas e descritivas tenha grande utilidade para estabelecer uma aproximação conceitual, para a teoria interagir com dados da realidade é necessário incluir uma classificação que fragmenta as pesquisas com base nos procedimentos técnicos empregados para a coleta de dados. Assim, são definidos grupos conforme o procedimento metodológico: pesquisa bibliográfica, pesquisa experimental, estudo de caso e entre outros (GIL, 2002).

A pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de materiais já elaborados, constituído principalmente por livros ou artigos científicos. A maioria dos estudos envolvem esse tipo de pesquisa, porém alguns são desenvolvidos exclusivamente a partir de fontes bibliográficas. Sua principal vantagem é permitir ao pesquisador cobrir uma vasta fonte de informação, por exemplo em situações em que o problema em questão necessita de dados muito dispersos pelo espaço (GIL, 2002).

A pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar variáveis que talvez o influenciem e definir meios de controle e observação dos efeitos que ela produz nesse objeto. Portanto, trata-se de um tipo de pesquisa que o agente é ativo no lugar de observador passivo. Devido as possibilidades de controle, os experimentos fornecem melhor garantia de que a variável independente causa efeitos na variável dependente quando comparados aos outros procedimentos metodológicos (GIL, 2002).

O estudo de caso é bastante aplicado nas ciências biomédicas e sociais, visto que ele é constituído pelo estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos para que alcance um conhecimento amplo e detalhado. É indicado para situações em que os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidos (GIL, 2002).

O presente trabalho é agrupado principalmente em três categorias:

- Procedimento metodológico;

O processamento metodológico se identifica a ser pelo método experimental. O método consiste em submeter objetos de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas, a fim de observar os resultados que a variável produz no objeto (GIL, 2008).

- Natureza de pesquisa;

Esta pesquisa será desenvolvida para proporcionar uma visão geral, de tipo aproximativo, a cerca de determinado assunto. Tal funcionalidade abrange os conceitos de uma pesquisa exploratória (GIL, 2008).

- Objetivos;

Ela terá um caráter qualitativo como objetivo, pois tenta compreender a totalidade do fenômeno ao invés de focalizar em conceitos específico, assim como analisa as informações de maneira organizada, porém intuitiva (GERHARDT *et al*, 2009).

3.2 Materiais e Métodos

Para um melhor entendimento, será feito um roteiro descrevendo o que será feito durante o trabalho. Após, será apresentado os equipamentos empregados nos processos de corte, no processo de soldagem e no ensaio de dureza, respectivamente.

3.2.1 Roteiro

3.2.1.1 Revisão Bibliográfica

Inicialmente será abordada uma revisão bibliográfica do tema que será um suporte técnico de embasamento teórico, conforme o entendimento dos autores, para que baseado em estudos e experimentos anteriores seja possível ter uma comparação precisa em relação a soldagem do aço ABNT 1020 e o estudo das consequentes tensões residuais.

3.2.1.2 Escolha e preparação das amostras

Serão cortadas 12 amostras padronizadas de aço ABNT 1020 com as seguintes dimensões: 76,2mm (3”) x 12,7mm (1/2”) x 100mm. A Figura 28 expõe o comprimento e espessura de cada uma dessas amostras. Além dessas 12 amostras, será separado uma nova amostra que não passará pelo processo de soldagem e no final servirá como um parâmetro de comparação do efeito do processo de soldagem sobre a dureza com a dureza do metal base sem esse tratamento. Ela será tratada posteriormente como *blank*.

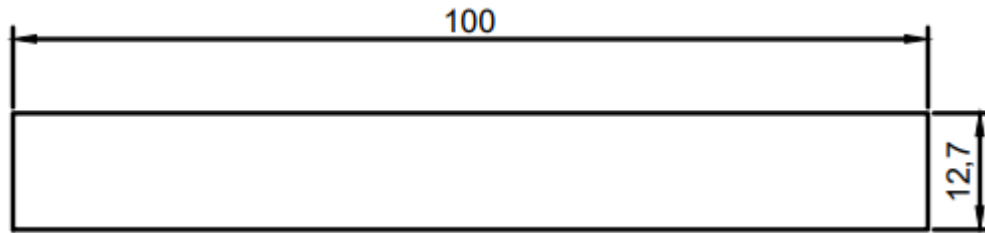


Figura 28: Geometria em 2D das amostras após o primeiro corte.
 Fonte: Pesquisa direta (2020)

Em seguida, haverá uma nova operação de corte de cada amostra a fim de preparar as geometrias de chanfro do processo de soldagem, sendo essas: chanfro em V e chanfro em X. Os cortes dessa etapa foram feitos de forma a padronizar o ângulo de abertura dos chanfros em 60°.

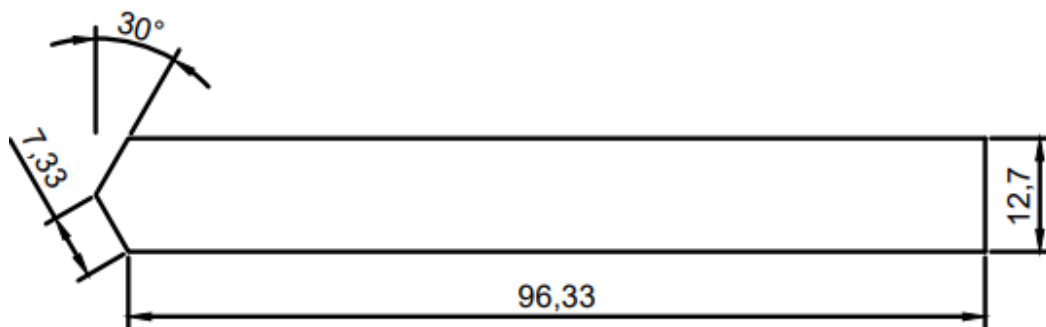


Figura 29: Geometria em 2D das amostras com chanfro em X após o segundo corte.
 Fonte: Pesquisa direta (2020)

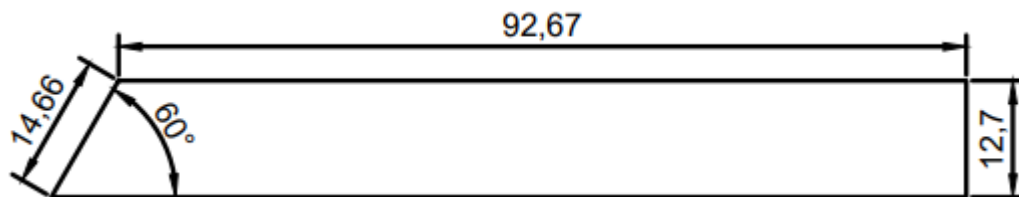


Figura 30: Geometria em 2D das amostras com chanfro em V após o segundo corte.
 Fonte: Pesquisa direta (2020)

A Figura 29 e Figura 30 ilustram a geometria das amostras que serão utilizadas para a criação dos chanfros em X e V, respectivamente. Será fabricado metade das amostras (6) para cada chanfro.

3.2.1.3 Processo de Soldagem e Ensaio de Dureza

Essa etapa consiste na aplicação do processo de soldagem MIG/MAG para união das amostras, de forma obter-se 6 corpos de prova para a próxima parte. Todo o processo

será realizado a partir de um mesmo padrão e diferencia-se apenas na geometria de chanfro. Ao final da união das peças, existirá um total de 6 amostras:

- 3 amostras com chanfro em V
- 3 amostras com chanfro em X

Os ensaios de dureza serão realizados por meio de um microdurômetro, na escala Vickers. O penetrador será posicionado inicialmente no centro da solda, medido e então ajustado à esquerda e à direita em passes padronizados de 7mm, chegando em até 28mm do centro da solda em cada lado.

Para ilustrar as dimensões da solda e as posições que a dureza será medida, foram criadas 2 imagens com vista superior das amostras (Figura 31 e Figura 32). Nela também estão expostas a largura do *gap* (1,5mm), o passe (7mm) e as respectivas zonas de fusão da soldagem, situadas nas regiões tracejadas.

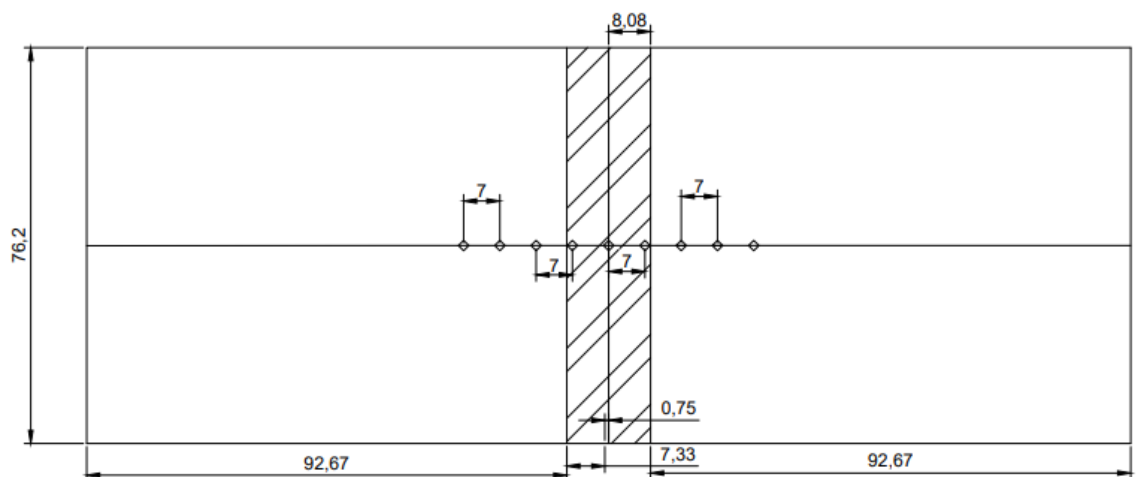


Figura 31: Vista superior das amostras com chanfro em V.
Fonte: Pesquisa direta (2020)

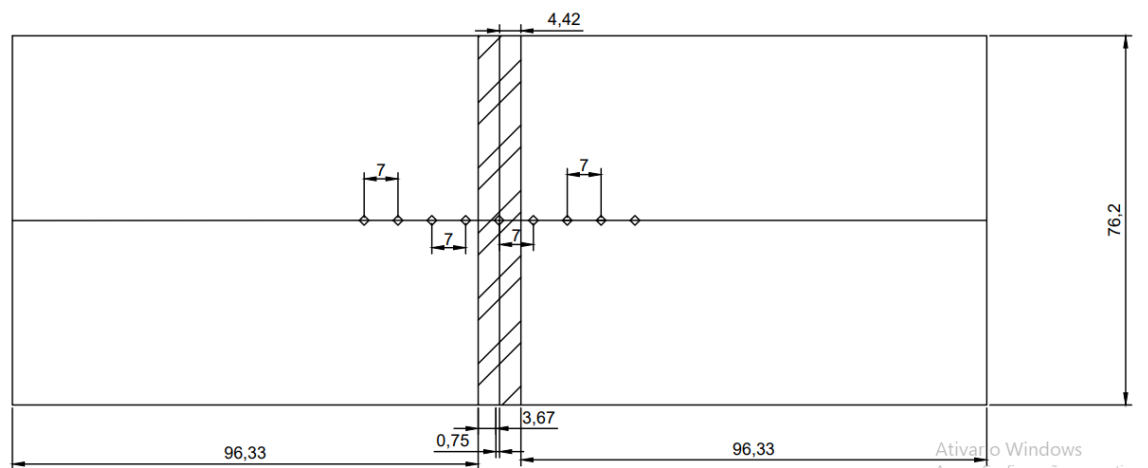


Figura 32: vista superior das amostras com chanfro em X.
Fonte: pesquisa direta (2020)

3.2.1.4 Análise Estatística

Na análise estatística dos resultados do experimento comparar-se-á a dureza obtida após a soldagem dos corpos de prova (3 amostras com chanfro em X e 3 com chanfro em V) e o *blank* (amostra que não foi soldada). Para a análise e tratamento dos dados será utilizado o Excel, Minitab e o modelo de cálculo estatístico Anova e teste de Tukey.

3.2.1.5 Análises e conclusões:

Ao obter o resultado gerado pela análise estatística dos corpos de prova, serão feitas as conclusões acerca das tensões residuais sobre a junta, provenientes do processo em função do tipo de chanfro e posição em relação ao centro da junta.

3.2.2 Equipamentos

3.2.2.1 Processo de Corte

Para a preparação das chapas de aço ABNT 1020, os cortes serão realizados pela máquina RONEMAK MRC-340 HVF com um motor principal de 3CV, ilustrada na Figura 33.



Figura 33: Serra de fita horizontal MRC-340 HVF
Fonte: Pesquisa direta, 2020

Por seguinte, será feito um segundo corte com a esmerilhadeira angular BT-AG 2350 Einhell (2350W e 180mm), ilustrada na Figura 34, para a preparação dos chanfros. Esse mesmo equipamento realizará um procedimento adicional para preparação das amostras para o ensaio de dureza, esmerilhando-as após o processo de soldagem.



Figura 34: Esmerilhadeira Einhell BT-AG.
Fonte: Pesquisa direta, 2020

3.2.2.2 Processo de soldagem

O processo de soldagem utilizado será o MIG/MAG a partir da máquina de solda POWERTEC LINCOLN ELETRIC 305C (trifásica e com uma faixa de corrente entre 25A à 300A). Nas amostras com chanfro V serão realizados 4 passes de solda e o com chanfro em X serão feitos 2 passes para cada lado, sendo que o ensaio de dureza se realizará na superfície do último passe. A Figura 35 ilustra o equipamento:



Figura 35: POWERTEC LINCOLN ELETRIC 305C.
Fonte: pesquisa direta, 2020

3.2.2.3 Ensaio de dureza

Para a obtenção dos dados de dureza Vickers, foi realizado um ensaio de dureza superficial pelo equipamento e microdurômetro da EmcoTest, modelo DuraScan10 do Laboratório de Metalografia e ensaios mecânicos do DECAT/UFOP (Ouro Preto). Sua capacidade de carga varia de 0,01kgf até 10kgf.

3.3 Variáveis e indicadores

Gerhardt *et al* (2009) define variáveis como sendo a presença ou ausência de um determinado fenômeno inserido em dada realidade. Já os indicadores, são ferramentas que comparam a situação atual com a desejada.

As variáveis e indicadores da pesquisa são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Variáveis e indicadores.

Variável	Indicadores
Elaboração das amostras	Padronização das amostras (quantidade e dimensões)
Processo de soldagem	MIG/MAG
Tipo de chanfro	X ou V
Tipo de junta	Junta de topo
Liga metálica	Aço ABNT 1020
Ensaio de Dureza	Microdureza Vickers
Modelo de cálculo estatístico	Anova e teste de Tukey
Análise de resultados	Análise dos dados obtidos da dureza da superfície do material

Fonte: Pesquisa direta, 2020

3.4 Instrumentos de coleta e tabulação de dados

Etapa da pesquisa onde ocorre o início da aplicação dos instrumentos elaborados e das técnicas selecionadas, a fim de efetuar a coleta de dados prevista. Os dados podem ser classificados em subgrupos e reunidos de modo que as hipóteses possam ser comprovadas ou refutadas (LAKATOS & MARCONI, 2013).

Eles serão tabulados e organizados através de tabelas, planilhas e gráficos feitos pelo software Excel 2020 e Minitab 18. Este possui vantagens para a realização dos cálculos estatísticos em conjunto com a boa visualização e tratamento de dados em comparação ao Excel.

A coleta de dados e criação de gráficos e tabela foram feitas através de:

- Material didático
- Ensaio experimental
- Análise de variância
- Microsoft Excel
- Microsoft Word
- Minitab

3.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os mecanismos de análise, ferramentas e materiais, que, de acordo com o que foi estudado, deverão atingir o objetivo proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Material

O material a ser utilizado nos corpos de prova é o aço ABNT 1020, composto por Ferro, Carbono, Silício e Manganês. Possui também outros elementos inerentes do processo de fabricação em percentuais controlados. Ele é vastamente empregado em equipamentos mecânicos, tais como: virabrequins, engrenagens, eixos, anéis de engrenagem, pinos guias e entre outros. Aços ABNT 1020 possuem boa soldabilidade, boa forjabilidade, pequena resistência mecânica e uma usinabilidade relativamente pobre.

Entre as condições de fornecimento, as barras utilizadas para estudo foram obtidas em formato de chapa após laminadas sem o acabamento mecânico. Conforme a especificação do material e ao desconsiderar os resíduos que fazem parte do processo de fabricação, espera-se que o aço adquirido seja composto de aproximadamente:

- Carbono: 0,18 a 0,23%
- Manganês: 0,30 a 0,60%
- Enxofre: 0,05%
- Fósforo: 0,014%
- Ferro: restante da composição

4.2 Cortes

As amostras apresentadas pela Figura 36 foram cortadas pela RONEMAK MRC-340 HVF e ficaram com as seguintes dimensões: 76,2mm (3”) x 12,7mm (1/2”) x 100mm. A Figura 37 é uma fotografia que expõe a quantidade de materiais, em suma, que foi necessária para a realização desse estudo.



Figura 36: Amostras antes da realização do processo de soldagem.
Fonte: pesquisa direta, 2020



Figura 37 – Total de materiais a serem trabalhados.
Fonte: Pesquisa direta (2020)

Utilizando a esmerilhadeira da Figura 34, o segundo corte preparou ambos os chanfros X e V com uma angulação de 60° conforme a Figura 38 (a) e Figura 38 (b). Frisa-se que as variáveis foram as mesmas, sendo que o *gap*, ou seja, “R”, foi de 1,5mm e o nariz “F” foi próximo de zero.

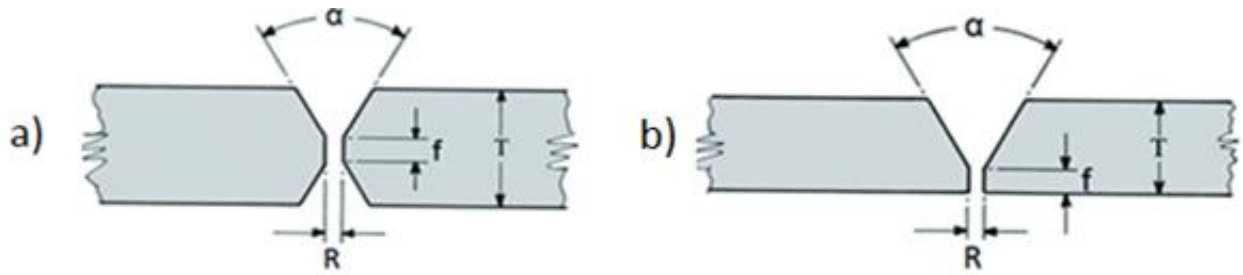


Figura 38: (a) chanfro em X ou duplo V (b) chanfro em V.
 Fonte: Gimenes *et al* (2018)

A partir de uma simples trigonometria utilizando a espessura e a angulação, ilustradas pela Figura 38, é possível obter a largura da ZF de cada caso (deve-se acrescentar o gap à largura). Dessa forma, foi encontrado o valor de 16,16 mm para a largura da junta com chanfro em V (Figura 38 – b) e 8,83mm para a com chanfro em X (Figura 38 – a). Elas também podem ser observadas nas Figuras 31 e 32, nas dimensões da região tracejada.

4.3 Processo de Soldagem MIG/MAG

Como indica a Tabela 2, que apresenta as especificações do processo de soldagem, utilizou-se o gás ONU 1956, composto por 20% de Dióxido de Carbono em Argônio e o eletrodo BME-C4, que é fabricado com um alto teor de Manganês e Silício.

Tabela 2 – Especificações do processo de soldagem realizado.

Tensão de Alimentação	220V
Corrente Média	120A
Voltagem Média	23V
Gás	ONU 1956
Eletrodo	BME-C4
Posição de Soldagem	Posição Plana
Diâmetro do Arame de Solda	1mm

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Para que as amostras não distorcessem devido o processo de soldagem, elas foram fixadas com uma morsa que, por consequência, acaba por favorecer o surgimento das tensões residuais.

Devido ao alto volume de material a ser depositado, principalmente no chanfro em V, foi feita a soldagem com multipasses. As amostras com chanfro em V receberam 4 passes e o Duplo V (X) recebeu 2 de cada lado, totalizando 4 aplicações de calor. O ensaio de dureza para as amostras com chanfro em X foi aplicado na face do último passe. As amostras soldadas são apresentadas pela Figura 39.



Figura 39: Amostras após o processo de soldagem
Fonte: Pesquisa própria (2021)

4.4 Ensaio de dureza

Para as amostras ficarem devidamente lixadas, planas e retirar a camada superficial de óxido, foi necessário cortar o excesso de solda e esmerilhá-las com a Esmerilhadeira Einhell BT-AG, ilustrada na Figura 34. Por seguinte, elas foram lixadas manualmente com as lixas d'água dos seguintes tamanhos: 80,100,220,400,600,1000,1200,1500; exatamente nessa ordem. Revezou-se o sentido dos movimentos em 90° para cada tamanho, sendo que apenas as 3 últimas foram lixadas com auxílio de água, ou seja, a úmido.

Por estar em contato direto com o ar, a superfície possui um maior gradiente de temperatura durante a fase transiente do processo de soldagem. Isso implica em maiores módulos de tensões residuais de soldagem, com natureza compressiva, se analisados de maneira semelhante à Figura 22, que esquematiza as tensões residuais em um material temperado. Portanto, o mais indicado é um ensaio de dureza superficial.

Um dos motivos pelo qual não foi feito o ensaio de dureza Rockwell é a ductilidade do Aço 1020, que poderia deformar o bastante para invalidar as leituras de

dureza. Outro motivo da preferência pelo ensaio Vickers é o fato dele não possuir à pré-carga, que retira parte das tensões residuais e analisa uma parte mais profunda do material.

Os dados obtidos pelo ensaio de microdureza foram salvos em uma planilha de Excel que está exposta na Tabela 3. A primeira coluna indica o número da amostra com o seu respectivo tipo de chanfro (X ou V). A segunda coluna em diante representam a distância ao centro da junta, sendo que a posição central é a coluna “solda”. As cores fazem referência ao material que foi ensaiado, ou seja, o azul (Solda) e laranja (Aço). Além dessas medidas de dureza, também foi realizado o ensaio no *blank*, que obteve os seguintes resultados de dureza em Vickers: 165, 170, 167 e 173. Por fim, a carga utilizada no ensaio foi de 0,5(kgf). Esses dados serão a base para os Gráficos 1,2,3,4,5,6 e 7.

Tabela 3 – Resultados de Dureza das amostras e do *blank*.

Amostra	28mm	21mm	14mm	7mm	Solda	7mm	14mm	21mm	28mm
1V	198	201	206	231	218	233	223	201	193
2V	199	195	175	191	201	204	176	170	161
3V	205	216	210	230	203	224	200	187	194
1X	164	158	177	189	234	217	162	160	158
2X	187	193	195	187	248	224	214	212	186
3X	185	197	201	226	237	227	210	204	187

Fonte: Pesquisa direta (2020).

Os primeiros gráficos a serem analisados serão os de efeitos principais, que inserem as médias das medidas de dureza (Vickers) em cada posição (milímetros). Os Gráficos 1 e Gráfico 2 apresentam os valores de dureza para as amostras com chanfro em V e X, respectivamente.

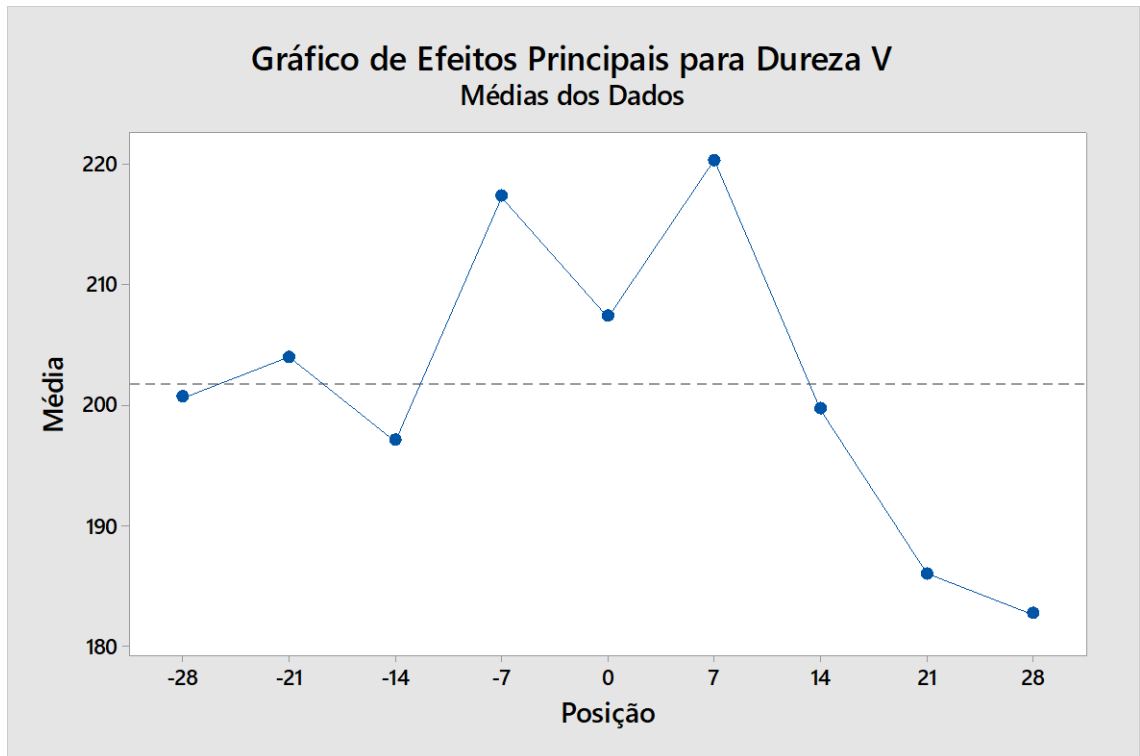


Gráfico 1: Gráfico de Efeitos Principais com valores de dureza da amostra com chanfro em V.
Fonte: Pesquisa direta (2020)

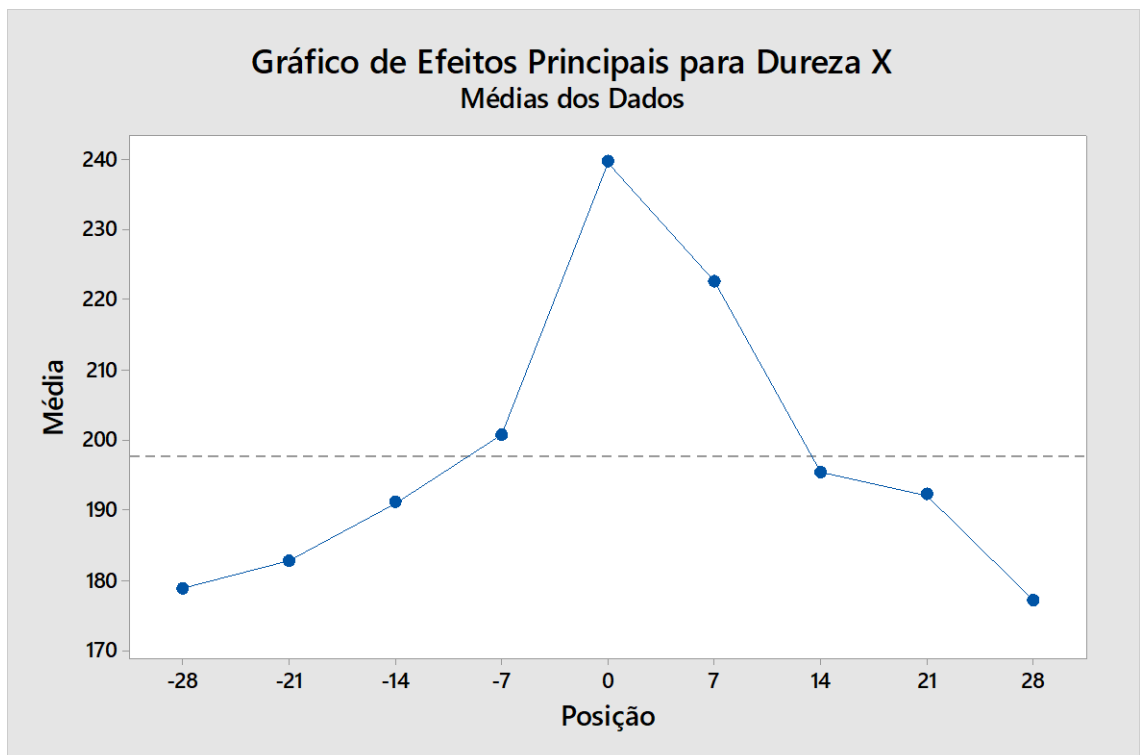


Gráfico 2: Gráfico de Efeitos Principais com valores de dureza da amostra com chanfro em X
Fonte: Pesquisa direta (2020)

Existem divergências significativas entre os dois lados em ambos os Gráficos 1 e

2. Elas podem ter ocorrido devido a alguns fatores, entre eles: não uniformidade dos

operadores (soldador e operador da máquina de dureza Vickers) e a própria variância, por conta do número pequeno de amostras por posição. Dessa forma, para uma melhor previsibilidade do processo, o próximo amostral foi considerado utilizando a posição (milímetros) em valor absoluto, o que fará com que cada uma tenha ao todo 6 dados de dureza e considere os erros devido àqueles fatores.

4.5 Análise Estatística

Para poder aplicar a ANOVA, antes é necessário determinar se os desvios padrões das populações são estatisticamente diferentes, sendo assim, faz-se um teste de igualdades de variâncias. O Anexo A, onde está inserido o teste, apresenta o resultado: $p > 0,05$, indicando que os desvios padrões não são diferentes para tal nível de significância ($\alpha = 0,05$).

4.5.1 Análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey

Inicialmente cria-se uma hipótese nula que as médias são iguais. Por outro lado, seja uma ou mais médias diferentes, parte-se para a hipótese alternativa.

Para uma melhor visualização dos gráficos, fez-se três análises de variância diferentes, sendo elas: dureza das amostras com chanfro em X pela posição e o *blank*, dureza das amostras com chanfro em V pela posição e o *blank*, e, por último, uma comparação da dureza entre os dois chanfros.

Dividiu-se em três devido ao Minitab limitar o gráfico de Intervalo de Confiança entre Médias a 10 fatores diferentes, que é uma ferramenta excelente para o entendimento do processo. Os resultados de cada ANOVA e Teste de Tukey realizado é apresentado no Anexo B (dureza do chanfro em X e *blank*), Anexo C (dureza do chanfro em V e *blank*) e Anexo D (dureza dos chanfros em V e X).

4.5.2 Boxplot

Os Gráficos 3 e 4 apresentam Boxplots, que comparam os resultados da dureza das amostras com chanfro em V e X com a dureza do *blank*, respectivamente. Em ambos, ao comparar a dureza da posição 7mm e o centro (indicado como solda no gráfico), verifica-se que em um dos gráficos ela é maior e a outra menor. Isso porque ao medir a dureza da posição 7mm, nas amostra com chanfro em V, atinge-se a extremidade da ZF, enquanto na de chanfro em X atinge aproximadamente uma distância de 2,58mm dessa extremidade.

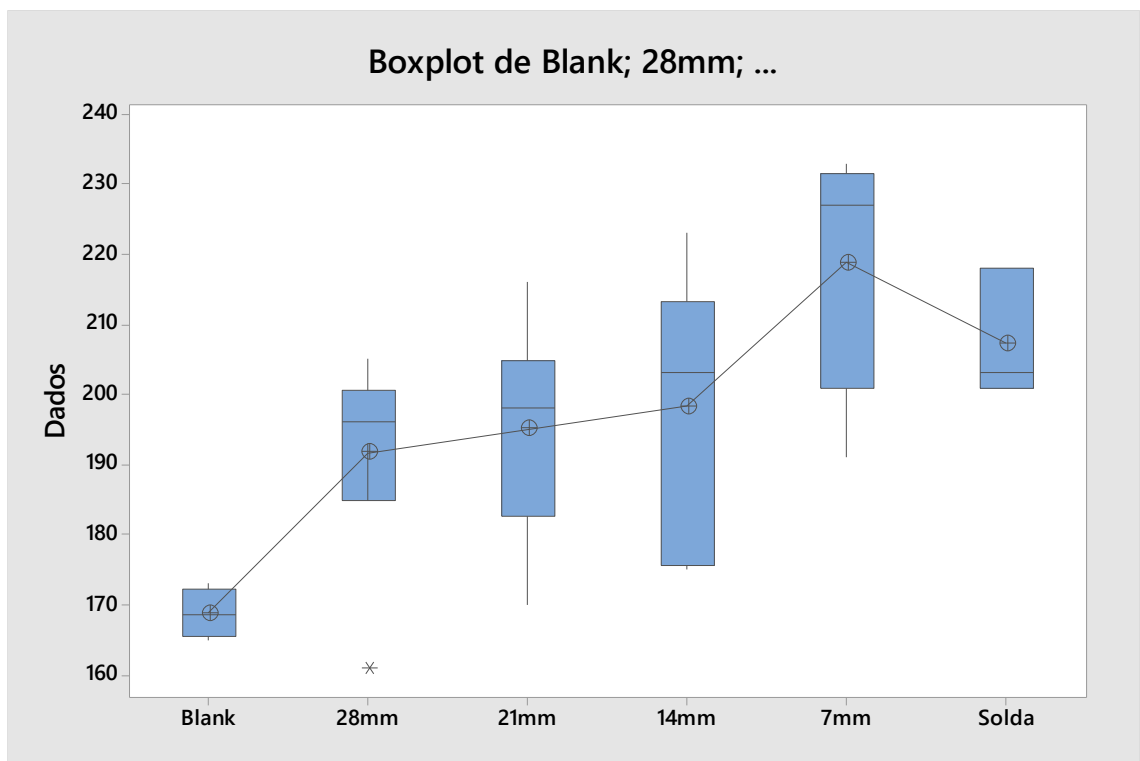


Gráfico 3: Gráfico de Boxplot das amostras com chanfro em V e o *blank*.
 Fonte: Pesquisa direta (2020)

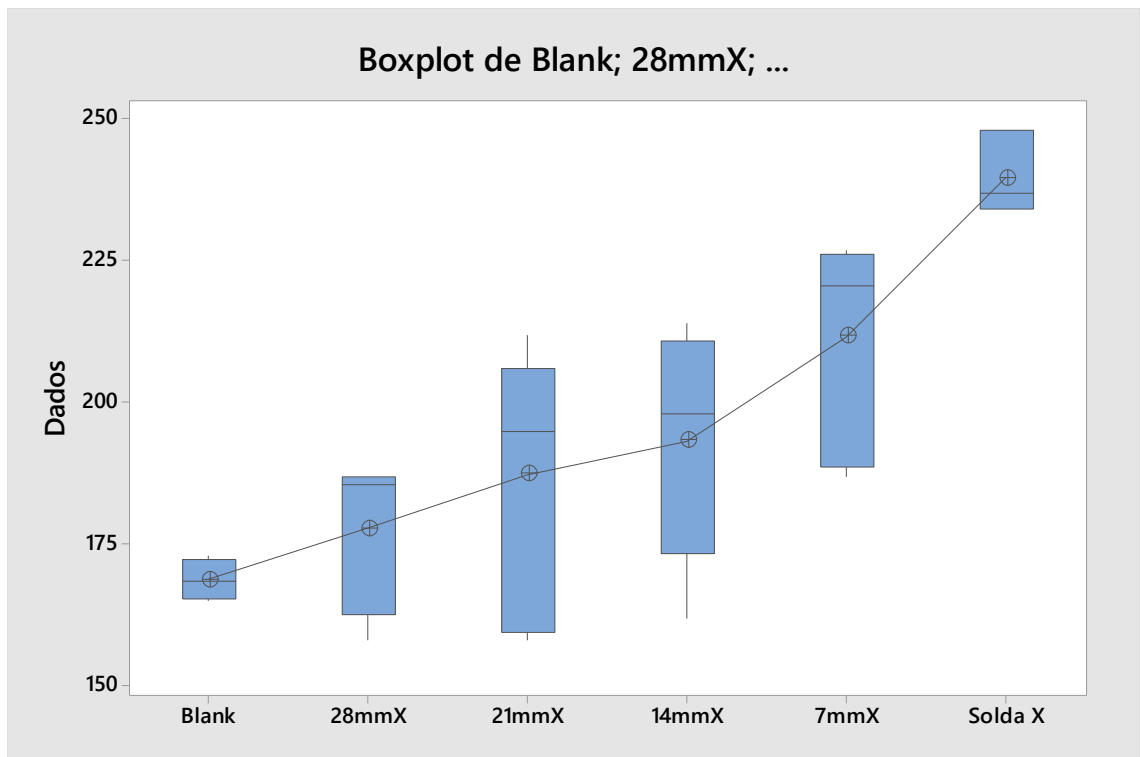


Gráfico 4: Gráfico de Boxplot das amostras com chanfro em X e o *blank*.
 Fonte: Pesquisa direta (2020)

Portanto, pelo fato dos valores da dureza na posição 7mm, no Gráfico 4, serem superiores ao valor do da solda é um indicativo de que as tensões residuais trativas da junta atingem seu pico exatamente no centro.

Subsequentemente, compara-se as medidas de dureza das posições referentes ao metal base (aço ABNT 1020) ou ZTA, onde claramente, à medida que a distância aumenta, a dureza se aproxima do *blank*. Ou seja, já que as durezas são maiores do que a do *blank*, existem indicativos que as tensões residuais são de natureza compressiva e mostram-se maiores nas posições mais próximas à solda.

Outra análise dos Gráficos 3 e 4 foi que houve um resíduo apenas no resultado da dureza no comprimento 28mm da amostra V (Gráfico3), isso aponta que fatores externos influenciaram nessa medida. Portanto, ela não foi considerada para o cálculo das médias na análise de variância (o próprio Minitab já a desconsidera no comando).

4.5.3 ICs Simultâneos de 95% de Tukey

A partir dos Testes de Tukey, obteve-se diferentes gráficos de ICs. Entre eles, o Gráfico 5 apresenta as comparações feitas das medidas de dureza das amostras com chanfro X com o *blank*. Por seguinte, o Gráfico 6 utiliza as medidas de dureza das amostras com Chanfro em V para comparar ao *blank*, enquanto o Gráfico 7 compara as durezas entre as amostras dos dois chanfros.

Como expõem os Gráficos 5 e 6, as comparações que os intervalos contêm o número zero (coordenada x) são aquelas que as médias correspondentes são significativamente diferentes. Em outras palavras, significa que o tratamento (posições e o processo de soldagem) foi significativo o suficiente para alterar o valor das medidas da dureza superficial.

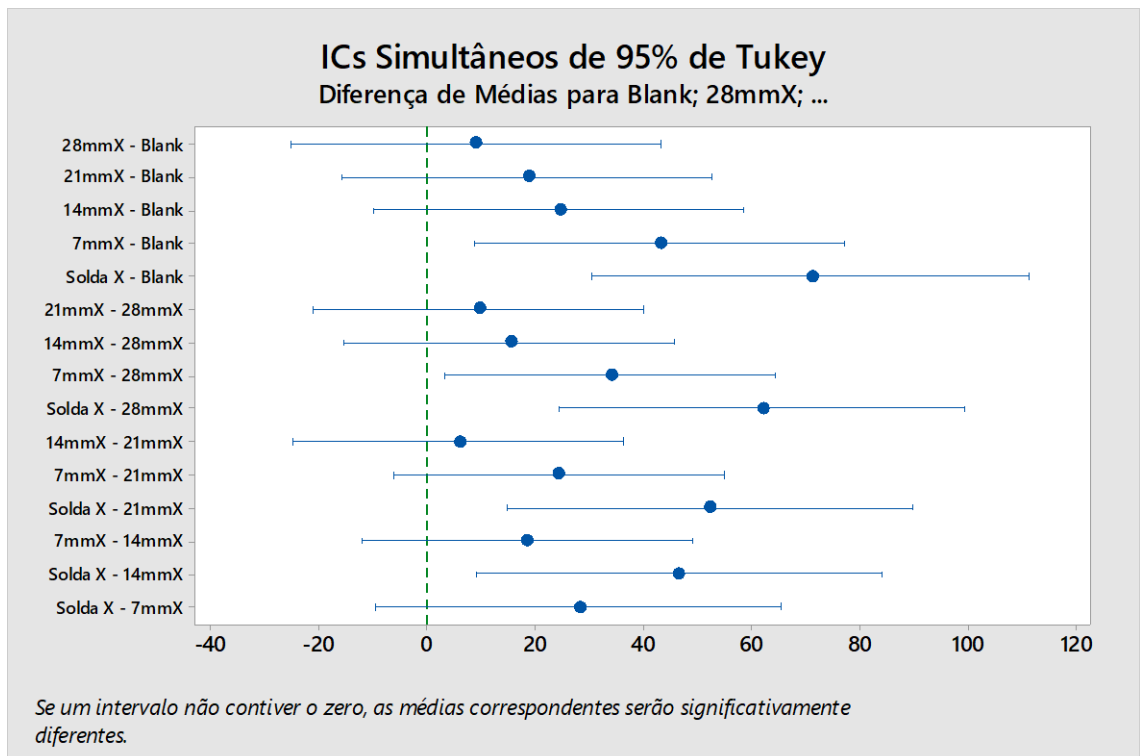


Gráfico 5: gráfico de Intervalo de Confiança entre Médias das durezas da amostras com chanfro em X e o *blank*.
Fonte: Pesquisa direta (2020)

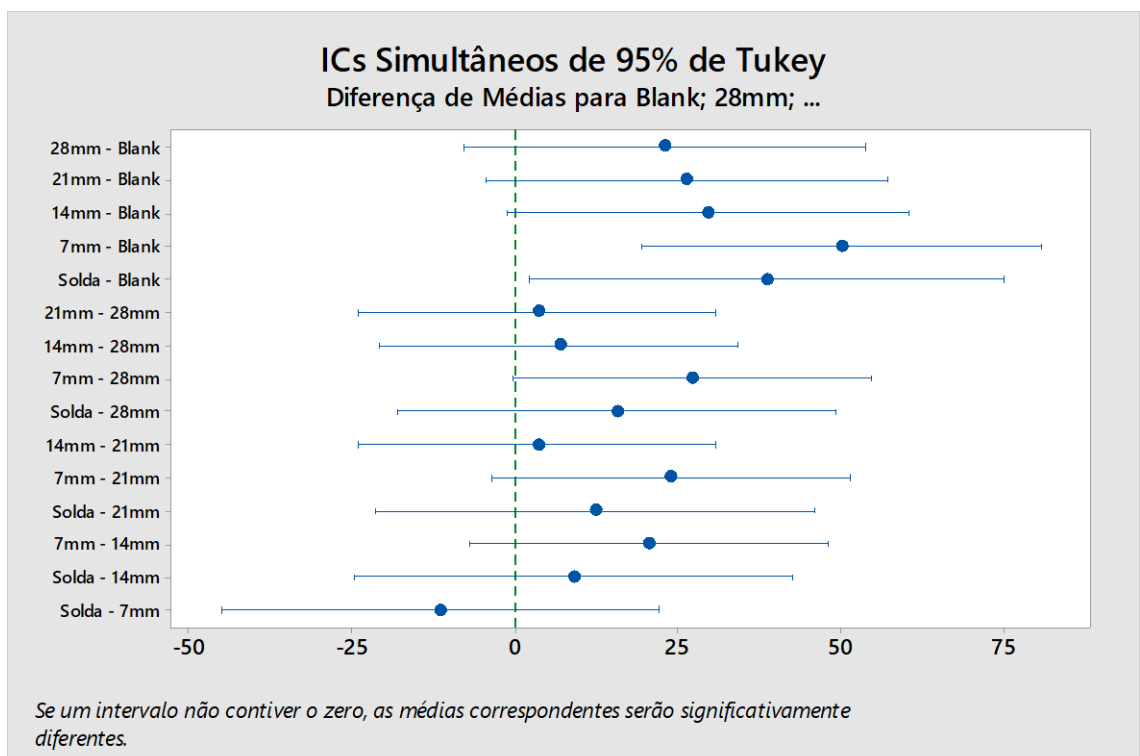


Gráfico 6: gráfico de Intervalo de Confiança entre Médias das durezas das amostras com chanfro em V e o *blank*.
Fonte: pesquisa direta (2020).

A partir do Gráfico 5, nota-se que as médias que diferem consideravelmente do blank são a da posição 7mm e da solda. Outras informações retiradas desse gráfico são que existem diferenças significativas entre a média da dureza do centro da solda e as outras posições, com exceção da posição 7mm. Além disso, a única média das durezas entre posições referentes ao metal base e ZTA que diverge é a da posição 7mm com a de 28mm. Já no Gráfico 6, apenas solda e 7mm possuem divergência de média, ambas com o *blank*.

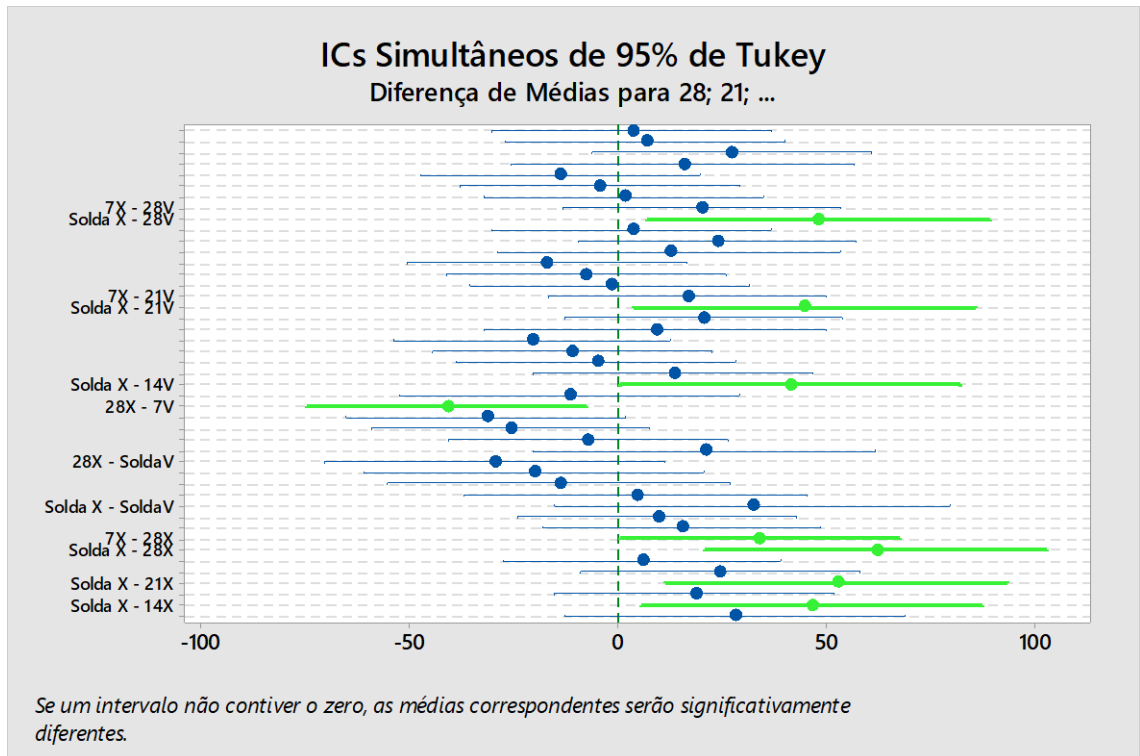


Gráfico 7: gráfico de Intervalo de Confiança entre Médias das durezas das amostras com chanfro em X e V.

Fonte: Pesquisa direta (2020)

A diferença principal entre o Gráfico 7 e os outros gráficos de ICs foi a quantidade de fatores escolhidos, de forma a necessitar de uma edição para melhor interpretação dos resultados. Todas as linhas em verde são comparações que não contém o zero no intervalo, assim suas médias diferem para o nível de significância de 95%. Já no eixo y, que indica os fatores a se comparar, foi retirada a maioria dos rótulos. No Anexo D, está incluso o gráfico “original”, com todos os rótulos e as linhas das mesmas cores.

Vale ressaltar que as 4 últimas linhas em verde já foram apresentadas pelos outros gráficos, sendo assim não serão comentadas na discussão dos resultados.

Por fim, o Gráfico 7 compara as amostras com chanfro em X com as do Chanfro em V desconsiderando o *blank*. Nele está exposto que, entre eles, as únicas médias da

dureza que diferem são as do centro da solda do chanfro em X com as posições 14mm e superiores do chanfro em V. Por outro lado, a posição de 7mm do chanfro em V (que possui a maior dureza do grupo de amostras em V) é a única que diverge com alguma posição do chanfro em X e ainda, com a mais distante 28mm.

Nele constata-se também que ao comparar as durezas que cada tipo de chanfro proporcionou sem relacioná-las ao blank, apesar da aparente diferença nas durezas, não houve evidências suficientes para que suas médias sejam significativamente diferentes. Isto significa que não é possível afirmar que o processo de soldagem com essa geometria de chanfro, nesse formato de multipasses e nessas especificações implica em resultados suficientemente relevantes na medida de dureza superficial entre as duas ZFs (Solda X, Solda V e 7mm). Portanto, é necessário que a comparação das amostras com o *blank* seja feita para poder correlacionar suas respectivas durezas com as tensões residuais provocadas pelo processo de soldagem.

Ainda assim, algumas informações podem ser retiradas dos gráficos de ICs em conjunto. A média das medidas de dureza da posição 7mm do chanfro em X diferiu de todas as posições acima de 21mm e o blank, portanto, a dureza dessa distância de 2,58mm do limite da Zona de Fusão (7mm menos 4.42mm, este sendo metade da largura da ZF) poderia ser considerada como uma ZTA nesse estudo estatístico.

4.6 Discussão de resultados

Após os cortes dos chanfros, a primeira observação a ser feita é que as larguras da ZF de cada chanfro são diferentes. E como os gráficos de dureza *versus* posição não indicam, na coordenada x, a distância de sua extremidade e sim do seu centro, a distância até essa margem para os fatores chanfro em X e chanfro em V diferem consideravelmente.

Por seguinte, no processo soldagem houve uma quantidade considerável de respingos que pode ter afetado as tensões residuais de algumas regiões, ou as próprias medidas de microdureza. Esta porque a análise de microdureza Vickers é superficial e existe a possibilidade do esmerilhamento do material não ter sido o suficiente para retirar completamente os resquícios dos efeitos de tais respingos na dureza, visto que ele impôs alterações térmicas na superfície.

		Posição - Chanfro em V				
Comparação	Solda	7mm	14mm	21mm	28mm	
a) Blank	X	X	-	-	-	
Solda						
7mm	-					

		Posição - Chanfro em X				
Comparação	Solda	7mm	14mm	21mm	28mm	
b) Blank	X	X	-	-	-	
Solda			X	X	X	
7mm	-				X	

Legenda	
X	-
Diverge	Igual

Figura 40: Comparação estatística de Tukey entre as médias das medidas de dureza. (a) amostras com chanfro em V (b) amostras com chanfro em X
 Fonte: pesquisa direta, 2020.

Devido ao material do cordão de solda possuir uma dureza maior do que o aço ABNT 1020, é natural seus valores de dureza divergirem do *blank*. Afirma-se esse ponto nas linhas “*blank*” da Figura 40. Portanto, não dá para retirar conclusões sobre qual tipo de chanfro é mais favorável para o surgimento de tensões residuais apenas com essa comparação. Porém, uma informação interessante é que a posição 7mm do chanfro em X (Figura 39 - b) diverge do *blank*. Então, o surgimento de tensões residuais somado ao tratamento térmico realizado em tal ponto é suficiente para que a dureza do Aço 1020 cresça de maneira estatisticamente relevante. Por outro lado, a posição 7mm do chanfro em V ainda indica a dureza do cordão de solda e portanto, não convém compará-la à dureza do *blank*.

Para uma melhor interpretação do resultado, agora ao analisar a Figura 39 (a), percebe-se que não há divergência nas médias ao comparar as posições solda e 7mm com as demais posições das amostras já soldadas (ou seja, desconsidera-se a linha do *blank*). De maneira contrária, existe tal divergência na Figura 39 (b). Sendo assim, a soldagem realizada nas amostras com a geometria de chanfro em V fez com que a propriedade de dureza fosse mais homogenia ao longo da junta em relação a dureza das amostras com chanfro em X, ou seja, nenhuma média de dureza entre as posições está distante o suficiente para ser considerada estatisticamente diferente.

Comparar apenas os dados das médias de dureza em cada posição entre os Boxplots (Gráfico 3 e 4) induz à uma conclusão de que as médias da dureza das amostras com o chanfro em V são maiores. Porém, ao comparar as durezas com posições iguais, de maneira a alterar apenas o tipo chanfro conforme o Gráfico 7 de ICs, deve-se

considerar suas médias como estatisticamente iguais, ou seja, elas não são maiores o suficiente para serem consideradas como tal.

Sendo assim, deve-se partir ao mesmo tempo para uma interpretação das comparações feitas em posições diversas. Percebe-se que enquanto a junta do chanfro em V tem caráter homogêneo, o valor das médias da dureza da solda do chanfro em X divergem do centro desde a posição 14mm adiante, sendo assim, ela é estatisticamente maior que as posições a partir dessa.

Isso ocorre devido a dois fatores: a dureza da solda está com um valor alto pois não há tensões residuais trativas como na dureza do chanfro em V e ao mesmo tempo, a média das durezas das posições do chanfro em V são maiores, o que indica que há presença de maiores tensões residuais compressivas.

Portanto, apenas a mudança do perfil do chanfro não trouxe alterações significantes o suficiente para afirmar que tal tratamento é relevante para a dureza em uma mesma posição comparando-o à outra geometria (comparação realizada entre as médias de dureza com as mesmas posições, por exemplo: 14mmX x 14mmV). Pode-se incluir que as comparações de cada chanfro realizadas com o *blank* apresentaram os mesmos resultados. Sendo assim, o tratamento (mudança do tipo de chanfro) também não trouxe alterações relevantes nesse aspecto.

Analogamente, no caso do tratamento realizado pela soldagem com chanfro em V, cujas médias de dureza da “Solda V” e “posição 7mm” divergem apenas do *blank*, há indícios de que o impacto do processo de soldagem entre as médias de dureza das posições analisadas fez com que suas médias fossem significativamente iguais. Isso mostra que houve uma boa homogeneidade da junta considerando tais posicionamentos. Em consideração à ZTA, como a posição 7 é um metal de solda, e a posição 14mm não diverge do *blank*, elas não podem ser consideradas como a mesma.

5 CONCLUSÕES

Considerando que tensões residuais compressivas são benéficas à resistência à trincas, chegou-se à conclusão de que as amostras com chanfro em V sofreram tensões residuais maiores, provavelmente devido a um maior aporte de calor (pois possui mais material depositado) e assim mostrou-se o chanfro mais favorável. Porém, com os dados obtidos não foi possível adquirir informações referentes à sua ZTA. Em contrapartida, no caso do chanfro em X, tal qual sua posição 7mm corresponde a aproximadamente 2,6mm de distância da extremidade da ZF, as tensões residuais se mostraram compressivas e relevantes em comparação ao *blank*, o que indica que essa distância pode pertencer à ZTA da junta.

Como as medidas de posição foram feitas visualmente, apesar de possuir o auxílio de uma mesma régua para todas as amostras e utilizar métodos pré-estabelecidos de medição, são inevitáveis erros de medição visuais, tais como: acuidade, descuidos e entre outros. Sendo assim, análises mais aprofundadas envolvendo uma função de posição não são indicadas, pois a precisão da distância ao centro pode não ser boa o suficiente para maiores conclusões.

Uma das dificuldades de interpretar a diferença entre as tensões residuais que as soldagens com cada chanfro proporcionaram foi o passo de 7mm, que em um caso o penetrador do ensaio de dureza mediu a extremidade da ZF e no outro da ZTA. Dessa forma, esse aspecto poderia ser corrigido ao calcular o ângulo de chanfro de maneira a deixar igual à largura das juntas.

5.1 Recomendações

A partir dos conhecimentos obtidos no estudo realizado, recomenda-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos;

- Estudo do efeito das tensões residuais provenientes da soldagem MIG/MAG na inspeção de solda feita a partir do ensaio de dobramento do Aço ABNT 1020;
- Estudo do surgimento de tensões residuais com variação do tipo de chanfro no processo de soldagem por eletrodo revestido em um aço ABNT 1020;
- Análise das tensões residuais com variação do volume de metal depositado pelo processo de soldagem MIG/MAG.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUSA, Diogo Antônio. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza**. Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del-Rei (MG), 2012

SOARES, Maria da Conceição Barbosa Vieira. **Influência das Tensões Residuais no Comportamento em Fadiga e Fratura de Ligas Metálicas**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear - IPEN/CNEN-SP. São Paulo, 1998

SILVA, Régis Henrique Gonçalves. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**. Florianópolis, 2005

COFINO, Rachel Cristina. **Análise das Tensões Residuais em uma Junta Soldada em Condição *Overmatch***. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2010

MAIA, Thiago de Menezes. **Análise das Tensões Residuais Geradas nos Processos de Soldagem MIG/MAG e Plasma**. Rio de Janeiro, 2015

GABRIEL, Matheus Henrique. **Análise de uma Junta de Topo Soldada pelo Processo MAG de Aço Carbono Sae 1020**. Guaratinguetá, 2016.

ESAB, **Apostila de Soldagem MIG/MAG**, 2005

ESAB. **Apostila de Eletrodo Revestido**, 2005

MISHCHENKO, Andrii. **Uma Visão Holística da Geração de Tensões Residuais em Soldagem a Arco e da Medição por Difração de Raio X**. Uberlândia (MG), 2018

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandr. **Ensaio dos Materiais 2ª Edição**. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2012

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V. **Introdução ao Processo de Soldagem**. Belo Horizonte (MG), 2000

MARQUES, P. V. **Tecnologia da Soldagem**. ESAB/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1991

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de Metodologia Científica 5ª edição**. São Paulo (SP), 2003

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social 6ª Edição**. Editora Atlas. São Paulo (SP), 2008.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo Jose; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia. 3ª edição Atualizada**. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2009

BATISTA, Higor Jonas. **Avaliação da Microestrutura E da Resistência à Corrosão na Soldagem Multipasse do Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750 pelo Processo MIG/MAG**. FORTALEZA, 2012.

BOWER, Keith M. *Analysis of Variance (ANOVA) Using Minitab. M.S., Technical Training Specialist, Minitab Inc. This article was originally published in the February 2000 issue of Scientific Computing and Instrumentation*).

URTADO, Edson; GIMENES, Luiz; GIMENES, Gustavo. **Projeto e Soldagem de Estruturas de Chassi Automotivo para Processo GMAW (MIG/MAG)**. 2018

CALLISTER, Willian D. **Ciência e Engenharia de Materiais, Quinta Edição**. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2002.

RAMOS, Dayvison Magalhães. **Análise da Tensão Residual Gerada no Processo de Soldagem MIG e por Eletrodo Revestido em Armaduras de Aço CA50S**. Monografia (graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto - MG, 2019.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa 4ª Edição**. Editora Atlas S.A. São Paulo, 2002

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. 5. ed**. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1982.

PAIVA, Vitor Eboli Lopes. **Simulação de Tensões Residuais de Soldagem e seu Alívio por Teste Hidrostático**. Dissertação de Mestrado do Curso de Engenharia Mecânica, Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2015.

FARIAS, Jesualdo Pereira. **Influência da Composição do Revestimento na Estabilidade e Transferência de Metal em Eletrodos Básicos**. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 1985

OKUMURA, Toshie; TANIGUSHI, Célio; **Engenharia da Soldagem e Aplicações**. LTC, Rio de Janeiro, 1982

SANTOS, Ricardo D. **Influência da Força pós Dobra e da Geometria da Ferramenta no Retorno Elástico em Processos de Dobramento de Aços de Alta Resistência**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

FILHO, Antenor L. **Análise da Influência dos Parâmetros do Processo de Soldagem com Eletrodos Revestidos na Estabilidade do Arco e Características Geométricas do Cordão**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2005.

RIBEIRO, Vladimir Soler. **Revisão dos Principais Aspectos Relacionados à Soldagem Dissimilar de Aço Carbono e Aço Inoxidável Austenítico com Adição de Ligas de Níquel**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

KEIM, E.; Schmidt, J.; Fricke, S. *Numerical weld modeling — a method for calculating weld-induced residual stresses*. Erlagen, Germany, 2000.

BERTOLDI, Evandro. **Análise de Ensaios de Dureza Brinel e Rockwell em Corpo de Prova**. Horizontina (RS), 2014.

OLIVEIRA, Andréia Fróes Galuci. **Testes Estatísticos Para Comparação de Médias**. Revista Eletrônica Nutritime, v.5, n° 6, p.777-788 Novembro/Dezembro 2008.

NUNES, Bruna Borges. **Diagnóstico em Análise de Experimentos**. Instituto de Ciências Exatas da Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

NETO Walter Pomarico. **Desenvolvimento de Padrão Secundário de Densidade de Coque para Fábrica De Ânodo**. Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas (MG), 2014.

SILVA, Russilano Costa. **Testes de Comparação de Médias**. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2010.

ANNA, Leandro Bitti Santa; NACARI, Luis Fernando. **Desenvolvimento de Juntas Soldadas de Aço Carbono e API Obtidas pelo Processo Arco Submerso**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2006.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte (MG), 2012.

FERREIRA, Ana Carolina Maia. **Estudo de Soldas Obtidas pelo Processo GMAW Empregando o Modo de Transferência Metálica por *Spray* com Misturas de Proteção Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆**. Universidade Estadual Do Norte Fluminense. Campos Dos Goytacazes (RJ), 2018.

RESENDE, André Alves. **Estudo de Características Operacionais do Processo “Plasma-MIG” com Arcos Concêntricos**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia (MG), 2013.

ROSA, André Luiz Poubel Bastos; ALMEDA, Camila Moura. **Identificação de Regiões Otimizadas Quanto aos Parâmetros de Soldagem Através do Mapa de Transferência Metálica**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória (ES), 2014.

GROETELAARS, Peter Jan. **Influencia da Variação de Parâmetros de Soldagem Sobre a Transferência Metálica e Perfil no Cordão no Processo MIG/MAG Duplo-Arame**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2005.

CAVALCANTI, Carlos André Nobre. **Comparação entre o Comportamento de Eletrodos Revestidos Utilizando Dispositivo de Soldagem por Gravidade e com Controle Automático do Comprimento do Arco Elétrico**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), 2011.

PIGOZZO, Ivan Olszanski. **Soldagem TIG Orbital: Otimização de Equipamentos e Prospecções Tecnológicas para Procedimentos de Passe de Raiz**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis (SC), 2015.

COSTA, Jacilene de Jesus *et all*. **Influência da Geometria do Chanfro nas Propriedades Mecânicas de um Aço Estrutural Astm A36 Soldado com o Processo MIG/MAG**. Instituto Federal do Maranhão/ Campus Monte Castelo. Fortaleza (CE), 2016.

MODENESI, Paulo J *et all*. **Análise Numérica do Ensaio de Indentação em Materiais com Comportamento Frágil**. Revista Matéria, v. 15, n. 1, pp. 056 – 069, 2010.

RODRIGUES, Luciano Monteiro *et all*. **Estudo da Microestrutura e da Microdureza dos Aços 1020 e 1060**. Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Faculdade de Tecnologia Campus Regional de Resende – UERJ. Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais - Dezembro/2014.

MARINO, Anderson Luis. **Comparação entre os Processos de Soldagem MIG/MAG Eletrodo Maciço e Alma Metálica**. Universidade Luterana Do Brasil. Canoas, 2010.

VAZ, Cláudio Turani. **Influência do Polímero Utilizado como Aglomerante em Eletrodos Revestidos Básicos Sobre a Formação de Ferrita Acicular no Metal de Solda**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

KOBAYASHI Yukio. **Influência da Composição do Revestimento de Eletrodos Básicos Sobre as Características Econômicas e Operacionais**. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 1987.

LIMA, Elpidio Moura Faleiros. **Análise de Falhas em Processo de Soldagem com Arame Tubular na Indústria Naval Utilizando FMEA**. Universidade Federal de Santa Catarina / Campus Joinville. Joinville, 2015.

SANTOS, Rozenir Rosário. **Formação de Mordeduras em Processos de Soldagem MIG MAG**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

NOVAIS, Paulo Rogério Santos. **Avaliação das Principais Descontinuidades Encontradas nas Juntas Soldadas, Causas e Possíveis Soluções**. CONSTRUMETAL – Congresso Latino-Americano Da Construção Metálica. São Paulo, 2010.

FIGUEIREDO, Kléber Mendes. **Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de Alumínio**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia (MG), 2000.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Processo de Soldagem TIG – GTAW**. Universidade de Minas Gerais. Belo Horizonte (MG), 2000.

MODENESI, Paulo J. **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte (MG), 2001.

BEZERRA, Alexandre Campos. **Simulação Numérica da Soldagem com Aplicação à Caracterização do Comportamento Dinâmico de Estruturas Soldadas**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia (MG), 2006.

SILVA, Edna Lúcia; MENEZES, Estera Muskat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e SEAD/UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

FBTS. **Curso de Inspetor de Soldagem Nível 1**. Petrus Consultoria em Controle da Qualidade. Rio de Janeiro (RJ), 2009.

FISCHER, A. **Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW - Arco Pulsado**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

ANEXOS

Anexo A: Teste de igualdade de variâncias

Teste de igualdade de variâncias: 28mm; 21mm; 14mm; ... mX; Solda X

Método

Hipótese nula	Todas as variâncias são iguais
Hipótese alternativa	No mínimo uma variância é diferente
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Intervalos de 95% de Confiança Bonferroni para os Desvios Padrão

Amostra	N	DesvPad	IC
28mm	6	15,6162	(1,25107; 3,69832E+02)
21mm	6	15,5048	(3,12323; 1,46038E+02)
14mm	6	19,2319	(5,27782; 1,32961E+02)
7mm	6	17,2907	(1,71987; 3,29808E+02)
Solda	3	9,2916	(0,00000; 2,87580E+11)
Blank	4	3,5000	(0,24941; 1,69013E+02)
28mmX	6	13,1972	(1,02240; 3,23204E+02)
21mmX	6	22,8881	(4,64577; 2,13943E+02)
14mmX	6	20,0740	(4,28691; 1,78344E+02)
7mmX	6	18,6726	(2,36060; 2,80235E+02)
Solda X	3	7,3711	(0,00000; 2,28140E+11)

Nível de confiança individual = 99,5455%

Testes

Método	Estatística de teste	Valor-p
Comparações múltiplas	—	0,459
Levene	0,66	0,751

Anexo B: ANOVA e Tukey para amostra com chanfro em X

ANOVA com um fator: Blank; 28mmX; 21mmX; 14mmX; ... X; Solda X

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
---------------	----------------------------

Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais

Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	6	Blank; 28mmX; 21mmX; 14mmX; 7mmX; Solda X

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	12518	2503,7	8,47	0,000
Erro	25	7394	295,8		
Total	30	19912			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
17,1974	62,87%	55,44%	46,03%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Blank	4	168,75	3,50	(151,04; 186,46)
28mmX	6	177,83	13,20	(163,37; 192,29)
21mmX	6	187,33	22,89	(172,87; 201,79)
14mmX	6	193,17	20,07	(178,71; 207,63)
7mmX	6	211,67	18,67	(197,21; 226,13)
Solda X	3	239,67	7,37	(219,22; 260,12)

DesvPad Combinado = 17,1974

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento
Solda X	3	239,67	A
7mmX	6	211,67	A B
14mmX	6	193,17	B C
21mmX	6	187,33	B C
28mmX	6	177,83	C
Blank	4	168,75	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
28mmX - Blank	9,1	11,1	(-25,1; 43,3)	0,82	0,961
21mmX - Blank	18,6	11,1	(-15,6; 52,8)	1,67	0,560
14mmX - Blank	24,4	11,1	(-9,8; 58,6)	2,20	0,273
7mmX - Blank	42,9	11,1	(8,7; 77,1)	3,87	0,008
Solda X - Blank	70,9	13,1	(30,4; 111,4)	5,40	0,000
21mmX - 28mmX	9,50	9,93	(-21,11; 40,11)	0,96	0,927
14mmX - 28mmX	15,33	9,93	(-15,28; 45,94)	1,54	0,640
7mmX - 28mmX	33,83	9,93	(3,22; 64,44)	3,41	0,024
Solda X - 28mmX	61,8	12,2	(24,3; 99,3)	5,08	0,000
14mmX - 21mmX	5,83	9,93	(-24,78; 36,44)	0,59	0,991
7mmX - 21mmX	24,33	9,93	(-6,28; 54,94)	2,45	0,178
Solda X - 21mmX	52,3	12,2	(14,8; 89,8)	4,30	0,003
7mmX - 14mmX	18,50	9,93	(-12,11; 49,11)	1,86	0,446
Solda X - 14mmX	46,5	12,2	(9,0; 84,0)	3,82	0,009
Solda X - 7mmX	28,0	12,2	(-9,5; 65,5)	2,30	0,230

Nível de confiança individual = 99,51%

Anexo C: ANOVA e Tukey para amostra com chanfro em V

ANOVA com um fator: Blank; 28mm; 21mm; 14mm; 7mm; Solda

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	6	Blank; 28mm; 21mm; 14mm; 7mm; Solda

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	6573	1314,5	5,50	0,002
Erro	25	5975	239,0		

Total 30 12548

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
15,4595	52,38%	42,86%	30,22%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Blank	4	168,75	3,50	(152,83; 184,67)
28mm	6	191,67	15,62	(178,67; 204,67)
21mm	6	195,00	15,50	(182,00; 208,00)
14mm	6	198,33	19,23	(185,33; 211,33)
7mm	6	218,83	17,29	(205,83; 231,83)
Solda	3	207,33	9,29	(188,95; 225,72)

DesvPad Combinado = 15,4595

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento
7mm	6	218,83	A
Solda	3	207,33	A
14mm	6	198,33	A B
21mm	6	195,00	A B
28mm	6	191,67	A B
Blank	4	168,75	B

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
28mm - Blank	22,92	9,98	(-7,85; 53,68)	2,30	0,233
21mm - Blank	26,25	9,98	(-4,52; 57,02)	2,63	0,127
14mm - Blank	29,58	9,98	(-1,18; 60,35)	2,96	0,064
7mm - Blank	50,08	9,98	(19,32; 80,85)	5,02	0,000
Solda - Blank	38,6	11,8	(2,2; 75,0)	3,27	0,033
21mm - 28mm	3,33	8,93	(-24,18; 30,85)	0,37	0,999
14mm - 28mm	6,67	8,93	(-20,85; 34,18)	0,75	0,974
7mm - 28mm	27,17	8,93	(-0,35; 54,68)	3,04	0,054

Solda - 28mm	15,7	10,9	(-18,0; 49,4)	1,43	0,707
14mm - 21mm	3,33	8,93	(-24,18; 30,85)	0,37	0,999
7mm - 21mm	23,83	8,93	(-3,68; 51,35)	2,67	0,117
Solda - 21mm	12,3	10,9	(-21,4; 46,0)	1,13	0,865
7mm - 14mm	20,50	8,93	(-7,02; 48,02)	2,30	0,233
Solda - 14mm	9,0	10,9	(-24,7; 42,7)	0,82	0,960
Solda - 7mm	-11,5	10,9	(-45,2; 22,2)	-1,05	0,895

Nível de confiança individual = 99,51%

Anexo D – Chanfro em X e chanfro em V

ANOVA com um fator: 28; 21; 14; 7; Solda; 28X; 21X; 14X; 7X; Solda X

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	10	28; 21; 14; 7; Solda; 28X; 21X; 14X; 7X; Solda X

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	9	12596	1399,6	4,63	0,000
Erro	44	13295	302,2		
Total	53	25891			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
17,3828	48,65%	38,15%	25,18%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
28	6	191,67	15,62	(177,36; 205,97)
21	6	195,00	15,50	(180,70; 209,30)
14	6	198,33	19,23	(184,03; 212,64)
7	6	218,83	17,29	(204,53; 233,14)

Solda	3	207,33	9,29	(187,11; 227,56)
28X	6	177,83	13,20	(163,53; 192,14)
21X	6	187,33	22,89	(173,03; 201,64)
14X	6	193,17	20,07	(178,86; 207,47)
7X	6	211,67	18,67	(197,36; 225,97)
Solda X	3	239,67	7,37	(219,44; 259,89)

DesvPad Combinado = 17,3828

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento		
Solda X	3	239,67	A		
7	6	218,83	A	B	
7X	6	211,67	A	B	
Solda	3	207,33	A	B	C
14	6	198,33		B	C
21	6	195,00		B	C
14X	6	193,17		B	C
28	6	191,67		B	C
21X	6	187,33		B	C
28X	6	177,83			C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
21 - 28	3,3	10,0	(-30,1; 36,8)	0,33	1,000
14 - 28	6,7	10,0	(-26,8; 40,1)	0,66	1,000
7 - 28	27,2	10,0	(-6,3; 60,6)	2,71	0,203
Solda - 28	15,7	12,3	(-25,3; 56,6)	1,27	0,954
28X - 28	-13,8	10,0	(-47,3; 19,6)	-1,38	0,927
21X - 28	-4,3	10,0	(-37,8; 29,1)	-0,43	1,000
14X - 28	1,5	10,0	(-31,9; 34,9)	0,15	1,000
7X - 28	20,0	10,0	(-13,4; 53,4)	1,99	0,608
Solda X - 28	48,0	12,3	(7,1; 88,9)	3,91	0,011
14 - 21	3,3	10,0	(-30,1; 36,8)	0,33	1,000

7 - 21	23,8	10,0	(-9,6; 57,3)	2,37	0,365
Solda - 21	12,3	12,3	(-28,6; 53,3)	1,00	0,991
28X - 21	-17,2	10,0	(-50,6; 16,3)	-1,71	0,784
21X - 21	-7,7	10,0	(-41,1; 25,8)	-0,76	0,999
14X - 21	-1,8	10,0	(-35,3; 31,6)	-0,18	1,000
7X - 21	16,7	10,0	(-16,8; 50,1)	1,66	0,811
Solda X - 21	44,7	12,3	(3,7; 85,6)	3,63	0,023
7 - 14	20,5	10,0	(-12,9; 53,9)	2,04	0,575
Solda - 14	9,0	12,3	(-31,9; 49,9)	0,73	0,999
28X - 14	-20,5	10,0	(-53,9; 12,9)	-2,04	0,575
21X - 14	-11,0	10,0	(-44,4; 22,4)	-1,10	0,983
14X - 14	-5,2	10,0	(-38,6; 28,3)	-0,51	1,000
7X - 14	13,3	10,0	(-20,1; 46,8)	1,33	0,941
Solda X - 14	41,3	12,3	(0,4; 82,3)	3,36	0,046
Solda - 7	-11,5	12,3	(-52,4; 29,4)	-0,94	0,994
28X - 7	-41,0	10,0	(-74,4; -7,6)	-4,09	0,006
21X - 7	-31,5	10,0	(-64,9; 1,9)	-3,14	0,080
14X - 7	-25,7	10,0	(-59,1; 7,8)	-2,56	0,268
7X - 7	-7,2	10,0	(-40,6; 26,3)	-0,71	0,999
Solda X - 7	20,8	12,3	(-20,1; 61,8)	1,69	0,792
28X - Solda	-29,5	12,3	(-70,4; 11,4)	-2,40	0,351
21X - Solda	-20,0	12,3	(-60,9; 20,9)	-1,63	0,828
14X - Solda	-14,2	12,3	(-55,1; 26,8)	-1,15	0,976
7X - Solda	4,3	12,3	(-36,6; 45,3)	0,35	1,000
Solda X - Solda	32,3	14,2	(-14,9; 79,6)	2,28	0,423
21X - 28X	9,5	10,0	(-23,9; 42,9)	0,95	0,994
14X - 28X	15,3	10,0	(-18,1; 48,8)	1,53	0,874
7X - 28X	33,8	10,0	(0,4; 67,3)	3,37	0,045
Solda X - 28X	61,8	12,3	(20,9; 102,8)	5,03	0,000
14X - 21X	5,8	10,0	(-27,6; 39,3)	0,58	1,000
7X - 21X	24,3	10,0	(-9,1; 57,8)	2,42	0,337
Solda X - 21X	52,3	12,3	(11,4; 93,3)	4,26	0,004
7X - 14X	18,5	10,0	(-14,9; 51,9)	1,84	0,705
Solda X - 14X	46,5	12,3	(5,6; 87,4)	3,78	0,015
Solda X - 7X	28,0	12,3	(-12,9; 68,9)	2,28	0,423

Nível de confiança individual = 99,82%

ICs Simultâneos de 95% de Tukey

