

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIENCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TÉCNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECANICA**

AUGUSTO CESAR DE SOUZA

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE PEÇAS DE FERRO FUNDIDO
NODULAR POR PROCESSO DE SOLDAGEM**

JARAGUÁ DO SUL, MAIO DE 2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIENCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS GERALDO WERNINGHAUS**

CURSO SUPERIOR DE TÉCNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECANICA

AUGUSTO CESAR DE SOUZA

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE PEÇAS DE FERRO FUNDIDO
NODULAR POR PROCESSO DE SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica em 2018.

Professor Orientador: Msc. Fenando Henrique Gruber Colaço

JARAGUÁ DO SUL, MAIO DE 2018

Souza, Augusto Cesar de
ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE PEÇAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR
POR PROCESSO DE SOLDAGEM / Souza, Augusto Cesar de; Fenando Henrique
Gruber Colaço - Jaraguá do Sul, SC, 2018;
80 p.:

Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Campus
Geraldo Werninghaus.

1. Soldagem. 2. Ferro Fundido Nodular. 3. Eletrodo revestido. 4. MIG

AUGUSTO CESAR DE SOUZA

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE PEÇAS DE FERRO FUNDIDO
NODULAR POR PROCESSO DE SOLDAGEM**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 24 de maio de 2018



Prof. Me. Fernando Henrique Gruber Colaço

Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Esp. Carlos Roberto Alexandre

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Dr. Almir Turazi

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU

RESUMO

A utilização de ferro fundido na fabricação de componentes para aerogeradores se torna cada vez mais comum na atualidade, seja pelas ótimas características deste tipo de material quanto pelo menor custo de fabricação em relação ao aço. Porém, existem alguns problemas na utilização deste material, podendo ser problemas no processo de fundição como trincas, inclusões de material não metálico e bolhas de gás ou durante a operação do aerogerador que está sujeito a defeitos do material e condições externas, a maioria destes problemas não possuem um processo de recuperação definido. Portanto, o objetivo deste trabalho é apresentar um processo de recuperação de peças fundidas em ferro nodular aceitável para aplicação em fábrica e/ou em campo, de modo que após o processo de soldagem a estrutura do material não se alterasse garantindo assim características mecânicas iniciais. Neste trabalho foram estudados o ferro fundido nodular e os processos de soldagem comumente utilizados na indústria que são o processo MIG e o eletrodo revestido. Utilizado a metodologia hipotético-dedutivo que buscou o falseamento da hipótese apresentada, o que neste trabalho foram os ensaios mecânicos. Foram apresentados também nos resultados as diferentes transformações do metal base, decorrentes das variáveis do projeto que foram o tipo de soldagem e se o processo foi executado com ou sem tratamentos térmicos de pré e pós aquecimento, verificando assim que a soldagem afeta drasticamente a poça de fusão e a ZTA causando nesta a formação de uma zona martensítica de extrema dureza e propensa a trincas. Para fins de aprovação ou rejeição dos parâmetros foram feitos ensaio de tração, flexão e de dureza em todas as amostras de caráter eliminatório, ou seja, se um dos corpos de prova fosse rejeitado em algum ensaio conseqüentemente os parâmetros utilizados também estariam rejeitados. Foi adotado um critério conservador que rejeitou todas as amostras, pois as mesmas falharam nos ensaios mesmo até as amostras que tiveram resultados próximos dos valores objetivados, porém deve se levar em conta de que se a peça não possuir os parâmetros definidos no cálculo do projeto pode vir a falhar e assim condenar todo o equipamento causando milhares de reais de prejuízo.

PALAVRAS-CHAVE: Ferro Fundido, Nodular, Soldagem, MIG, Eletrodo revestido.

ABSTRACT

The use of cast iron in the manufacture of components for wind turbines becomes increasingly common nowadays, either due to the excellent characteristics of this type of material or the lower cost of manufacturing in relation to steel. However, there are some problems in the use of this material and may be problems in the casting process such as cracks, inclusions of non-metallic material and gas bubbles or during the operation of the wind turbine that is subject to defects in material and external conditions, most of these problems do not have a defined recovery process. Therefore, the objective of this work is to present a process of recovery of nodular iron castings acceptable for factory and / or field application, so that after the welding process the material structure did not change, thus guaranteeing initial mechanical characteristics. In this work the nodular cast iron and the welding processes commonly used in the industry that are the MIG process and the coated electrode were studied. Using the hypothetical-deductive methodology that sought the falsification of the presented hypothesis, what in this work were the mechanical tests. It was also presented in the results the different transformations of the base metal, resulting from the design variables that were the type of welding and whether the process was performed with or without heat treatments of pre and post heating, thus verifying that the welding drastically affects the puddle of fusion and HAZ causing in this the formation of a martensitic zone of extreme hardness and prone to cracks. For the purpose of approval or rejection of the parameters, tensile, flexure and hardness tests were carried out on all samples of eliminatory character, that is, if one of the test specimens was rejected in some test, the parameters used would also be rejected. We adopted a conservative criterion that rejected all the samples, since they failed in the tests even to the samples that had results close to the target values, but it should be taken into account that if the part does not have the parameters defined in the calculation of the project, come to fail and thus condemn all the equipment causing thousands of reais of loss.

Keywords: Cast Iron, Ductile, Welding, MIG, Coated Electrode.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral	2
1.2. Objetivos Específicos.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1. Aerogeradores	4
2.2. Ferro Fundido	5
2.2.1. Ferro fundido nodular (dúctil).....	8
2.3. Soldagem.....	11
2.3.1. Breve histórico da soldagem	11
2.3.2. Classificação dos processos de soldagem	12
2.4. Soldagem MIG/MAG.....	14
2.5. Processo de Soldagem por Eletrodo Revestido.....	16
2.6. Soldabilidade	19
2.6.1. Soldabilidade de Ferros Fundidos:	20
2.6.2. Transformações que a soldagem promove nos ferros fundidos	21
2.7. Parâmetros De Soldagem.....	23
2.8. Geometria da junta soldada	25
2.9. Defeitos em solda	27
3. MÉTODOS E MATERIAIS	30
3.1. Materiais e Equipamentos	30
3.2. Processo de soldagem	34
3.2.1. Processo de Técnica de Soldagem a frio	35
3.2.2. Processo de Técnica de Soldagem com Tratamento Térmico.....	36
3.3. Ensaio mecânicos	37
3.3.1. Ensaio de Tração.....	39
3.3.2. Ensaio de Flexão	41
3.3.3. Ensaio de Dureza	42
3.4. Metodologia de Avaliação de resultados.....	45
3.5. Fluxograma do projeto	47
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	49
4.1. Ensaio de Tração	49
4.2. Ensaio de Flexão	54
4.3. Ensaio de Dureza	59
4.4. Análise e Discussão dos resultados	62
5. CONCLUSÃO	67
6. REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

Como o ferro fundido é amplamente utilizado e ainda vem se expandindo cada vez mais, substituindo o aço por exemplo, procura-se obter meios de recuperação para componentes fabricados com este material. O objetivo é que custos com sucateamento das mesmas sejam reduzidos, assim, conseqüentemente reduzindo também, o custo de fabricação destes materiais resultando em uma maior atratividade para utilização desta liga de ferro fundido ao invés de componentes soldados ou aço fundido. (FUNDIÇÃO TUPY, 1971).

Dentre os diversos tipos existentes de ferros fundidos, o presente trabalho foca nos processos de recuperação por soldagem em ferros fundidos nodulares, que também costumam ser conhecidos como dúcteis. Comparando com os demais tipos de ferros fundidos, pode-se destacar como características principais desta liga a ductilidade aliada a uma boa resistência mecânica. Esse conjunto de propriedades é responsável pela aplicação dos ferros fundidos nodulares em vários segmentos, tais como produção de peças para a indústria automobilística, produção de tubos e conexões para o transporte de água, válvulas e corpos de bomba na indústria do petróleo, entre outros. (Guesser, 2009).

Os processos de soldagem citados neste projeto envolvem muitos fenômenos metalúrgicos como, por exemplo, fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem causar problemas práticos, principalmente em ligas de ferro fundido onde qualquer alteração em sua composição pode acarretar sérios problemas estruturais. Tais problemas podem ser evitados ou resolvidos aplicando-se princípios metalúrgicos apropriados para cada processo de soldagem, visto isso há a necessidade deste trabalho para saber quais métodos devem ser aplicados.

Os processos comumente utilizados na recuperação de peças de ferro fundido nodular, são os de revestimentos por deposição de material em peças com superfícies desgastadas (Ex. Engrenagens), preenchimento de defeitos (Trincas superficiais e internas), junção de componentes quebrados (Ex.: Polias).

Durante o processo de fabricação de peças estruturais de aerogeradores, são realizados diversos ensaios mecânicos (Ex.: Ultrassom, líquido penetrante e partícula magnética) em seus componentes devido ao custo do equipamento num todo e da confiabilidade que o mesmo deve apresentar durante toda a sua vida útil. Após tais ensaios as peças que apresentam qualquer tipo de defeito são sucateadas imediatamente visto o risco que as mesmas podem trazer ao aerogerador, estes defeitos podem ser algum tipo de falha como trincas e micro trincas tanto externas quanto internas, inclusão de material não metálico ou deformações no macho ou cavidade durante o processo de fundição. Por se tratar de um material com alto teor de carbono, a soldabilidade que é um processo utilizado em recuperações na indústria atual é comprometida fazendo que o descarte seja a melhor solução. Sendo assim tem, se a hipótese de soldar os componentes condenados recuperando-os sem que sua estrutura e propriedades mecânicas sejam alteradas pelo processo de soldagem.

Se confirmado a possibilidade de utilização destas peças no após soldagem, os fornecedores destes tipos de material não terão que sucatear mais estas peças assim reduzindo seus gastos, conseqüentemente tornando estas peças mais baratas devido à redução de possibilidade de erros.

1.1. Objetivo Geral

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo avaliar a possibilidade de utilização de processos de soldagem para a recuperação de defeitos em peças fundidas com ferro fundido nodular (dúctil). Atualmente a literatura nacional não possui muitas fontes bibliográficas referentes a esse assunto, podendo este ser por motivos de dúvidas referentes ao processo de solda em ferros fundidos, já que a maior dificuldade desse processo é de se obter a mesma estrutura cristalina da matéria-prima na região da solda. Visto que o ferro fundido nodular é utilizado largamente na indústria e, em muitos casos, em componentes estruturais, assim sua estrutura cristalina não deve ser modificada já que pode vir a acarretar um risco elevado de vir falhar e de futuros problemas.

1.2. Objetivos Específicos

- Analisar os efeitos dos processos de soldagem MIG/MAG e Eletrodo Revestido na recuperação das peças de ferro fundido nodular;
- Analisar possíveis defeitos do processo e do material que possam existir ou que vão aparecer com a utilização do material recuperado;
- Comparar as propriedades mecânicas das amostras de ferro fundido nodular recuperadas quando submetidas aos ensaios de tração até atingir a ruptura;
- Analisar os valores obtidos de limite de resistência à tração, ductilidade e dureza das amostras ensaiadas comparando com os valores das amostras brutas;
- Analisar os possíveis problemas de um processo de soldagem a frio onde não se pode controlar a temperatura do componente durante todo o processo;
- Analisar os efeitos de tratamentos térmicos de pré e pós aquecimento nos processos de soldagem;
- Analisar qual o melhor processo e seus respectivos parâmetros para recuperação de peças fundidas de ferro fundido nodular, seja este em relação ao custo ou segurança na aplicação, assegurando a confiabilidade da liga do ferro fundido também na região dos defeitos;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

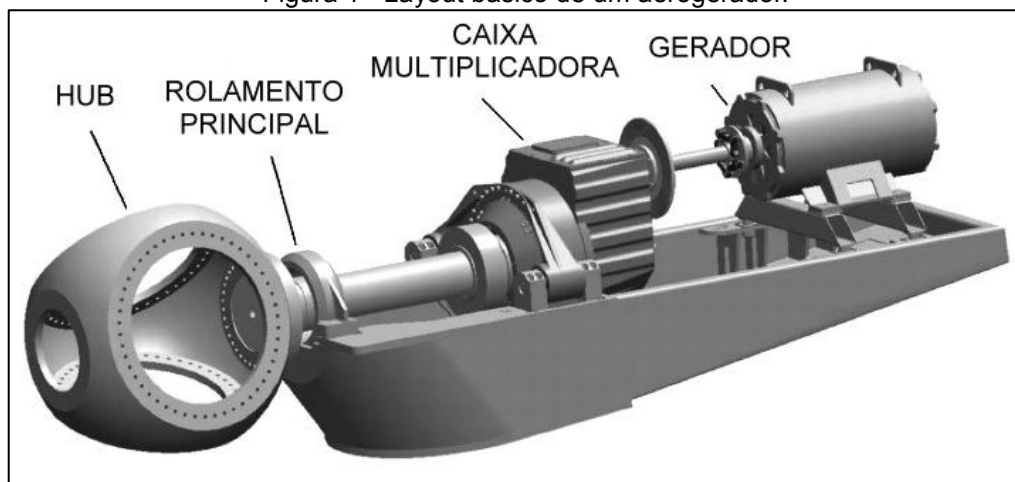
2.1. Aerogeradores

O aerogerador conhecido também por turbina eólica é um equipamento que converte a energia cinética do vento, em energia elétrica. Como a produção de energia elétrica utiliza uma fonte de energia sem fim pode-se chamar de energia renovável, e também de energia eólica por ser utilizado o vento nesse processo. (DUTRA, 2008).

Utilizado para transformar energia eólica em elétrica, o aerogerador é uma solução cada vez mais presente quando se pensa em alternativas sustentáveis de geração de energia. Normalmente são encontradas em grupos de dezenas de unidades, seja próxima ao mar ou regiões de planalto, garantindo melhor captação da energia, sendo chamadas de parques eólicos. (DUTRA, 2008).

A movimentação do eixo gera energia mecânica, que é retransmitida até um gerador elétrico já conectado as linhas de transmissão. A energia sai do aerogerador já em formato de eletricidade, indo direto para a rede elétrica. (DUTRA, 2008).

Figura 1 - Layout básico de um aerogerador.



Fonte: Portal energia, 2018

Os componentes de grande responsabilidade estrutural do aerogerador em sua maioria são fabricados em ferro fundido nodular, como por exemplo o hub, que é o componente na qual são fixadas as pás do aerogerador.

Figura 2 - HUB montado na WEG.



Fonte: O CORREIO DO POVO, 2016

2.2. Ferro Fundido

A história do ferro fundido é datada aproximadamente ao ano de 500 d.C. desde então este material tem sido a liga metálica mais comumente utilizada nas aplicações da indústria como, por exemplo, a utilização na indústria automobilística sendo utilizado, por exemplo, na fabricação de blocos de motores ou em peças de elevada solicitação mecânica. Alguns motivos da utilização desta liga ao invés dos aços é o custo de produção relativamente mais baixo, propriedades mecânicas satisfatórias, além de uma elevada resistência à corrosão, entre outras características. (FRANKLIN, 2009).

De acordo com CHIAVERINI, (1979):

Ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2% em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. (CHIAVERINI, 1979, p.413).

Dentre os metais de emprego industrial são as ligas de ferro-carbono que reúnem o mais valioso conjunto de propriedades, aos mais baixos custos de produção. É também do conhecimento geral que dentre os processos de obtenção de ligas a base de ferro e sua transformação em produtos industriais constitui a fundição o de maior flexibilidade e economicidade. Esta circunstância motivou ao longo dos anos o desenvolvimento de uma tecnologia bastante valiosa e ampla na produção de fundidos de ferro (FUNDIÇÃO TUPY, 1971).

Os ferros fundidos, segundo GUESSER, (2009), são classificados em alguns casos de acordo com o aspecto de sua fratura que neste caso são o ferro fundido cinzento, branco e mesclado, diferencia-se também pela forma da grafita na estrutura da liga, exemplos são o vermicular e nodular e por último podem ser classificados devido a alguma propriedade mecânica assim temos o ferro fundido maleável. Porém CHIAVERINI, (1979) inclui mais uma liga neste conjunto que é o ferro fundido mesclado. Abaixo algumas características destas ligas.

Sendo assim, existem diversos tipos de ferro fundido, cujas suas diferenças são relativas a composição química e aos tratamentos características podem ser analisadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades Típicas dos Ferros Fundidos.

Tipo de Ferro fundido	Composição Química (% do peso)						Dureza (HB)	Propriedades Típicas	
		C	Si	Mn	P	S		Limite de Resistencia	Ductilidade
Branco	Min.	1,8	0,5	0,25	0,06	0,06	Sem dados	Sem dados	Inexistente
	Max.	3,6	1,9	0,8	0,2	0,2			
Cinzento	Min.	2,5	1	0,2	0,002	0,02	180 a 260	20 a 60 ksi	Muito Baixa
	Max.	4	2,8	1	1	0,25		130 a 410 Mpa	
Dúctil	Min.	3	1,8	0,1	0,01	0,01	140 a 300	20 a 200 ksi	3 a 20% de alongamento
	Max.	4	2,8	1	0,1	0,03		130 a 1380 Mpa	
Maleável	Min.	2,2	0,9	0,15	0,02	0,02	140 a 300	40 a 105 ksi	1 a 20% de alongamento
	Max.	2,9	1,9	1,2	0,2	0,2		270 a 720 Mpa	

Fonte: Adaptado de ZEEMANN, 2003, pág. 1.

O ferro fundido branco é caracterizado por apresentar uma superfície de

fratura com uma coloração esbranquiçada, contendo como elementos de liga predominante o carbono e o silício. A estrutura que devido às condições de fabricação e o baixo teor de silício apresentam o carbono na sua maioria no estado combinado em cementita, devido a esta composição o ferro fundido branco é considerado um material extremamente frágil. (CHIAVERINI, 1979).

A estrutura desta liga se forma quando existe um resfriamento rápido no processo de fundição de qualquer outro ferro fundido. Devido às suas propriedades mecânicas de alta dureza, o ferro fundido branco é principalmente utilizado em situações onde se exija resistência ao desgaste por abrasão, como por exemplo: revestimentos de moinhos, bolas para moagem, cilindros de laminação, etc. (Zeemann, 2003).

Diferente do ferro fundido branco, o ferro fundido cinzento por sua vez apresenta uma coloração na superfície de fratura uma cor acinzentada. Assim como o ferro fundido branco está a liga apresenta como principais componentes de sua composição o carbono e o silício, mas com o diferencial de possuir uma estrutura em grande parte de carbono no estado livre (grafita lamelar) e outra no estado combinado (cementita). (GUESSER, 2009).

Esta liga tem como características fundamentais o baixo custo de obtenção em relação a outras ligas de ferro fundido e ligas de aço, um processo de fusão e moldagem mais fácil, com valores aceitáveis de resistências mecânicas, como por exemplo, valores de resistência a tração variando de 100 a 400 Mpa, ao choque térmico, excelente usinabilidade e uma boa capacidade de amortecimento. Estas características permitem utilizar o ferro fundido cinzento para a produção das mais diversas peças mecânicas, como: carcaças de compressores, blocos de motores, cabeçotes, tambores de freio, engrenagens, bases de máquinas, etc. (CHIAVERINI, 1979).

Contudo, existe também o ferro fundido mesclado que nada mais é do que uma mistura de duas ligas que são o ferro fundido cinzento e o branco, ou seja, esta liga é resultado da solidificação no instante da formação de áreas de ferro fundido branco e de ferro fundido cinzento, em virtude de parte de sua solidificação se verificar

segundo o sistema estável (austenita-grafita) e parte, segundo o sistema metaestável (austenita-carboneto). O ponto de fratura apresenta a coloração cinza-claro, também em função da mistura das características dos ferros fundidos branco e cinzento. Suas propriedades são intermediárias entre os ferros fundidos brancos e cinzentos (CHIAVERINI, 1979).

O ferro fundido maleável é o ferro fundido branco com tratamento térmico de maleabilização, assim resultando a transformação de praticamente toda a cementita em grafite na forma de nódulos e em forma de veios ou lamelas. Esta liga possui como características principais a de uma melhor usinabilidade comparada com outros tipos de ferros fundidos (Ex.: branco e cinzento) e alguns tipos de aços (Ex.: SAE1022, SAE1112 e SAE1035). Sua alta ductilidade por ser superior à dos ferros fundidos cinzentos deixa esta liga mais atraente para indústria, apresentando alongamentos que ultrapassam os 10%. São geralmente aplicados na produção de conexões para tubulações hidráulicas, conexões para linhas de transmissão elétrica, sapatas de freios, etc. (GUESSER, 2009).

A liga de ferro fundido vermicular às vezes chamada como ferro fundido de grafita compacta possui na sua estrutura o carbono livre na forma de grafita que se apresenta na forma de estrias ou vermes. Para a formação da grafita é necessário na sua obtenção o acréscimo de componentes como o Ti que irão reduzir a formação de nódulos, garantindo assim a esta liga tem como característica uma boa fundibilidade (semelhante à do ferro fundido cinzento), melhor resistência mecânica e ainda alguma ductilidade. (CHIAVERINI, 1979). Esta liga de ferro fundido pode ser encontrada geralmente na indústria em coletores de exaustão, caixas de engrenagens, suportes de mancais. Os ferros fundidos vermiculares possuem condutibilidade térmica que permitem a sua utilização em peças fundida utilizadas a temperaturas elevadas e/ou sob condições de fadiga térmica, como lingoteiras, cárter, tubulações de exaustão (CHIAVERINI, 1979).

2.2.1. Ferro fundido nodular (dúctil)

O processo de obtenção do ferro fundido nodular muito se assemelha a

produção do ferro fundido cinzento havendo somente algumas diferenças como, por exemplo, a seleção da matéria prima de maior qualidade, pois a liga de ferro fundido nodular exige matérias primas com reduzido teor de enxofre. (DE PARIS, 2003).

Esta liga de ferro fundido se caracteriza pela presença do carbono livre na forma de nódulos grafiticos, distribuídos em matriz ferrítica, perlítica ou ferrítica-perlítica, resultante de um processo denominado nodularização, feito ainda no estado líquido. Possuem como características a ductilidade, aliada a elevados limites de resistência à tração. Em ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica, os limites de resistência variam de 380 a 450 MPa associados a alongamentos de 7 a 22%. Já para ferros fundidos nodulares de matriz perlítica, os valores de limite de resistência podem atingir até 900 MPa com alongamentos de até 2%. A excelente combinação de propriedades vem fazendo com que essa liga substitua os ferros fundidos cinzentos, maleáveis e até alguns aços fundidos com o passar dos anos. Ferros fundidos nodulares são usados em eixos de comando de válvulas, carcaças, componentes hidráulicos, engrenagens, coletores de exaustão, peças de suspensão de veículos, tubulações e válvulas para transporte de água, entre outros. (CHIAVERINI, 1979).

Este tipo de ferro fundido sofre um tratamento de inoculação realizado no seu estado líquido, fazendo que sua composição seja de carbono livre na forma de grafite esferoidal, o que garante a liga de ferro fundido nodular características de boa ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. (CHIAVERINI, 1979).

As ligas de ferro fundido conforme norma EN 1563 tem sua nomenclatura designada pelas letras EN-GJS seguida de mais cinco dígitos que são o limite mínimo de resistência a tração (MPa) e os dois restantes indicam o mínimo alongamento (%).

Tabela 2- Tipos de ferros fundidos nodulares conforme norma EN 1563.

Material designation		Tensile strength	0,2 % proof stress	Elongation
		R_m	$R_{p0,2}$	A
		N/mm ²	N/mm ²	%
Symbol	Number	min.	min.	min.
EN-GJS-350-22-LT ^a	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT ^b	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT ^a	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT ^b	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

^a LT for low temperature.
^b RT for room temperature.

Fonte: EN 1563 -1997, pag. 7.

Resumidamente, as propriedades mais importantes que caracterizam o ferro fundido nodular são sua ductilidade e sua tenacidade. Entretanto estas nem sempre são as propriedades mais requeridas ou aproveitadas visto que o objetivo principal na maioria das utilizações do ferro fundido é a sua capacidade de conservar, sobretudo sua forma não importando o quão severo é sua aplicação. Assim sua ductilidade, isto é, capacidade de dobrar, empenar ou deformar plasticamente sem romper será como uma segurança adicional. (FUNDIÇÃO TUPY, 1971).

Sendo assim, a propriedade mais importante no ferro fundido esferoidal é a sua resistência mecânica. Em geral não importar tanto o limite de ruptura e sim o valor de tensão de escoamento, este último torna-se muito importante por atingir valores maiores que seus possíveis substitutos tais como ferro fundido cinzento, maleável ou aços não ligados. Este em relação ao último mencionado apresenta ainda a vantagem de melhor usinabilidade, melhor amortecimento de vibrações e melhores características de fundição. (FUNDIÇÃO TUPY, 1971).

2.3. Soldagem

2.3.1. Breve histórico da soldagem

Conhecida na história como a arte de unir dois ou mais materiais metálicos, como por exemplo, a brasagem do chumbo com o latão datada de aproximadamente 3500 a.C. (OKUMURA, 1982).

Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, (2009) a soldagem foi largamente utilizada na antiguidade na fabricação de ferramentas e armas, pois como o minério de ferro abundante na época não possuía dureza necessária era realizado um processo de soldagem por forjamento, onde eram inseridas de tiras de aço nas arestas dos instrumentos. Porém nos séculos XII e XIII a utilização deste processo começou a diminuir vindo a ser substituído em grande parte por processos de fundição que começaram a ter sua tecnologia difundida nos séculos XIV e XV. Assim por um longo tempo a soldagem ficou como um processo secundário na fabricação de peças, visto que o processo de soldagem por forjamento vinha sendo substituído por processos de fundição e a junção de peças por sua vez, era substituída por processos de rebitemento e parafusos.

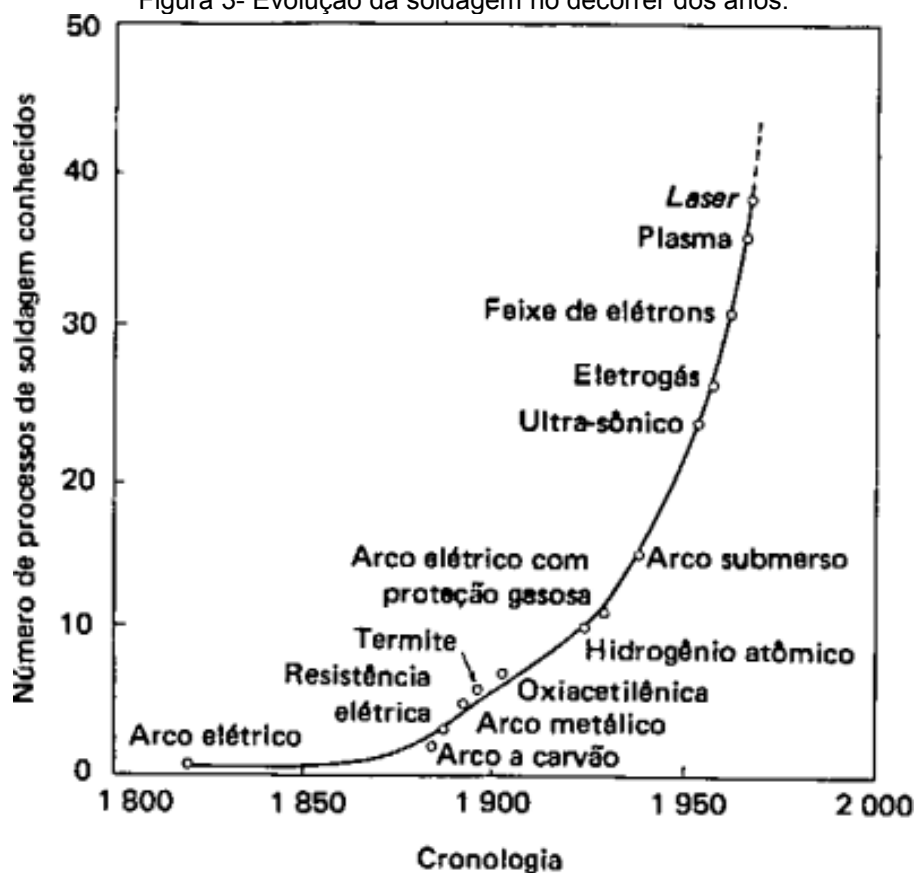
Abaixo algumas datas importantes na história que alavancaram o uso de processo de soldagem segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009):

a) Século XVIII – Descoberta do acetileno por Sir Edmund Davy e primeiras experiências com arco elétrico por Sir Humphrey Davy;

b) 1885 – Primeira patente de um processo de soldagem é registrada na Inglaterra por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewski, tratava-se de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada;

c) Meados de 1890 – Em países distantes um do outro o russo N.G. Slavianoff e o americano Charles Coffin cada qual no seu país desenvolveram individualmente a primeira soldagem com arco elétrico com um eletrodo metálico.

Figura 3- Evolução da soldagem no decorrer dos anos.



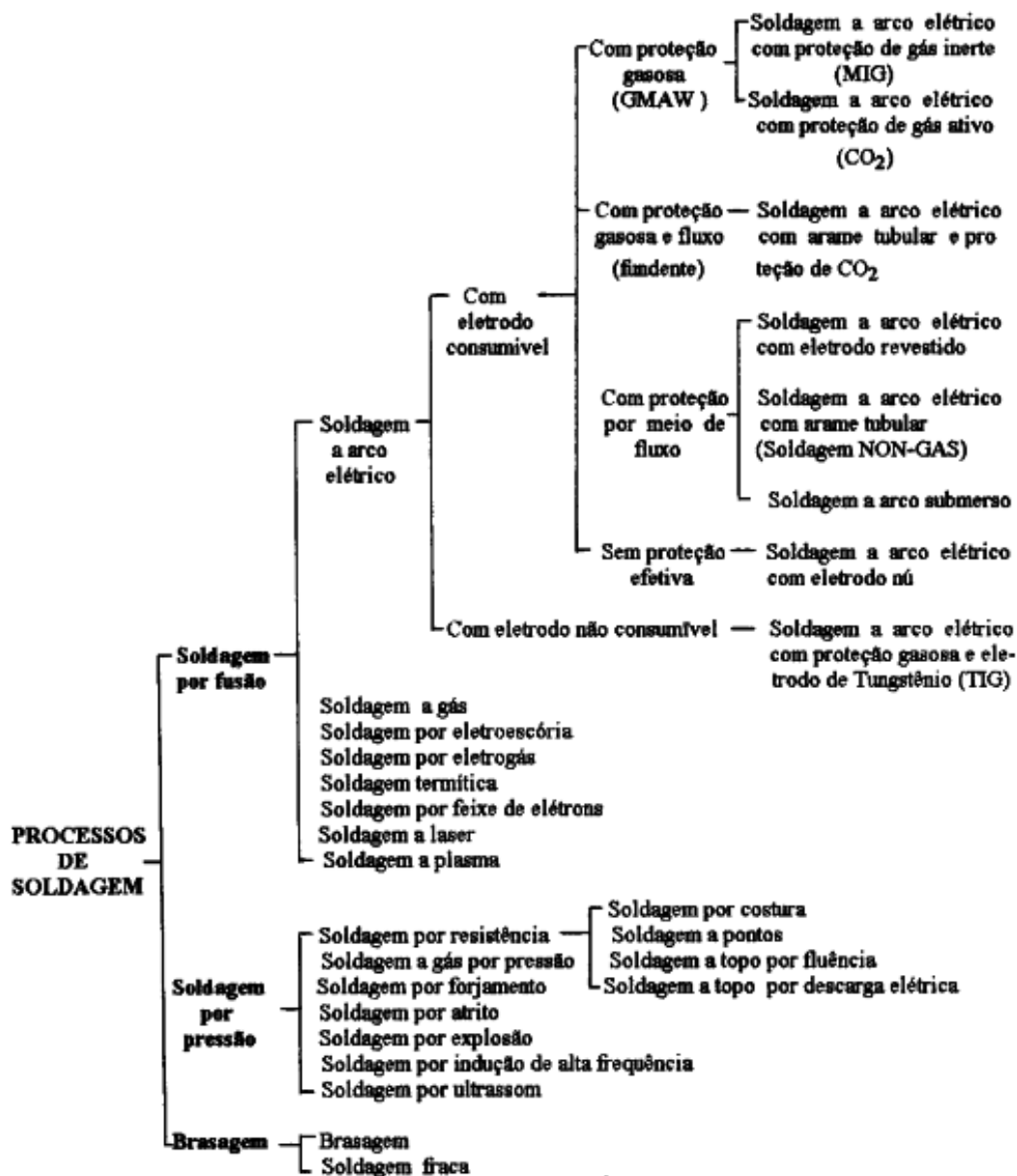
Fonte: OKUMURA, 1982, pag.3.

2.3.2. Classificação dos processos de soldagem

Existem diversos processos de soldagem, mas nenhuma forma universal para classificação dos mesmos, porém neste trabalho utiliza-se a classificação segundo BRANDI, 1992, onde os processos podem ser classificados pela natureza da união.

Nesta forma de classificação tanto WAINER, BRANDI MELLO, 1992 e OKUMURA, 1982 concordam com o método apresentado na Figura 4.

Figura 4- Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.



Fonte: OKUMURA, 1982, pag.9.

Neste trabalho foram utilizados apenas processos de soldagem por fusão através de arco-elétrico, onde segundo BRANDI (1992), pode-se definir arco elétrico como a descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciado por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido.

Sabe-se que o arco elétrico devido a sua concentração de energia, facilidade na utilização, custo reduzido e níveis aceitáveis de segurança, é o meio

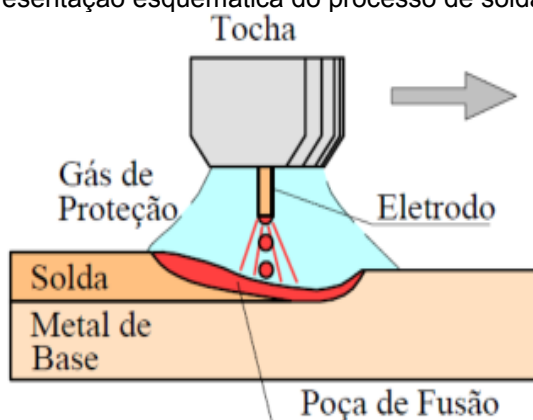
mais utilizado na soldagem por fusão. O processo de soldagem por arco elétrico ocorre devido a um gás ionizado a uma alta temperatura que também pode ser chamado de plasma. O termo arco é definido graças ao arco resultante da convecção de gases quentes gerados pelo mesmo. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.4. Soldagem MIG/MAG

Este processo de soldagem ocorre quando um arame consumível entra em contato com o metal de base, ou seja, as peças a serem unidas, tem-se assim o fechamento de um circuito fazendo com que a circulação de corrente elétrica entre o polo positivo e o negativo, aqueça os metais ali presente até a temperatura de fusão e o resultado é a chamada "poça de fusão". Esta poça de fusão é composta fusão do arame ou metal de adição, e a fusão do metal de base. Após o resfriamento desta poça de fusão temos a união entre estes metais. (FIGUEIREDO,2015).

Neste processo existe ainda a proteção do arco elétrico que é realizada através de uma mistura gasosa, onde pode se ter o processo MIG (Metal Inert Gas – Gás Inerte de Metal), quando a proteção gasosa utilizada é inerte ou contém misturas ricas em gases inertes ou MAG (Metal Active Gas – Gás Ativo de Metal), quando o gás utilizado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

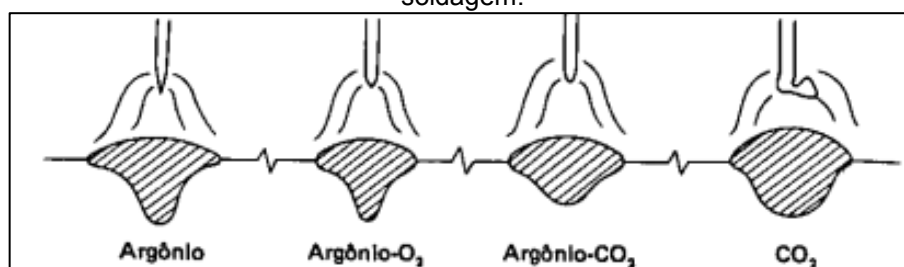
Figura 5 - Representação esquemática do processo de soldagem MIG/MAG.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense 2009, pag. 234.

O tipo de gás influencia as características do arco e transferência de metal, penetração, largura e formato do cordão de solda, velocidade máxima de soldagem, tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da soldagem. A Figura 66 mostra um perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas. Entretanto, deve-se lembrar que o perfil do cordão de solda pode ser totalmente modificado pela alteração do conjunto de parâmetros operacionais de soldagem. (FIGUEIREDO, 2015).

Figura 6 –Diferenças em penetração, em função do gás de proteção utilizado no processo de soldagem.



Fonte: OKAMURA, 1986 pág. 23.

Na soldagem MIG/MAG, são considerados materiais consumíveis o eletrodo e o gás de proteção e, em alguns casos, um líquido para proteção da tocha e regiões adjacentes à solda contra a adesão de respingos. As demais peças, tais como bico, bocal, mangueiras, etc., são consideradas peças de reposição e/ou sobressalentes do equipamento MIG/MAG. (FIGUEIREDO, 2015).

Este tipo de soldagem, pode ser utilizada em materiais de diferentes espessuras e tanto em metais ferrosos e quanto não ferrosos. Sendo que, o processo MAG é utilizado apenas para materiais ferrosos com o gás de proteção CO₂ ou misturas ricas nesse gás, e a soldagem MIG pode ser utilizada tanto em materiais ferrosos como não ferrosos como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O processo MIG/MAG apresenta uma série de vantagens onde se destacam um diferencial entre solda de eletrodo revestido, as vantagens são referentes a altas taxas de deposição e alto fato de ocupação do soldador, grande versatilidade quanto ao tipo de matéria e espessuras, não existência de fluxo de

soldagem e conseqüentemente a ausência de operação para remoção da escória, e os operadores não necessitam de uma habilidade tão elevada. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Segundo Figueiredo (2015), apesar das grandes vantagens este processo tem algumas limitações:

- Maior sensibilidade à variação dos parâmetros;
- Equipamentos de soldagem complexos, caros e menos portáteis;
- Utilização mais restrita em locais de difícil acesso, devido à maior complexidade e dimensões dos equipamentos;
- O arco deverá ser protegido das correntes de ar, para garantir a eficiência de proteção realizada pelos gases empregados;
- Os altos níveis de radiação e calor gerado fazem com que o operador ponha resistência à utilização deste processo.

2.5. Processo de Soldagem por Eletrodo Revestido

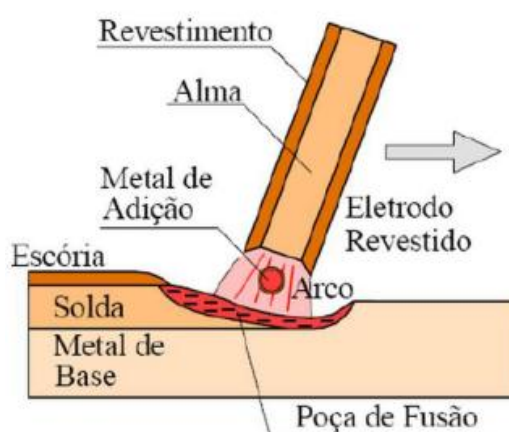
O processo de soldagem com eletrodo revestido é um processo no qual a fusão do metal é produzida pelo aquecimento de um arco elétrico, mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base a ser soldada. (SANTOS, 1995). O revestimento tem a função de estabilizar o arco, proteger o metal fundido por meio da formação de uma atmosfera de gases protetores e fornecer elementos de liga à solda. (FIGUEIREDO,2015).

Marques, Modenesi e Bracarense (2009) afirmam que o eletrodo revestido consiste em uma vareta metálica, que é revestida por uma mistura de diferentes materiais que tem diversas finalidades entre elas, estabilizar o arco elétrico, ajuste de composição química do cordão com a adição de elementos de liga para eliminar as impurezas e proteção da poça de fusão e o metal de solda contra contaminantes externos, através de uma geração de gases e de escória.

É muito utilizado em soldagens de campo e em manutenção, apresenta

baixo custo, produz uniões soldadas com boas propriedades e tem grande versatilidade, tanto com relação à posição de soldagem quanto ao projeto da junta. Requer mão-de-obra habilidosa, exige uma frequente troca de eletrodo e quando se executam vários passes, é necessário que se remova a escória após a deposição de cada um deles. (FIGUEIREDO, 2015).

Figura 7 - Esquema de soldagem por eletrodo revestido.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense 2009, pag. 181.

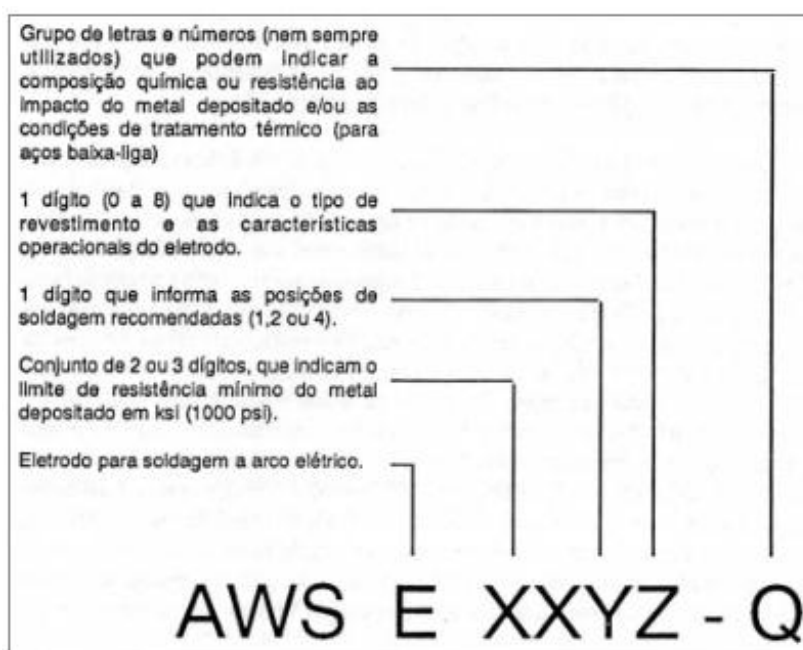
Esse processo apresenta diversas vantagens, sendo elas o baixo custo, simplicidade dos equipamentos, possibilidade de acesso a lugares difíceis, ambientes abertos, entre uma infinidade de metais que podem ser soldados com eletrodos revestidos. Sendo o principal processo de soldagem industrial até os anos 60, a soldagem com eletrodo revestido vem decrescendo, devido sua baixa produtividade em comparativos com outros métodos e também pelo fato de ser um processo bastante manual, de difícil mecanização (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Um eletrodo revestido é constituído por uma vareta metálica, com diâmetro entre 1,5 e 8 mm e comprimento entre 23 e 45 cm, recoberta por uma camada de fluxo (revestimento). A composição do revestimento determina as características operacionais dos eletrodos e influencia a composição química e propriedades mecânicas da solda efetuada. Algumas das funções do revestimento são:

- Formar uma camada de escória protetora;
- Facilitar a remoção da escória e controlar as propriedades físicas e químicas e a soldagem nas diversas posições;
- Dissolver óxidos e contaminações na superfície da junta;
- Reduzir o nível de respingos e fumos;
- Diminuir a velocidade de resfriamento da solda;
- Possibilitar o uso de diferentes tipos de corrente e polaridade;
- Aumentar a taxa de deposição (quantidade de metal depositado por unidade de tempo), entre outras.

Como consequência, existe no mercado um grande número de tipos de eletrodos, apresentando diferentes características operacionais, aplicáveis a diferentes materiais e que produzem soldas com diferentes características. O sistema de classificação de eletrodos da AWS utiliza um conjunto de números e letras que fornecem várias informações a respeito dos eletrodos, como mostra na Figura 8.

Figura 8 - Sistema de classificação de eletrodos revestidos segundo a AWS.



Fonte: Figueiredo, 2005 pag. 40.

Neste sistema, a identificação se inicia pela letra E, que indica que o consumível é um eletrodo. O conjunto seguinte, formado por dois ou três algarismos, indica o limite de resistência mínimo à tração do metal depositado pelo eletrodo, em ksi (1.000psi). O dígito seguinte é um algarismo que indica a posição de soldagem em que o eletrodo pode ser utilizado, sendo 1 para a soldagem em todas as posições, 2 para soldagem nas posições plana e horizontal e 4 para soldagem também na posição vertical ascendente. O próximo dígito, que é o último para eletrodos de aço doce, indica o tipo de revestimento do eletrodo e, portanto, suas características operacionais.

2.6. Soldabilidade

Segundo a sociedade americana de soldagem (AWS - American Welding Society), uma definição simples para o termo soldabilidade seria a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço.

O conceito de soldabilidade abrange muitos detalhes, porém principalmente leva em conta as dificuldades encontradas durante a soldagem e o comportamento do material soldado em serviço. Materiais com boa soldabilidade asseguram características iguais ou melhores do que o material base puro. (DRAPINSKI, 1979).

Com base nessas definições, para melhor determinar a soldabilidade, é interessante fazer algumas suposições, que são a de que o metal base é o adequado para a aplicação desejada, isto é, ele possui as propriedades adequadas e necessárias para resistir aos requerimentos da aplicação e se o projeto da estrutura soldada e de suas soldas é adequado para o uso pretendido.

Baseado nestas suposições, é necessário, então, avaliar a própria junta soldada. Idealmente, uma junta deveria apresentar resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistências à fadiga e à corrosão uniformes ao longo da solda e similares às propriedades do material adjacente.

Segundo Modenesi, (2011) na maioria dos casos, a produção de uma solda envolve o uso de calor e/ou deformação plástica, resultando em uma estrutura metalúrgica diferente do metal base. Soldas podem, também, apresentar descontinuidades como vazios, trincas, material incluso, etc. Três tipos de problemas devem ser considerados:

- Problemas na zona fundida ou na zona termicamente afetada que ocorrem durante ou imediatamente após a operação de soldagem, como poros, trincas de solidificação, trincas induzidas pelo hidrogênio, perda de resistência mecânica, etc;
- Problemas na solda ou no material adjacente que ocorrem nas etapas de um processo de fabricação posteriores à soldagem. Incluem, por exemplo, a quebra de componentes na região da solda durante processos de conformação mecânica;
- Problemas na solda ou no material adjacente que ocorrem em um certo momento durante o serviço da estrutura soldada. Estes podem reduzir a eficiência da junta nas condições de serviço e incluem, por exemplo, o aparecimento e a propagação de trincas por diversos fatores, problemas de corrosão, fluência, etc.

2.6.1. Soldabilidade de Ferros Fundidos:

Segundo Zeemann, 2003:

“Existem ferros fundidos com resistência mecânica tão boa quanto a dos aços estruturais apesar de possuírem %C pelo menos 10x superior, o que com certeza é um fator complicador na soldagem de qualquer tipo de ferro fundido.”

Modenesi (2011) cita várias outras características que dificultam a soldagem do ferro fundido, destacando-se:

- Alto teor de carbono e, em geral, de fósforo e de enxofre;
- Tendência à formação de cementita na região da solda devido às velocidades de resfriamento relativamente elevadas associadas com a soldagem;

- Baixa ductilidade do metal base e de sua zona termicamente afetada;
- Estrutura porosa dos ferros fundidos cinzento, maleável e nodular favorece a absorção de graxas e outras sujeiras durante o seu uso.

Ferros fundidos brancos são considerados, em geral, não soldáveis devido à sua extrema fragilidade. A soldagem pode ser utilizada, em ferros fundidos cinzentos, maleáveis, nodulares e vermiculares, principalmente para eliminar defeitos de fundição e para reparar peças trincadas ou mesmo fraturas.

Com base no tipo de metal de adição utilizado, a soldagem de ferros fundidos pode ser dividida em dois grupos principais:

- Procedimentos que fornecem um metal depositado de composição similar ao metal base (Ferro fundido), e;
- Procedimentos que fornecem um metal depositado de aço ou ligas com um elevado teor de metais não ferrosos (cobre/níquel).

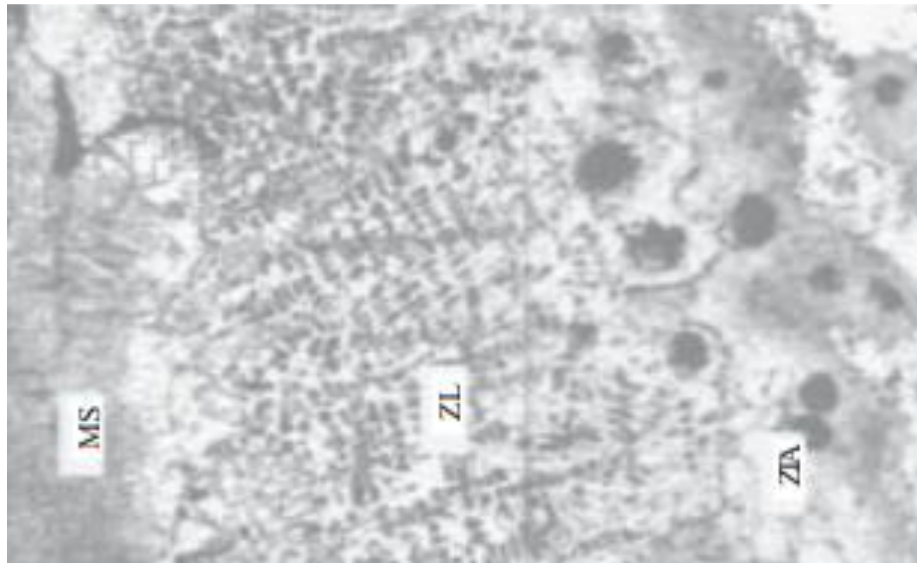
2.6.2. Transformações que a soldagem promove nos ferros fundidos

Segundo Zeeman (2003), existem duas preocupações básicas na soldagem do ferro fundido que são:

- As alterações sofridas nas regiões aquecidas (ZTA – Zona Termicamente Afetada), visto que qualquer ferro fundido quando resfriado rapidamente pode se tornar um ferro fundido branco extremamente frágil ou um aço temperado;
- A quantidade adicional de carbono que se introduz na poça de fusão, cuja composição depende do tipo de consumível a ser adotado.

Para melhor exemplificar estas preocupações está ilustrado na Figura 9, as regiões encontradas em um cordão de solda em um ferro fundido nodular de matriz ferrítica utilizando um eletrodo de baixo carbono AWS E6013 com pré-aquecimento de 150°C.

Figura 9 - Análise metalográfica ferro fundido.



(Fonte: Zeeman, 2003, pag. 4.

A figura acima apresenta 3 regiões distintas de um mesmo material soldado.

- MS – Metal de solda se apresenta totalmente martensítico com dureza na ordem de 60 HRc com trincas mesmo sem ter sido solicitado mecanicamente, devido ao tensionamento residual e ao de transformação martensítica;
- ZL – Existe uma larga região no metal de solda próxima a zona de ligação que é uma região de alta diluição, onde a estrutura é similar à de um ferro fundido branco, portanto frágil;
- ZTA – Existe uma região de zona termicamente afetada, como uma faixa martensítica típica de um aço temperado e não revenido, muito frágil e susceptível ao trincamento a frio.

Existem dois tipos básicos de procedimento de soldagem para os ferros fundidos, aplicados na condição de soldagem de peças pequenas e ou de peças grandes que possuem como objetivo evitar a diferença de estruturas em um mesmo material soldado, cujo os procedimentos estão explicados na Tabela 3

Tabela 3 – Dados básicos para procedimentos de soldagem de reconstrução de ferros fundidos.

Aplicação	Tipo	Consumível	Cuidados Especiais	Tratamentos Anteriores ou Posteriores
Peças de pequena espessura	A quente	AWS E CI Ferro Fundido	Evita restrições	Pré aquecimento em temperaturas na ordem de 400°C a 600°C
Peças de pequena espessura sujeitas a carregamento	A frio	AWS E CI (níquel) AWS E NiFe CI (níquel ferro)	Técnica de baixo calor como eletrodo de pequena bitola cordões curtos e estreitos, passe a ré	Manutenção sempre a frio

Fonte: Adaptado de Zeeman, 2003, pag. 3.

O aquecimento e a fusão provocados pela soldagem importam em transformações estruturais da região soldada, as quais se relacionam intimamente com o comportamento mecânico da solda como um todo. Esse comportamento dependerá dos seguintes fatores: composição química da metal base e do metal acrescentado, temperatura do ato da solda, condições do resfriamento tratamento térmico posterior, etc. (FUNDIÇÃO TUPY, 1971).

Quando executada na temperatura ambiente, a estrutura tende a ser martensítica ou rica em carbonetos. Prefere-se, portanto, soldar com pré-aquecimento de 250°, e os eletrodos deverão de ser aço ferro – níquel ou níquel; os que garantem melhor resultado contem 55% Ni e 45% Fe. (FUNDIÇÃO TUPY, 1971).

2.7. Parâmetros De Soldagem

Conforme Fortes (2005), após a seleção do arame e do gás as condições de operações devem ser selecionadas. Os quatro parâmetros mais importantes consistem em a corrente de soldagem, extensão do eletrodo, tensão de soldagem e velocidade de soldagem. Esses parâmetros serão importantes para as características da solda, e seus valores devem ser registrados para qualquer tipo diferente de solda, pois assim permitirá a reprodutibilidade do parâmetro. Ainda Fortes (2005) apresenta os quatro parâmetros como uma abordagem teórica:

Corrente de Soldagem: A corrente de soldagem tem grande influência na taxa de fusão do arame eletrodo, na largura, na penetração e no reforço do cordão de solda. Com todas as outras variáveis do processo mantidas constantes um aumento na corrente proporciona um aumento na taxa de deposição, na penetração e na largura do cordão de solda.

Extensão do Eletrodo: Esta variável representa o comprimento do arame não fundido a partir do bico de contato até o início do arco. Neste trecho de arame por onde passa corrente elétrica gera-se calor por efeito Joule. Quanto maior comprimento do eletrodo, maior será o calor gerado por efeito Joule e conseqüentemente terá um acréscimo na taxa de fusão de material. Este calor gerado não só afeta a taxa de fusão de material, mas também influencia a taxa de deposição e a penetração do cordão de solda.

Tensão de Soldagem: A tensão do arco está diretamente relacionada com comprimento do arco, pois, mantendo as demais variáveis constantes, um acréscimo na tensão do arco resulta numa elevação do comprimento do arco. Lembrando que o mesmo comprimento do arco pode estar relacionado com diferentes tensões, dependendo de fatores como corrente de soldagem, gás de proteção e comprimento do eletrodo. A tensão é a principal variável na definição da largura do cordão de solda e em conjunto com a corrente exerce influência direta no modo de transferência metálica. Uma diminuição na tensão resulta em cordões com perfil estreito e mais abaulado, já um aumento tende a gerar cordões mais planos com maior largura da zona de fusão.

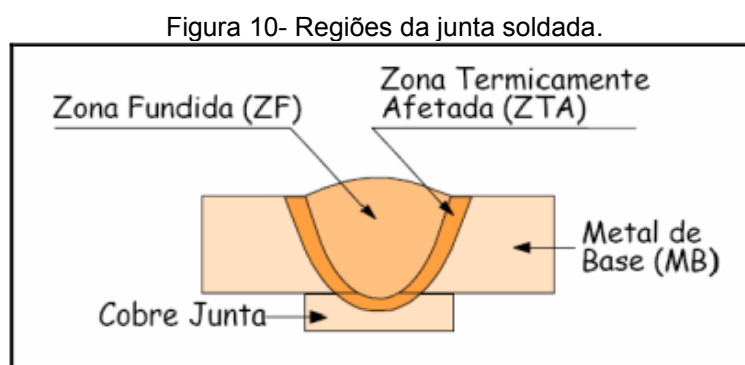
Velocidade de Soldagem: Consiste entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo, normalmente expressado em cm/min. ou mm/min.. Observa-se que a penetração, primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias.

Quando a velocidade de soldagem é muito baixa, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Já quando se utiliza uma velocidade

de soldagem muito elevada, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui. Outro aspecto a se considerar é que o uso de velocidades excessivas pode resultar em mordeduras e falta de penetração ao longo do cordão de solda.

2.8. Geometria da junta soldada

Ao contrário do que muitos pensam uma junta soldada não é constituída unicamente pelo que se convencionou chamar de cordão de solda. Do ponto de vista da metalurgia da soldagem, qualquer região na qual em decorrência dos efeitos da soldagem tenham ocorrido consideráveis alterações em suas condições iniciais, é constituinte da junta soldada. A Figura 10 indica de forma esquemática as diferentes regiões que constituem uma junta soldada.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense 2009, pag.192.

O processo de soldagem pela sua natureza é caracterizado por um resfriamento rápido quando comparado a um processo de fundição. Portanto, as propriedades da solda - bem como as seções da fundição expostas a essas altas temperaturas, conhecido como a zona afetada pelo calor - podem ser diferentes do processo de fundição. (ASM, BUSHAY, 1993).

Durante a soldagem, o carbono pode se difundir para a austenita. Quando o resfriamento ocorre, esta austenita se transforma em martensita. Esta estrutura martensitica é muito frágil e suscetível a trincas. A quantidade de martensita formada

depende da química ou do tipo de ferro fundido. A estrutura martensítica quebradiça pode ser modificada por tempera usando controle de temperatura pré-aquecido e interpassado, por soldagem de passagem múltipla ou por um tratamento térmico pós-soldado. (ESAB, 2015).

A região parcialmente fundida é uma área ao lado da ZTA, onde o calor da solda foi alto o suficiente para causar derretimento parcial do metal base, perto da linha de fusão. Esta é a zona mais crítica na solda, porque ao resfriar, esta área congela como ferro fundido branco, devido às altas taxas de resfriamento. A região é muito complexa e pode conter muitos tipos diferentes de microestruturas. Se a quantidade de grafite dissolvida durante a soldagem for suficientemente alta e formando uma matriz contínua fundida, é provável que a rede de carboneto também seja contínua, levando a problemas. Como a região parcialmente fundida contém uma grande proporção de produtos duros, é a zona mais difícil da solda. (ASM, BUSHAY, 1993).

A variação de dureza resultante torna esta região responsável por muitos dos problemas mecânicos experimentados na soldagem de ferro fundido. A forma mais eficaz de reduzir a gravidade dos problemas de trincas é reduzir as temperaturas e a duração da exposição a altas temperaturas. Isso pode ser controlado por pré-aquecimento, temperatura do processo e seleção adequada de metal de enchimento. (ASM, BUSHAY, 1993).

Na Zona Termicamente Afetada (ZTA), embora a temperatura de processamento não tenha sido suficiente para modificar o estado físico dos materiais envolvidos, ocorrem importantes transformações metalúrgicas no estado sólido, ou seja, são registradas importantes alterações nas propriedades iniciais dos materiais utilizados na construção metálica. Entre as transformações citadas encontram-se principalmente o crescimento de grãos (aços e outros), dissolução ou coalescimento de precipitados (ligas de alumínio cobre), e o recozimento (ligas alumínio magnésio). (ESAB, 2015).

E por fim a região da Zona Fundida onde a temperatura de processamento é suficiente para fundir os materiais envolvidos, ou seja, parte de metal de base

juntamente com parte do metal de adição passam para a forma líquida formando a denominada poça de fusão. Nesta região, diversos fenômenos ligados a metalurgia física manifestam-se simultaneamente, dando origem a uma série de transformações, não só de origem metalúrgica, como também química e física. A forma como ocorre à solidificação da zona fundida após o resfriamento da região tem grande influência na qualidade final da junta soldada. (ESAB, 2015).

2.9. Defeitos em solda

Uma descontinuidade na solda pode ser considerada como uma interrupção da estrutura típica ou esperada de uma junta soldada, estas podem ser devido a diversos fatores como a falta de homogeneidade e das características metalúrgicas do material ou da solda

A simples existência de uma descontinuidade em uma peça, não quer dizer que a mesma esteja rejeitada, este veredito dependerá da aplicação do componente fundido que em geral é comparada com um nível aceitável no projeto ou norma preexistentes. (MODENESI, 2001).

Segundo Modenesi (2001), toda e qualquer descontinuidade pode vir a acarretar ao sucateamento de uma junta soldada, sendo assim as seguintes descontinuidades devem ser evitadas para evitar o sucateamento do componente soldado.

Distorção: é a mudança de forma que a peça toma após ser soldada devido a deformações térmicas durante o processo de soldagem. Este defeito pode ser evitado com um projeto adequado, sequenciamento de cordões de solda, desempenho com ou sem utilização de calor, etc.

Perfil incorreto da Solda: O perfil, de uma solda é importante pois variações geométricas bruscas causam pontos de concentração de tensão facilitando assim o aparecimento de trincas.

Figura 11 - Exemplos de perfis inadequados.



Fonte: MODENESI, 2001, pág.2.

Porosidades são formadas pela evolução de gases, na parte posterior da poça de fusão, durante a solidificação da solda. As principais causas operacionais da formação deste defeito estão relacionadas com contaminações de sujeira, oxidação e umidade na superfície do metal base.

Inclusões de escória, este termo é utilizado para descrever partículas de oxido e outros sólidos não metálicos aprisionados entre passes de solda ou entre a solda e o metal base. Geralmente ocorrem devido a execução de vários passes, onde parte da escoria depositada não é retirada adequadamente antes do próximo passe.

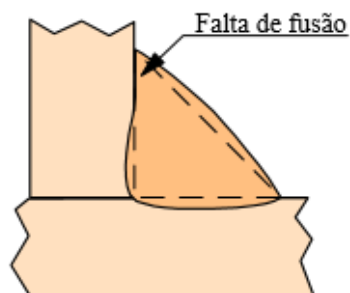
Figura 12 - Escoria entre passes.



Fonte: MODENESI, 2001, pág.3.

Falta de Fusão: A ausência de fusão entre passes de solda ou entre a solda e o metal base, é causada por um aquecimento inadequado do material sendo soldado. Esta falha é muito severa pois além de ser um concentrador de tensão pode reduzi a seção efetiva da solda para resistir esforços mecânicos.

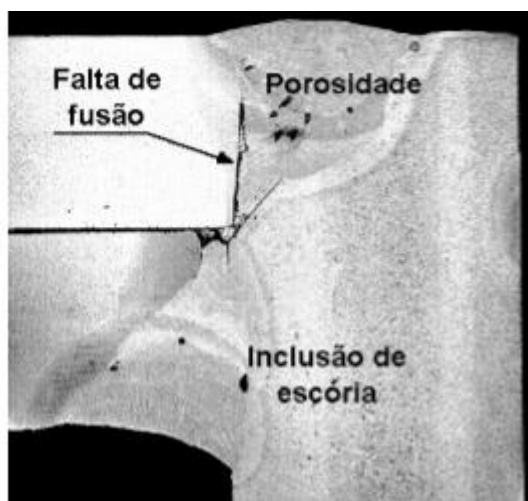
Figura 13 - Falta de Fusão durante a solda.



Fonte: MODENESI, 2001, pág.3.

Trincas: Estas descontinuidades no geral são as mais graves em uma junta soldada por serem fortes concentradores de tensão. Elas podem surgir após a soldagem em operações de fabricação posterior a soldagem ou durante a aplicação do componente.

Figura 14 - Diversas descontinuidades de um cordão de solda.



Fonte: MODENESI, 2001, pág.7.

3. MÉTODOS E MATERIAIS

3.1. Materiais e Equipamentos

A obtenção do material para o presente estudo foi através de uma doação da TECNOTÊMPERA LTDA. A mesma cedeu os materiais de seu estoque e também informou os valores dos mesmos conforme mostrado na Tabela 7, assim tomou-se como base para comparação dos dados obtidos neste trabalho.

Para fabricação das amostras todos os equipamentos utilizados neste trabalho são dos laboratórios de usinagem, soldagem e ensaios mecânicos do IFSC. Segue abaixo imagem dos equipamentos utilizados bem como algumas características dos mesmos de acordo com cada processo executado.

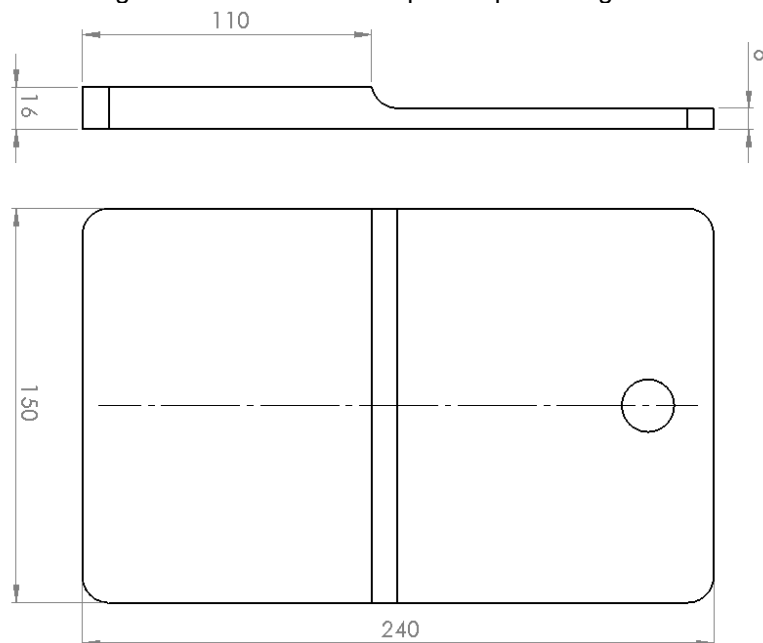
Os corpos de provas recebidos possuíam um formato retangular medindo 204x150mm, porém com 2 espessuras diferentes. Uma metade com espessura de 8mm e outra com 16mm, sendo assim optou-se pela utilização da parte com maior espessura devido ao tipo da solda ser utilizada. Nesta etapa foi realizado o corte com a serra mostrada na Figura 16, bem ao centro da amostra para assim obter 12 corpos de prova com as dimensões de 102x150x16 mm.

Figura 15 – Serra Industrial Automatizada utilizada no corte das amostras.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 16 - Dimensões corpos de prova originais.



Fonte: Elaboração Própria.

As dimensões finais dos corpos de prova foram obtidas através de processos de usinagem em máquinas convencionais (Ex.: Fresamento). O primeiro passo de usinagem foi executar o faceamento e esquadrejamento em todos os corpos de prova, utilizando fresadora conforme Figura 17 e fresa de cabeçotes de $\text{Ø}50\text{mm}$.

Figura 17 - Fresadora Ferramenteira Diplomat / 3 Eixos / Painel Digital de coordenadas utilizada nos processos de usinagem.



Fonte: Elaboração Própria.

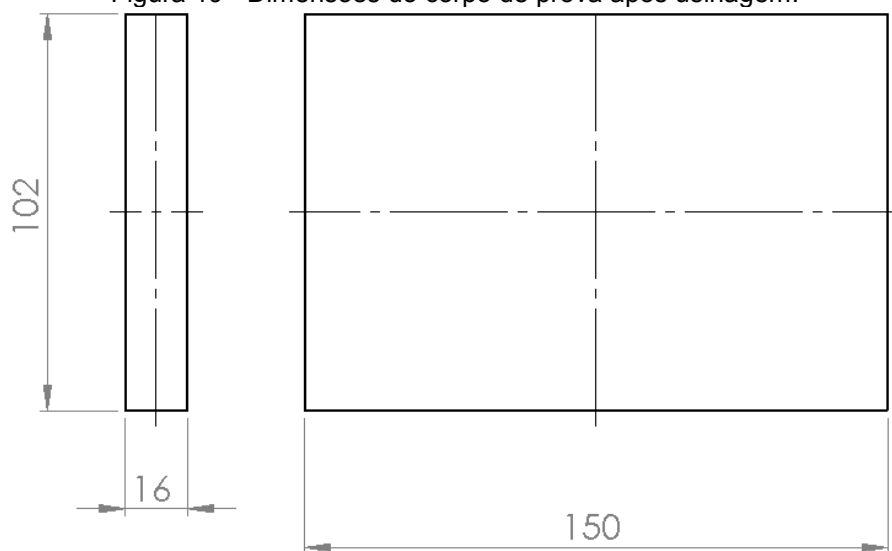
A Figura 18 apresenta o primeiro passo, onde foram usinadas ambas as faces dos corpos de prova e a Figura 19 apresenta as dimensões finais dos CP.

Figura 18 - Faceamento dos corpos de prova.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 19 - Dimensões do corpo de prova após usinagem.

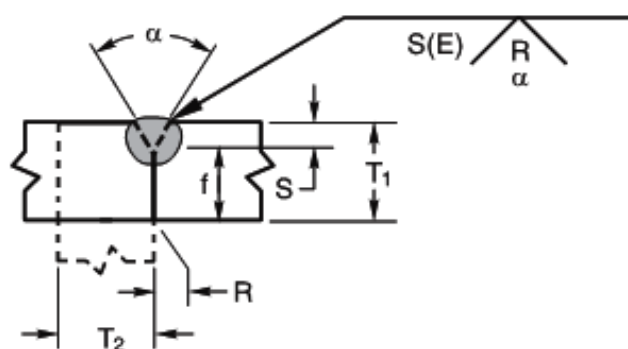


Fonte: Elaboração Própria.

O segundo passo foi a execução do chanfro em V em todos os corpos de prova, como as peças possuíam uma espessura de aproximadamente 16 mm optou-se pela execução de um chanfro de 10 mm de profundidade. As dimensões e o tipo

de solda escolhido para a realização dos estudos foi à solda de topo tipo V com dimensões conforme a norma AWS D1.1, pois é uma das soldas mais comumente utilizadas na indústria de componentes estruturais.

Figura 20 - Dimensões da junta soldada.



Fonte: AWS D1.1:2010, pág.80.

Sendo: $\alpha - 60^\circ$, $T_1 - 15\text{mm}$, $R - 0\text{mm}$, $S - 10\text{mm}$

Como resultado, obteve-se 12 corpos de provas para soldagem, optou-se por utilizar três corpos de prova para cada processo/parâmetro, garantindo assim que se houvesse algum problema em um dos CPs de modo que não se pudesse considera-lo no trabalho o mesmo não seria invalidado.

Sendo assim, os corpos de provas foram divididos de acordo com a Tabela 4 onde mostram a divisão dos corpos de prova de acordo com o processo e tratamento térmico realizado.

Tabela 4 - Diferentes parâmetros utilizados a fim de comparação.

Qtd. CPs	Processo de soldagem	Tratamento
3	Eletrodo Revestido	Sem tratamento
3	Eletrodo Revestido	Com pré e pós Aquecimento
3	MIG	Sem tratamento
3	MIG	Com pré e pós Aquecimento

Fonte: Elaboração Própria.

3.2. Processo de soldagem

A seleção do eletrodo revestido e do arame utilizado foi através de catálogo de fornecedores de consumíveis de soldagem.

O eletrodo selecionado foi o Eletrodo revestido OK 92.58 (classificação segundo a ASME SFA 5.15 / ENiFe-CI) do fabricante ESAB. Este eletrodo possui uma alma de níquel-ferro e é indicador para soldagem de ferros fundidos de vários tipos, a frio ou com moderado pré-aquecimento.

- Arame tubular AWS A5.15 Ni-Fe Diâmetro: Ø2,5 mm;
- Gases para soldagem (Argônio e Oxigênio);

Figura 21 - Máquina inversora portátil, para soldar com eletrodos revestidos e TIG Sumig Tiger 166/ Tensão de 220V / Corrente de 5 a 160 A.



Fonte: Elaboração Própria.

A máquina de solda utilizada possui regulagens de tensão, corrente e possibilita a soldagem por processo MIG ou por eletrodo revestido. Porém, o procedimento utilizado tinha os valores de tensão e corrente fixos.

Figura 22 - Máquina de Solda MIG/MAG Hawk 338 – Corrente de regulação 30 a 300 A/ Diâmetro do arame 0,6 / 1,2 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

3.2.1. Processo de Técnica de Soldagem a frio

Este processo teve o embasamento em um processo utilizado pela Casting Service (<https://www.castingervicesinc.com>) que é uma empresa americana especializada em recuperação de peças de grande porte de ferro fundido cinzento, onde não é possível a realização de tratamentos térmicos seja este devido ao tamanho das peças ou por dificuldade e alto custo de desmontagem destas peças em campo para que seja realizada sua soldagem em ambiente com temperatura controlada.

O processo se inicia pela limpeza de toda a região da solda, para evitar contaminação e comprometimento da junta soldada. O processo de soldagem foi realizado sem pré-aquecimento, sendo assim em nenhum caso a temperatura da metal base excedeu a 60°C, para que assim sejam minimizadas as alterações estruturais. A temperatura interpasses também foi controlada. Para isso foi utilizado cordões intermitentes para evitar o superaquecimento da peça. Cordões de solda foram feitos os mais curtos possíveis, preferindo por fazer cordões de 50mm, e após cada deposição de material foi executado martelamento utilizando martelo esférico, verificando se o preenchimento foi garantido.

Já para o processo com eletrodo revestido, foi removido toda a escória com martelamento e escova de aço. Esta operação foi feita antes de cada novo cordão e na realização de novos cordões foi feito de modo que metade do novo cordão ficasse no anterior e metade no fundido, garantindo assim a fusão completa e fazendo com que os defeitos na linha de fusão sejam minimizados.

3.2.2. Processo de Técnica de Soldagem com Tratamento Térmico

Este processo assemelha-se ao processo de soldagem a frio em relação aos passos executados, porém o grande diferencial é o pré e pós aquecimento executado. Os valores dos tratamentos encontram-se na Tabela 5. Executado a limpeza da junta antes de iniciar a soldagem, removendo óleo, graxa, sujeira, pó, pintura, etc. Utilizado processo de lixamento com disco com cerdas de aço.

O escovamento foi aplicado entre cada passe para melhorar as condições de limpeza, onde também foi realizado o martelamento entre passes para reduzir as tensões residuais. Efetuado a deposição de material usando cordões de 30 mm e deixando 50 mm de espaço entre cada cordão. Este procedimento tinha por objetivo reduzir o superaquecimento da área, e diminuir a área termicamente afetada, o que evita a formação de trincas. Depois de concluir a primeira camada de cordões, foi retornado ao início e soldado os espaços vazios deixados entre os mesmos.

Tabela 5 - Dados utilizados nos tratamentos térmicos.

Taxa de Aquecimento	Máx: 70°C/h
Taxa de Resfriamento	Máx. 50°C/h
Temp. Pré Aquecimento	500 +/- 50°C
Temp. Pós aquecimento	400 +/- 50°C
Tempo de Tratamento	1h

Fonte: Elaboração Própria.

O eletrodo utilizado possui uma alma de níquel-ferro sendo utilizado para soldagem de ferro fundido cinzento, maleável e nodular, a frio ou com moderado pré-

aquecimento, quando o metal depositado necessita usinagem posterior; também usado para enchimento de falhas de fundição; o depósito apresenta a mesma coloração da peça fundida. (ESAB, 2015).

Os parâmetros de soldagem conforme Tabela 6, foram obtidos do fornecedor do eletrodo onde são indicados os valores das propriedades mecânicas após soldagem e os valores de tensão e corrente a serem utilizados no processo de soldagem.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na soldagem.

Eletrodo	Metal Depositado	Propriedades mecânicas	Tensão	Faixa de corrente (A)
ASME SFA 5.15 ENiFe-CI	C 1,14 / Si 0,85 Mn 0,20 / Ni 60	L.R. 450Mpa Dureza 180HB	18-23VCA	80 - 90

Fonte: Catalogo de consumíveis ESAB, pág. 16.

Em nenhum dos procedimentos foi utilizado esmeril para preparação de chanfro em ferros fundidos pois a abrasão faz com que o carbono presente precipite e forme cementita, além de partículas do próprio esmeril que penetrara na superfície do material prejudicando a penetração do cordão de solda. Em ambos os processos foram utilizados eletrodos e arames de solda recomendados para reparo em ferro fundido segundo o fornecedor de consumíveis de soldagem. (ESAB, 2015).

3.3. Ensaio mecânicos

Foram utilizados nos ensaios mecânicos equipamentos encontrados no IFSC no laboratório de ensaios de materiais, sendo eles caracterizados na Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 - Máquina de ensaios universal DL10000/ Capacidade 10000 kgf/ Faixa de abertura (sem garras): de 120 A 1370 mm / Largura útil entre as colunas: 400 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 24 - Durômetro de bancada modelo EQTRB-250 fabricante EQUILAN.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 25 - Forno com controle de Temperatura e umidade para armazenamento de eletrodos.



Fonte: Elaboração Própria.

Foram utilizados ainda:

Martelo de cabeça esférica utilizado entre os passes de soldagem no processo de eletrodo revestido. Este processo de martelamento alivia as tensões de soldagem.

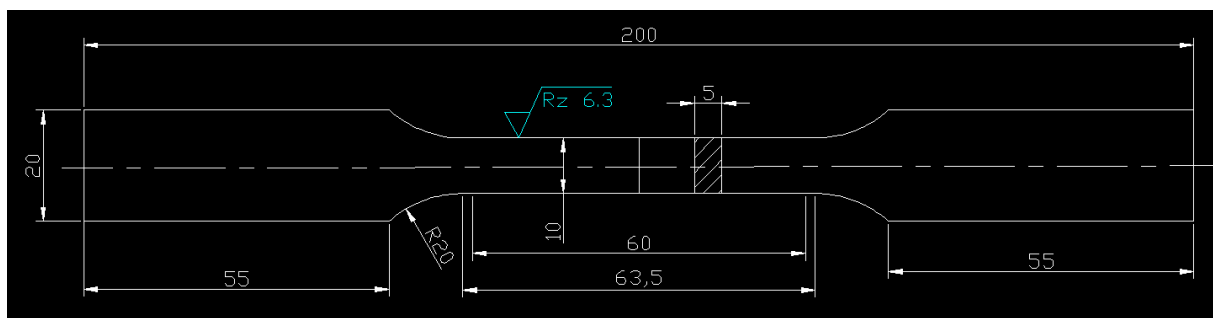
Escova de aço para limpeza dos cordões de solda, removendo assim a escória presente após processo de soldagem por eletrodo revestido.

Equipamentos de proteção individual como máscara de proteção, avental de proteção e mangotes, sapato de segurança, etc.

3.3.1. Ensaio de Tração

O ensaio de tração ocorreu conforme norma NBR ISO 6892 - Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente, de onde foram retiradas as dimensões dos corpos de prova, métodos de ensaio, velocidade do ensaio, etc. Já com as dimensões definidas conforme Figura 26, foram removidos os corpos de prova para o ensaio de tração de cada uma das amostras soldadas. Como o objetivo era de analisar a solda da amostra, foi retirada o CP perpendicularmente do cordão de solda.

Figura 26 – Desenho esquemático dos corpos de prova.



Fonte: Elaboração própria com base nas dimensões mostradas na NBR ISO 6892.

A Figura 27, apresenta os cortes realizados por eletroerosão nas chapas usinadas para obtenção das amostras a serem testadas.

Figura 27 - Área de retirada de corpos de prova para ensaio de tração e flexão.



Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 28 apresenta a amostra já fixada nas pinças da máquina de ensaios.

Figura 28 - Ensaio de Tração.



Fonte: Elaboração Própria.

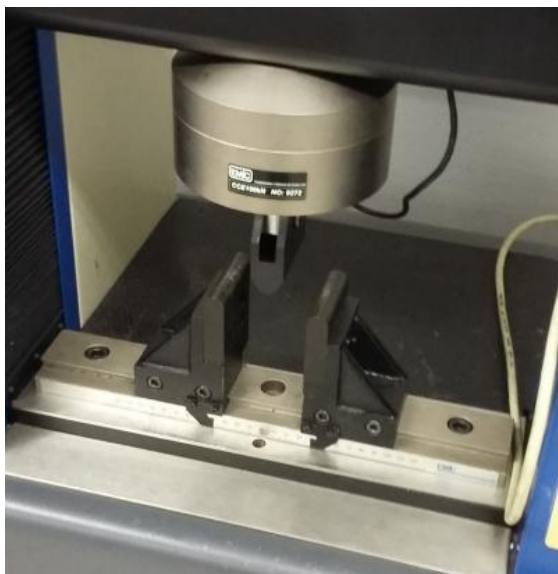
3.3.2. Ensaio de Flexão

O procedimento de ensaio de flexão tomou como base os procedimentos da norma ASTM E290:14 - Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, por ser uma norma citada nos artigos pesquisado e que é muito utilizada para testes de dobramento em amostras de ferro fundido. Os ensaios de dobramento são muito utilizados também em corpos de prova soldados, realizados para qualificação de soldadores ou para avaliação dos processos de solda. Neste trabalho o ensaio de flexão foi utilizado de modo a comparar os processos, onde poderia ser verificado, por exemplo, se o processo poderia ser replicado ou se apresentaria valores dispersos. O ensaio de flexão em corpos soldado deve ser finalizado ao menor sinal de trincamento, ou seja, quando a máquina de ensaios perceber alguma divergência na carga aplicada visto que a mesma é linear.

As dimensões dos corpos de prova estão de acordo com as condições mínimas da norma que são 20mm de largura por 200mm de comprimento, como o objetivo era analisar a junta soldada a mesma foi disposta perpendicular ao

comprimento da amostra.

Figura 29 - Ensaio de Dobramento.



Fonte: Elaboração Própria.

3.3.3. Ensaio de Dureza

O ensaio foi realizado segundo a norma ABNT NBR NM ISO 6506-1:2010 esta parte da norma especifica o método de ensaio de dureza Brinell para materiais metálicos e a aplicabilidade até o limite de 650 HBW. Contudo o ensaio padrão é realizado com carga de 3.000 kgf e esfera de 10 mm de diâmetro sendo que no IFSC não temos equipamento com estas características, sendo assim foram utilizados os equipamentos encontrados no IFSC, ou seja, foi utilizado o durometro de bancada EQTRB – 250 kgf e esfera de 5mm de diâmetro. Assim, os valores de dureza encontrados neste ensaio recebem o sufixo HB 5/250/15, que significam que o valor de carga aplicada foi de 250 kgf em uma esfera de 5 mm de diâmetro por 15 segundos.

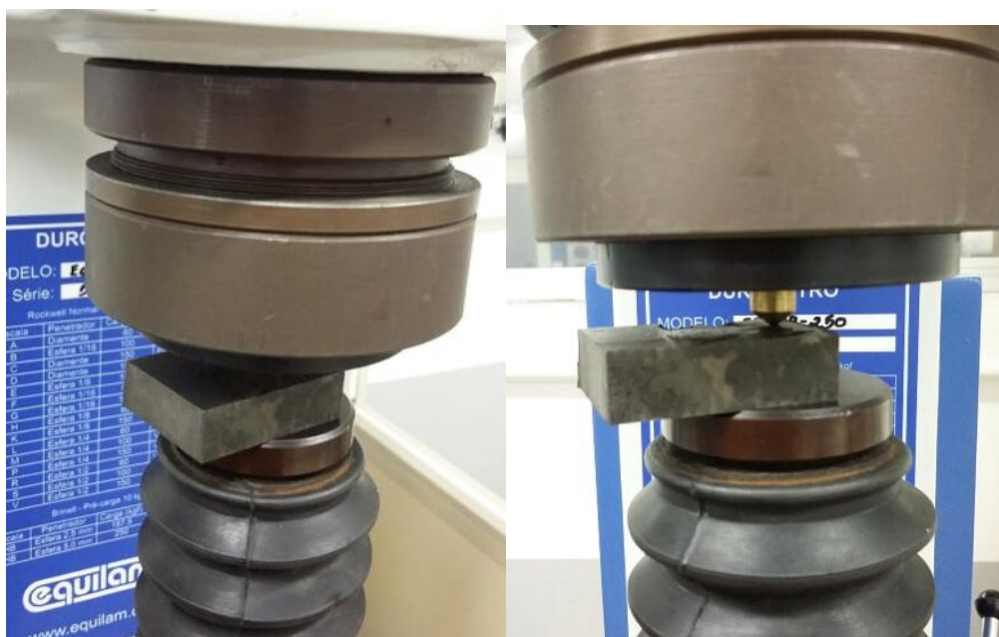
Para realização do ensaio foram retiradas duas amostras menores de cada uma das amostras soldadas cada uma medindo 45 mm X 35 mm X 10 mm, resultando assim em 6 amostras para ensaio de dureza para cada um dos diferentes parâmetros. Em cada uma das amostras foram feitas 9 marcações com aproximadamente 5mm de distância entre si, de modo que pudesse verificar todo o perfil de dureza das amostras desde o metal base até o metal de adição, passando pela ZTA.

Figura 30 - Marcações nas amostras.



Fonte: Elaboração própria.

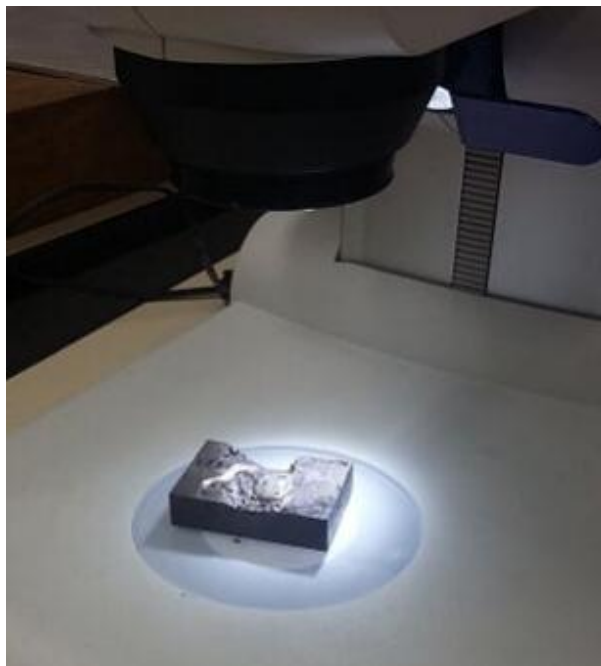
Figura 31 - Ensaio de dureza realizado.



Fonte: Elaboração própria.

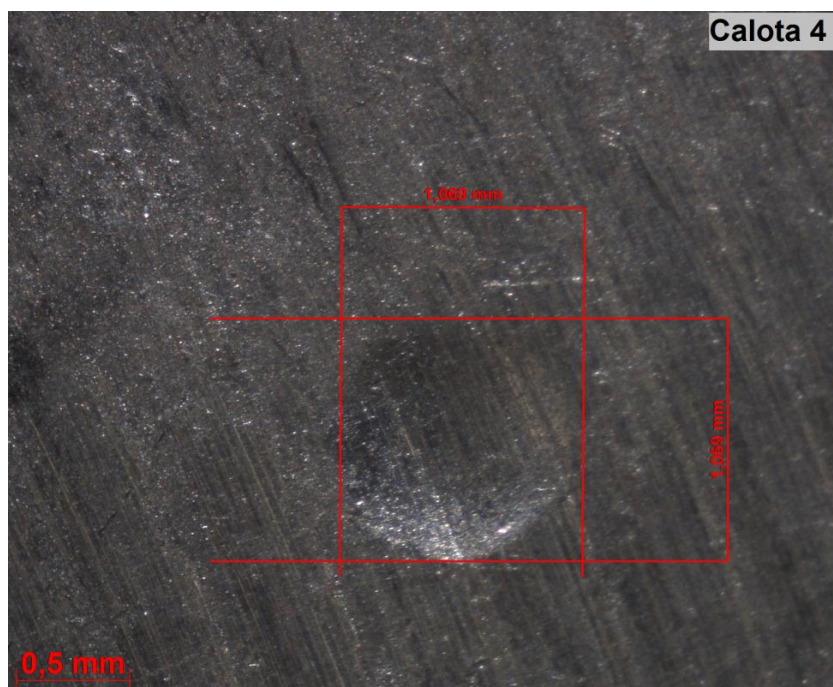
Após realizado o ensaio, todas as amostras tiveram suas endentações medidas dimensionalmente no microscópio digital, para que assim correlacionar a dimensão da endentação com a dureza, e consequentemente obter o perfil de dureza das amostras.

Figura 32 - Medição dimensional das calotas via microscópio.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 33 - Medição via software.



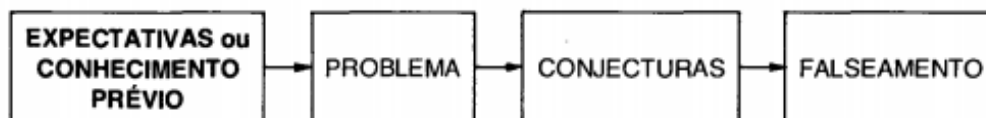
Fonte: Elaboração Própria.

3.4. Metodologia de Avaliação de resultados

A metodologia utilizada foi o método Hipotético-Dedutivo, proposto pelo filósofo Karl Popper, tem uma abordagem que busca a eliminação dos erros de uma hipótese. Faz isso a partir da ideia de testar a falsidade de uma proposição, ou seja, a partir de uma hipótese, estabelece-se que situação ou resultado experimental nega essa hipótese e tenta-se realizar experimentos para negá-la.

Para Popper (1975), o método científico parte de um problema (P1), ao qual se oferece uma espécie de solução provisória, uma teoria-tentativa (TT), passando-se depois a criticar a solução, com vista à eliminação do erro (EE) e, esse processo se renovaria a si mesmo, dando surgimento a novos problemas (P2). (LAKATOS, 2003).

Figura 34 - esquema apresentado por Popper.



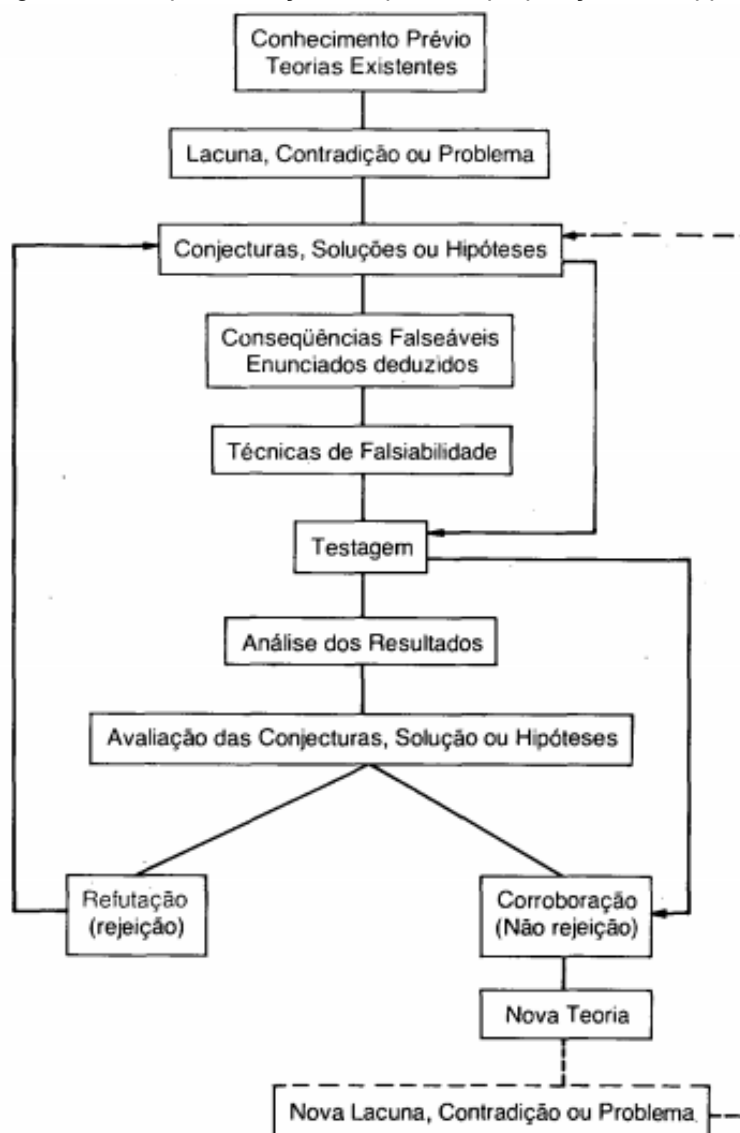
Fonte: LAKATOS, 2003. Pág. 95.

Portanto, Popper, (1975) defende estes momentos no processo investigatório, como o PROBLEMA, que surge, de conflitos ante, expectativas e teorias existentes, a SOLUÇÃO proposta consistindo numa CONJECTURA (nova teoria); dedução de consequências na forma de proposições passíveis de teste e pôr fim os TESTES DE FALSEAMENTO que são tentativas de refutação, entre outros meios, pela observação e experimentação.

Quando os conhecimentos disponíveis sobre determinado assunto são insuficientes para a explicação de um fenômeno, surge o problema. Para tentar explicar a dificuldade expressa no problema, são formuladas conjecturas ou hipóteses. Das hipóteses formuladas, deduzem-se consequências que deverão ser testadas ou falseadas. Falsear significa tentar tornar falsas as consequências deduzidas das hipóteses. Enquanto no método dedutivo procura-se a todo custo confirmar a hipótese, no método hipotético-dedutivo, ao contrário, procuram-se evidências empíricas para derrubá-la. (GIL, 2008).

Quando não se consegue demonstrar qualquer caso concreto capaz de falsear a hipótese, tem-se a sua corroboração, que não excede o nível do provisório. De acordo com Popper, a hipótese mostra-se válida, pois superou todos os testes, mas não definitivamente confirmada, já que a qualquer momento poderá surgir um fato que a invalide. (LAKATOS, MARCONI, 2003).

Figura 35 - Esquemática completa da proposição de Popper.



Fonte: LAKATOS, MARCONI, 2003. Pág. 96.

Conforme MARCONI E LAKATOS (2003), a primeira etapa do método proposto por Popper é o surgimento do problema. Toda investigação nasce de algum problema teórico/prático.

A segunda etapa dirá o que é relevante ou irrelevante observar, os dados que devem ser selecionados. Esta seleção exige uma hipótese, conjectura e/ou suposição, que servirá de guia ao pesquisador. Ainda conforme Marconi e Lakatos (2003):

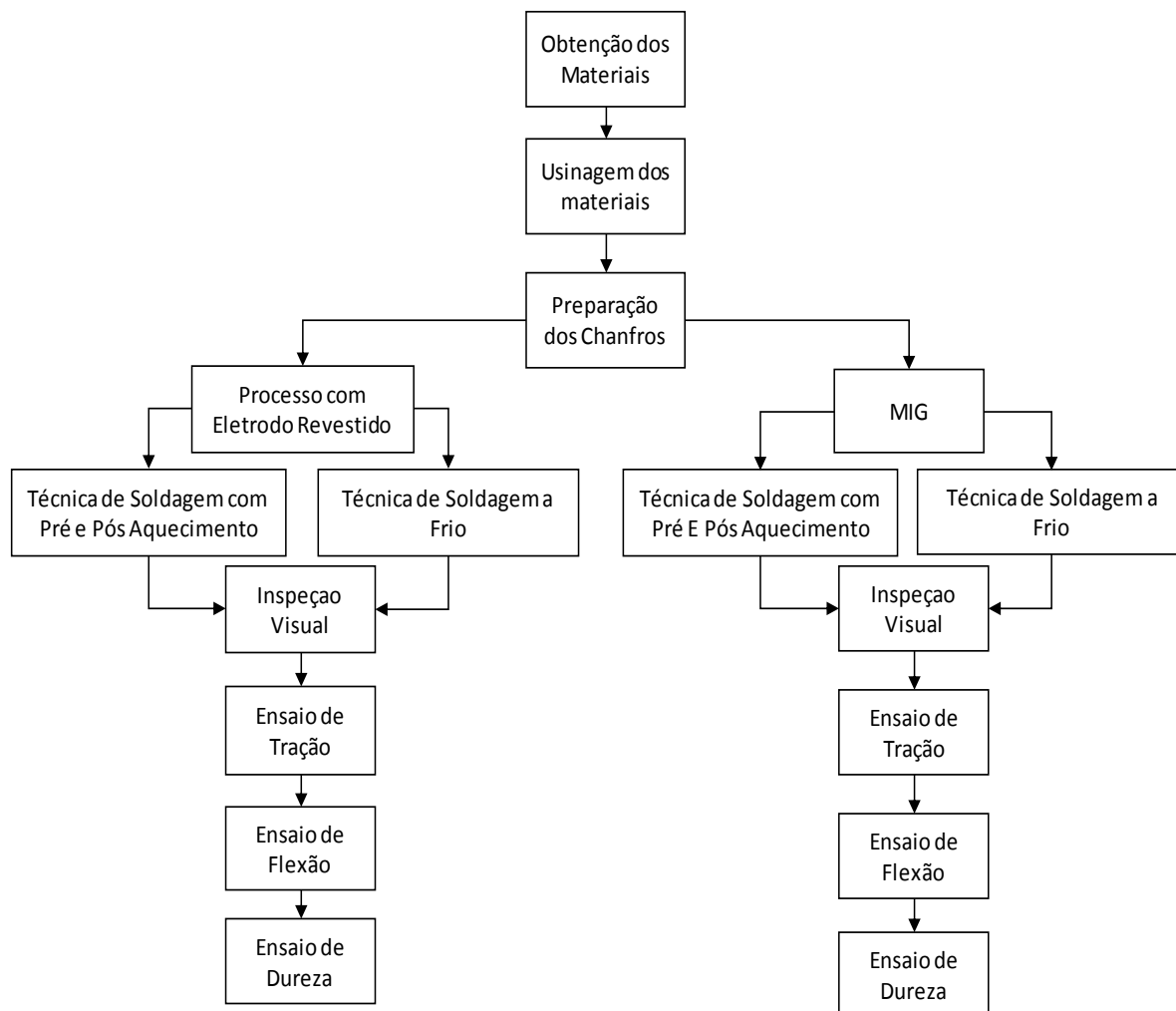
“Conjectura é uma solução proposta em forma de proposição passível de teste, direto ou indireto, nas suas consequências, sempre dedutivamente: “Se ... então.” Verificando-se que o antecedente (“se”) é verdadeiro, também o será forçosamente o consequente.”

Nesta terceira etapa do método hipotético-dedutivo, realizam-se os testes que consistem em tentativas de falseamento, de eliminação de erros. Um dos meios de teste, que não é o único, é a observação e experimentação. Consiste em falsear, isto é, em tornar falsas as consequências deduzidas ou deriváveis da hipótese. Quanto mais falseável for uma conjectura, mais científica será, e será mais falseável quanto mais informativa e maior conteúdo empírico tiver. (Marconi, Lakatos, 2003).

3.5. Fluxograma do projeto

A Figura 36 apresenta em forma de fluxograma todas as atividades práticas executadas neste trabalho.

Figura 36 - Fluxograma de Atividades.



Fonte: Elaboração Própria.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta etapa são apresentados os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova. Como o objetivo dos testes era obter amostras soldadas com as mesmas características (ou superiores) do metal base, segue na Tabela 9 as características mecânicas da matéria prima informadas pelo fornecedor, bem como os requisitos de produto.

Tabela 7 – Requisitos de produto.

CARACTERISTICA	METAL BASE
RESISTENCIA A TRAÇÃO	505 Mpa
LIMITE DE ESCOAMENTO	344 Mpa
ALONGAMENTO	12,40%
Dureza	175 HB

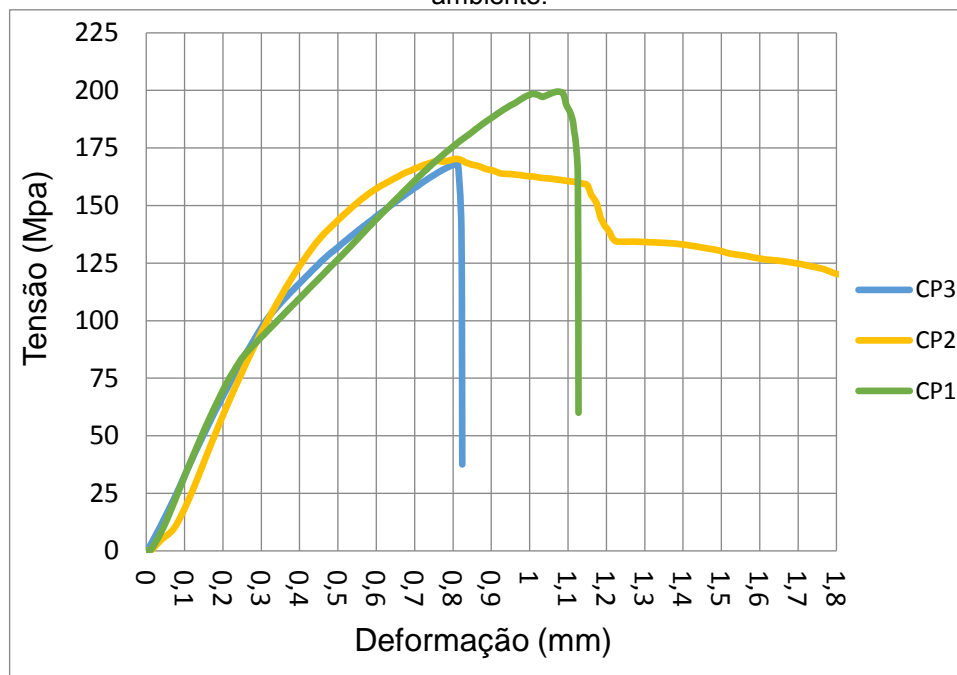
Fonte: Autoria própria com valores cedidos pela empresa parceira.

4.1. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração executados demonstraram de forma objetiva a ruptura de um material de ferro fundido nodular após processo de soldagem. Os gráficos de Tensão X Deformação, abaixo apresentam os valores encontrados nas amostras com processo de soldagem a frio e com pré e pós aquecimento.

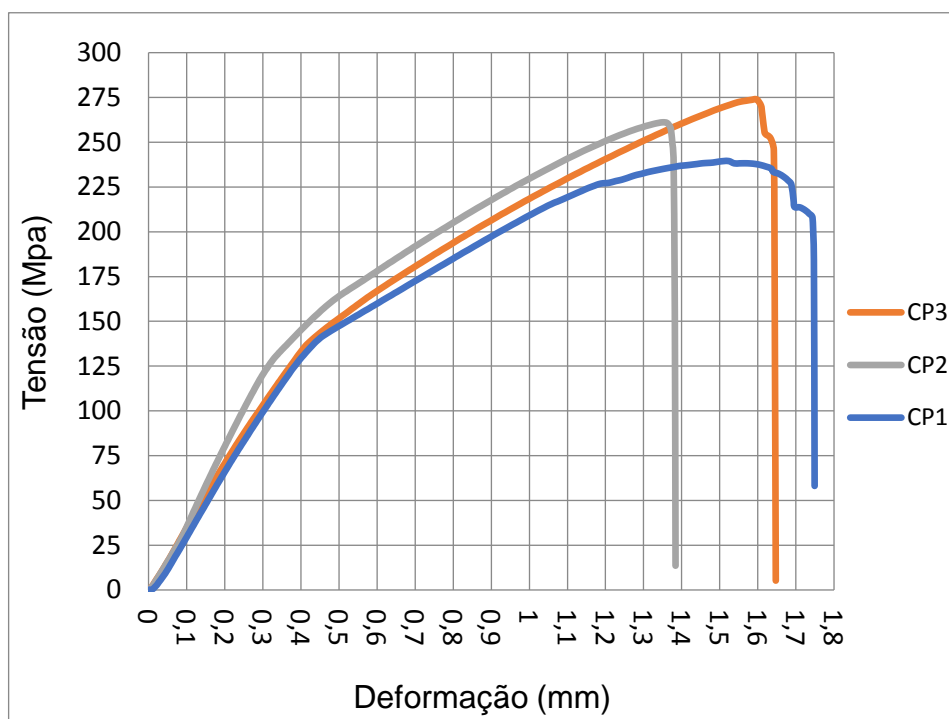
Os gráficos mostrados na Figura 37 e Figura 38 são referentes aos ensaios de tração realizados nos corpos de prova soldados por processo MIG e eletrodo revestido à temperatura ambiente.

Figura 37 - Gráfico de Tração com processo de soldagem por eletrodo revestido e a temperatura ambiente.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 38 - Gráfico de Tração com processo de soldagem MIG e a temperatura ambiente.



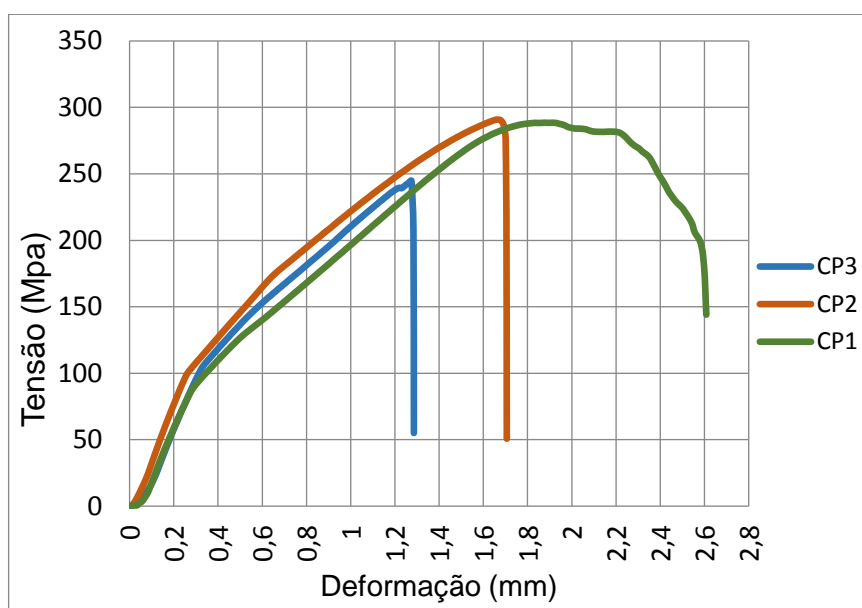
Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser verificado os valores variam muito dependendo do processo, pois enquanto temos valores de tensão de ruptura na ordem de 170 a 200 Mpa no processo de eletrodo revestido, temos valores superiores no processo MIG com tensões de 240 a 275Mpa. Porém estes valores estão muito abaixo dos valores desejados. Um detalhe importante é de que na maioria dos corpos de prova a quebra localiza-se na ZTA.

O ensaio do corpo de prova 2 do processo de eletrodo revestido não pode ser considerado como válido pois houve escorregamento do CP nas pinças de fixação durante o ensaio.

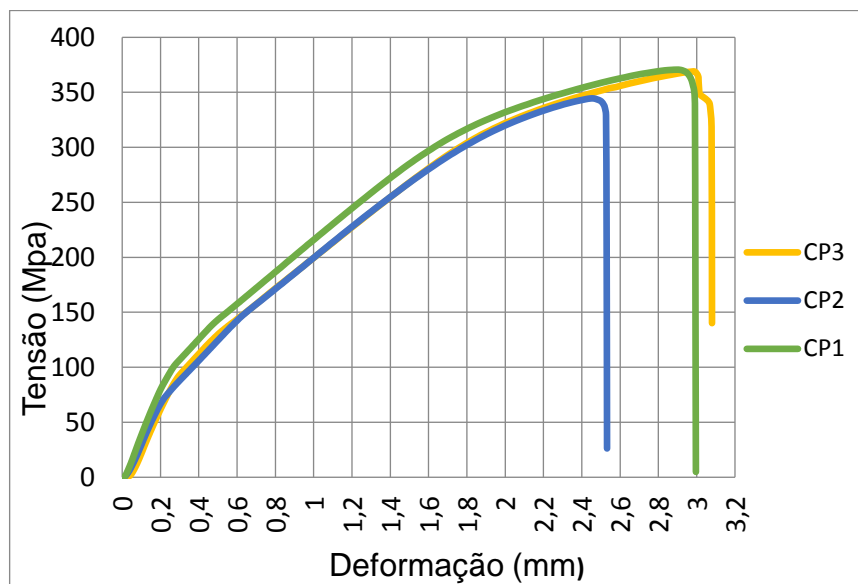
Figura 39 e Figura 40 são referentes aos ensaios de tração dos corpos de prova também soldados por processo MIG e eletrodo revestido, porém, com tratamento de pré e pós aquecimento.

Figura 39 - Gráfico de Tração com processo de soldagem por eletrodo revestido e com pré e pós aquecimento.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 40 - Gráfico de Tração com processo de soldagem MIG revestido com pré e pós aquecimento.



Fonte: Autoria Própria.

Comparando os valores entre processos temos uma grande diferença, pois enquanto temos valores de tensão de ruptura na ordem de 250 a 300 Mpa no processo de eletrodo revestido, temos valores maiores no processo MIG com valores de 350 a 370Mpa.

O ensaio do corpo de prova 1 do processo de eletrodo revestido não pode ser considerado como válido pois houve escorregamento do CP nas pinças de fixação durante o ensaio, devido provavelmente a falta de aperto na fixação da amostra.

Assim como ocorreu nos ensaios dos corpos de prova sem tratamentos de pré e pós aquecimento, os valores encontrados foram abaixo do esperado, contudo este valor pode estar ligado diretamente ao processo de soldagem onde não ocorreu a fusão do metal base devido aos cuidados com o sobreaquecimento das amostras durante o processo.

Por meio da análise do gráfico tensão-deformação obtidos nos ensaios e da inspeção visual nas amostras após ensaios, percebe-se que não houve escoamento definido e que a superfície de fratura de todos os CP's foi frágil, o que caracterizaria um material com pouca ou nenhuma ductilidade, porém a matéria prima

possui certa ductilidade o que indica que esta redução de foi devido ao processo de soldagem executado.

Fratura é a separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes, quando este material sofre a ação de uma tensão que atinja seu limite de ruptura. O processo de fratura pode ser dividido em duas partes: Início da trinca e a propagação da mesma. (DALCIN, 2007).

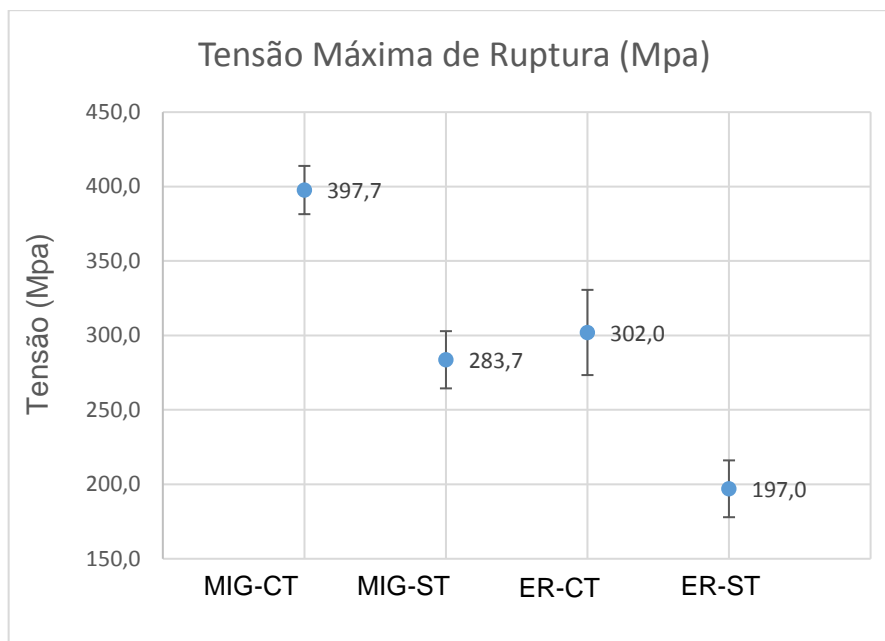
Com isto as fraturas podem ser classificadas em dois grandes grupos, sendo as fraturas dúcteis que são aquelas que apresentam uma deformação plástica visual antes e durante a propagação da trinca já as fraturas frágeis são reconhecidas pela rápida propagação da trinca, sendo que o material não apresenta nenhuma deformação macroscópica e aparecimento de micro deformações. (DALCIN, 2007).

Contudo o limite entre a fratura frágil e dúctil é indefinido, pois o conceito de ductilidade ou fragilidade somente é empregado em comparações entre materiais. Por exemplo, o ferro fundido dúctil quando comparado com o aço doce é mais frágil, contudo se comparado com um ferro fundido branco é considerado mais dúctil.

Observa-se que todos os CPs tiveram a fratura na região da junta soldada, e sua maioria na zona termicamente afetada indicando novamente que o causador do ocorrido foram as transformações do material de base após soldagem ou por falta de fusão.

Tinha-se por objetivo obter uma amostra que após processo de soldagem apresentasse as mesmas características do metal base, porém as mesmas apresentaram valores de tensão de ruptura dispersos e sem um padrão além de apresentar um escoamento quase nulo e não definido, fazendo com que o processo de soldagem fosse rejeitado por este ensaio. Para reforçar esta rejeição as amostras não apresentaram estricção, resultado de uma fratura frágil. Além disso, conforme mostrado na Figura 41, os valores de tensão de ruptura das amostras não apresentam similaridade, ou seja, são diferentes uns dos outros. Os valores que ficaram mais próximos (valores de desvio padrão coincidentes) são o processo MIG sem tratamento térmico e o processo de soldagem por eletrodo revestido com tratamento térmico.

Figura 41 - Gráfico de tensão máxima de ruptura com desvio padrão.



Elaboração própria.

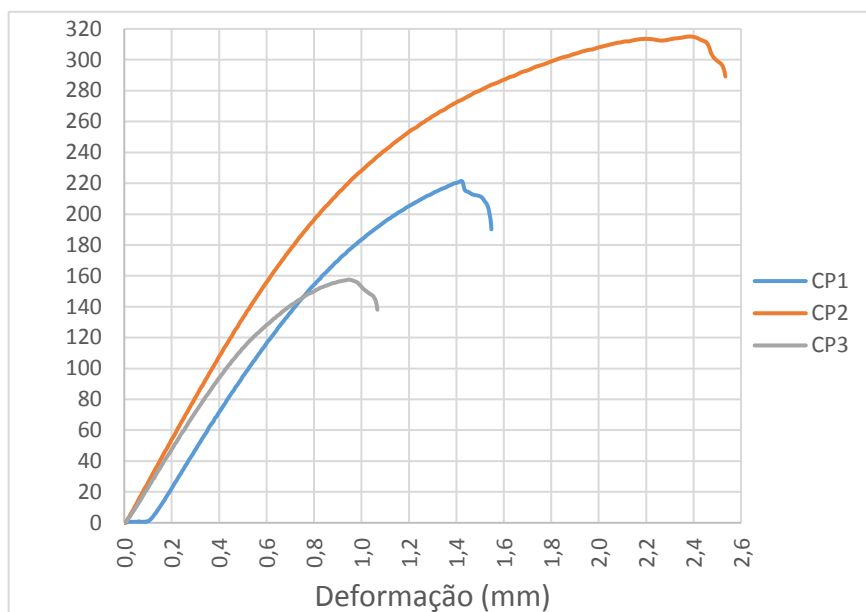
Sendo:

- MIG-CT – Proc. de soldagem MIG com tratamento térmico;
- MIG-ST – Proc. de soldagem MIG sem tratamento térmico;
- ER-CT – Proc. de soldagem eletrodo revestido com tratamento térmico;
- ER-ST – Proc. de soldagem eletrodo revestido sem tratamento térmico;

4.2. Ensaio de Flexão

Com o ensaio de flexão nos corpos de prova, ficou ainda mais claro que o processo de soldagem alterou a estrutura do material, visto que não houve uma uniformidade nas amostras testadas mesmo sendo com processos semelhantes.

Figura 42 - Gráfico de Flexão com processo de soldagem por eletrodo revestido e a temperatura ambiente.



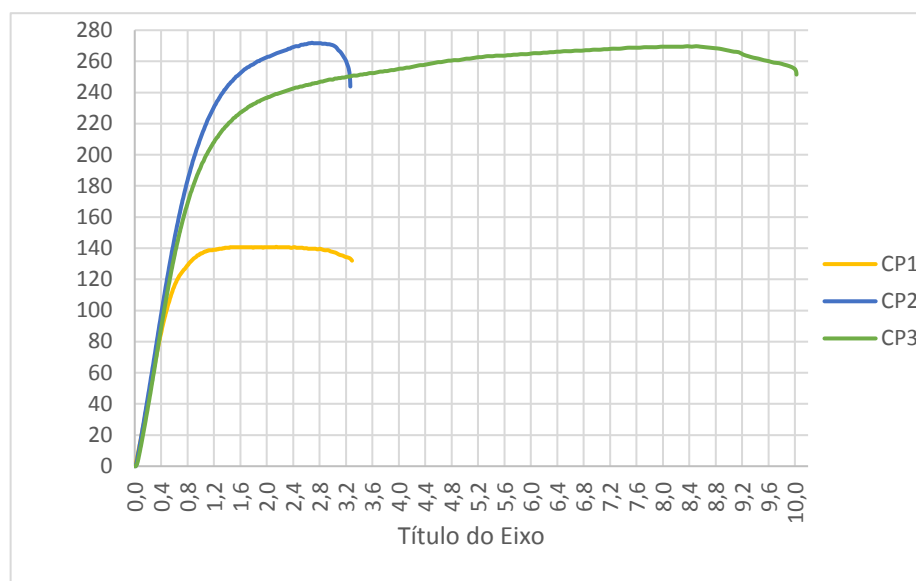
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 - Flexão com processo de soldagem por eletrodo revestido e a temperatura ambiente.

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Deformação Máxima (mm)	Módulo Elasticidade (Mpa)
CP1	1576	378,1	0,9	125475
CP2	3151	756,3	2,4	139664
CP3	2215	531,5	1,3	127239

Fonte: Autoria Própria.

Figura 43 - Gráfico de Flexão com processo de soldagem MIG e a temperatura ambiente.



Fonte: Autoria Própria.

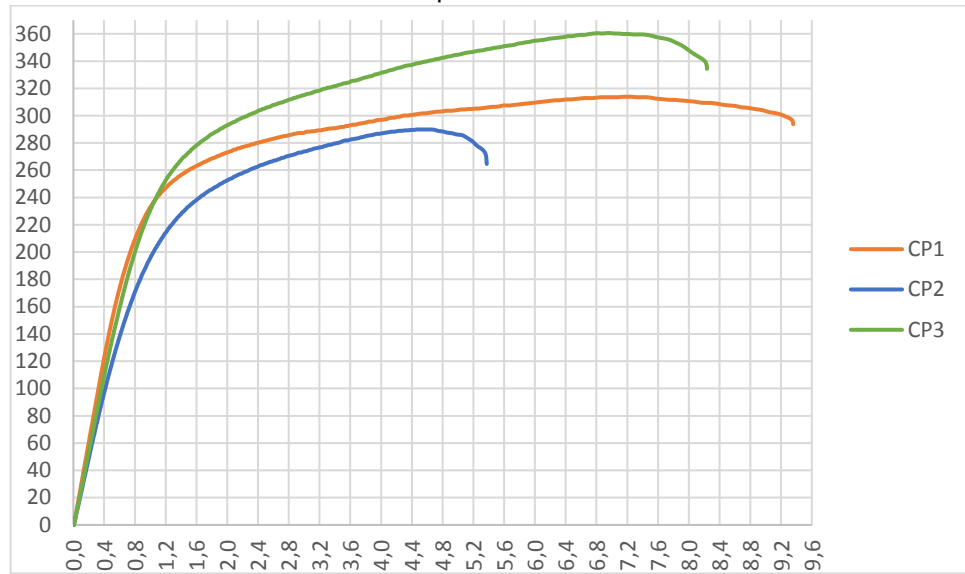
Tabela 9 - Flexão com processo de soldagem MIG e a temperatura ambiente.

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Deformação Máxima (mm)	Módulo Elasticidade (Mpa)
CP1	1409	338,2	2,1	117197
CP2	2720	652,7	2,7	134423
CP3	2697	647,3	8,3	129777

Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser verificado nas figuras 41 e 42 os resultados são completamente diferentes entre si. Enquanto no eletrodo revestido foram encontrados valores de 378,1 Mpa a 756,3 Mpa no processo MIG os valores são de 338,2 Mpa a 652,3 Mpa. Porém o processo MIG apresenta uma maior deformação, mostrando assim uma melhor homogeneidade na estrutura contudo não sendo o valor necessário para validação do processo.

Figura 44 - Gráfico de flexão com processo de soldagem por eletrodo revestido e com pré e pós aquecimento.



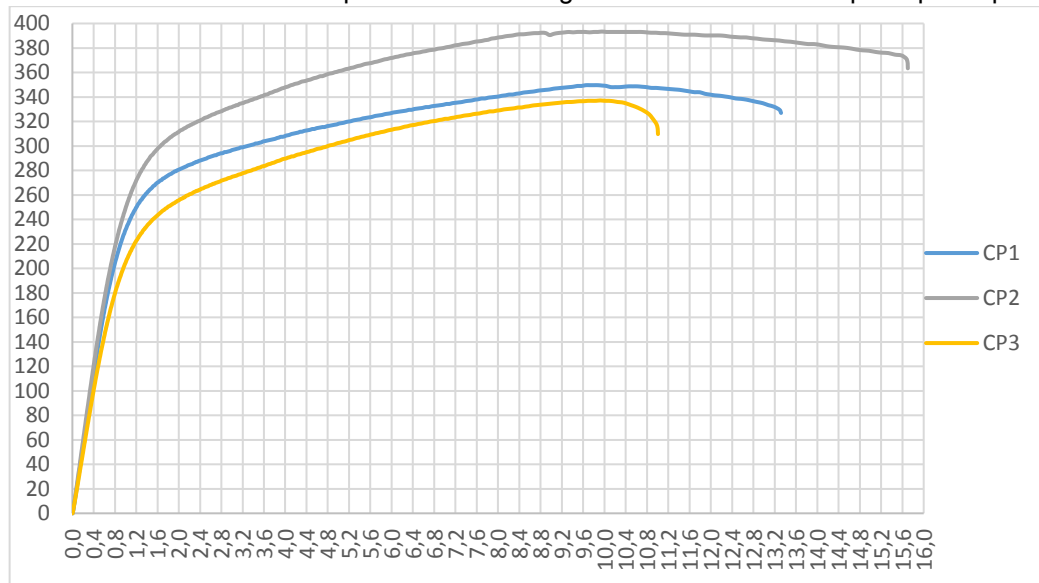
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 - flexão com processo de soldagem por eletrodo revestido e com pré e pós aquecimento.

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Deformação Máxima (mm)	Módulo Elasticidade (Mpa)
CP1	3496	839,1	9,6	149754
CP2	2899	695,7	4,5	128702
CP3	3605	865,2	6,8	143680

Fonte: Autoria Própria.

Figura 45 - Gráfico de Flexão com processo de soldagem MIG revestido com pré e pós aquecimento.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 11 - Flexão com processo de soldagem MIG revestido com pré e pós aquecimento.

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Deformação Máxima (mm)	Módulo Elasticidade (Mpa)
CP1	3496	839,1	9,6	149754
CP2	3934	944,2	9,9	158011
CP3	3372	809,2	9,9	131940

Fonte: Autoria Própria.

Ao contrário dos valores encontrados no processo MIG e eletrodo revestido em temperatura ambiente, os valores dos mesmos processos com pré e pós aquecimento se mostraram mais adequados, porém devido a dispersão nos resultados não é possível comparar os resultados. Os CPs com tratamento térmico apresentaram um grande aumento em suas propriedades, principalmente na deformação máxima que é uma das características mais importantes do ferro fundido nodular. Os CPs soldados em temperatura ambiente apresentaram um valor máximo de deformação de 2,7% (desconsiderando o CP3 do processo MIG que apresentou valor extrapolado indicando possível problema no ensaio) enquanto os processos com tratamento térmico apresentaram valores próximos a 10%.

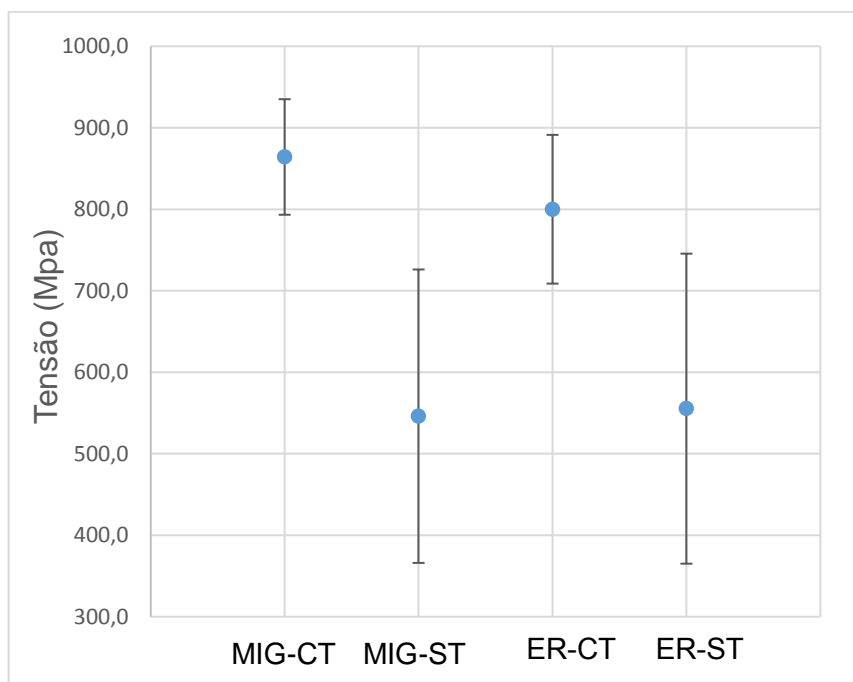
Obs.: Devido aos resultados obtidos apresentarem uma grande dispersão, deve-se ensaiar uma maior quantidade de ensaios para estabelecer um valor médio.

Apesar de não receber os valores da tensão de flexão do fornecedor das amostras, foi decidido realizar o ensaio de flexão para ter mais um método de comparação de resultados.

Conforme mostrado na Figura 46, os valores médios de tensão de flexão das amostras apresentam certa similaridade entre processos, ou seja, tanto o processo MIG quanto o de eletrodo revestido apresentam valores coincidentes quando soldados em temperatura ambiente e também quando soldados com tratamento térmico. Porém, vale lembrar que devido à grande dispersão dos valores dos resultados este gráfico contém valores de desvio padrão próximos a 50% nos processos de soldagem a frio e 10% nos processos com tratamento térmico. Desta forma, não só os valores encontrados rejeitam as amostras, mas também a

disparidade dos mesmos, visto que não há como ter uma comparação real devido aos altos valores de desvio.

Figura 46 - Gráfico de tensão máxima de flexão com desvio padrão.



Elaboração própria.

Sendo:

- MIG-CT – Proc. de soldagem MIG com tratamento térmico;
- MIG-ST – Proc. de soldagem MIG sem tratamento térmico;
- ER-CT – Proc. de soldagem eletrodo revestido com tratamento térmico;
- ER-ST – Proc. de soldagem eletrodo revestido sem tratamento térmico;

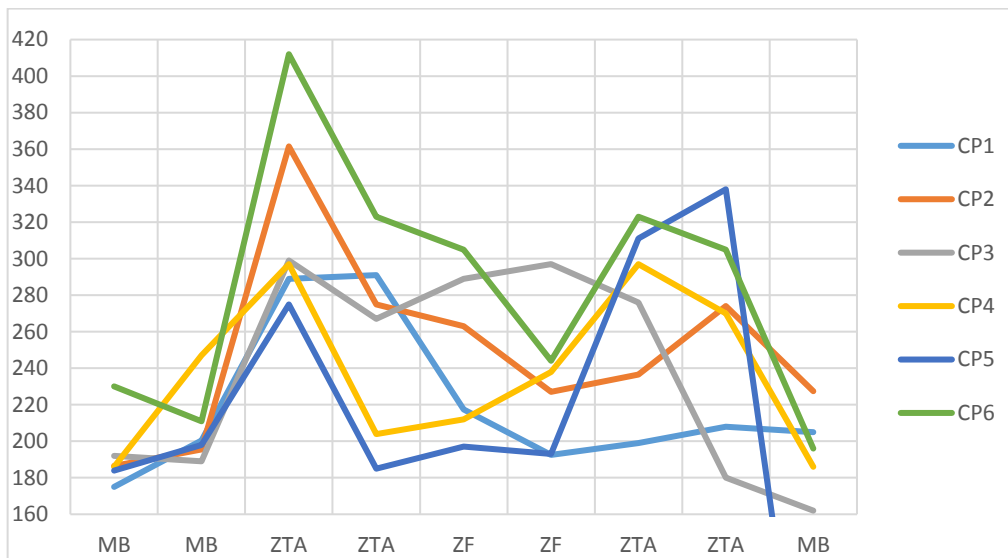
4.3. Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza é extremamente válido para análise de soldagem do ferro fundido, visto que com ele é possível verificar um perfil de dureza nas amostras, ou seja, é analisado ponto a ponto a dureza das diferentes regiões da soldagem.

A princípio temos a dureza da matéria prima que é 175 HB e a dureza do eletrodo indicada no catalogo do fornecedor que é de 180 HB, com estas referências

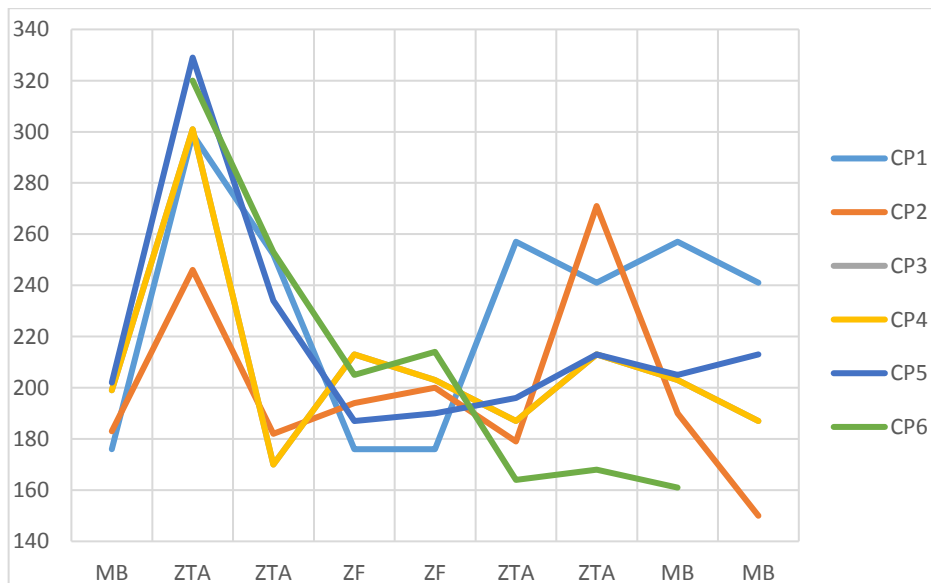
pode-se comparar com os valores encontrados nos ensaios e assim validar ou não as amostras. As Figuras 45, 46, 47 e 48 apresentam graficamente o perfil de dureza das amostras desde o metal base, passando pela zona termicamente afetada até a zona fundida. Todas as amostras soldadas apresentaram nitidamente suas diferentes regiões da junta soldada, como metal de solda, ZTA e metal base.

Figura 47 - Valores de dureza Eletrodo Ambiente.



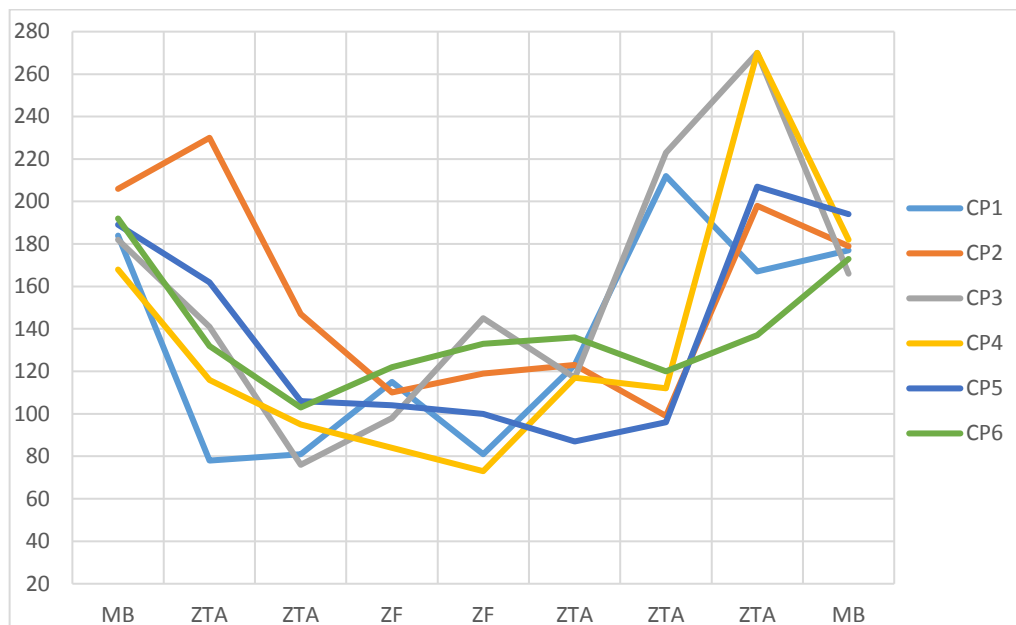
Fonte: Autoria Própria.

Figura 48 - Valores de dureza Eletrodo Forno.



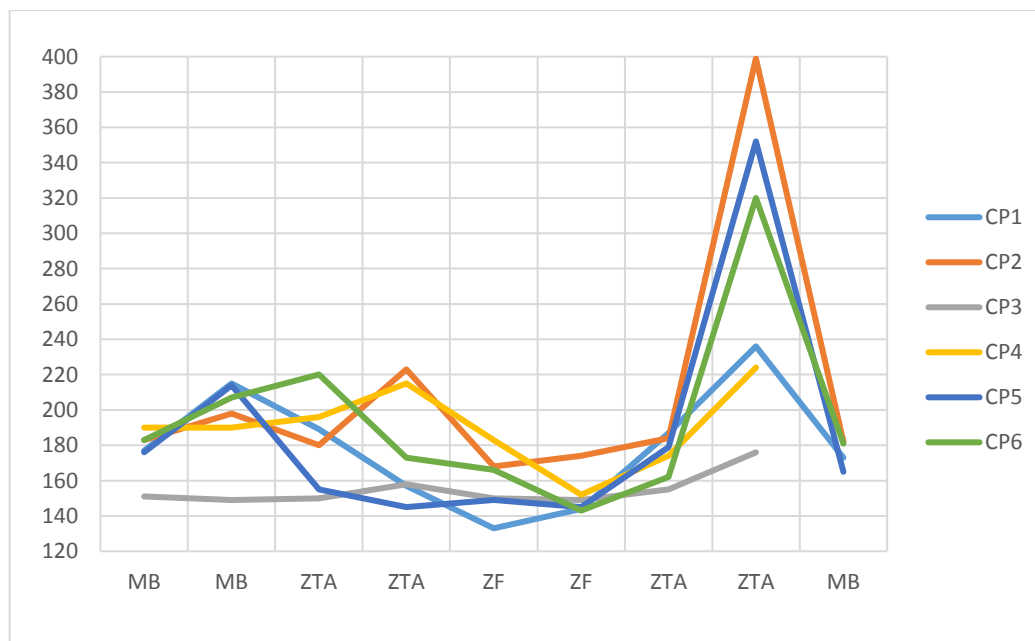
Fonte: Autoria Própria.

Figura 49 - Valores de dureza MIG Ambiente.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 50 - Valores de dureza MIG Forno.



Fonte: Autoria Própria.

Após os ensaios foi verificado que o metal base próximo a ZTA sofreu pouco ou quase nada de alteração em sua dureza ficando na região dos 180 HB, porém os valores encontrados nas demais regiões apresentam uma grande divergência.

Na ZTA, principalmente nos ensaios das amostras a soldadas a eletrodo revestido temos um grande aumento de dureza, podendo isto ser decorrido de uma alta energia de soldagem seguida de uma alta de resfriamento, visto que como o processo foi feito em temperatura ambiente tem-se uma temperatura do ambiente muito menor que a de fusão e um processo que depende muito da habilidade do soldador. Já nas amostras que foram soldadas por processo MIG os valores da ZTA estão abaixo da dureza do metal base.

O parâmetro que demonstrou um melhor resultado foi o processo de soldagem MIG com pré e pós aquecimento, onde neste ensaio o perfil de dureza da peça está uniforme com exceção de um dos lados que neste caso era o lado onde estava a região final do cordão de solda, podendo isto ter causado uma dureza elevada.

Resume-se que problema está intimamente ligado aos problemas de solidificação dos metais fundidos em processos de soldagem em ferros fundidos, pois conforme verificado em todas as amostras tem-se um “vale” no perfil de dureza bem ao centro das mesmas, sendo em parte causado pelo processo de soldagem não homogêneo ou pela seleção do metal de adição que poderia ter melhores propriedades mecânicas.

4.4. Análise e Discussão dos resultados

A fraca soldabilidade do ferro fundido dúctil pode ser atribuída a dois fatores, a formação de martensita na zona afetada pelo calor, ZTA, e o desenvolvimento de carboneto de ferro duro e quebradiço na zona de fusão parcial. A maior parte das soldagens realizadas em ferro fundido são soldagens de reparos superficiais. É o reparo das discontinuidades produzidas durante o processo de fundição ou as desenvolvidas no próprio componente durante sua vida útil. Apesar disso, a soldagem deste material sempre foi comprovada difícil e continua a exigir conhecimentos especializados e técnicas. (El-Banna, Nageda, Abo El-Saadat, 1998).

Em geral, a maioria das pesquisas de soldagem até os dias atuais está restrita aos ferros fundidos nodulares na faixa de resistência à tração - 60 a 120 ksi

(414 a 827 MPa), resistência ao escoamento - 45 a 90 ksi (310 a 621 MPa) e alongamento de 10 a 3%. (KELLY, BISHEL, WILSON, 1984 *apud* PEASE, 1960, pág. 196).

Os processos de soldagem comumente utilizados são eletrodos de aço de baixo carbono, níquel puro, aço inoxidável e ferro-níquel, sendo que eletrodos de ferro-níquel geralmente são reconhecidos como o metal capaz de fornecer maior resistência nas juntas soldadas. Uma vez que a eficiência das juntas soldadas raramente alcança 100%. (KELLY, BISHEL, WILSON, 1984).

Além disso, os metais de enchimento do tipo Ni-Fe-Mn mostrou-se adequado para uso com todos os processos de soldagem por fusão normalmente aplicados aos ferros fundidos. Porém o artigo que apresenta esta informação não tentou avaliar a fadiga ou as propriedades de impacto das soldas; se essas propriedades forem importantes em uma aplicação específica, elas devem ser testadas antes de utilizar o Ni-Fe-Mn. (El-Banna, Nageda, Abo El-Saadat, 1998).

Uma das razões pelas quais os ferros fundidos, incluindo o nodular, são mais econômicos do que os aços fundidos é que suas temperaturas de solidificação são mais baixas, o que permite a derretimento e vazamento com menores temperaturas. Porém temperaturas baixas são uma das causas dos problemas de soldagem, uma vez que os metais comuns de enchimento para soldagem de ferro fundido - Ni puro (AWS grade ENI-CI) e 55% NiFe (ENiFe-CI e -CI-A) - solidificam a temperaturas mais altas do que o metal base. Quando o metal de base se solidifica antes da poça de fusão tem-se uma ZTA de alta temperatura, assim os esforços de solidificação são concentrados em uma região estreita com ductilidade limitada. Quando a área de baixa ductilidade não pode absorver os esforços resultantes, as trincas se formam na ZTA. (KELLY, BISHEL, WILSON, 1984).

Quando o ferro fundido nodular é soldado, é necessário um pré-aquecimento de cerca de 425°C, para evitar a formação de martensita, mas o pré-aquecimento aumenta a quantidade de cementita que se forma na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Sendo que a fase de carbonetos pode ser mais prejudicial do que a martensita às propriedades mecânicas, particularmente quando

se torna quase que contínua na ZTA. A soldagem sem pré-aquecimento para produzir uma faixa fina de martensita é preferível ao desenvolvimento de uma banda contínua de carboneto de ferro na ZTA de ferro fundido nodular não ligado. (KELLY, BISHEL, WILSON, 1984 *apud* Kotecki, Braton, Loper, 1969 pág. 161).

Segundo KELLY, BISHEL, WILSON, (1984) uma solução para este problema das temperaturas seria a de se utilizar um consumível de Fe-Ni-Mn que possuem a temperatura mais compatível com a temperatura de solidificação da metal base. O sistema Fe-Ni-Mn tem uma temperatura líquida de cerca de 100°C inferior ao consumível Fe-Ni, e a temperatura de solidificação é conseqüentemente menor.

A exploração do sistema Fe-Ni-Mn levou além das temperaturas mais compatíveis com a solidificação, o consumível Ni-Fe-Mn tem a vantagem de combinar corretamente o coeficiente de expansão térmica com ferro fundido nodular. A combinação dessas características resulta em soldas que se solidificam em uma faixa de temperatura muito mais próxima da do metal base e que sofrem contração térmica similar após a solidificação. Por conseguinte, não são colocadas tensões de solidificação elevadas na zona parcialmente fundida do ferro fundido nodular durante a solidificação, e as tensões subseqüentes de solidificação são reduzidas. (KELLY, BISHEL, WILSON, 1984).

Segundo El-Banna, Nageda, Abo El-Saadat, (1998), um sistema de enchimento com Ni-Fe-Mn pode ser capaz de soldar ferro fundido nodular sem pré-aquecimento ou pós-aquecimento e reter 100% das propriedades de tração do metal base e também que soldagens de ferro fundido nodular contendo carbonetos de ferro e/ou martensita na ZTA podem ter propriedades de tração úteis devendo ser condizentes com a aplicação é claro. Portanto, a microestrutura de ZTA por si só não pode ser usada para prever o desempenho de soldagem.

O metal de solda de alto teor de níquel proporciona a força e ductilidade necessárias, enquanto o alto teor de carbono diminui a quantidade da contração no resfriamento. O início e a propagação de uma trinca no ferro dúctil são resultados da diferença das propriedades mecânicas do metal base com metal de adição. A deposição de níquel e cobre tem um uso limitado para a soldagem de ferro dúctil,

porque há uma alta sensibilidade de trincas devido a coexistência de altos teores de carbono. (El-Banna, Nageda, Abo El-Saadat, 1998).

Além de apresentar uma dureza que depende fortemente das fases presentes e que pode apresentar após a soldagem valores de dureza na ZTA de 450 a 650 HV. Pode-se dizer que a dureza aumenta com o aumento da porcentagem de martensita na ZTA. A dureza na linha de fusão aumenta em cerca de 654-825 HV devido à presença de ledeburita na zona de fusão. A extensão e dureza de ZTA e zona de fusão dependem principalmente da temperatura de fusão e a taxa de resfriamento durante a soldagem. (El-Banna, Nageda, Abo El-Saadat, 1998).

Todos os problemas associados às soldas feitas com material de enchimento Fe-Ni também estão presentes em soldas feitas com metal de enchimento de aço carbono. Além disso, o metal de solda depositado é vulnerável às dificuldades associadas à transformação austenítica da martensítica que ocorre no resfriamento. No entanto, o metal de enchimento de aço ferrítico é atraente devido ao seu baixo custo, dureza satisfatória e a variedade de produtos de transformação de metal soldado, como a bainita e martensita que ocorrem no resfriamento. (El-Banna, Nageda, Abo El-Saadat, 1998).

Além disso, a largura da ZTA aumenta continuamente à medida que a temperatura de pré-aquecimento também aumenta, ou seja, com altas temperaturas de pré-aquecimento, a taxa de liquidação e solidificação é mais rápida, reduzindo assim o líquido efetivo e permitindo zonas de fusão menores, zonas de transformação maiores e uma ZTA menor. O pré-aquecimento diminui a tamanho da zona fundida. Assim, o nível de temperatura de pré-aquecimento de 300 °C parece ser a temperatura de pré-aquecimento ideal, pode minimizar o efeito da absorção de carbono do metal comum em combinação com o resfriamento lento.

A camada externa de dureza extremamente alta é uma zona que foi derretida e teve uma alta taxa de resfriamento. Por baixo desta zona, a zona de transformação foi aquecida até a temperatura da austenita e arrefecida, depois transformada em martensita, bainita ou perlita de acordo com o nível de energia de soldagem e a taxa de resfriamento. (VOIGT, R. C., LOPER, C. R. JR, 1982).

Em muitos casos, no entanto, é impossível atingir uma taxa de resfriamento de solidificação suficientemente baixa para evitar completamente a formação de carboneto. Também é possível usar baixa energia de soldagem para minimizar a formação da zona livre de precipitação, isto é, para criar um gradiente de temperatura íngreme que reduza a espessura da ZLP. No caso de ferro fundido dúctil, embora uma baixa energia de soldagem apenas reduza a espessura da ZLP, resulta em uma ZLP que é menos prejudicial porque as estruturas de carboneto são menos propensas a interconectar.

A energia de soldagem não é o único fator que controla o tamanho e a continuidade do carboneto. O pré-aquecimento excessivo acima de 427C, a velocidade da tocha e a composição do metal base também afetam a morfologia do carboneto. Os fatores específicos que regem a continuidade ou a falta de continuidade das estruturas de carboneto da ZLP são uma interação complexa entre os parâmetros de soldagem e as características de solidificação do metal base.

Uma estrutura de carboneto descontínua pode ser conseguida com energia de soldagem alta ou baixa, seja porque com energia de soldagem alta, tem-se uma grande ZTA e a ZLP é geralmente ampla, mas a linha de fusão de forma irregular faz com que a estrutura de carboneto na ZLP seja descontínua. Assim, a seleção das condições de soldagem deve ser considerada com cuidado, porque elas podem produzir um efeito benéfico em uma zona e um efeito prejudicial em outra. Por exemplo, uma alta energia de soldagem pode elevar a temperatura do metal base de uma pequena solda o suficiente para causar graves problemas de linha de fusão mesmo que não seja usado pré-aquecimento. Por outro lado, uma temperatura de pré-aquecimento elevada utilizada para evitar a formação de martensita na ZTA e para reduzir as tensões de expansão térmica pode resultar em rachaduras de linha de fusão.

5. CONCLUSÃO

A hipótese inicial da possibilidade ou viabilidade de recuperação de peças fundidas de ferro fundido nodular através de processos de soldagem para reduzir custos gerados na fabricação e recuperação foi refutada devido aos riscos de se soldar o ferro fundido nodular e este acabar gerando outros defeitos além do inicial.

Os dados encontrados nos ensaios mostram que os parâmetros escolhidos e o metal de deposição causaram danos ao metal base como endurecimento nas regiões termicamente afetadas e formação de trincas internas. Conseqüentemente, os carbonetos que são formados na ZTA, têm a tendência a formar martensita de alto teor de carbono, assim essas transformações estruturais resultam na redução da ductilidade a um nível no qual a suscetibilidade a trincas é tão alta que ocorre a quebra espontânea da junção após a soldagem, ou as rachaduras são geradas quando a primeira carga operacional é aplicada.

O grau de fragilidade, assim como a tendência à fissuração, depende, em certa medida, do tipo de ferro fundido, sua estrutura, tratamento térmico e, mais importante, do processo de soldagem. Porém, a hipótese foi principalmente descartada devido a problemas de uma soldagem em campo de peças de aerogeradores com defeitos decorrentes da operação (trincas por fadiga) visto que o acesso é difícil devido à altura dos componentes que geralmente estão a mais de 100 metros de altura e em ambientes fechados com demais componentes próximos, tornando quase impossível os processos de pós e pré-aquecimento, processos estes que melhoraram as características das amostras soldadas como foi verificado nos ensaios.

Contudo, mesmo com a melhora os valores ainda não estavam aceitáveis. Sendo assim, a pobre soldabilidade do ferro fundido nodular pode ser atribuída a dois fatores principais que são a formação de martensita na zona termicamente afetada e o desenvolvimento de níveis de dureza diferentes na região parcialmente fundida. A maioria dos processos de recuperação de peças fundidas deve se a recuperação de descontinuidades encontradas durante o processo de fundição das peças ou que aparecem durante sua vida útil.

Este trabalho tinha por finalidade analisar os parâmetros de soldagem a serem utilizados na recuperação de defeitos em peças fabricadas com ligas de ferro fundido nodular através dos processos de soldagem MIG e eletrodo revestido. Foi realizado a comparação dos resultados obtidos em cada um destes processos com base nos ensaios mecânicos variando as condições de trabalho e respectivos parâmetros e não foi encontrado um método válido para realização de recuperações de peças fundidas, ou seja, todos os parâmetros e processos realizados neste trabalho se mostraram ineficazes na soldagem do ferro fundido, porém foi verificado que com o uso de processos de pré e pós aquecimento as propriedades mecânicas ficaram mais próximas do desejado podendo este parâmetro ser investigado em maiores detalhes em projetos futuros.

A bibliografia encontrada possui propósitos muito específicos, porém nenhum deles semelhante ao do trabalho apresentado. Os artigos pesquisados apresentavam processos de soldagem com tratamentos térmicos controlados, processos estes que necessitavam ser realizados em salas com temperatura controlada sem contaminação no ambiente equipamentos de grande porte e alto custo, etc. Porém para recuperação de peças em campo torna-se inviável a desmontagem de um aerogerador para recuperação de uma peça, elevando o custo quase que o de compra de um novo componente.

Alguns artigos apresentam que a soldagem do ferro fundido nodular não deixa o componente com as propriedades originais sendo que algumas delas são alteradas durante o processo sendo assim, a indicação é de que após o processo de recuperação seja feita análise do resultado e comparado com o necessário para aplicação.

Uma nova seleção de parâmetros bem como soldadores experientes podem mostrar futuramente a possibilidade de recuperação de peças fundidas em ferro Nodular em campo, contudo conforme apresentado neste experimento não foi possível a recuperação das amostras, pois todas foram rejeitadas nos ensaios executados, pois apresentaram valores fora do esperado como a falta de ductilidade, diferenças dos valores de dureza de uma mesma amostra.

Em peças de componentes estruturais como em aerogeradores, componentes devem ter os valores de tensão de escoamento, ruptura e dureza iguais ou próximas conforme norma selecionada, visto que estes valores são utilizados nos cálculos de projeto (elementos finitos), porém o demonstrado neste projeto é que se estas peças sofrerem processo de soldagem conforme realizado irão apresentar flutuações dos valores podendo trazer riscos ao componente num todo. Sendo assim torna-se preferível sucatear uma peça de aproximadamente R\$35000,00 do que correr o risco de condenar um equipamento de R\$10 milhões.

Um dos artigos pesquisados apresentou uma boa solução que seria a utilização de um eletrodo ou arame de Ni-Fe-Mn onde os resultados apresentados mostraram que metais de enchimento em Ni-Fe-Mn são adequados para uso com todos os processos de soldagem por fusão normalmente aplicados aos ferros fundidos. Porém, este artigo não tentou avaliar a fadiga ou propriedades de impacto das soldas o que pode ser impeditivo em componentes para aerogeradores, porém como mencionado anteriormente o experimento deste artigo utilizou processos de pré e pós aquecimento controlados em laboratório, o que aumenta mais a dificuldade em soldagem em campo.

Já para recuperações superficiais, que não serão solicitadas estruturalmente é possível a utilização de massas de solda frio como a DEVCON que é uma massa epóxi com carga de titânio de alto desempenho, indicada para reparar áreas críticas em máquinas e peças em geral que necessitem de reparos precisos e duradouros. Porém devem ser analisadas as cargas de projeto se condizem com a da massa para que não haja outros problemas.

6. REFERÊNCIAS

A GAZETA DO POVO: **Weg contorna desaceleração com aposta em energias renováveis**. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/weg-contorna-desaceleracao-com-aposta-em-energias-renovaveis-b1wq3pp1psp2502p71sa0rlvo>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 6892-1:2013 - Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro. 2013. 70p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6916:2017 - Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal** — Rio de Janeiro, 2017, 24p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 6506-1:2010: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell Parte 1: Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2010. 16 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM E290:14 - Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility**, 1998. 10p.

ASM. **WELDING BRAZING AND SOLDERING: Metals Hand Book**. 6^a Ed. Ohio: ASM International, 1993. 2683p.

BEER, F. P. & JOHNSTON, E. R., **Resistência dos Materiais**, 5^a Ed. Porto Alegre: MAKRON Books, 2011,799p.

BISHEL, R. A.; KELLY, T. J.; WILSON, R. K. **Welding of Ductile Iron with Ni-Fe-Mn Filler Metal**. Paper presented at 65th Annual AWS Convention, Dallas, Texas, 1984, 85p.

BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3^a Ed Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363p.

BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H.; WAINER, E. **Soldagem: processos e metalurgia**. 2^a Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 1578p.

CALLISTER JR., WILLIAM D., **Ciência e Engenharia dos. Materiais: Uma**

Introdução, 1a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002. 878p.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7ª Ed São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2002. 599p.

DALCIN, GABRIELI BORTOLI. **Ensaio dos materiais**, Uri–Universidade Regional Integrada Do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, 2007, 41p.

DRAPINSKI, J. **Elementos de soldagem: manual prático de oficina**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1979. 280p.

DUTRA, Ricardo Marques. **Energia eólica princípios e tecnologia**. CEPTEL GRUPO ELETROBRAS, 2008, 51p.

EL-BANNA, E.; EL-SAADAT, M. A.; NAGEDA, M. **Study of restoration by welding of pearlitic ductile cast iron**. Elsevier Science, Amsterdã, n.42, p.311-320, 2000.

FIGUEIREDO, DR. KLÉBER MENDES DE. **Tecnologia da soldagem**. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Mecânica e Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, São Luís, 2005. 110p.

FORTES, C. ESAB. **Apostila de soldagem MIG/MAG**, 1ªEd. Contagem-MG ,2005 48p.

FRANCKLIN, A. R. **Um breve estudo sobre ferro fundido nodular**. Monografia (Tecnologia em Produção Siderúrgica) - Centro Universitário da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2009. 30p.

FUNDIÇÃO TUPY **Ferro fundido com grafita esferoidal (nodular)**. Joinville, Santa Catarina: Tupy, 1971. 49p.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio de Materiais**. 2ª Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000. 378p.

Gil, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social** - 6. ed. - São Paulo: Atlas, 2008. 220p.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1º. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 344p.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 3.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000. 690p.

HOFFMANN, SALVADOR. **Manutenção por soldagem**. 1º. Ed. Editora Sagra-dc Luzzatto, Caxias Do Sul, 1986, 123p.

INFOSOLDA **Revestimento por soldagem-processos de soldagem para revestimento**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/180-revestimento-por-soldagem-processos-de-soldagem-para-revestimento.html>> Acesso em: 1 fev. 2017.

INFOSOLDA, **Ensaio mecânico: dobramento**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/213-ensaio-mecanico-dobrimento.html>> Acesso em: 1 abr. 2018.

INFOSOLDA. **Revestimento por soldagem-processos de soldagem para revestimento**, disponível em <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/180-revestimento-por-soldagem-processos-de-soldagem-para-revestimento.html>>. Acesso em 10 de fevereiro 2018.

LAKATOS, Eva Maria, MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica** 5. ed. - São Paulo: Atlas 2003, 310p.

MODENESI, P.J. **Soldagem I: Descontinuidades e Inspeção de Juntas Soldadas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, 2001 16p.

OKAMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. 1º Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 463p.

PASCUAL, M. FERRER, C. RAYÓN E. **Weldability of spheroidal graphite ductile cast iron using Ni / NiFe electrodes** Instituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Camí de Vera, 2009. 5p.

POPPER, Karl S. **A lógica da pesquisa científica**. 2. ed. São Paulo: ultrix, 1975. 567p.

RODRIGUES, LUIZ EDUARDO MIRANDA. **Ensaio Mecânico de Materiais - Aula 4 – Ensaio de Dobramento**. Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia De São Paulo 22p.

VESELKO. J, MESKO. J, PLEVA. J, KONECNA. R & STRAPKO. J **Repair welding casting defects in nodular cast iron castings**, Welding International, 1994, 328p.

VOIGT R. C. LOPER, C. R. **Study of Heat-Affected Zone Structures in Ductile Cast Iron** Paper presented at the 63rd AWS Annual Meeting held in Kansas City, Missouri, during April 30, 1982. 7p.

WAINER, E. (Coord.); BRANDI, S. D. (Coord.); MELLO, F. D. H. (Coord.). **SOLDAGEM: PROCESSOS E METALURGIA**. 4ª Reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2004. 494p.

ZEEMANN, A. **Soldagem por fusão para reconstrução de componentes de ferro fundido**. Infosolda, Portal Brasileiro de Soldagem, v.0, n.1, p.1-4, 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol02.pdf>> Acesso em: 25 set. 2017.