

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Max Amorim Brum

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE
TEMPERATURA SOBRE A DUCTILIDADE EM CORDÕES DE
SOLDA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE IMPACTO.**

Cachoeira do Sul, RS
2019

Max Amorim Brum

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA SOBRE A
DUCTILIDADE EM CORDÕES DE SOLDA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
IMPACTO**

Trabalho de conclusão de curso II, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**

Orientador: Prof. MSc. Anderson Dal Molin

Cachoeira do Sul, RS
2019

Ficha Catalográfica

Universidade Federal de Santa Maria
Campus Cachoeira do Sul | UFSM-CS
Biblioteca Setorial de Cachoeira do Sul

Bibliotecário-Documentalista Carlos Eduardo Gianetti - CRB-10/2485

B893a Brum, Max Amorim, 1991-

Avaliação da influência da variação de temperatura sobre a ductilidade em cordões de solda através de ensaios de impacto / Max Amorim Brum. - Cachoeira do Sul, RS : [s.n.], 2019.

Orientador: Anderson Dal Molin.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul.

47 p. ; il.

1. Soldagem 2. Manufatura 3. Metalografia 4. Baixa temperatura 5. Ensaios de impacto 6. Engenharia Mecânica I. Dal Molin, Anderson, 1975- II. Universidade Federal de Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul III. Título.

©2019

Todos os direitos autorais reservados a Max Amorim Brum. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte

Endereço: Rua 3 de outubro, 877, Bairro Centro, Jaguarão, RS. CEP: 96300-000

Fone: (0xx)53 9 8432 8846; E-mail: maxbrum1991@gmail.com

Max Amorim Brum

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA SOBRE A
DUCTILIDADE EM CORDÕES DE SOLDA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
IMPACTO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Aprovado em 05 de dezembro de 2019

Prof. MSc. Anderson Dal Molin (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Cristiano Frandalozo Maidana (UFSM)

Prof. Dr. Gustavo Roberto Ramos (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Leila, que fez o possível e o impossível para me manter dentro da universidade, mesmo com os imprevistos que surgiram ao longo do caminho;

A minha avó, Nílvia, que também colaborou com a minha caminhada;

A minha namorada, Priscilla, que sempre me apoiou e incentivou diante das dificuldades;

Aos meus irmãos, Luiz Inácio e Raí, que também estiveram envolvidos no processo;

Ao meu padrasto, Celso Batalha, que, juntamente com minha mãe, se manteve firme durante todo o tempo e não mediu esforços para me ajudar a chegar até aqui;

Ao meu orientador, Professor Anderson Dal Molin, que me auxiliou durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho;

A empresa Screw Indústria Metalmeccânica EIRELI (Cachoeira do Sul - RS) pelos serviços prestados na produção dos corpos de prova;

E ao Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LSTC) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelos serviços prestados.

A todos, o meu muito obrigado!

RESUMO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA SOBRE A DUCTILIDADE EM CORDÕES DE SOLDA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE IMPACTO

AUTOR: Max Amorim Brum

ORIENTADOR: Prof. MSc. Anderson Dal Molin

Um dos processos de manufatura mais utilizados nas indústrias, atualmente, é o de soldagem. Através dele fabricam-se produtos e estruturas metálicas que, dependendo da sua aplicação, podem enfrentar condições bem distintas (variações de temperaturas, pressão, umidade, etc.) podendo resultar em modificações nas suas características físicas, químicas e mecânicas. Com isso, nesse trabalho foram avaliados os efeitos das baixas temperaturas em cordões de soldas através de ensaios de impacto. Os perfis adotados para criação dos espécimes foram fabricados a partir da união de chapas do metal-base (aço ASTM A36) na posição plana, através do processo MAG (*Metal Active Gas*) automático com proteção gasosa de argônio (75%) + CO₂ (25%) e vazão do gás de 16 l/min. Foram utilizados os arames maciços AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G, ambos com diâmetro 1,2 mm e empregados individualmente. Para cada espécime foram feitos ensaios na temperatura ambiente (26°C) e a -25°C. Observou-se que, em temperatura ambiente, ambas as amostras apresentaram comportamento dúctil, com deformações plásticas significativas nos cordões de solda. Já nos testes com os espécimes resfriados houve uma mudança para um comportamento frágil, onde ocorreram o surgimento de trincas nas zonas afetadas pelo calor (ZAC) e deformações plásticas menos acentuadas. Contudo, os espécimes resfriados apresentaram maior absorção de energia, principalmente os soldados com o arame ER70S-6 (menor resistência mecânica), em comparação com os testados em temperatura ambiente, o que pode significar um comportamento mais desejável dos aços considerados macios (aços com até 0,02% de carbono) em temperaturas mais baixas.

Palavras-chave: Soldagem. Manufatura. Metalografia. Baixa Temperatura. Ensaios de impacto.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE VARIATION ON DUCTILITY OF WELD BEADS SUBMITTED TO IMPACT TESTS

AUTHOR: Max Amorim Brum
ADVISOR: Prof. MSc. Anderson Dal Molin

One of the most widely used manufacturing processes in the industry today is welding. Through it, metal products and structures are manufactured that, depending on their application, may face very different conditions (variations in temperature, pressure, humidity, etc.) and may result in changes in their physical, chemical and mechanical characteristics. Thus, in this work the effects of low temperatures on weld beads were evaluated through impact tests. The profiles used to create the specimens to be tested were fabricated from the union of sheets of the base metal (ASTM A36 steel) in the planar position, by means of the automatic MAG process, using gaseous protection based on argon (75%) + CO₂ (25%) and gas flow rate of 16 l/min. The solid wires used were AWS ER70S-6 and AWS ER110S-G, both with 1,2 mm diameter and individually employed. For each specimen tests were performed at room temperature (26 °C) and at -25 °C. At room temperature, both samples showed ductile behavior, with significant plastic deformations in the weld beads. In the tests with the cooled specimens, however, there was a change to a fragile behavior, where there was the appearance of cracks in the heat affected zones (ZAC) and less severe plastic deformations. However, the cooled specimens showed higher energy absorption, especially those welded with the ER70S-6 wire (lower mechanical strength), compared to those tested at room temperature, which may mean a more desirable behavior of soft steels (steels with up to 0.02% carbon) at lower temperatures.

Keywords: Welding. Manufacturing. Metallography. Low Temperature. Impact tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento do número de processos de soldagem ao longo do tempo.....	15
Figura 2 - Esquema sobre o processo de soldagem MIG/MAG.....	17
Figura 3 - Equipamentos envolvidos nos processos de soldagem MIG/MAG manual.....	18
Figura 4 - Tocha seca utilizada nos processos de soldagem MIG/MAG.	19
Figura 5 - Equipamento de soldagem MIG/MAG automático.	19
Figura 6 - Distância entre o bico de contato e a peça (DBCP).....	20
Figura 7 - (A) Transferência por curto-circuito; (B) Transferência globular; (C) Transferência por pulverização.	22
Figura 8 – (A): Posicionamento da tocha para iniciar o processo de soldagem; (B): Passe de preenchimento finalizado pelo robô	31
Figura 9 - (A) Dimensões dos corpos de prova para dobramento de face; (B) Dimensões dos corpos de prova para dobramento de raiz.	32
Figura 10 - Dispositivo para ensaios de impacto.....	34
Figura 11 - Amostra posicionada no dispositivo de ensaio de impacto.	34
Figura 12 - Mostrador do dispositivo que indica os ângulos final e inicial do movimento do martelo.....	35
Figura 13 - Movimento do martelo durante o teste de impacto.	36
Figura 14 - Desenho com cotas e CG do martelo.....	37
Figura 15 - Desenho com cotas e CG do dispositivo como um todo, considerando todos os componentes e a base.	37
Figura 16 - Corpos de prova testados em baixas temperaturas	38
Figura 17 - Corte e acabamento dos corpos de prova.....	39
Figura 18 - Macrografias dos corpos de prova.	39
Figura 19 - Imagem ampliada da região correspondente ao metal-base. O ponto escuro próximo ao centro da imagem refere-se à indentação do teste de dureza.	40
Figura 20 - Valores de dureza em escala Rockwell B (HRB) encontrados em um espécime soldado com o arame ER70S-6, após a realização do teste de impacto.	40
Figura 21 - Teste de dureza em corpo de prova soldado com o arame ER110S-G antes da realização dos ensaios de impacto.	41
Figura 22 - Deformação plástica em corpo de prova soldado com arame ER70S-6 testado em temperatura ambiente (26°C).	41
Figura 23 - Material com comportamento frágil, apresentando trincas na ZAC.....	42
Figura 24 - Energias absorvidas pelos corpos de prova.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações AWS para os tipos de metais de adição.....	24
Tabela 2: Condições mínimas exigidas pela especificação A5.18.....	25
Tabela 3: Condições mínimas exigidas pela especificação A5.28.....	25
Tabela 4: Parâmetros de soldagem utilizados para ambos os arames.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3 JUSTIFICATIVA.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM	14
2.2 A HISTÓRIA DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	14
2.3 TIPOS DE PROCESSOS DE SOLDAGEM	15
2.4 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM GÁS DE PROTEÇÃO (GMAW).....	16
2.4.1 Equipamentos	17
2.4.2 Parâmetros de soldagem	20
2.4.2 Tipos de transferência de metal	21
2.4.3 Vantagens e desvantagens dos processos MIG/MAG	22
2.5 MATERIAIS CONSUMÍVEIS.....	23
2.6 METALOGRAFIA	26
2.7 ENSAIOS MECÂNICOS EM JUNTAS SOLDADAS	26
2.8 IMPACTO.....	27
3. METODOLOGIA	30
3.1 OS CORPOS DE PROVA	30
3.2 ENSAIOS METALOGRÁFICOS	33
3.3 ENSAIOS DE DUREZA	33
3.4 ENSAIO DE IMPACTO.....	33
3.5 CONTROLE DE TEMPERATURA DOS CORPOS DE PROVA.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5. CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS	46

1. INTRODUÇÃO

Peças e acessórios utilizados nos mais variados tipos de projetos na área das engenharias possuem características físicas, químicas e mecânicas distintas, de acordo com o material que os constitui. Além disso, os processos de manufatura, de modo geral, possuem influência direta nessas características, o que pode determinar o comportamento dos mesmos quando sob a ação de forças quaisquer.

Ainda pode-se levar em consideração alguns aspectos externos, como fatores ambientais relacionados a temperatura, pressão, umidade, etc., que também interferem no comportamento de peças e elementos de máquinas (parafusos, arruelas, juntas soldadas, etc.).

Um exemplo onde as condições ambientais atuam sobre os materiais ocorre nas navegações. Dependendo da rota, podem ocorrer grandes diferenças de temperatura das águas (como em regiões próximas aos extremos sul ou norte do planeta), o que expõe os materiais que constituem os navios e embarcações a diferentes condições de trabalho.

Para conhecer as propriedades de um determinado tipo de material, geralmente são feitos testes em amostras, onde as condições ambientais possam ser controladas. Para isso, ensaios em laboratórios são as melhores ferramentas, onde pode-se obter resultados confiáveis e compará-los com informações disponíveis na literatura.

Uma maneira de analisar a influência dos fatores externos sobre os materiais é realizar ensaios onde existam diferentes condições externas aplicadas. Com isso busca-se observar as mudanças nas propriedades das amostras conforme a variação dessas condições.

Os cordões de solda, que estão presentes em muitos projetos das mais variadas áreas, são constituídos de materiais que também possuem características próprias e estão sujeitas às variações do ambiente. Além dos fatores externos, deve-se levar em consideração que o processo de soldagem envolve altas temperaturas, as quais podem modificar as características estruturais dos elementos que estão sendo unidos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Com base no que foi abordado, considerando a escassez de materiais científicos que esclareçam os mais variados aspectos referentes aos processos de soldagem e com a necessidade de expansão dos conhecimentos na área devido a sua crescente demanda, este trabalho tem por objetivo principal analisar, através de ensaios de impacto, utilizando como elemento norteador a norma da Sociedade Americana de Soldagem (AWS – *American Welding Society*) AWS D1.1 (2006) para ensaios de dobramento, o comportamento de cordões de solda produzidos com os

arames maciços AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G empregados individualmente pelo processo de soldagem a arco elétrico conhecido como MAG (*Metal Active Gas*) em espécimes submetidos a diferentes condições de temperaturas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensaios metalográficos para relacionar a estrutura do material com as suas propriedades físicas e mecânicas;
- Realizar ensaios de dureza, comparando os resultados obtidos com o comportamento apresentado pelos espécimes durante os ensaios de impacto;
- Analisar a qualidade de solda, entre outras características, conforme norma estabelecida pela AWS D1.1 (2006);
- Observar o comportamento dos materiais sob tensões e as variações de suas propriedades conforme a utilização de diferentes condições de temperatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

A necessidade de ampliação dos conhecimentos na área de soldagem está cada vez mais se fazendo necessária no cotidiano das indústrias, de modo geral. Quando se trata da questão de propriedades de materiais, busca-se pela utilização dos que melhor atendam às necessidades dos seus projetos de maneira eficiente e com o menor custo possível.

Os processos de soldagem MIG/MAG, que são amplamente utilizados, envolvem, entre outros fatores, altas temperaturas, o que pode influenciar nas propriedades dos materiais. Assim, conhecer o comportamento dos materiais soldados é de fundamental importância para a indústria e para todos aqueles que se beneficiam de produtos que envolvem esses processos.

Também torna-se importante entender a relação entre variações de temperatura e as propriedades dos materiais soldados, visto que as condições ambientais existentes em todas as regiões do planeta são bem distintas. O desenvolvimento de uma máquina agrícola que tem como objetivo o mercado brasileiro, por exemplo, deve ser realizado considerando as condições ambientais desse local. Já no caso de desenvolver o mesmo projeto visando o mercado russo, deve-se considerar as condições desse local, que são bem diferentes e envolvem outros tipos de materiais e processos. Além disso, quanto maior o conhecimento, maior pode ser o aproveitamento dos processos em questão, tornando possível a obtenção de uma boa relação custo-benefício.

Este estudo foi realizado utilizando ensaios de impacto sobre corpos de prova soldados, com o objetivo de avaliar o comportamento dos materiais submetidos a diferentes condições de temperatura, visto que a atuação de cargas dinâmicas em estruturas soldadas é um fator muito importante a ser analisado e que permite entender um pouco mais sobre os conceitos envolvidos.

Com este trabalho busca-se atrair a atenção de todos aqueles que têm interesse na área metal-mecânica e que compreendem a importância de conhecer, ou ampliar os conhecimentos relacionados aos processos de soldagem e as características dos materiais soldados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de esclarecer os aspectos envolvidos no processo de soldagem a arco elétrico com gás de proteção, bem como na análise micro e macroestrutural dos espécimes em questão, o entendimento dos conceitos fundamentais que estão presentes neste trabalho se torna importantíssimo. Para isso, a seguir temos uma breve revisão bibliográfica, onde é feito um detalhamento de alguns aspectos relevantes.

2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM

Soldagem é um processo de manufatura que envolve muitas atividades e vem sendo cada vez mais utilizado pelas indústrias. Trata-se de um processo de união entre dois materiais, seja através da fusão dos mesmos em íntimo contato, ou pela fusão de ambos e adição de um outro material fundido; ou ainda, simplesmente, por contato entre os materiais, nas fases sólida ou semi-sólida (MACHADO, 2007).

Segundo a Sociedade Americana de Soldagem (AWS), soldagem é uma operação que visa obter coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição (AWS – American Welding Society, 2006).

Já Modenesi, Marques e Santos (2012) definem o processo de soldagem como sendo um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. Eles ressaltam que a soldagem é um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais.

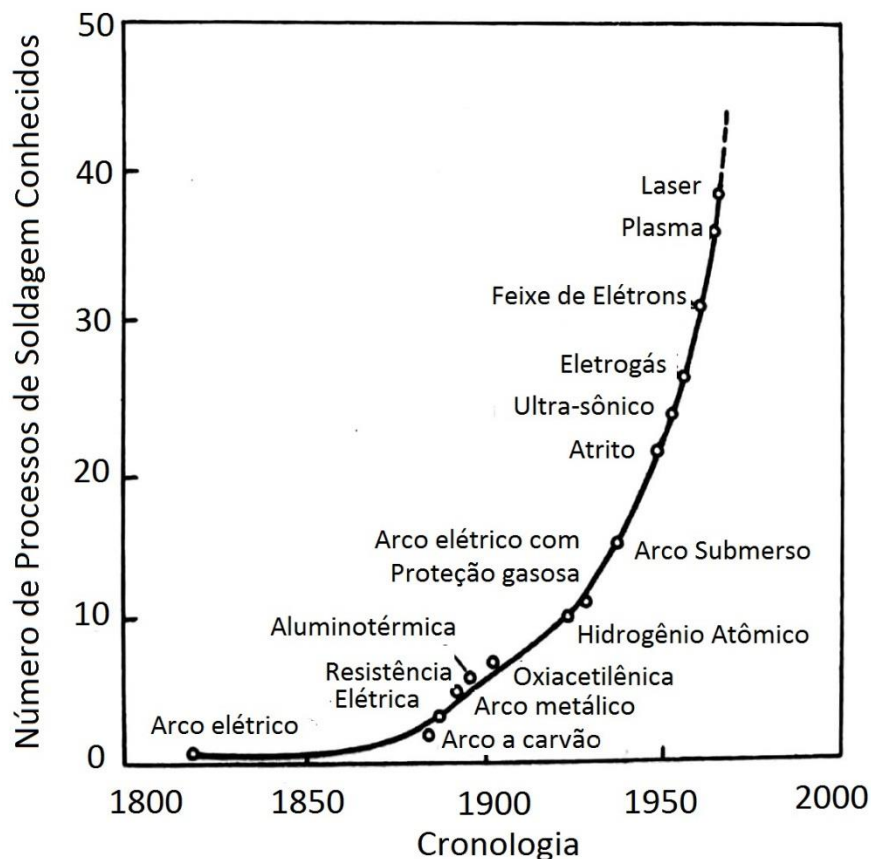
2.2 A HISTÓRIA DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Segundo Wainer, Brandi & Mello (2015), os processos de soldagem tiveram seu grande impulso durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de aviões e navios soldados. Hoje em dia são utilizados para fabricar produtos e estruturas metálicas, aviões, navios, locomotivas, plataformas marítimas, reatores nucleares, componentes eletrônicos, etc. Os mesmos autores ainda destacam que, mesmo os processos de soldagem sendo utilizados desde o fim do século XIX, somente a partir de 1970, no Brasil, que de fato houve uma percepção da necessidade de aprimoramento na área.

2.3 TIPOS DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

Desde o início da sua utilização, no século XIX, até os dias de hoje, muitos outros métodos de soldagem foram desenvolvidos conforme a necessidade da indústria em virtude do desenvolvimento de produtos e a demanda de novos projetos. A Figura 1 mostra o crescimento do número de processos de soldagem ao longo dos anos (WAINER, BRANDI & MELLO, 2015).

Figura 1 - Crescimento do número de processos de soldagem ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi & Mello (2015)

Os processos de soldagem conhecidos atualmente são divididos nos seguintes grupos: soldagem em fase sólida; soldagem termoquímica; soldagem por resistência elétrica; soldagem por energia radiante; brasagem; solda branda; processos térmicos de corte; pulverização térmica e soldagem por arco elétrico. Cada uma dessas classificações refere-se a processos com características distintas. No total, são quase 100 processos de soldagem (MACHADO, 2007).

Alguns dos principais tipos de processos de soldagem e que são muito utilizados na indústria atualmente são: TIG (GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*), soldagem a arco submerso

(SAW – *Submerged Arc Welding*), MIG/MAG (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*), soldagem com eletrodos revestidos (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*), entre outros.

O processo de soldagem TIG (GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*) é um processo a arco elétrico que utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio e um gás que é soprado pela tocha para proteger a poça de soldagem, o eletrodo e parte do cordão. Seu grande desenvolvimento ocorreu devido à necessidade de processos eficientes de soldagem para materiais com baixa soldabilidade na indústria da aviação no começo da Segunda Guerra Mundial (BRACARENSE, 2000).

A soldagem a arco submerso (SAW – *Submerged Arc Welding*) consiste num processo em que o calor para a fusão dos materiais é fornecido por um arco elétrico, desenvolvido entre um eletrodo de arame sólido ou tubular e a peça base. O arco fica envolvido por uma camada de fluxo granular fundido, cuja principal finalidade é estabilizar a descarga elétrica e proteger a poça de fusão da oxidação atmosférica (POLIDO *et. al.*, 2005).

O processo de soldagem com eletrodos revestidos (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*) consiste na coalescência dos metais através do aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo especial revestido e a peça. O eletrodo é formado por um núcleo metálico chamado "alma", revestido por uma camada de minerais e/ou outros materiais. A alma do eletrodo conduz a corrente elétrica e serve como metal de adição. O revestimento gera escória e gases que protegem a região soldada da atmosfera e estabilizam o arco (MODENESI, MARQUES & SANTOS, 2012).

2.4 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM GÁS DE PROTEÇÃO (GMAW)

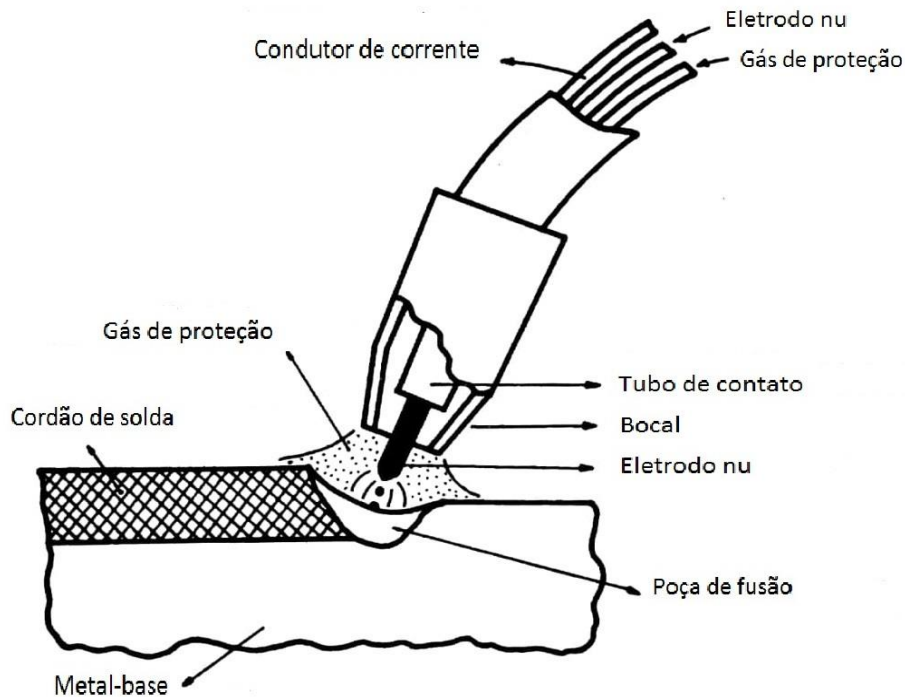
Como este é o processo utilizado para atingir os objetivos deste trabalho, a soldagem a arco elétrico com gás de proteção será melhor explicada e detalhada que os demais processos.

Os processos MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. Diferentemente da soldagem por eletrodo revestido, nos processos MIG/MAG utiliza-se eletrodo nu, onde a proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou ativo (MAG). Os processos MIG/MAG são utilizados na soldagem de aços carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas, cobre e ligas, aços de baixo carbono e aços de baixa liga (WAINER, BRANDI & MELLO, 2015).

Ainda sobre a definição do processo, Machado (2007) diz que a soldagem pelos processos MIG/MAG ocorre por um arco elétrico estabelecido entre um arame nu

continuamente alimentado e a peça. A proteção do mesmo e da poça de fusão é realizada por gás que flui pelo bocal, concentricamente com o arame. Geralmente os gases utilizados são inertes (MIG), como argônio e hélio, ou do tipo oxidante, também denominado ativo (MAG), tais como CO_2 , ou argônio + CO_2 , ou Argônio + O_2 , ou combinação destes três gases. A operação é automática ou semi-automática, sendo que podem ser soldadas ligas ferrosas e não-ferrosas. A Figura 2 ilustra o funcionamento do processo de soldagem MIG/MAG.

Figura 2 - Esquema sobre o processo de soldagem MIG/MAG



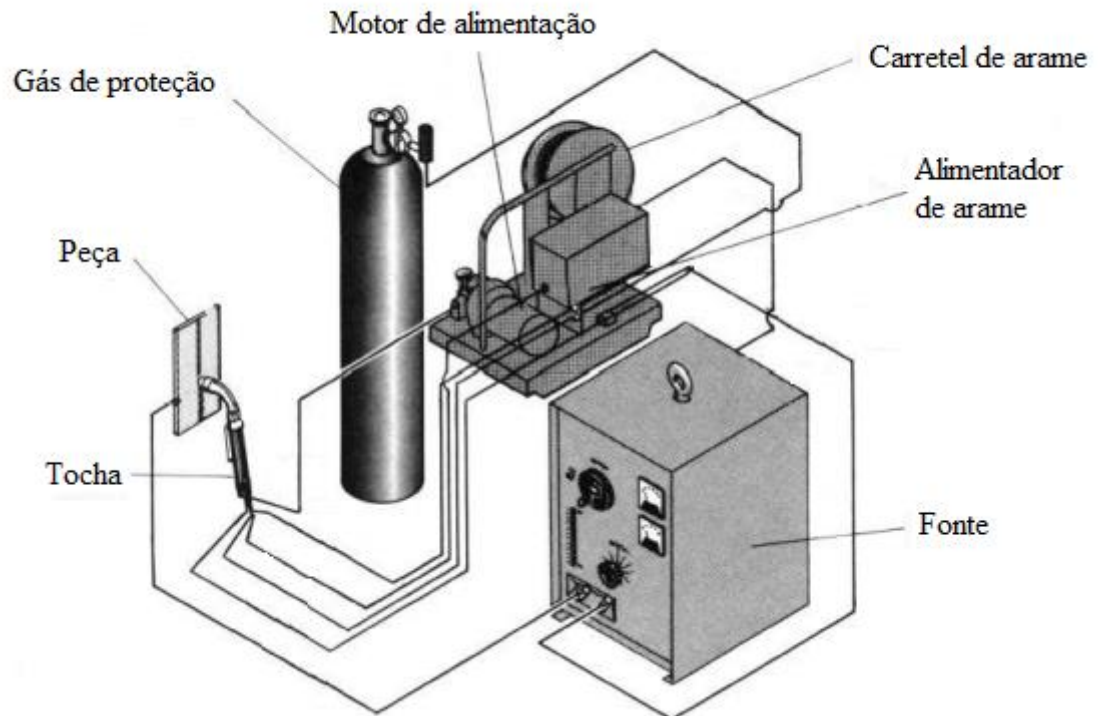
Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi & Mello (2015)

Segundo Wainer, Brandi & Mello (2015), os primeiros trabalhos com estes processos foram feitos com gás ativo, em peças de aço, no início dos anos 30. O processo foi viabilizado a partir da II Guerra Mundial, primeiro para a soldagem de magnésio e suas ligas e em seguida para os outros metais, porém utilizando gás inerte. Somente depois de algum tempo que foi introduzido no lugar do argônio o CO_2 , parcial ou totalmente, na soldagem de aços.

2.4.1 Equipamentos

A soldagem MIG/MAG pode ser realizada manual ou automaticamente. Para a realização desse processo de forma manual, os equipamentos necessários são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Equipamentos envolvidos nos processos de soldagem MIG/MAG manual.

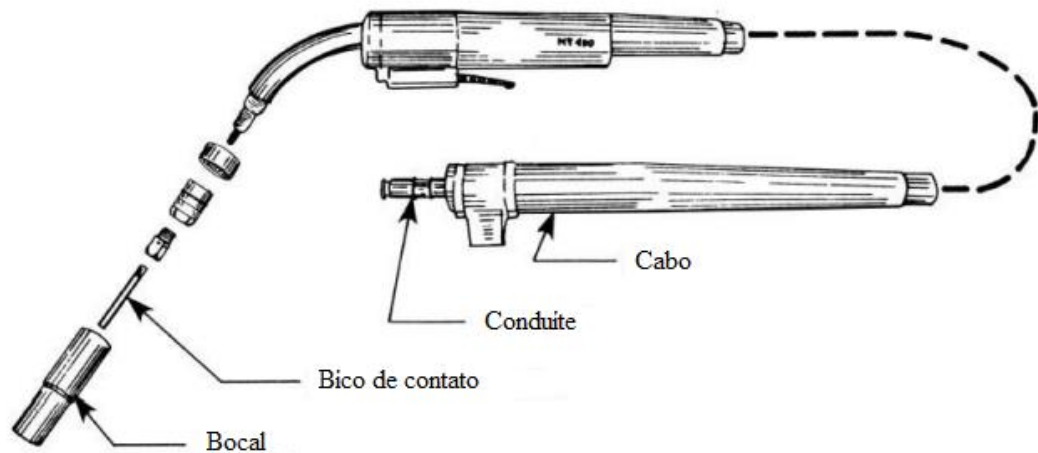


Fonte: Adaptado de Fortes & Vaz (2005).

A fonte de energia pode ser um gerador ou um retificador, onde geralmente, nos processos MIG/MAG, utilizam corrente contínua, mas pode-se trabalhar com corrente pulsada (WAINER, BRANDI & MELLO, 2015).

A tocha, dispositivo ilustrado na Figura 4, serve como guia para o arame e o gás de proteção, direcionando-os para a região de soldagem. Ela também leva a energia de soldagem até o arame. Diferentes tipos de tocha foram desenvolvidos para proporcionar o máximo desempenho na soldagem em diferentes tipos de aplicações. Podem variar desde tochas para ciclos de trabalho pesados para atividades envolvendo altas correntes até tochas leves para baixas correntes e soldagem fora de posição. Em ambos os casos estão disponíveis tochas refrigeradas a água ou secas (refrigeradas pelo gás de proteção), e tochas com extremidades retas ou curvas (FORTES & VAZ, 2005).

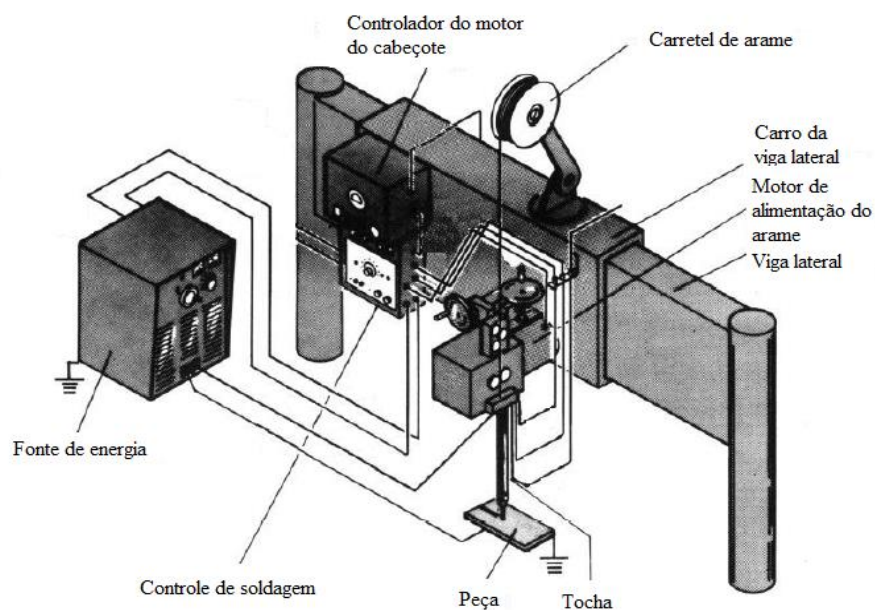
Figura 4 - Tocha seca utilizada nos processos de soldagem MIG/MAG.



Fonte: Adaptado Fortes & Vaz (2005).

No processo de soldagem automático, os equipamentos, mostrados na figura 5, são utilizados quando a peça pode ser facilmente transportada até o local de soldagem ou onde muitas atividades repetitivas de soldagem justifiquem dispositivos especiais de fixação. O caminho do arco é automático e controlado pela velocidade de deslocamento do dispositivo. Normalmente a qualidade da solda é melhor e a velocidade de soldagem é maior (FORTES & VAZ, 2005).

Figura 5 - Equipamento de soldagem MIG/MAG automático.



Fonte: Adaptado de FORTES & VAZ (2005).

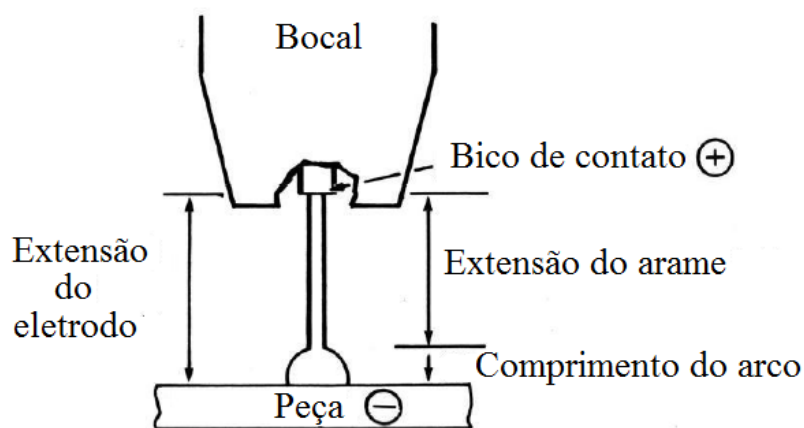
2.4.2 Parâmetros de soldagem

Além do equipamento, é muito importante uma análise dos principais parâmetros de soldagem nos processos MIG/MAG, que são: tensão, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP).

Neste processo, a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame, desde que a extensão do eletrodo (vide Figura 6) seja constante. Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido. Em outras palavras, um aumento (ou diminuição) na velocidade de alimentação do arame causará um aumento (ou diminuição) da corrente de soldagem (FORTES & VAZ, 2005). Segundo Wainer, Brandi & Mello (2015), a faixa de corrente de soldagem utilizada nos processos MIG/MAG está entre 60 e 500 A.

A extensão do eletrodo (*stick-out*) é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do bico de contato, e a peça de trabalho (DBCP). A Figura 6 mostra esquematicamente a extensão do eletrodo. A distância entre o bico de contato e a peça (extensão do eletrodo) afeta a corrente de soldagem, necessária para fundir o arame a uma dada velocidade de alimentação do mesmo (FORTES & VAZ, 2005).

Figura 6 - Distância entre o bico de contato e a peça (DBCP).



Fonte: Adaptado de FORTES & VAZ (2005).

Sobre a velocidade de soldagem, Fortes & Vaz (2005) citam que consiste na relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo. Esse parâmetro é normalmente expresso em cm/min ou mm/min.

A tensão, assim como a corrente de soldagem, também sofre influência da velocidade de alimentação do arame. Uma fonte MIG/MAG proporciona uma tensão do arco relativamente constante durante a soldagem, o que determina o comprimento do arco. Quando ocorre uma variação brusca da velocidade de alimentação do arame, ou uma mudança momentânea da tensão do arco, a fonte aumenta ou diminui abruptamente a corrente (FORTES & VAZ, 2005).

Para Machado (2007), a seleção da tensão é função da intensidade de corrente (para estabilizar o arco), do tipo do arame e do gás de proteção, além da geometria desejada do cordão.

2.4.2 Tipos de transferência de metal

O modo como o metal fundido se transfere do eletrodo para a peça é determinado pelos seguintes fatores: (a) natureza do gás de proteção, (b) polaridade e tipo (pulsado ou contínuo) da corrente, (c) densidade de corrente, (d) tensão, (e) extensão do eletrodo após o contato elétrico, (f) composição química e diâmetro do eletrodo, (g) características específicas da fonte de potência, (h) pressão do ambiente (MACHADO, 2007).

Wainer, Brandi & Mello (2015) definem a existência de 4 tipos de transferência de metal: transferência por curto-circuito, transferência por pulverização, transferência globular e transferência com arco pulsado.

A Figura 7 ilustra como ocorrem os principais modos de transferência de metal. Machado (2007) define 5 tipos de transferência: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência por gotas repelidas e projetadas, transferência axial em aerossol e transferência axial por corrente pulsada. Os principais modos de transferência são: por curto-circuito (o qual será utilizado na realização dos corpos de prova deste trabalho), globular e por pulverização.

Para o modo de transferência por curto-circuito, a ponta do arame pode vir a manter contato com a poça de fusão e ocorre para baixas corrente (entre 30 e 200 A) e tensão (entre 15 e 22 V), sendo denominado também de arco curto. Através desse modo de transferência ocorre uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação e é indicado para seções finas (MACHADO, 2007).

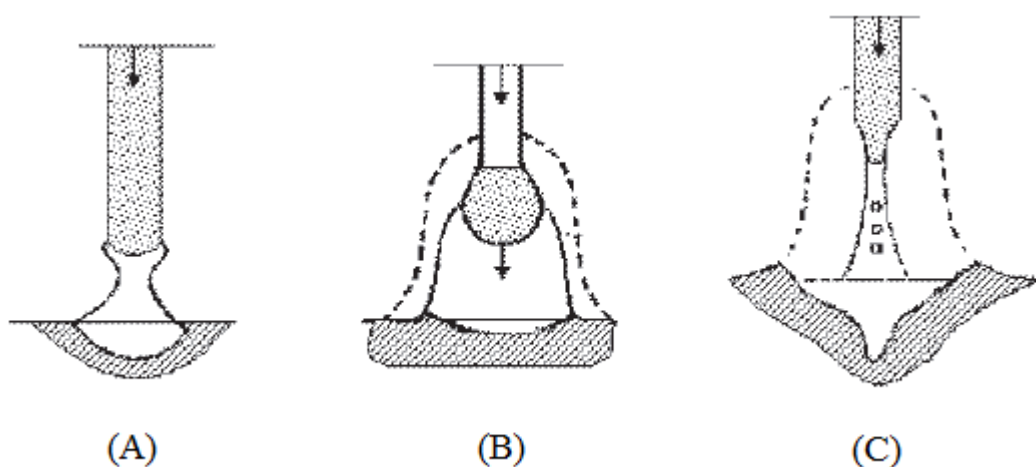
Wainer, Brandi & Mello (2015) afirmam que a transferência por curto-circuito acontece quando utilizados arames com diâmetros entre 0,8 e 1,2 mm para qualquer tipo de gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu toca a poça de fusão, formando um curto-circuito.

Machado (2007) diz que, elevando-se a tensão e corrente em relação ao modo por curto-circuito tem-se a transferência globular, onde o metal é transferido na forma de gotas. Wainer, Brandi & Mello (2015) dizem que, por se formar uma gota com diâmetro maior que o do arame, esse modo de transferência resulta em dificuldades para soldagem fora de posição, além da possibilidade de gerar falta de penetração, falta de fusão e/ou reforço do cordão de solda excessivo.

No modo de transferência por pulverização, Machado (2007) destaca que se utilizam valores de tensão e corrente mais elevados, fazendo com que o metal na ponta do eletrodo atinja temperaturas próximas ao seu ponto de vaporização. Com isso, a deposição de metal ocorre através de um grande número de gotículas aceleradas.

Wainer, Brandi & Mello (2015) destacam que a transferência por pulverização ocorre quando o argônio ou mistura ricas em argônio são utilizados como gás de proteção. Devido a maior quantidade de calor, esse modo é indicado para soldagem de chapas grossas..

Figura 7 - (A) Transferência por curto-circuito; (B) Transferência globular; (C) Transferência por pulverização.



Fonte: Adaptado de WAINER, BRANDI & MELLO (2015).

2.4.3 Vantagens e desvantagens dos processos MIG/MAG

As vantagens dos processos MIG/MAG, segundo Correia (2017), são: indicada para a soldagem de todos os metais (aço carbono, aço inox, aço liga, alumínio, cobre, níquel, etc.) e em todas posições de soldagem; solda peças com espessura acima de 0,76 mm; ótimo acabamento (dispensa a limpeza); elevada produtividade (alta taxa de deposição) e baixo custo;

permite o preenchimento de grandes aberturas e vazios (reparos); exige menor habilidade do soldador.

Fortes & Vaz (2005) ainda citam outras vantagens, como simplicidade na escolha do equipamento, arame, gás de proteção; as condições de soldagem capazes de produzir soldas de alta qualidade com baixo custo; não tem necessidade de remoção de escória; menos distorção nas peças.

Porém, Wainer, Brandi & Mello (2015) destacam algumas desvantagens, como o aumento na ocorrência de trincas devido à alta taxa de resfriamento, principalmente em aços temperáveis; o processo deve ser protegido de correntes de ar; dificuldade de operação em locais de difícil acesso; grande emissão de raios ultravioleta.

Correia (2017) cita outras desvantagens, como a limitação do processo em soldar peças com no máximo 50 mm de espessura; riscos de inclusões com CO₂; custos dos gases de proteção.

2.5 MATERIAIS CONSUMÍVEIS

Um elemento muito importante dentro do processo de soldagem MIG/MAG refere-se aos materiais consumíveis, que são empregados na deposição ou proteção da solda, tais como: eletrodos, varetas, anéis consumíveis e fluxos (CUNHA, 2013).

Para os vários tipos de consumíveis, a Sociedade Americana de Soldagem (AWS – *American Welding Society*) especifica condições de propriedades mecânicas e composição química mínimas a fim de certificar que a solda resultante tenha as propriedades exigidas. A Tabela 1 mostra como são utilizados os sistemas de classificação dos consumíveis.

Tabela 1 - Especificações AWS para alguns tipos de metais de adição.

Especificação AWS	Metais de Adição
AWS A5.1-78	Eletrodos revestidos de aço carbono para soldagem a arco
AWS A5.2-69	Varetas de ferro e de aço carbono para soldagem a gás
AWS A5.9-77	Eletrodos nus e eletrodos tubulares para soldagem a arco e varetas de solda, de aço cromo e cromo-níquel resistentes à corrosão

Fonte: Adaptação de Cunha, 2013.

Além disso, Cunha (2013) afirma que os metais de adição são designados por um conjunto de algarismos e letras com um dos seguintes prefixos:

- E – Eletrodo para soldagem a arco elétrico.
- R – Vareta para soldagem a arco elétrico.
- B – Metal de adição para brasagem.

Os espécimes fabricados e analisados foram soldados com os arames maciços AWS A5.18 ER70S-6 e AWS A5.28 ER110S-G. O primeiro consumível é definido como “*matching*” por apresentar resistência mecânica semelhante a do metal base, já o segundo é considerado “*overmatching*” por apresentar resistência mecânica maior que o metal base (MILLER, 1994; AISC, 2006; MACHADO, 2012).

Assim, podemos concluir a respeito do arame AWS A5.18 ER70S-6 que, após a sua utilização no processo de soldagem, ele deve seguir as especificações A5.18, referentes aos eletrodos e varetas de aço carbono para soldagem a arco elétrico com gás de proteção e está classificado como ER70S-6.

Para o eletrodo AWS A5.28 ER110S-G, após a sua utilização no processo de soldagem, ele deve seguir as especificações A5.28, referentes aos eletrodos e varetas de baixa liga para soldagem a arco elétrico com gás de proteção e está classificado como ER110S-G.

Segundo Cunha (2013), as classificações dos eletrodos nus para soldagem a arco elétrico com gás de proteção baseiam-se nas suas composições químicas. Além disso, um fator muito

importante que deve ser considerado refere-se às propriedades mecânicas dos eletrodos, as quais também estão especificadas nas normas A5.18 e A5.28. As Tabelas 2 e 3 a seguir mostram os valores mínimos de tensões aos quais os eletrodos devem suportar após serem soldados ao metal base.

Tabela 2 - Condições mínimas exigidas pela especificação A5.18

Requisitos para testes de tensão (após soldado)			
Classificação AWS	Gás de proteção	Resistência mínima à tração	
		psi	MPa
ER70S-2 ER70S-3 ER70S-4 ER70S-5 ER70S-6 ER70S-7	CO ₂ *	70 000	480

Fonte: Adaptado de ANSI (1993).

Tabela 3 - Condições mínimas exigidas pela especificação A5.28

Requisitos para testes de tensão			
Classificação AWS		Resistência mínima à tração	
A5.28	A5.28M	psi	MPa
ER70S-G E70C-G	ER49S-G E49C-G	70 000	490
ER80S-G E80C-G	ER55S-G E55C-G	80 000	550
ER90S-G E90C-G	ER62S-G E62C-G	90 000	620
ER100S-G E100C-G	ER69S-G E69C-G	100 000	690
ER110S-G E110C-G	ER76S-G E76C-G	110 000	760
ER120S-G E120C-G	ER83S-G E83C-G	120 000	830

Fonte: Adaptado de ANSI (2015).

2.6 METALOGRAFIA

De acordo com a composição química do metal-base, dos materiais de solda, velocidades de aquecimento e resfriamento e outros fatores inerentes ao processo de soldagem utilizado, pode-se esperar que ocorram variações nas suas microestruturas, o que afeta diretamente as propriedades mecânicas resultantes (MODENESI, MARQUES & SANTOS, 2012).

Através da metalografia pode-se analisar o comportamento dos materiais, observando as micro e macroestruturas que compõem os mesmos. A metalografia é um processo que busca relacionar a estrutura micro e macroscópica de um metal com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e outros. Pode ser macrográfico ou micrográfico (ROHDE, 2010).

Para Modenesi, Marques & Santos (2012), a metalografia consiste na preparação de uma superfície plana e polida, devidamente atacada por um reativo adequado, observação e interpretação da estrutura e obtenção de um documento que reproduza os resultados obtidos no exame. A estrutura dos metais pode ser abordada em três níveis: estrutura cristalina, microestrutura e macroestrutura.

Nos ensaios macrográficos busca-se examinar a olho nu ou com pouca ampliação (até 50x) o aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Com isso pode-se ter uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, qualidade de solda profundidade de tratamentos térmicos entre outras características. Já os ensaios micrográficos consistem no estudo dos metais com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões. (ROHDE, 2010).

A preparação dos corpos de prova para análises metalográficas está normatizada de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pela NBR 13284 de 1995.

2.7 ENSAIOS MECÂNICOS EM JUNTAS SOLDADAS

Ensaio mecânicos em materiais geralmente tem por objetivo avaliar o comportamento dos mesmos diante da ação de forças quaisquer. Quando se deseja avaliar juntas soldadas, é comum a realização de testes mecânicos para análise de desempenho em comparação com o metal base ou outra junta soldada (MADEIRA & MODENESI, 2010). Entre os diversos ensaios que podem ser usados, pode-se citar os ensaios de dobramento, tração e impacto.

.Através desses ensaios pode-se verificar se a solda proposta para ser empregada na fabricação é capaz de alcançar as propriedades exigidas para sua aplicação. Esses ensaios também visam garantir, além da qualidade das amostras fabricadas, os processos de soldagem e os equipamentos/soldadores que realizam os procedimentos, buscando uma maior homogeneidade na produção (ASME, 1983)

Os ensaios de impacto, que são amplamente utilizados em virtude da sua facilidade e baixo custo de realização, tem papel importante na avaliação da tenacidade dos materiais e de juntas soldadas até a sua fratura, onde os seus resultados podem ser obtidos em termos de energia absorvida pelo corpo de prova testados em temperatura conhecida. Além disso, auxiliam na identificação da temperatura de transição de comportamento dúctil – frágil dos materiais (FIGUEIREDO, 2004).

2.8 IMPACTO

Pode-se definir impacto como uma força dinâmica em que a taxa de carregamento é quase instantânea. Caracteriza-se pela ação de uma força e, conseqüentemente, uma resposta que variam com o tempo. Muitos materiais que possuem comportamento dúctil sob carregamentos estáticos, sob cargas de impacto, podem apresentar comportamento frágil (SANTOS, 2008). A transição dúctil-frágil também está relacionada ao nível de energia de impacto absorvida e é influenciada pela temperatura do material (CALLISTER, 2002).

O impacto é um fenômeno que envolve o módulo da força, duração da sua aplicação e velocidade do impacto, além do comportamento mecânico do material. É definido como um carregamento não linear, no qual se verifica a atuação de uma força de alto módulo em um curto intervalo de tempo (GOLDSMITH, 1960).

Quando se aplica numa região localizada de um corpo qualquer uma solitação impulsiva ou impacto, o equilíbrio local é afetado, dando origem a uma onda de tensão que se propaga às regiões vizinhas do corpo com uma velocidade finita que depende das características mecânicas do material (KOLSKY, 1963).

A capacidade de resistência a uma força de impacto relaciona-se com a tenacidade do material, onde a energia cinética é transformada em energia de deformação. Para que haja resistência a uma carga de impacto, a peça deve possuir grande volume, ser constituída de material com um módulo de elasticidade baixo e alta tensão de escoamento e possuir uma forma que possibilite a distribuição das tensões da maneira mais uniforme possível (BEER, *et al.*, 2015, pág. 753).

Utilizam-se as denominações “frágil” e “dúctil” para distinguir falhas ou materiais caracterizados por baixa ou alta tenacidade. Pode-se dizer que um material é dúctil quando absorve uma quantidade significativa de energia antes da fratura. Por outro lado, um material que absorve pouca energia antes da fratura é considerado pouco tenaz e fratura de maneira frágil (BROEK, 1984; FIGUEIREDO, 2004).

A energia absorvida (energia de deformação) por uma estrutura provém do trabalho realizado pela força de impacto sobre a estrutura, que causa o deslocamento de suas partículas resultando assim na deformação. O trabalho realizado durante um impacto corresponde à variação de sua energia cinética (DIMAS & SOARES, 2009; MERIAM & KRAIGE 2004).

Segundo Santos (2008), a força de impacto, também chamada de impulso, causa a mudança de uma variável física na estrutura, chamada de quantidade de movimento, expressa na equação (1) abaixo.

$$Q = mv \quad (1)$$

Onde:

m = massa da estrutura (kg);

v = velocidade da estrutura (m/s).

Considerando o impulso como uma força constante aplicada em um curto período de tempo, pode-se defini-lo pela equação (2):

$$I = F\Delta t \quad (2)$$

Onde:

F = Força aplicada (N);

Δt = Intervalo de tempo de aplicação da força (s).

Utilizando a equação (3) referente à 2ª Lei de Newton, pode-se deduzir o Teorema do Impulso considerando a aceleração como sendo a variação de velocidade no tempo, conforme a equação (4) e igualando com a equação (2) para obtermos as equações (5) e (6). Assim, temos:

$$F = ma \quad (3)$$

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \quad (4)$$

$$F\Delta t = m(v_2 - v_1) \quad (5)$$

$$I = Q_2 - Q_1 \quad (6)$$

Com isso, observa-se que o impulso é a diferença entre as quantidades de movimento final e inicial. A partir dessa análise pode-se conhecer a energia absorvida pelos corpos envolvidos (HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2016).

Em um ensaio de impacto, o martelo do pêndulo é liberado de uma altura pré-definida, causando a ação de uma carga dinâmica no corpo de prova. A altura de elevação do martelo após o impacto, em comparação com a anterior, dá a medida da energia absorvida pelo corpo de prova.

3. METODOLOGIA

A identificação das propriedades mecânicas e físicas que relacionam o cordão de solda com o metal-base foram determinadas através de ensaios de impacto, onde a produção dos corpos de prova foi baseada nas normas para ensaios de dobramento, de acordo com a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME – *American Society of Mechanical Engineers*), Seção IX, 1983. Também foram realizados ensaios metalográficos e de dureza a fim de relacionar a estrutura do material com as suas propriedades físicas.

Os ensaios de impacto, assim como a análise e processamento dos dados obtidos, foram realizados no decorrer do trabalho no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LSTC) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.1 OS CORPOS DE PROVA

Os perfis adotados para criação dos espécimes ensaiados foram fabricados a partir da união de chapas de aço ASTM A36, na posição plana, através do processo MAG (*Metal Active Gas*) automático com proteção gasosa de argônio (75%) + CO₂ (25%) e vazão do gás de 16 l/min, utilizando os arames maciços AWS A5.18 ER70S-6 e AWS A5.28 ER110S-G, ambos com diâmetro de 1,2 mm e empregados individualmente. Todos os cordões foram realizados com ângulos de trabalho e deslocamento de 0° e com distância bico de contato-peça (DBCP) igual a 18 mm. Para a soldagem das chapas, foi usinado um chanfro com ângulo de 45°, onde foi realizado um passe de raiz e um passe de preenchimento. A tabela 4 mostra os parâmetros de soldagem utilizados na produção dos espécimes.

No cálculo da energia de soldagem (E_s) foi utilizada a equação (7), de acordo com Machado (2007), onde:

$$E_s = r \cdot \frac{\text{Tensão (V)} \cdot \text{Corrente (A)}}{\text{Velocidade de soldagem (mm/s)}} \quad (7)$$

O fator “r” refere-se ao rendimento térmico de cada processo de soldagem, onde, no processo MAG é aproximadamente igual a 0,75. Os valores de energia líquida de soldagem encontrados através da equação (7) são dados em Joules (J/mm).

Tabela 4: Parâmetros de soldagem utilizados no robô para ambos os arames.

	Passe de Raiz		Passe de Preenchimento	
	Média	Variação	Média	Variação
Tensão (V)	20	±1	25	±1
Corrente (A)	165	±5	240	±5
Vel. de Soldagem (mm/min)	35	-	40	-

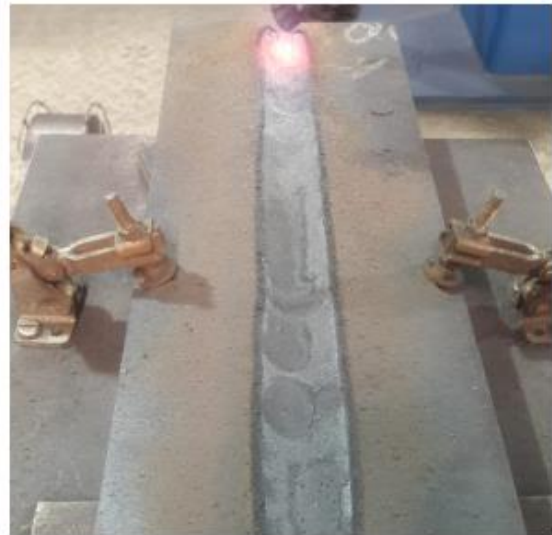
Fonte: O Autor.

As Figuras 8(A) e 8(B) mostram o processo de fabricação dos corpos de prova pelo processo MAG automático. O corte das chapas foi realizado através de uma serra-fita com refrigeração líquida e avanço de corte programado. A disponibilização da matéria-prima, bem como todos os processos de fabricação, desde o corte das chapas ASTM A36, soldagem e corte das chapas soldadas foi realizado na empresa Screw Indústria Metalmeccânica (Cachoeira do Sul – RS).

Figura 8 – (A): Posicionamento da tocha para iniciar o processo de soldagem; (B): Passe de preenchimento finalizado pelo robô



(A)



(B)

Fonte: O Autor.

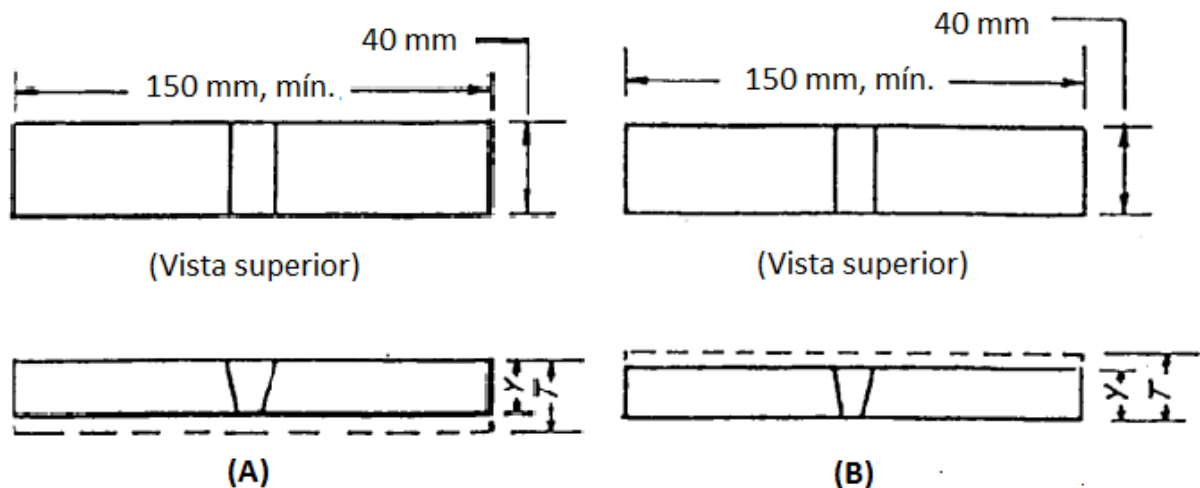
Como não se tem disponível uma norma que determine as características dos corpos de prova para este trabalho, os mesmos foram produzidos com base nas normas referentes aos

ensaios de dobramento transversal de face e de raiz, e suas dimensões estão especificadas nos itens QW-160 e QW-462.3(a) da Seção IX, ASME, 1983.

O item QW-160, artigo I da Seção IX, ASME, 1983, define os requisitos necessários para os testes de dobramento guiado. Ele define que as chapas ou tubos utilizados como corpos de prova devem ser cortados de maneira que suas seções transversais sejam aproximadamente retangulares. As superfícies cortadas devem ser designadas como laterais ou lados do corpo de prova. As outras duas superfícies devem ser designadas de superfícies de face e de raiz.

No item QW-462.3(a), artigo IV da Seção IX, ASME, 1983, estão definidas as dimensões que devem ter os corpos de prova para a realização dos ensaios de dobramento transversal de face e de raiz, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - (A) Dimensões dos corpos de prova para dobramento de face; (B) Dimensões dos corpos de prova para dobramento de raiz.



Fonte: Adaptado de ASME (1983).

De acordo com o item QW-160, artigo I da Seção IX, ASME, 1983, há uma definição das espessuras dos corpos de prova conforme o tipo de material que compõe o metal-base. Com isso, os corpos de prova deveriam ser produzidos utilizando chapas com $3/8$ in (9,52 mm) de espessura. Em virtude dessa espessura dificultar o procedimento de ensaio de impacto por limitações físicas do dispositivo na região de posicionamento do corpo de prova, foram utilizadas chapas com 8 mm de espessura.

3.2 ENSAIOS METALOGRAFICOS

Nos ensaios metalográficos foram realizadas análises quantitativas, ou seja, a determinação do tamanho médio dos grãos, a porcentagem de cada fase constituinte do material, a forma e o tipo de inclusões não metálicas. Nas macrografias utilizou-se uma ampliação de 20x, onde pode-se observar com clareza a zona afetada pelo calor (ZAC), a região do cordão de solda e do metal-base.

Como as propriedades mecânicas foram avaliadas através dos ensaios de impacto, utilizamos as metalografias com o objetivo de comparar as características físicas com as mecânicas encontradas. A preparação das amostras para a realização das metalografias foi feita através dos processos a seguir:

1. Corte da amostra nas regiões entre o cordão de solda e o metal-base;
2. Lixamento - utilizando, respectivamente, lixas n° 220, 320, 400, 600 e 1000;
3. Polimento – utilizando pasta de diamante de 3µm como abrasivo;
4. Ataque a superfície polida utilizando nital 12%.

3.3 ENSAIOS DE DUREZA

Os ensaios de dureza nos corpos de prova foram realizados com o objetivo de agregar mais informações a respeito dos materiais estudados neste trabalho. Serve como mais um parâmetro de comparação entre as propriedades mecânicas observadas nos testes de impacto. O dispositivo utilizado nos ensaios de dureza fornece valores em escala Rockwell B (HRB). Os testes foram realizados no laboratório da empresa Screw. Foram analisados pontos de dureza ao longo da lateral do corpo de prova, com espaçamento de 3 mm entre cada ponto medido.

3.4 ENSAIO DE IMPACTO

Os testes de impacto foram realizados utilizando um dispositivo semelhante ao de ensaios Charpy. Suas características construtivas são mostradas nas Figuras 10 a 15.

O dispositivo, que possui massa total de aproximadamente 1043 kg, é constituído pelo mecanismo de um pêndulo. Na sua extremidade possui o formato de um martelo, que, na Figura 10, se encontra elevado formando um ângulo de 90° em relação ao eixo vertical e é responsável pela produção do carregamento sobre o corpo de prova.

Figura 10 - Dispositivo para ensaios de impacto.



Fonte: O Autor.

O martelo, que possui massa de 230,2 kg, é elevado através de uma talha manual e liberado para transmitir a energia do movimento ao corpo de prova, que está posicionado em local adequado, conforme mostrado na figura 11.

Figura 11 - Amostra posicionada no dispositivo de ensaio de impacto.



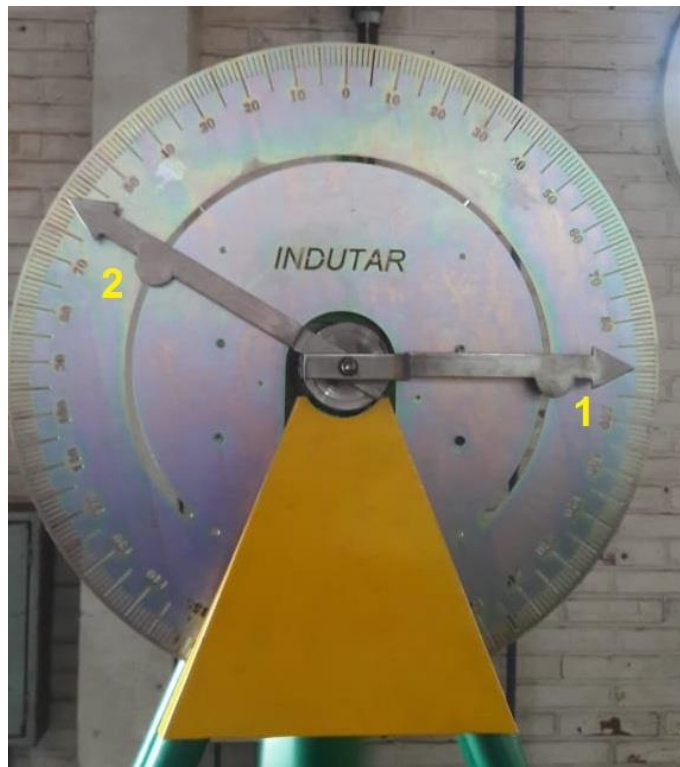
Fonte: O Autor.

Para os cálculos de energia potencial foi utilizada a equação (7), considerando a massa (m) do martelo igual à 230,2 kg, aceleração da gravidade (g) igual à 9,81 m/s², altura de elevação do martelo (h_0) igual à 1591 mm (para um ângulo de 90°, levando em consideração o seu centro de gravidade (CG)) e a altura final do seu movimento (h_1), que é obtida através do ângulo indicado pelo mostrador do dispositivo (Figura 16).

$$E_p = m.g.(h_0 - h_1) \quad (7)$$

A altura final (h_1) é obtida utilizando relações matemáticas considerando a figura geométrica de um triângulo retângulo. A diferença entre as energias potenciais no início e no fim do movimento nos mostra a energia que foi absorvida pelo corpo de prova durante o impacto.

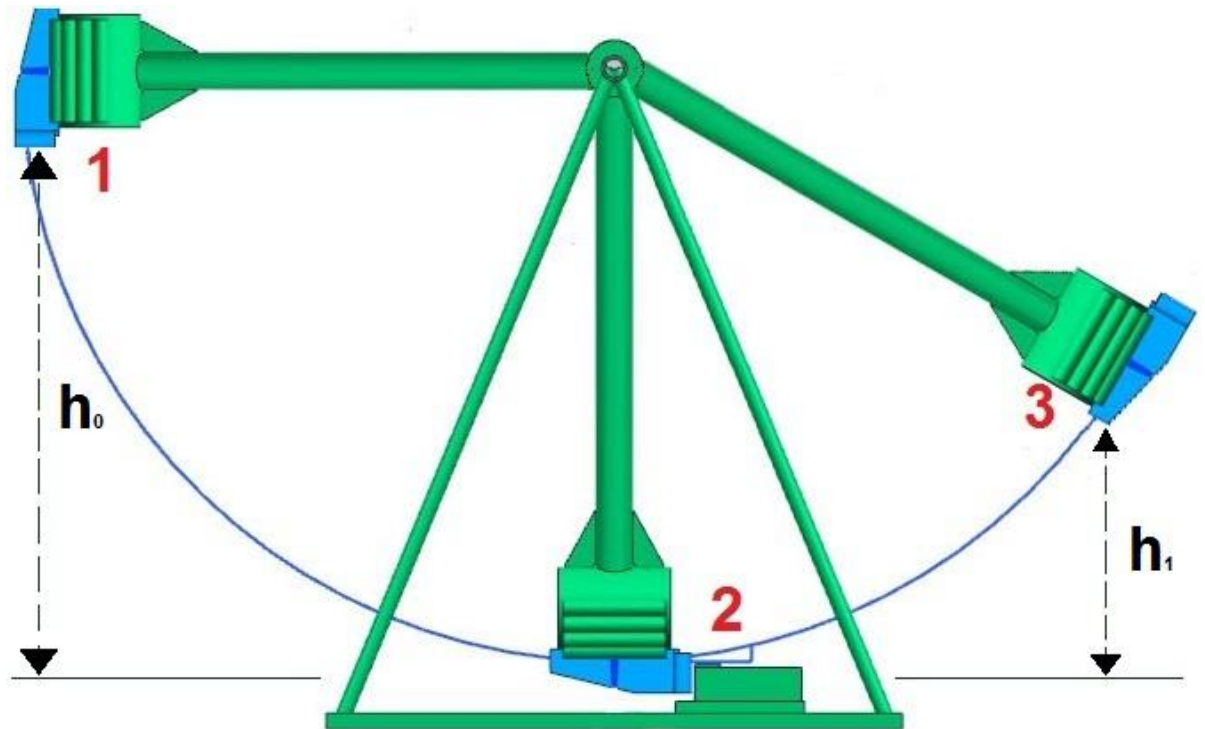
Figura 12 - Mostrador do dispositivo que indica os ângulos final e inicial do movimento do martelo.



Fonte: O Autor.

Na Figura 12, o ponteiro n° 1 indica a elevação inicial do martelo, já o ponteiro n° 2 mostra a inclinação do martelo ao final do seu movimento, após atingir o corpo de prova. A Figura 13 ilustra o movimento do dispositivo, as posições do martelo referentes às alturas h_0 e h_1 e o local de posicionamento do corpo de prova

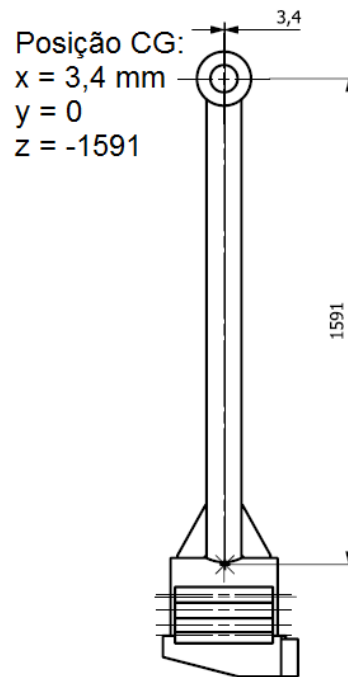
Figura 13 - Movimento do martelo durante o teste de impacto.



Fonte: O Autor.

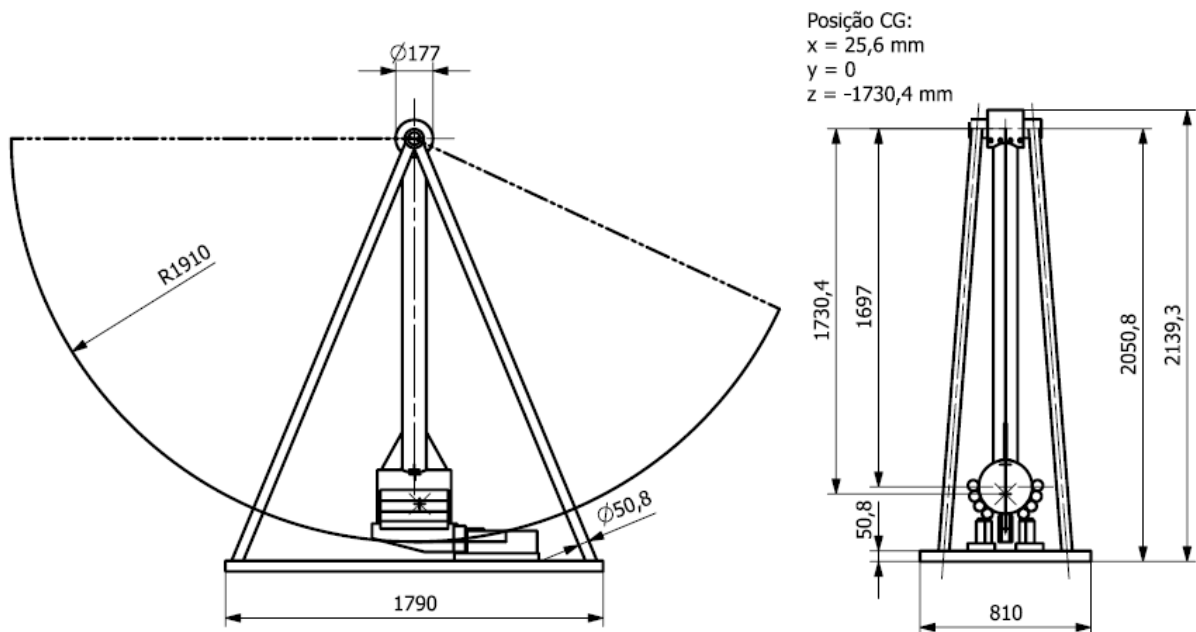
O ponto 1 refere-se à posição inicial do martelo, com altura inicial (h_0) de 1591 mm e inclinação de 90° em relação ao eixo vertical (indicado pelo ponteiro n° 1 da Figura 12). Quando o martelo é liberado para realizar o seu movimento, ele atinge o corpo de prova (ponto 2) e alcança uma altura final (h_1). As dimensões do dispositivo encontram-se nas Figuras 14 e 15, as quais foram cedidas pelo LSTC.

Figura 14 - Desenho com cotas e CG do martelo.



Fonte: LSTC – UFGRS

Figura 15 - Desenho com cotas e CG do dispositivo como um todo, considerando todos os componentes e a base.



Fonte: LSTC – UFGRS.

As cargas dinâmicas foram aplicadas sobre a raiz do cordão de solda em todas as amostras. No total, foram testados 3 espécimes em temperatura ambiente (26°C) e 2 resfriados até a temperatura de -25°C para cada um dos arames de solda utilizados, num total de 10 ensaios.

3.5 CONTROLE DE TEMPERATURA DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram avaliados na temperatura ambiente, que no momento estava em torno de 26°C, medida com o termômetro presente no laboratório, e em -25°C, medida com o auxílio de um pirômetro. Essa última temperatura foi atingida utilizando uma mistura de acetona e nitrogênio líquido, onde os corpos de prova foram submersos nessa substância até atingirem a temperatura desejada.

Figura 16 - Corpos de prova testados em baixas temperaturas

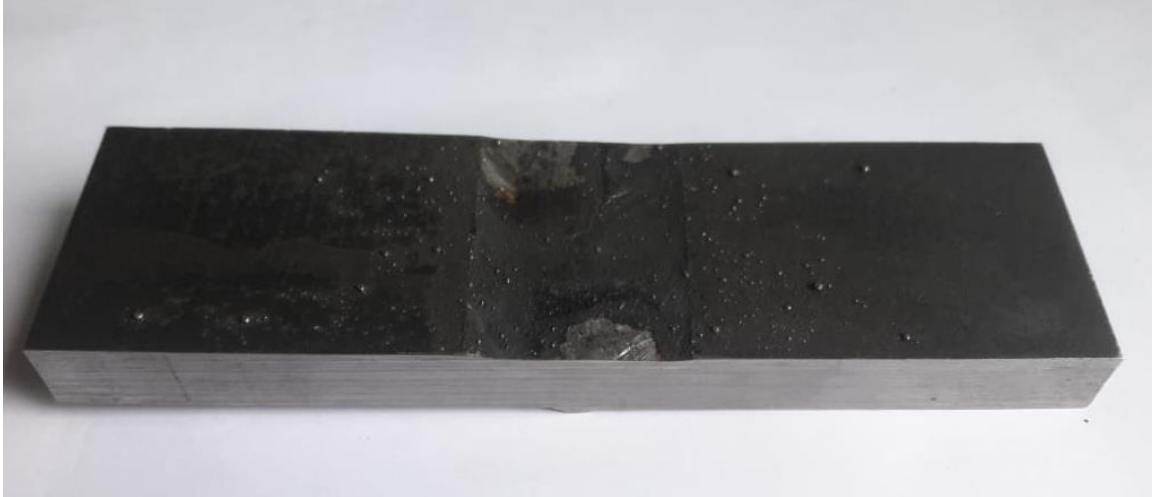


Fonte: O Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após os processos de soldagem, corte e acabamento dos espécimes (visando a redução de risco de acidentes com rebarbas e cantos vivos), pôde-se obter uma boa aparência como resultado final, conforme mostra a Figura 17.

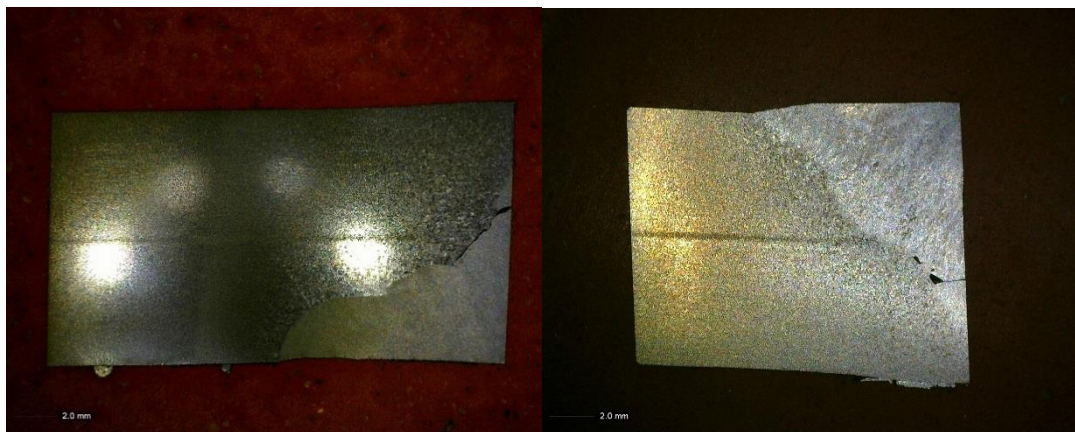
Figura 17 - Corte e acabamento dos corpos de prova



Fonte: O autor

Na Figura 18 podemos observar as imagens metalográficas realizadas com ampliação de 20x, onde mostram-se bem definidas as regiões do metal-base, ZAC e cordão de solda.

Figura 18 - Macrografias dos corpos de prova.

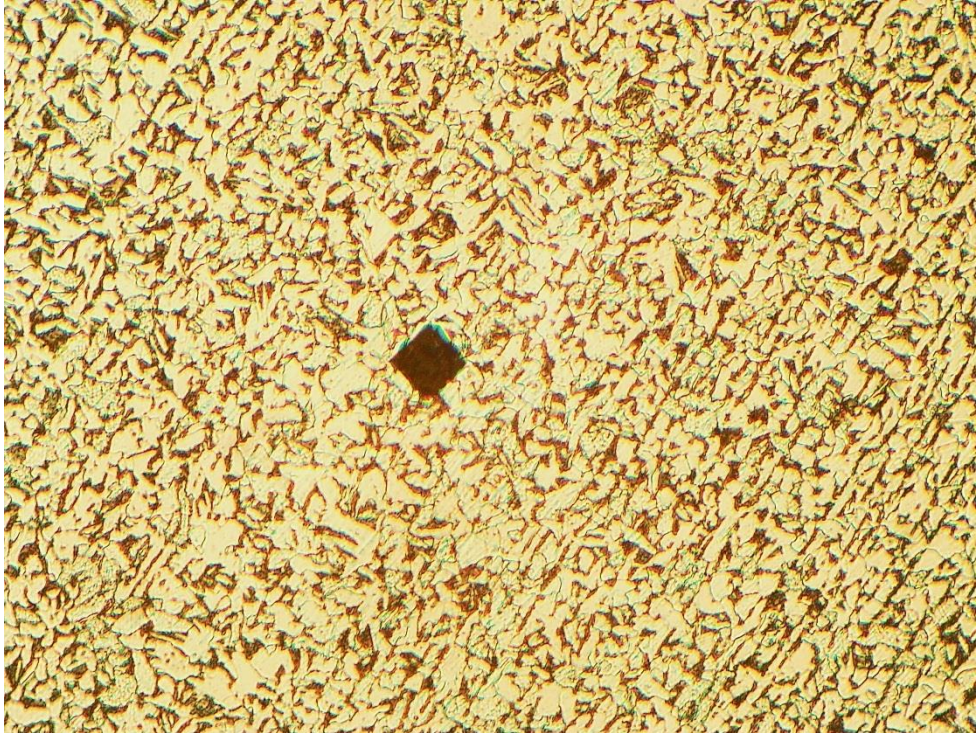


Corpo de prova soldado com arame
ER110S-G

Corpo de prova soldado com arame
ER70S-6

Já a Figura 19 mostra uma imagem com ampliação de 200x, onde pode-se observar a presença de ferrita e perlita, constituintes característicos dos aços macios (aços com cerca de 0,02% de carbono).

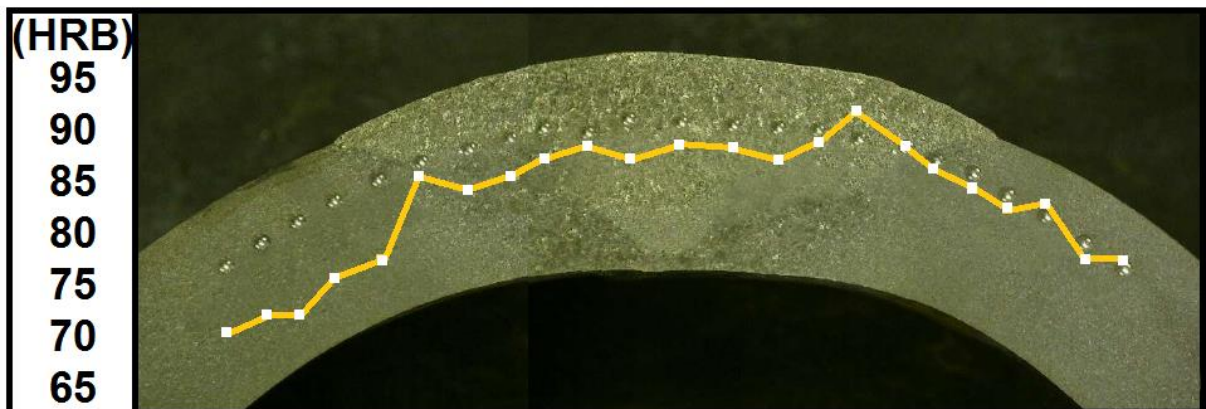
Figura 19 - Imagem ampliada da região correspondente ao metal-base. O ponto escuro próximo ao centro da imagem refere-se à indentação do teste de dureza.



Fonte: O Autor.

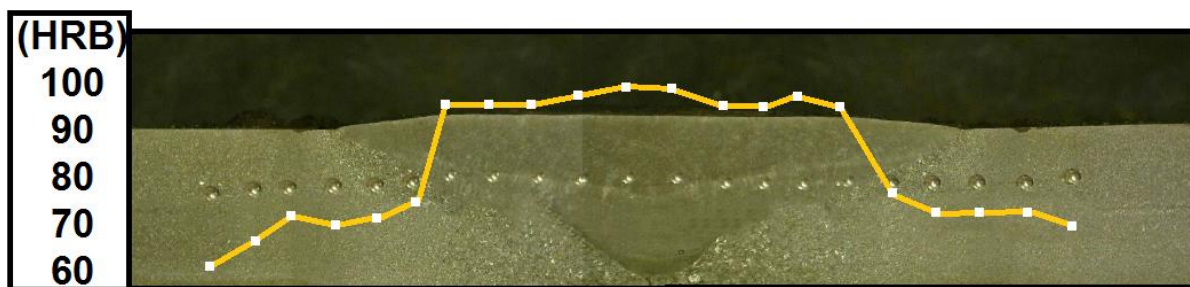
Os testes de dureza foram realizados no laboratório da empresa Screw, onde os valores encontrados estão apresentados em escala Rockwell B (HRB) nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 - Valores de dureza em escala Rockwell B (HRB) encontrados em um espécime soldado com o arame ER70S-6, após a realização do teste de impacto.



Fonte: O Autor.

Figura 21 - Teste de dureza em corpo de prova soldado com o arame ER110S-G antes da realização dos ensaios de impacto.



Fonte: O Autor.

Como pode-se perceber na Figura 21, os valores de dureza são mais altos na região do cordão de solda em comparação com a ZAC e o metal-base, chegando a atingir um valor máximo de dureza de 98 HRB.

Inicialmente, os valores de dureza encontrados nas amostras foram considerados muito baixos, onde optou-se por realizar os testes novamente. Contudo, os resultados encontrados continuaram muito próximos, o que permitiu utilizar um valor médio para cada região analisada. Para todos os testes de dureza realizados (antes e depois dos testes de impacto), os valores de dureza se mantiveram próximos. Além disso, foram encontrados valores semelhantes na literatura que trata sobre características mecânicas dos aços estruturais.

Após a realização dos testes de impacto, observou-se que, para ambos os tipos de arames de solda utilizados, em temperatura ambiente, os espécimes demonstraram um comportamento dúctil, sofrendo deformações plásticas acentuadas na região do cordão de solda, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Deformação plástica em corpo de prova soldado com arame ER70S-6 testado em temperatura ambiente (26°C).



Fonte: O Autor.

As deformações plásticas nos cordões de solda produzidos com o arame ER70S-6 ocorreram de maneira mais acentuada em comparação com os produzidos com o arame ER110S-G, mesmo com esse último absorvendo aproximadamente 6,5% a mais de energia em relação ao primeiro. Contudo, as deformações ocorreram de maneira semelhante.

Já os espécimes testados com temperatura de -25°C demonstraram comportamento de um material frágil, onde a Figura 23 mostra a presença de trincas nas ZAC com a ocorrência de deformações plásticas menos acentuadas no cordão de solda.

Figura 23 - Material com comportamento frágil, apresentando trincas na ZAC.



Fonte: O Autor.

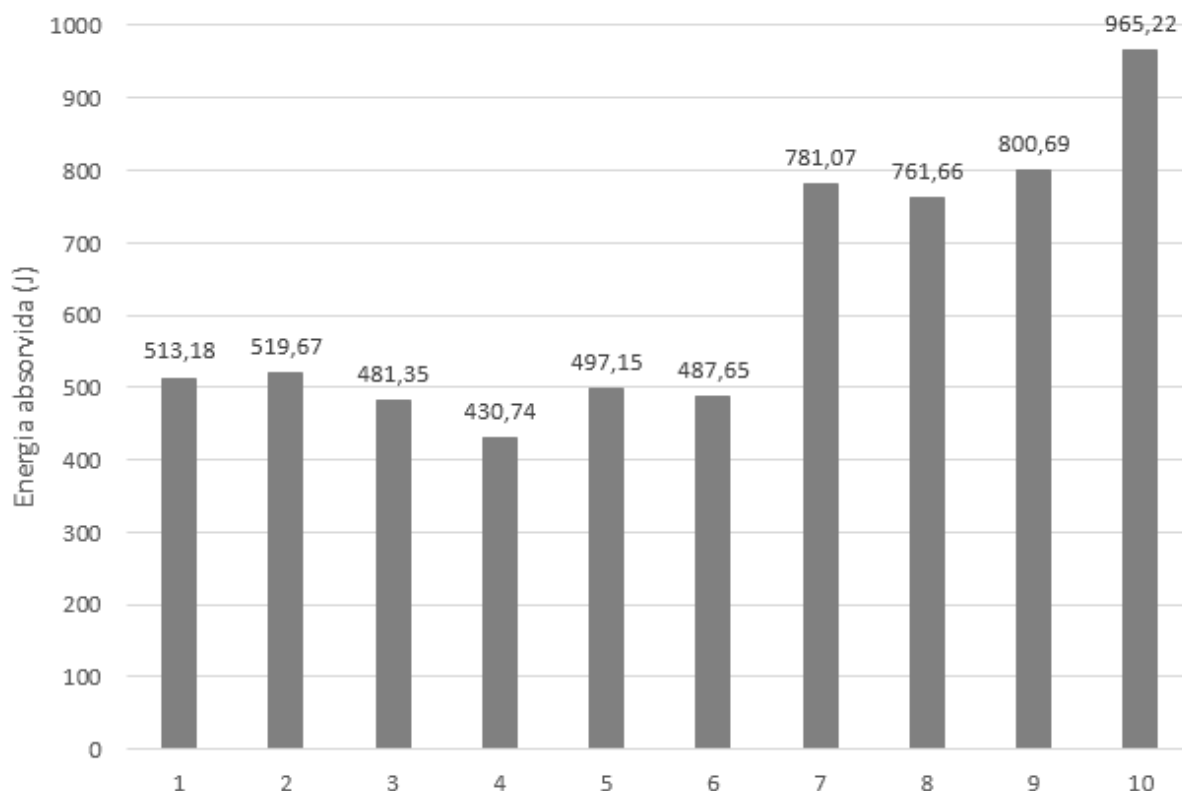
Essa diferença de comportamento está diretamente relacionada com as temperaturas em que os testes foram realizados, o que influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos materiais que compõem os corpos de prova.

Com a conclusão dos ensaios, onde nenhuma das amostras chegou ao seu estado de ruptura total, percebemos que os materiais testados em temperatura ambiente apresentaram maior tenacidade, ou seja, um comportamento condizente com um material dúctil, demonstrando deformações plásticas acentuadas nos cordões de solda. Já os corpos de prova testados em temperatura de -25°C demonstraram menor ductilidade, ou seja, apresentaram sinais de ruptura, com a presença de trincas na ZAC.

Os cálculos referentes à energia absorvida pelos corpos de prova, realizados de acordo com a equação (7) e apresentados na Figura 24, mostram os valores de energia absorvida para cada corpo de prova testado. Os 6 primeiros ensaios foram realizados com as amostras em

temperatura ambiente e os 4 últimos com as amostras submetidas a mistura de nitrogênio líquido + acetona.

Figura 24 - Energias absorvidas pelos corpos de prova.



Fonte: O Autor.

Os números presentes no eixo horizontal do gráfico referem-se a cada uma das amostras testadas. Do 1 ao 3, são os valores de energia absorvida por amostras soldadas com o arame ER110S-G em temperatura ambiente. Do 4 ao 6, amostras soldadas com o arame ER70S-6, também em temperatura ambiente. Do números 7 ao 10 são os valores para as amostras testadas na temperatura de -25°C . Os números 7 e 8 são de amostras soldadas com o arame ER110S-G, já o 9 e o 10 são de amostras soldadas com o arame ER70S-6.

Através das Figuras 22, 23 e 24 percebe-se que as amostras resfriadas obtiveram uma maior capacidade de absorção de energia, porém apresentando o comportamento de um material frágil. Além disso, as amostras soldadas com o arame ER70S-6, entre as amostras resfriadas, foram as que absorveram mais energia de impacto, atingindo um valor médio de 882,96 J.

Sobre o comportamento dos corpos de prova pode-se afirmar que a redução de temperatura até -25°C não foi suficiente para que os materiais atingissem a sua faixa de transição de comportamento dúctil – frágil, pois se fosse esse o caso, haveria uma ruptura do

material com uma menor quantidade de energia absorvida em relação aos ensaios em temperatura ambiente.

Também é notável a maior capacidade de absorção de energia do arame que, teoricamente, possui menor resistência mecânica em condições de temperatura ambiente. Isso nos permite concluir que os resultados encontrados neste trabalho podem demonstrar que os aços macios apresentam características mais “desejáveis” em circunstâncias adversas de temperaturas, até certo ponto.

5. CONCLUSÃO

Finaliza-se este trabalho com o seu objetivo principal alcançado, que era observar as mudanças de comportamento dos materiais que compõem os corpos de prova em virtude da variação de temperatura.

As escolhas do processo de soldagem e dos materiais utilizadas se deu em virtude da ampla utilização dos mesmos na indústria, onde pôde-se conhecer mais das suas características e entender o seu comportamento em condições de trabalho adversas.

Conclui-se que a redução da temperatura dos materiais analisados contribui para a redução da sua ductilidade, porém proporciona um aumento da capacidade de absorção de energia, o que, dependendo das condições de trabalho desses materiais, pode significar uma boa opção para projetos tendo em vista regiões mais frias, porém outros testes podem ser realizados utilizando diferentes metodologias para a confirmação desses resultados, visto que os ensaios de impacto convencionais não oferecem resultados aplicáveis a projetos de engenharia estrutural. Isso acontece devido à grande dispersão dos resultados, principalmente próximo à temperatura de transição, gerada pela dificuldade de obter corpos de prova rigorosamente iguais e pela falta de homogeneidade dos materiais.

A conclusão desse estudo abre novas possibilidades para trabalhos futuros, como a utilização de outros processos de soldagem, outros tipos de metais de adição e metais-base, maiores variações de temperaturas e o que tudo isso pode resultar em termos de influenciar o comportamento mecânico dos materiais analisados.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Welded connections: a primer for engineers**. Chicago: AISC, 2006.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI/AWS A5.18-79: **Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding**. 1993.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI/AWS A5.28-79: **Specification for low-alloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding**. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A36/A36M-14 **Standard Specification for Carbon Structural Steel**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code: Welding, Bracing and Fusing Qualifications**. ASME, Nova York. 1983.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1. **Structural welding code: steel**. Miami: AWS, 2006.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. 7ª ed. McGraw-Hill Global Education Holdings. Porto Alegre, 2015.
- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem TIG – GTAW**. Universidade Federal de Minas Gerais: Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2000.
- BROEK, D. **Elementary Engineering Fracture Mechanics**. Martinus Nijhoff Publishers, 3ª ed. 1984.
- CALLISTER, W.D. **Fundamentals of materials science an engineering**. 5ª ed. Nova York. John Willey & Sons, 2002.
- CORREIA, A. L. G. **Soldagem MIG/MAG: Processo, Consumíveis, Técnicas e Parâmetros, Defeitos e Causas**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2017. Disponível em:
https://docente.ifsc.edu.br/anderson.correia/MaterialDidatico/Eletromecanica/Modulo_2/Processos_de_Soldagem/Soldagem%20MIG-MAG.pdf
- CUNHA, L. **Solda: Como, quando e por quê**. Imprensa Livre. Porto Alegre, 2013.
- DIMAS, D. M.; SOARES, C. G. **Estudo experimental e numérico de vigas encastradas sujeitas a impacto a meio vão**. Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2009.
- FIGUEIREDO, K., M. **Aplicação de ensaio de impacto Charpy instrumentado no estudo da tenacidade à fratura dinâmica nas soldas a arco submerso em aços para caldeiras**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2004.

FORTES; C.; VAZ, C. T. **Soldagem MIG/MAG**. ESAB BR, 2005. Disponível em:

<http://www.ufjf.br/profab/files/2016/09/ESAB-Apostila-MIG-MAG.pdf>

GOLDSMITH, W. **The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids**. Courier Dover Publications, 1960. 396 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Mecânica**. Vol. 1, 10ª ed. LTC. Rio de Janeiro, 2016.

KOLSKY, H. **Stress Waves in Solids**. Dover Publications, Inc. New York, 1963.

MACHADO, I. G. **Falhas de estruturas de aço soldadas devido a reduzida ductilidade**. Soldagem & Inspeção, 18(4): 391-403, Out/Dez 2012.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

MADEIRA, R. P.; MODENESI, P. J. **Utilização do ensaio Erichsen para a avaliação do desempenho de juntas soldadas**. Revista Soldagem & Inspeção. Vol. 15, nº 1. São Paulo, 2010.

MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G. **Mecânica Dinâmica**. 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2004.

MILLER, D. K. **Welding of steel bridges: highway structures design handbook**. The Lincoln Electric Company. USA, 1994.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, 2012.

POLIDO, R. S.; CARVALHO Jr, D. A.; VIOTO Jr, L.; ARAÚJO, M. R. V.; GALLEGOS, J. **Caracterização da Zona Termicamente Afetada em Aço Estrutural Submetido a Soldagem por Arco Submerso**. Universidade Estadual Paulista: Departamento de Engenharia Mecânica. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia. Ilha Solteira, 2005

ROHDE, R. A. **Metalografia e Preparação de Amostras: Uma abordagem prática**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Santo Ângelo, 2010. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>

SANTOS, M. R. **Comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFC sujeitas a carga de impacto**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2008.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. 10ª ed. São Paulo, Blucher, 2015.