

**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Márlon da Silva Benvenhú

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESULTANTES DA  
SOLDAGEM DE MATERIAIS, PELO PROCESSO MAG.**

Santa Cruz do Sul  
2016

Márlon da Silva Benvenhú

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESULTANTES DA  
SOLDAGEM DE MATERIAIS, PELO PROCESSO MAG.**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Santa Cruz do Sul, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Flávio Thier

Santa Cruz do Sul

2016

Márlon da Silva Benvenhú

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESULTANTES DA  
SOLDAGEM DE MATERIAIS, PELO PROCESSO MAG.**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Santa Cruz do Sul, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

*Dr. Eng. Flávio Thier*

Professor Orientador – UNISC

*MSc. Eng. Jorge Luiz Rodrigues Marques*

Professor Examinador – UNISC

Santa Cruz do Sul

2016

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me abençoar nos momentos de luta e nunca deixar me abater quando tive dificuldade.

A minha mãe Maria Englaci e ao meu pai Clarevi, por não medir esforços e fazer de tudo para que o meu sonho fosse realizado.

Aos meus Irmãos Daysi e Robert, que sempre me incentivaram nos estudos e acreditaram na minha caminhada.

E a minha noiva Cíntia Fernanda, que caminhou lado a lado comigo durante o período acadêmico, foi minha melhor amiga, companheira e incentivadora, e que tornou o objetivo que eu tracei, no nosso.

“Vencer, realmente, pode não ser tudo, mas se empenhar pela vitória é a única coisa que importa”.

Bernardino

## RESUMO

A Soldagem é um processo de fabricação que tem por objetivo unir duas ou mais peças, mantendo as propriedades físicas e químicas do material. Porém, na prática, essa imutabilidade não ocorre, pois sempre teremos algum tipo de alteração gerada por meio de concentração de tensões residuais. O trabalho monitorou diversos processos de soldagem, e buscou alternativas que permitissem o alívio das tensões surgidas, reduzindo ou evitando a possibilidade do aparecimento de descontinuidades que eventualmente pudessem estar sendo provocadas. Os ensaios mostraram que determinados processos de alívio das tensões remanescentes da soldagem podem melhorar as características do material soldado quanto a sua ductilidade e a força máxima de tração que o material suporta antes de romper no seu estado plástico, tendo sido possível determinar o controle de alívio mais eficaz para determinado tipo de soldagem. Dentre os tipos de ações ensaiados nesta pesquisa, o processo de martelamento mostrou-se como o melhor resultado dos processos mecânicos e o controle de alívio a altas temperaturas, em relação aos processos térmicos.

Palavras chave: Soldagem, Tensões residuais, Alívio das tensões.

## **ABSTRACT**

The welding is a manufacturing process that aims to join two or more parts, maintaining the physical and chemical properties of the material. However, in practice this does not occur immutability therefore will always have some kind of change generated by concentrating residual stress. The work monitored various welding processes, and sought alternatives that allow relief of the stresses arising, reducing or avoiding the possibility of the appearance of discontinuities that could possibly being caused. The tests showed that some of the remaining welding stress relief processes can improve the performance of welded material as its ductility and the maximum tensile strength that the material can support before breaking in its plastic state, it was possible to determine the relief control more effective for certain types of welding. Among the types of actions tested in this study, the pounding process proved to be the best result of mechanical and relief control at high temperatures, relative to thermal processes.

Key words: welding, residual stresses, relief of tensions.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Caracterização de um processo de soldagem. ....  | 18 |
| Figura 2 - Classificação dos processos de soldagem por fusão.....   | 19 |
| Figura 3 - fonte de energia conectada a peça. ....  | 20 |
| Figura 4 - Metal base de adição e poça de fusão.....  | 21 |
| Figura 5 - Tipos mais comuns de juntas.....   | 22 |
| Figura 6 - Tipos comuns de chanfros. ....   | 22 |
| Figura 7 - Chanfros usados, geralmente com diferentes tipos de junta. ....  | 23 |
| Figura 8 - Características dimensionais de chanfros usados. (s-nariz; f-fresta; r-raio do chanfro; -ângulo do chanfro; -ângulo de Bisel)..... | 24 |
| Figura 9 - Dimensões e regiões de solda de topo (a) e de filete (b).....  | 25 |
| Figura 10 - Esquema do sistema de soldagem pelo processo MIG/MAG. ....  | 26 |
| Figura 11 - Esquema de um equipamento básico de soldagem pelo processo MIG/MAG. ....  | 27 |
| Figura 12 - Esquema dos modos de transferência de material. ....  | 27 |
| Figura 13 - Nomenclatura para arames eletrodos conforme norma AWS.....  | 31 |
| Figura 14 - Tipo de polaridade na soldagem.....   | 33 |
| Figura 15 - Deformações na junta soldada, transversalmente ao cordão executado. ....  | 36 |
| Figura 16 - Deformações na junta soldada, longitudinalmente ao cordão executado. ....   | 36 |
| Figura 17 - Distribuição de tensões no sentido longitudinal. ....   | 37 |
| Figura 18 - Fluxograma das etapas do trabalho.....  | 40 |
| Figura 19 - Certificado de qualidade do material de ensaio. ....  | 41 |
| Figura 20 - Dados técnicos do material conforme o fornecedor. ....  | 42 |
| Figura 21 - Processo de corte do material para os testes. ....  | 43 |
| Figura 22 - Esquadrejamento do corpo de prova após o corte.....   | 43 |
| Figura 23 - Preparação da junta de soldagem do corpo de prova.....  | 44 |
| Figura 24 - Arame - eletrodo utilizado na soldagem.....   | 46 |
| Figura 25 - Equipamento de soldagem ....  | 47 |
| Figura 26 - Penetração de soldagem ....   | 48 |
| Figura 27 - Gabarito de soldagem com a peça posicionada. ....   | 49 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 28 - Processo de soldagem.....   | 50 |
| Figura 29 - Medição do gabarito de soldagem. ....   | 51 |
| Figura 30 - Pontos de verificação de temperatura na peça. ....  | 52 |
| Figura 31 - Posicionamento do pirômetro em relação à peça. ....   | 52 |
| Figura 32 - Inspeção visual da solda e de medias. ....  | 53 |
| Figura 33 - Ensaio de líquidos penetrantes no cordão de solda e na raiz. ....                                     | 54 |
| Figura 34 - Martelo rompedor elétrico e ponteira utilizada no processo. ....                                      | 56 |
| Figura 35 - Cabine de jateamento. ....  | 58 |
| Figura 36 - Peça jateada por granalha de 0,7mm. ....  | 58 |
| Figura 37 - Forno com temperatura a 250°C para alívio a baixa temperatura. ....                                   | 60 |
| Figura 38 - Forno com temperatura controlada a 650°C para alívio de tensões. ....                                 | 61 |
| Figura 39 - Máquina de corte a jato de água.....  | 62 |
| Figura 40 - Medidas e corpo de prova para ensaio de tração. ....  | 63 |
| Figura 41 - Máquina universal de ensaios EMIC e dispositivo de ensaio.....  | 64 |
| Figura 42 - Medida dos corpos de prova antes e depois do ensaio.....  | 65 |
| Figura 43 - Resultados do corpo de prova sem a aplicação de solda. ....   | 66 |
| Figura 44 - Resultados do corpo de prova soldado sem o tratamento de alívio. ....                                 | 67 |
| Figura 45 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado por granalha.....                                       | 68 |
| Figura 46 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado por martelamento. ....                                  | 68 |
| Figura 47 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado termicamente a alta temperatura. ....                   | 69 |
| Figura 48 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado termicamente a baixa temperatura. ....                  | 70 |
| Figura 49 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado termicamente a baixa temperatura de forma inversa.....  | 71 |
| Figura 50 - Resultados de todos os corpos de prova ensaiados.....   | 72 |
| Figura 51 - Perda de ductibilidade dos materiais tratados em relação ao material utilizado. ....                  | 73 |
| Figura 52 - Resultados do aumento de ductibilidade dos materiais tratados em relação ao material não tratado..... | 74 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Seleção de gases de proteção processo MIG/MAG curto circuito..... | 29 |
| Quadro 2 - Classificação dos arames eletrodos conforme norma AWS. ....       | 31 |
| Quadro 3 - Tensões admissíveis nas soldas (N/mm <sup>2</sup> ou MPa).....    | 37 |
| Quadro 4 - Métodos para aliviar as tensões residuais. ....                   | 38 |
| Quadro 5 - Dados técnicos do equipamento ESAB - Smashweld 257.....           | 45 |
| Quadro 6 - Tempo de soldagem dos corpos de prova. ....                       | 50 |
| Quadro 7 - Dados retirados da inspeção do processo de soldagem .....         | 55 |
| Quadro 8 - Relação dos tratamentos aplicados nos corpos de prova. ....       | 55 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1- INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>1.1- OBJETIVO</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>1.1.1 - Objetivo Geral:</b> .....                                   | <b>14</b> |
| <b>1.1.2 - Objetivos Específicos:</b> .....                            | <b>14</b> |
| <b>1.2 - JUSTIFICATIVA</b> .....                                       | <b>15</b> |
| <b>2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                                 | <b>17</b> |
| <b>2.1 - HISTÓRIA DA SOLDAGEM</b> .....                                | <b>17</b> |
| <b>2.1.1 - Conceito de soldagem:</b> .....                             | <b>18</b> |
| <b>2.2 - ARCO VOLTAICO:</b> .....                                      | <b>19</b> |
| <b>2.2.1 - Terminologia da soldagem:</b> .....                         | <b>21</b> |
| <b>2.3 - SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO MIG/MAG:</b> .....                   | <b>25</b> |
| <b>2.4 - GÁS DE PROTEÇÃO:</b> .....                                    | <b>28</b> |
| <b>2.5 - Arame Eletrodo:</b> .....                                     | <b>30</b> |
| <b>2.6 - POLARIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO:</b> ..... | <b>32</b> |
| <b>2.7 - DESCONTINUIDADES FORMADAS NO PROCESSO DE SOLDAGEM:</b> .....  | <b>33</b> |
| <b>2.8 - TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS:</b> .....               | <b>34</b> |
| <b>2.8.1 - Controle e alívio de tensões residuais:</b> .....           | <b>37</b> |
| <b>3 - METODOLOGIA</b> .....   | <b>39</b> |
| <b>4 - DESENVOLVIMENTO</b> .....                                       | <b>41</b> |
| <b>4.1 - MATERIAL UTILIZADO PARA TESTE:</b> .....                      | <b>41</b> |
| <b>4.2 - PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA A SOLDAGEM:</b> .....             | <b>42</b> |
| <b>4.3 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM:</b> .....               | <b>45</b> |
| <b>4.4 - PROCESSO SOLDAGEM:</b> .....                                  | <b>48</b> |
| <b>4.5 - MONITORAR O PROCESSO DE SOLDAGEM:</b> .....                   | <b>51</b> |
| <b>4.6 - APLICAR O ALÍVIO DAS TENSÕES:</b> .....                       | <b>55</b> |
| <b>4.6.1 - Martelamento:</b> .....                                     | <b>56</b> |
| <b>4.6.2 - Jato de Granalha:</b> .....                                 | <b>57</b> |
| <b>4.6.3 - Alívio das tensões a baixas temperaturas:</b> .....         | <b>59</b> |
| <b>4.6.4 - Recozimento para alívio das tensões:</b> .....              | <b>60</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.7 - CORTE DO CP PARA ENSAIO DE TRAÇÃO:</b> ..... | <b>62</b> |
| <b>4.8 - ENSAIO DE TRAÇÃO:</b> .....                  | <b>63</b> |
| <b>5 - RESULTADOS E DISCUSÕES</b> .....               | <b>66</b> |
| <b>6 - CONCLUSÃO</b> .....                            | <b>75</b> |
| <b>ANEXOS</b> .....                                   | <b>79</b> |

## 1- INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação utilizado na indústria há décadas, com o objetivo de unir peças mantendo conservadas as propriedades físicas e químicas do material. Este processo pode ser manual ou automatizado, para o qual é utilizada uma fonte de calor e em alguns casos além da fonte de calor, é exercida uma pressão, para que ocorra a solda de forma homogênea e com boas propriedades de resistência mecânica.

Porém, existe a formação de tensões na solda e no material, denominadas tensões residuais, as quais são inevitáveis, sendo geradas pela fonte de calor no ponto da solda. Isso pode ser prejudicial à resistência mecânica tanto do cordão quanto do material, porque poderá ocorrer alguma transformação de fase no momento da soldagem, provocando alterações estruturais, além de descontinuidades como trincas, empenamento, porosidade dentre outros.

A determinação das tensões geradas no processo é muito importante, a fim de que sejam minimizados os possíveis problemas causados pela soldagem. Dessa forma, a finalidade deste estudo foi o de propor medidas e quantificar a influência benéfica de determinado métodos de alívio dessas tensões residuais, a fim de que o material não tenha a sua resistência mecânica comprometida, com possíveis danos ao projeto.

## **1.1- Objetivo**

### **1.1.1 - Objetivo Geral:**

Determinar o melhor processo de tratamento para alívio de tensões geradas no processo de soldagem MAG.

### **1.1.2 - Objetivos Específicos:**

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Definir os corpos de prova e parâmetros para aplicação da soldagem;
- Aplicar alguns tipos de tratamentos mecânicos e térmicos para o alívio das tensões formadas no processo de soldagem;
- A partir de ensaios de tração dos corpos de prova, determinar quais as ações mais eficazes para o alívio das tensões provenientes do processo de soldagem.

## 1.2 - Justificativa

O que remete à proposição do estudo em questão é o fato da importância da soldagem para a indústria metal-mecânica, em função da sua intensa aplicação como processo industrial.

Com a soldagem de materiais, ocorre a formação de tensões de tração e compressão, concentradas na zona termicamente afetada, que são denominadas tensões residuais. Estas tensões muitas vezes não são levadas em conta no processo o que pode acarretar em problemas futuros, tanto no material soldado quanto no cordão de solda, tornando a união dos materiais defeituosa.

Para Quites (2002), o campo da aplicação da soldagem se amplia, de modo que as especificações se tornam mais finas, obrigando assim, o aperfeiçoamento do controle de qualidade do processo de soldagem, a fim de, formar uma solda eficaz.

A utilização da informática por meio de softwares é crescente nesse tipo de processo, tendo em vista que o mercado atual cresce, e junto com ele a exigência de um resultado satisfatório, e a fim de manter essa exigência, busca a qualificação dos soldadores seguindo as normas internacionais AWS (*American Welding Society*), mais difundidas. A procura de uma autêntica revolução tecnológica é iminente, e o Brasil, também, vem sendo atingido por essa revolução.

Muitos processos são utilizados na indústria para a fabricação e recuperação de peças, sendo que a soldagem é o processo de união mais utilizado na atualidade, no qual, existem muitos tipos e variações deste processo, que é usado para a deposição de materiais sobre uma superfície, buscando a união e a recuperação de peças em geral, bem como a formação de um revestimento com características especiais para a união de peças (MARQUES et al, 2007).

A soldagem é hoje muito utilizada como processos de fabricação, e sempre que houver novas peças e estruturas a serem fabricadas, os processos de soldagem deverão ser considerados como opção. Quando existem peças com seções de união muito finas, o processo de soldagem pode ser significativamente, mais econômico, eliminando possíveis furos para a utilização de fixadores, como parafusos e rebites, e deixando assim de ter o custo destes elementos, e reduzindo também o custo de montagem, remetendo de fato, que a soldagem compete tanto na resistência, quanto em custo (SHIGLEY et al, 2005).

Na visão de Strasser (1963), a soldagem pode ser comparada com um processo de fundição, onde o metal fundido é derramado dentro de um cadinho. No caso desta comparação o metal de adição é o material a ser depositado, e o chanfro o cadinho, admitindo que as faces forma dois lados de quatro, e mais um lado fechado pela solda depositada já solidificada, formado três lados fechados, e a solda quando é depositada no chanfro, não tem efeito mecânico, por que existe dilatação do metal de solda, mas ao esfriar e solidificar começa a exercer uma contração no material que o envolve.

Já para Cunha (2005), quando a união de peças por uma solda é desejada, o dimensionamento do cordão de solda é também necessário, sendo imprescindível a verificação quanto à execução do procedimento, das normas e do controle no processo. A soldagem, na maioria dos casos, reflete aos procedimentos metalúrgicos, no qual, não se podem prescindir no dimensionamento da solda, as concentrações de tensões formadas, sendo que são necessários cuidados especiais, afim de, contornar os efeitos das tensões residuais, que podem provocar desconformidades e comprometer o dimensionamento da peça.

Qualquer tensão que existe no volume do material soldado, sem a ação direta de uma carga externa, pode ser definida como tensão residual. Essas tensões na sua maior parte determinam a capacidade de carga e vida útil da peça soldada, interferindo nas características mecânicas e de funcionamento dos elementos soldados. Conhecendo as tensões residuais, algumas ações podem ser aplicadas, permitindo a correção de possíveis defeitos que poderão ser formados durante a execução de um projeto (ESTEFEN, et al, 2008).

As modificações são notadas de forma significativa em estruturas e peças soldadas, causadas pelo estado de tensão e deformação. O metal fundido e o gradiente de altas temperaturas geradas no processo causam diversos defeitos como contração e transformação de fase. Para avaliação do estado de tensões e deformação que ocorrem após a soldagem, existem alguns softwares e ensaios especializados que são utilizados nessa avaliação (CASTELO, et al, 20--).



## 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 - História da Soldagem

A soldagem aplicada atualmente na indústria pode ser considerada como um processo recente em relação aos primeiros tipos de solda no qual a história nos revela. Muitos artefatos confeccionados na idade antiga (De 4000 a.C até 476 d.C.) foram feitos utilizando um processo de união de duas peças distintas com a aplicação de brasagem e soldagem por forjamento, sendo que estes recursos tem sido descoberto com mais de 4000 anos. A soldagem por forjamento também tem sido utilizada há mais de 3000 anos.

Na antiguidade e idade média, a soldagem era utilizada para a fabricação de armas e instrumentos cortantes, sendo este processo importante fator tecnológico, utilizados durante este período. Com a evolução dos processos de fabricação, a soldagem perdeu importância no século XII e XIII como principal processo utilizado para obtenção de união de peças, tendo assim a retomada e evolução com o passar dos anos. A tecnologia mudou a partir do século XIX, quando as experiências envolvendo arco elétrico de *Sir Humphrey Davy* (1801 – 1806), e a descoberta feita por *Edmund Davy*, do acetileno, e a evolução de fontes geradoras de energia elétrica, possibilitou o surgimento de processos de soldagem por fusão (MARQUES, et al, 2007).

Conforme Quites (2002), o processo de soldagem a arco elétrico teve sua primeira patente em 1885, por *Nikolas Bernardos* e *Stanislav Olszewsky*. Em 1890, *N. G. Slavianoff* e *Charles Coffin*, parceria formada por um Russo e um Norte Americano, desenvolveram a soldagem a arco com eletrodo metálico e em 1905, o sueco *Oscar Kjellberg* patenteia o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido. O processo para a união de materiais obteve o seu principal impulso em tecnologia e modernização durante a Primeira Guerra Mundial (1914 – 1918), sendo que a partir deste período, a soldagem começou a ser mais utilizada como processo de fabricação.

### 2.1.1 - Conceito de soldagem:

Soldagem é um processo de fabricação, que permite a união de duas ou mais peças ou um reparo de uma única peça, sendo estas metais ou não – metais, com utilização ou não de pressão e com ou sem adição de material, transformando assim uma peça única, representada na figura 1, sem a utilização de cola e dispositivos de fixação, como parafusos e rebites, ou seja, sem descontinuidades, conforme (MARQUES, et al, 2007).

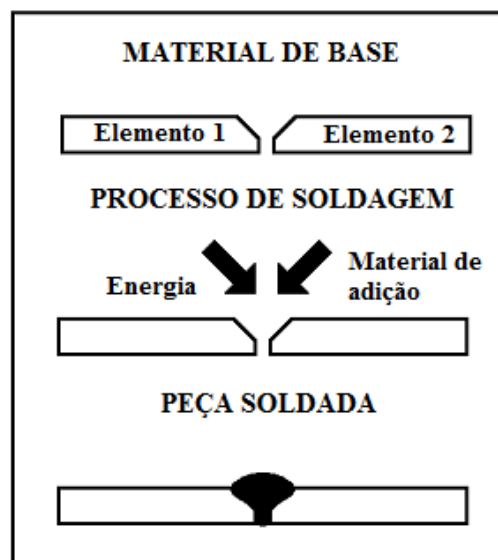
Em outras palavras podemos definir a soldagem como:

[...] Operação que visa à união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades químicas e físicas (QUITES, 2002).

De acordo com a Associação Americana de Soldagem (American Welding Society – AWS), citado por (MARQUES, 2007).

[...] É o processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.

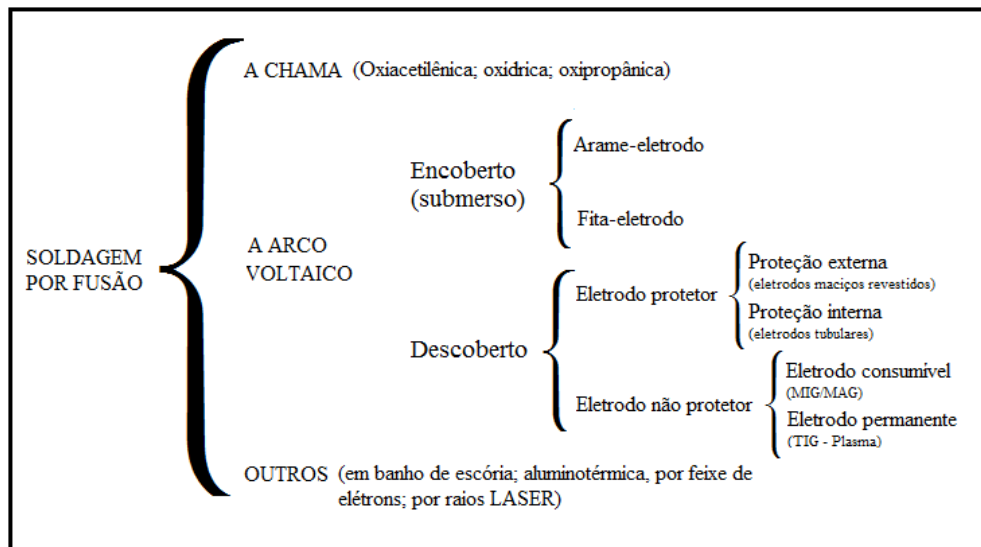
Figura 1 - Caracterização de um processo de soldagem.



Fonte: QUITES, 2002.

Conforme Quites (2002), a solubilização se processa na fase líquida, quando a energia aplicada no processo tem a intenção de fundir o material de base, sendo esta considerada uma soldagem por fusão, que pode ser classificada em soldagem a arco voltaico, elétrica por indução, por chama, entre outras, conforme a figura 2 onde é nítida a diferença de soldagem por pressão e fusão.

Figura 2 - Classificação dos processos de soldagem por fusão.



Fonte: QUITES, 2002.

Este processo de união de peças é atualmente um dos mais utilizados na indústria, e tem a sua aplicação desde microeletrônicos, sendo aplicados em estruturas simples e na indústria metal mecânica como montadoras de veículos automotores, navios, aviões, além de indústrias que exigem elevado grau de responsabilidade como químicas, petrolíferas e nucleares.

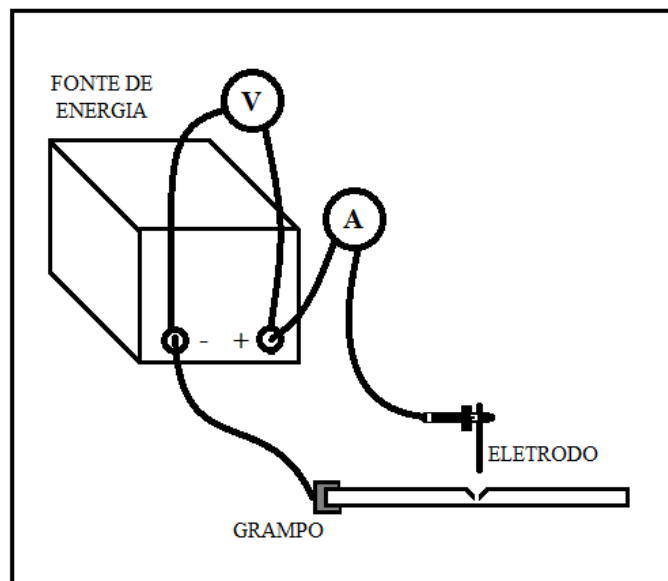
## 2.2 - Arco voltaico:

Existem vários tipos de soldagem na indústria, sendo que o arco voltaico é a fonte de calor mais usual, para a união de materiais metálicos, isso por que, concentra o calor no ponto onde ocorre a fusão do material e cria uma atmosfera

gasosa em volta, proporcionando assim uma menor contaminação do banho, tendo como fatores positivos em relação ao processo, a facilidade de controle do cordão de solda, bem como um baixo custo relação ao equipamento e insumos e contendo também, níveis aceitáveis de risco a saúde (MARQUES, 2007).

Para Qites (2002), o processo ocorre por solubilização líquida criada durante a fusão ou adição de material na união de peças ou partes, utilizando uma fonte de energia mostrado na figura 3, podendo ser equipamento um transformador próprio para soldagem ou um retificador de soldagem, sendo estes os responsáveis por criar uma diferença de potencial entre a peça e o eletrodo. Quando o aparelho é acionado o eletrodo e a peça ficam energizados, sendo que não passara corrente até o momento em que existir o contato entre ambos, isto por que o ar é um isolante elétrico.

Figura 3 - fonte de energia conectada a peça.



Fonte: Adaptado, QUITES, 2002.

Com o contato feito, ocorre uma descarga elétrica sendo que a tensão cai rapidamente a um valor muito baixo próximo da corrente de curto – circuito, e a parte do eletrodo que está em contato com a peça, aquece de imediato. O metal do eletrodo emite elétrons através do efeito termoiônico, e os elétrons se chocam com o gás da atmosfera criada no ponto de soldagem, transformando assim o gás em

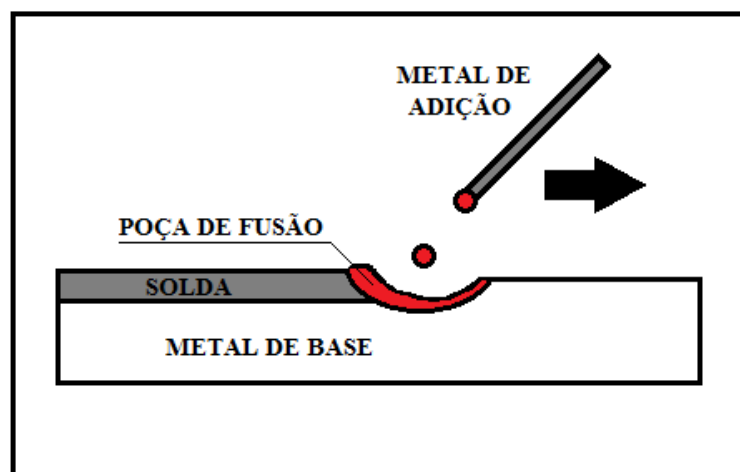
condutor elétrico. A fusão então será sustentada por este gás ionizado conhecido como plasma, fundindo assim os materiais e unindo uma peça a outra ou simplesmente reparando uma peça quebrada (MARQUES et al, 2007).

### 2.2.1 - Terminologia da soldagem:

A solda é o resultado do processo de soldagem, que visa assim obter a união de peças ou de reparo da mesma. A peça ou as peças soldadas no caso de duas peças ou mais, são denominadas como material base ou metal base. (Marques et al, 2007).

Como citado por Qites (2002), na soldagem por fusão, muitas vezes é utilizado material de adição, para unir as partes, sendo que o material é fundido pela fonte de calor que é gerada no processo, e misturado com o metal de base, formando assim a poça de fusão visto na figura 4.

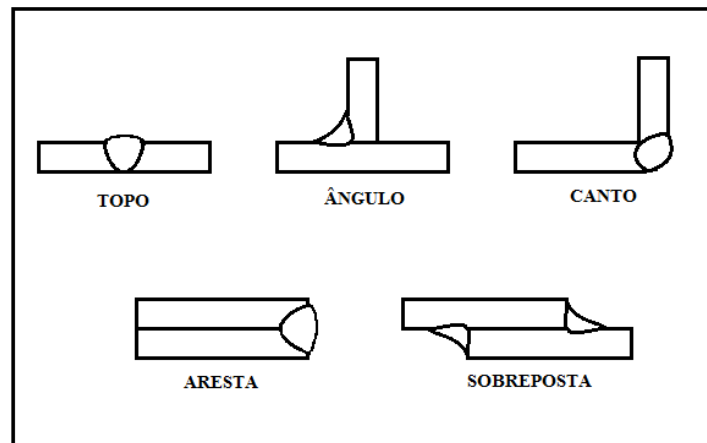
Figura 4 - Metal base de adição e poça de fusão.



Fonte: Adaptado, MARQUES et al, 2007.

Na soldagem é denominada junta, a parte onde ocorre a união das peças soldadas. Existem vários tipos de juntas mostradas na figura 5, sendo que os mais usuais são os destacados abaixo.

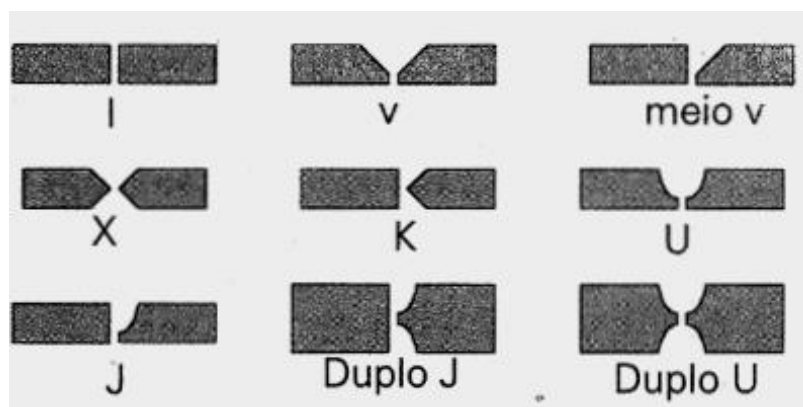
Figura 5 - Tipos mais comuns de juntas.



Fonte: MARQUES, et al, 2007.

O posicionamento das peças para efetuar a soldagem, forma vários tipos de junta. Mas muitas vezes é necessário ajustar a peça a fim de facilitar à penetração do metal de adição ao unir as partes. O ajuste é feito através de chanfros, que pode ser visto na figura 6, que são aberturas ou sulcos formados na superfície das peças, com o objetivo de conter e manter a solda no ponto certo (MARQUES et al, 2007).

Figura 6 - Tipos comuns de chanfros.



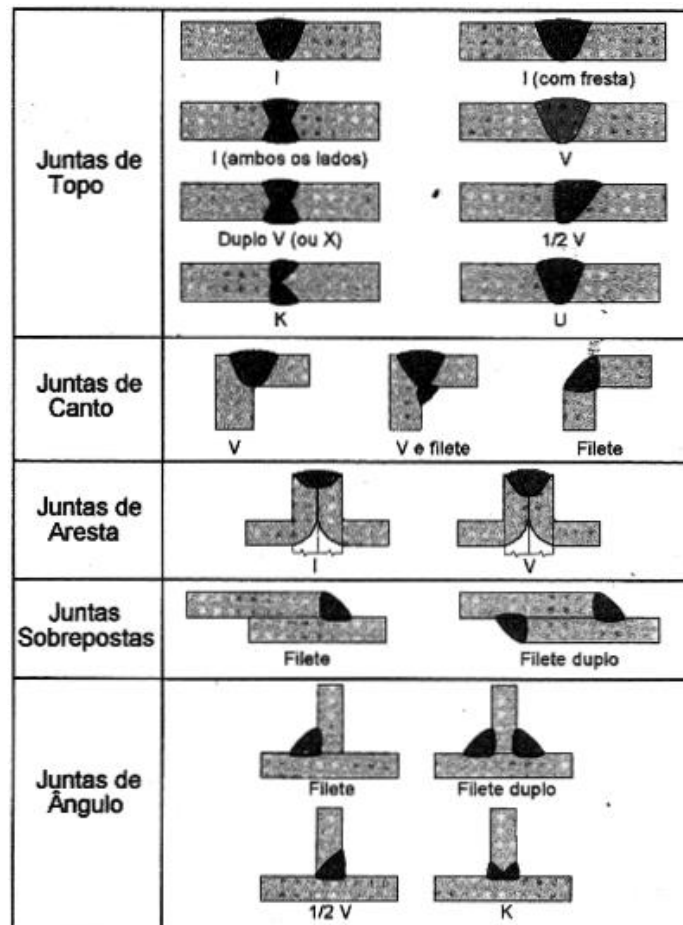
Fonte: MARQUES, et al 2007.

Conforme Marques et al (2007), uma condição de soldagem específica, o tipo de chanfro a ser utilizado depende de alguns fatores, como o material, a espessura das peças, a facilidade de acesso à região da junta, bem como custo de preparação de chanfros.

Os chanfros de tipo I são geralmente utilizados em condições de soldagens onde a penetração desejada é permitida, sendo que este tipo de chanfro é muito usual em soldagem de juntas com pequena espessura, que não necessita de usinagem e um corte mais elaborado. Quando não é possível obter a penetração desejada uma soldagem com outro tipo de chanfro, é mais indicada, sendo que os do tipo V e meio V são as mais usadas. Já quando a espessura da junta é muito grande o chanfro de tipo do tipo U ou J, pode ser mais adequado em relação à junta I, V ou meio V. Quando é possível soldar dos dois lados da junta da peça, juntas do tipo X, K, U, duplo U ou duplo J, pode ser melhores opções por ter como vantagem de melhor equilibrar as tensões térmicas que são geradas no processo, bem como apresentar uma menor distorção (MARQUES et al, 2007).

Para escolher um tipo de chanfro demonstrado na figura 7, devemos considerar o tipo de soldagem que será efetuada e avaliar a melhor opção.

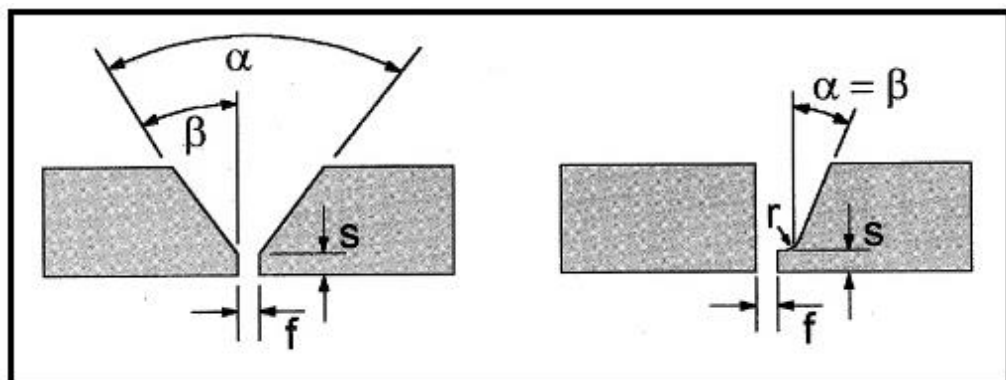
Figura 7 - Chanfros usados, geralmente com diferentes tipos de junta.



Para MARQUES et al, (2007), o chanfro é determinado pelos seus elementos característicos dimensionais que apresentam, mostrados na figura 8, sendo os principais destacados como:

- Face da raiz (s): Parte não chanfrada de um componente da junta, peça.
- Abertura da raiz, folga ou fresta (f): Menor distância entre as peças a ser serem soldadas.
- Ângulo de abertura da junta ou ângulo de Bisel ( $\beta$ ): Ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta.
- Ângulo de Chanfro ( $\alpha$ ): É a soma dos ângulos de Bisel, dos componentes da junta das peças a ser soldadas.

Figura 8 - Características dimensionais de chanfros usados. (s-nariz; f-fresta; r-raio do chanfro; - ângulo do chanfro; - ângulo de Bisel).



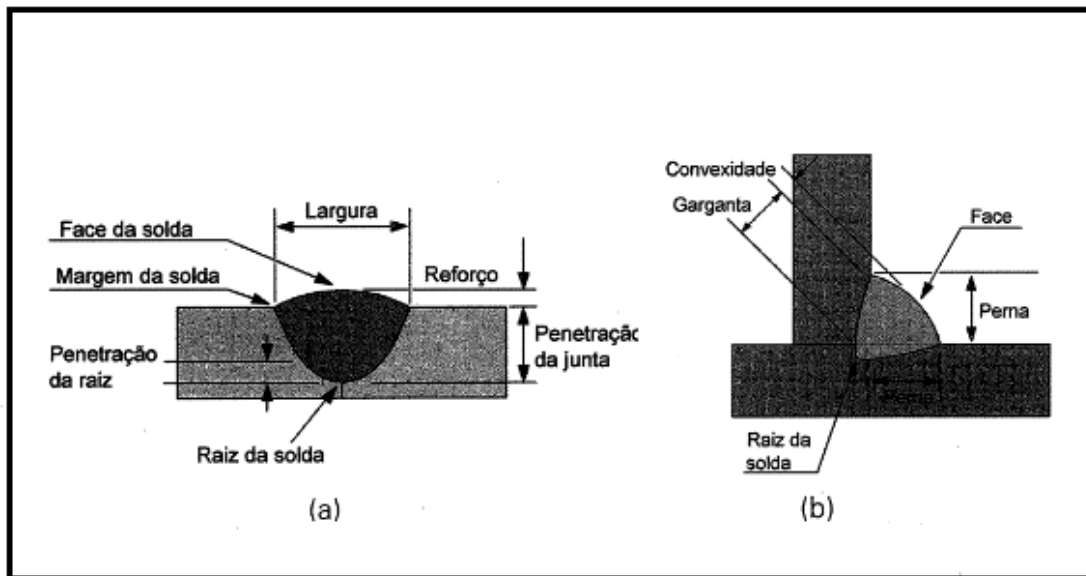
Fonte: MARQUES et al, 2007.

Para atender os requisitos de um projeto, escolhamos o chanfro mais adequado para aplicarmos na solda, a fim de garantir a união das peças de forma adequada, minimizando assim a quantidade de material de adição a ser utilizado bem como os eventuais problemas que possam ocorrer na solda.

Para definir o formato e as características técnicas dos cordões de solda, é utilizados alguns termos demonstrados na figura 9, como face da solda, margem da solda, penetração da raiz, raiz da solda, penetração da junta, reforço, largura, garganta, perna e convexidade (MARQUES et al, 2007).



Figura 9 - Dimensões e regiões de solda de topo (a) e de filete (b).



Fonte: MARQUES et al, 2007.

### 2.3 - Soldagem a arco elétrico MIG/MAG:

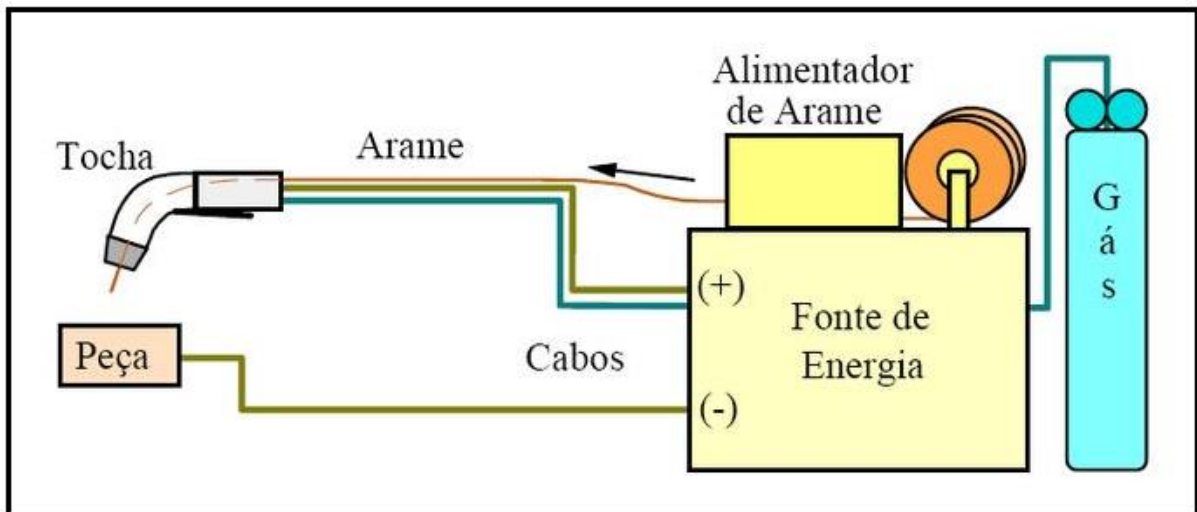
O período da Segunda Guerra foi muito importante para o aperfeiçoamento de novos processos industriais, e a soldagem foi uma delas. Como a indústria bélica americana precisava de um processo de soldagem com alta produtividade, foi desenvolvido um eletrodo consumível a base de SiMn, onde a partir do estudo do eletrodo comum, foi descoberto que sua atmosfera gasosa era rica em CO<sub>2</sub>, e com isso, foi adicionado então como base este gás, criando o processo MIG/MAG, que produz uma rápida deposição de material, bem como uma resistência considerável, que tem por outro lado, seu depósito com baixa tenacidade (HOFFMANN, 1992).

De acordo com Gohr Júnior (2002), o processo de soldagem MIG/MAG convencional utiliza a forma mais simples de equipamento, pois a fonte de energia fornecida é do tipo tensão constante, sendo que a corrente é uma variável dependente e fundamentalmente da velocidade de alimentação do arame e das suas características. Assim, as variáveis independentes que pode ser previamente ajustadas são a tensão e a velocidade do arame-eletrodo.

O processo de soldagem MIG/MAG é com base numa fonte de calor gerado por um arco elétrico formado através do contato entre o arame com polaridade

positiva e a peça a ser soldada de polaridade negativa, conforme a figura 10, estabelecendo um curto circuito que permite a passagem de uma elevada corrente elétrica, que como consequência causa o aquecimento do arame, fundindo assim o consumível na peça, onde é constantemente alimentado de forma contínua durante a soldagem (GOHR JÚNIOR, 2002).

Figura 10 - Esquema do sistema de soldagem pelo processo MIG/MAG.

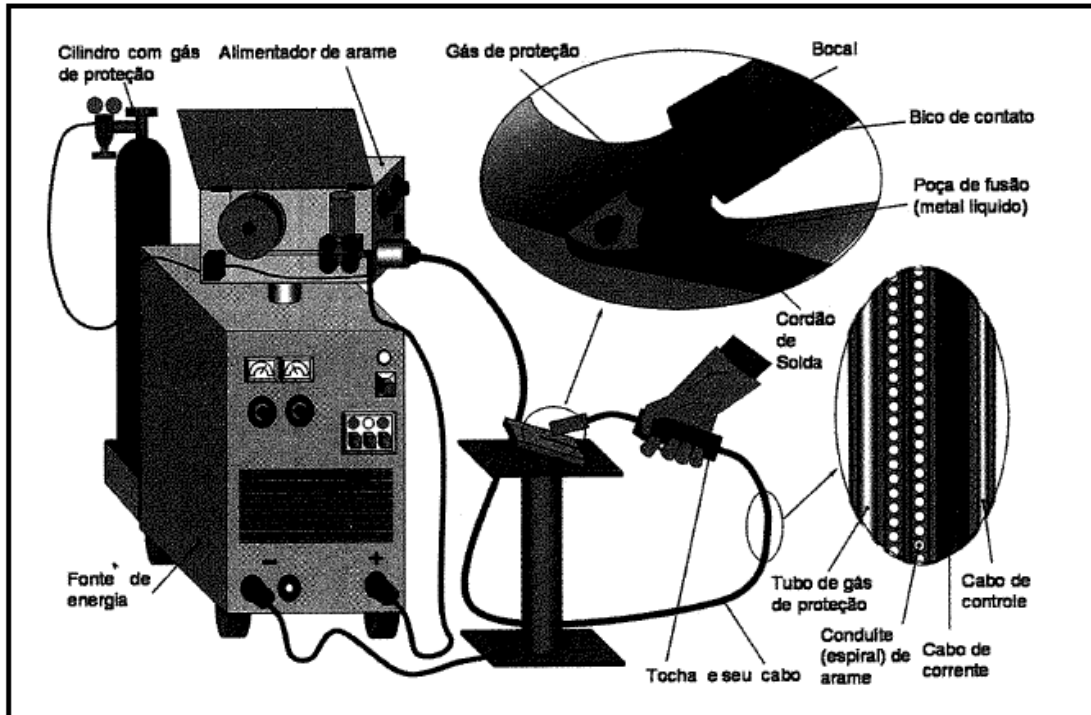


Fonte: Marques, 2007.

A nomenclatura deste tipo de soldagem vem do inglês, sendo que para MIG (*Metal Inert Gas*), ou seja, proteção por um gás ou mistura de um gás inerte, e MAG (*Metal Active Gas*) que é mistura de um ou mais gases ativos, ou com gases inertes, ou ainda  $\text{CO}_2$  puro. Também pode ser considerada a nomenclatura GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), que também é derivada do inglês e abrangem qualquer tipo de gás de proteção (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Na figura 11, é possível ver a distribuição e os componentes básicos que formam o equipamento para a soldagem do tipo MIG/MAG.

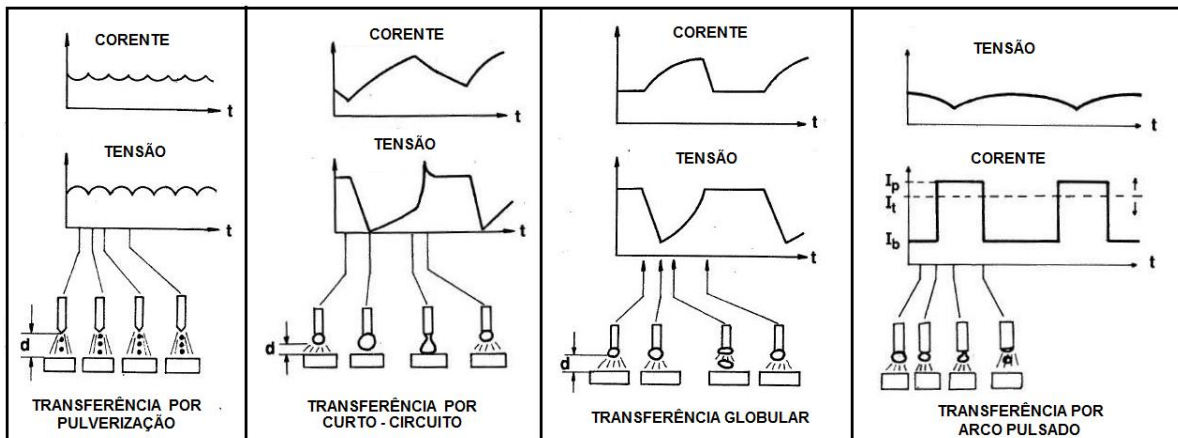
Figura 11 - Esquema de um equipamento básico de soldagem pelo processo MIG/MAG.



Fonte: Scotti, Ponomarev, 2014.

No processo de soldagem MIG/MAG existem basicamente quatro tipos de transferência de metal, que é o do tipo de curto-circuito, globular, pulverização e por arco pulsado, onde podemos ver na Figura 12, a corrente, a tensão e o modo de transferência de cada um dos processos (WAINER et al, 1992).

Figura 12 - Esquema dos modos de transferência de material.



Fonte: Wainer et al, 1992.

A transferência é globular, ocorre para as baixas densidades de corrente e o gás de proteção pode ser de qualquer tipo, em contra partida tem a dificuldade de soldagem, onde pode ocorrer problemas de falta de penetração ao cordão. A transferência por arco-pulsado é basicamente do tipo pulverização axial, onde o equipamento gera dois níveis de corrente, onde na primeira denominada corrente de base o é tão baixa que não há transferência de material, apenas a fusão do eletrodo, no segundo estágio de corrente denominada de corrente de pico, é superior a corrente de transição globular/pulverização, gerando assim a gota e a transferência de material (WAINER, et al, 1992).

A soldagem por pulverização pode produzir altas taxas de deposição do metal de solda, e basicamente utilizada para a soldagem de materiais de espessura 2.4 mm e maiores, não sendo aplicável na soldagem de alumínio ou cobre. O arco em pulverização fica restrito apenas à soldagem na posição plana isso devido a sua grande poça de fusão, já aços carbono podem ser soldados fora de posição usando este tipo de arco com uma formação de poça de fusão pequena, utilizando arames de diâmetro 0.89 mm ou 1.10 . No caso de da soldagem do tipo de transferência por curto circuito, o arame deve se manter na faixa 0.8 mm a 1.2 mm de diâmetro e tem como ponto positivo a vantagem de soldar em todas as posições, sendo indicado para chapas de menor espessura e que tenham solicitação mínima de distorção, pois a quantidade de calor gerada na peça é menor (ESAB, 2005).

## **2.4 - Gás de proteção:**

O gás de proteção tem o objetivo de evitar à contaminação do arame, pelos resquícios de metal de adição que se transfere para a poça de fusão, quanto aos gases da atmosfera. O gás também tem como função ser a fonte ionizante que confere assim as propriedades estabilizantes do arco, controlando o consumo do eletrodo, a transferência do material de adição e a fusão no metal base da peça. (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

A proteção em torno da solda é feita por uma atmosfera gasosa, criada a partir do um gás inerte, no caso da MIG, no qual o gás é composto por Argônio e Hélio, e ativo no caso da MAG, que utiliza para criar a atmosfera um gás ativo,

geralmente CO<sub>2</sub>, ou uma mistura que inclui o O<sub>2</sub>, e N<sub>2</sub>, que expulsa da região de soldagem, o ar atmosférico que atua como um contaminante da poça de fusão, onde essa contaminação basicamente é causada pelo nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e vapor d'água (H<sub>2</sub>O), que estão presentes no ar atmosférico, podendo ser visto no quadro 1, destacado pela (ESAB, 2005).

A condutividade térmica do gás de proteção em relação à temperatura influencia diretamente na tensão do arco, como na energia térmica transferida ao cordão de solda. Com o aumento da condutividade térmica, maior a tensão de soldagem é necessária para o sustento do arco voltaico, no caso do gás hélio e dióxido de carbono é necessário de uma tensão de soldagem maior para que o arco se mantenha estável, em relação ao argônio (ESAB, 2005).

Quadro 1 - Seleção de gases de proteção processo MIG/MAG curto circuito.

| Metal                    | Ar | He | Ar-He              | Ar-CO <sub>2</sub>                      | Ar-He-CO <sub>2</sub>        | Ar-O <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub>  |
|--------------------------|----|----|--------------------|---|------------------------------|------------------------------------|------------------|
| Alumínio                 | X  | X  | (25-75)            |   |                              |                                    |                  |
| Aços-Carbono             |    |    |                    | (75-25)<br>(50-50)<br>(92-8)<br>(85-15) |                              | (>90-<5-<10)                       | X <sup>(1)</sup> |
| Aços de alta Resistência |    |    |                    |   | (2,5-96-1,5) ACIMA DE 14 MSG | (>90-<5-<10) ATÉ 14 MSG            |                  |
| Cobre                    |    |    | (25-75)            |   |                              |                                    |                  |
| Aços Inoxidáveis         |    |    |                    | (75-25) <sup>(1)</sup>                  | (7,5-90-2,5)                 | (>90-<5-<10)                       |                  |
| Ligas de Níquel          | X  |    | (10-90)<br>(25-75) |   | (7,5-90-2,5)                 |                                    |                  |
| Metais reativos          | X  | X  | (25-75)            |   |                              |                                    |                  |

Fonte: ESAB, 2005.

Além disso, com as misturas de 25% de CO<sub>2</sub> + 75% de argônio, se produz uma solda com penetração reticular sendo o ciclo de operação de 65% que é a perda de partes do eletrodo + 35% do tempo. A mistura de CO<sub>2</sub> e argônio fazem com que a solda fique rica em Si e Mn, isso porque mistura não contém CO<sub>2</sub> suficiente para a decomposição (HOFFMANN, 1992).

Ainda destacado por Hoffmann (1992), o processo de soldagem MIG/MAG, pode ser utilizado para soldar ligas de cobre, alumínio e inox, e não deve ser utilizado em vasos de pressão. Para a utilização em ligas deve se utilizar os seguintes gases:

- Ligas de Alumínio – Argônio puro.
- Ligas de Alumínio e Magnésio – 75% Hélio, 25% Argônio.
- Aços inoxidáveis – Argônio com 5% de O<sub>2</sub>.
- Magnésio – Argônio Puro.
- Cobre desoxidado – 75% Hélio, 25% Argônio ou Argônio puro.

## 2.5 - Arame Eletrodo:

É o principal consumível de soldagem do processo MAG, onde é constituído de metais ou ligas metálicas que possuem composição química, dureza, condições superficiais e dimensões bem controladas. Os arames são normalmente cobreados, isso pelo fato do cobre proteger o cordão de solda contra a corrosão e melhorar a condução elétrica entre ele e a peça (MARQUES,2007).

O arame-eletrodo se torna um condutor de corrente elétrica, assim que passa pelo bico de contato, ou seja, em um espaço entre o bico e a poça de fusão. Os arames são fornecidos de acordo com as normas regulamentadoras e em diâmetros de 0.8, 0.9, 1.0, e 1.2 mm, podendo ser encontrados em alguns casos em diâmetros de 0.6, 1.38, 1.6 mm, sendo que quanto maior o diâmetro do arame, maior a dificuldade a máquina de soldagem tem de alimentar a tocha (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

Para facilitar a seleção do arame, a classificação atende as normas AWS (*American Welding Society*), nos quais são definidos a classe, a composição química, a resistência mecânica além de outras características operacionais e pode ser visto na figura 13 que engloba as normas AWS A5.18 e AWS A5.28 para arames sólidos e enchimento metálico (MARQUES, 2007).

Figura 13 - Nomenclatura para arames eletrodos conforme norma AWS.



Fonte: MARQUES, 2007.

No caso da soldagem de aços carbono, podemos notar no quadro 2 os requisitos químicos e para todos os arames de aço doce cobertos pela norma de especificação AWS A5.18, pois mostra os valores mínimos das propriedades mecânicas dos depósitos de solda. Como as propriedades mecânicas e os requisitos de serviço influenciam diretamente na seleção do arame, devemos em alguns casos, aplicar considerações mais genéricas, pois elas podem ser mais úteis na maioria das aplicações. Quando a corrente de soldagem, o tamanho da poça de fusão ou até mesmo a quantidade de oxidação, a carepa de usinagem e impurezas na superfície da peça, devem ter aumentado os teores de manganês e de silício do arame para que possa melhorar a qualidade à solda (ESAB, 2005).

Quadro 2 - Classificação dos arames eletrodos conforme norma AWS.

| AWS      | ESAB   | C         | Mn        | Si        | S      | P      | Mo        | Outros                                       |
|----------|--|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|--|
| ER70S-2  | 65   | 0,07      | 0,90-1,40 | 0,40-0,70 | ≤0,035 | ≤0,025 | ---       | 0,05-0,15 Ti<br>0,02-0,12 Zr<br>0,05-0,15 Al |
| ER70S-3  | 29S ou 82  | 0,06-0,15 | 0,90-1,40 | 0,45-0,75 | ≤0,035 | ≤0,025 | ---       |  |
| ER70S-4  | 85   | 0,07-0,15 | 1,00-1,50 | 0,65-0,85 | ≤0,035 | ≤0,025 | ---       |  |
| ER70S-5  | ---  | 0,07-0,19 | 0,90-1,40 | 0,30-0,60 | ≤0,035 | ≤0,025 | ---       | 0,50-0,90 Al                                 |
| ER70S-6  | OK 12.51   | 0,07-0,15 | 1,40-1,80 | 0,80-1,15 | ≤0,035 | ≤0,025 | ---       |  |
| ER70S-7  | 87HP   | 0,07-0,15 | 1,50-2,00 | 0,50-0,80 | ≤0,035 | ≤0,025 | ---       |  |
| ER80S-D2 | 83 ou Hi84   | 0,07-0,12 | 1,60-2,10 | 0,50-0,80 | ≤0,035 | ≤0,025 | 0,40-0,60 |  |
| ER70S-G  | não especificado – requisitos a serem acordados entre o cliente e o fornecedor |           |           |           |        |        |           |  |

Fonte: ESAB, 2005.

Para Scotti e Ponomarev (2014), o arame é fabricado com diferentes composições químicas, nos quais agregam propriedades ao cordão de solda combinados assim com o gás de proteção. Já no caso de soldas de aço carbono os arames tem composição nominal diferente para certas aplicações, possuem normalmente baixo teor de carbono, fósforo e enxofre, que permite ao cordão reduzir a susceptibilidade a trincas e maior teor de manganês para oferecer melhores propriedades mecânicas.

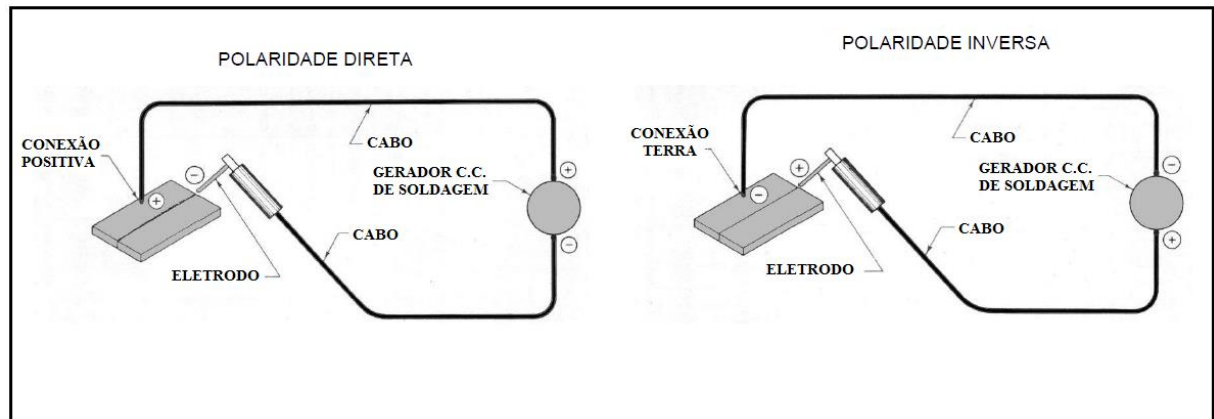
## **2.6 - Polaridade do processo de soldagem a arco elétrico:**

Outra coisa que devemos levar em consideração é o tipo de corrente utilizada para efetuar a solda. Se entre dois pontos distintos que passe uma corrente elétrica for mantida uma corrente constante e no mesmo sentido, é denominada então de esta corrente contínua, CC. O tipo de corrente fornecida pelos retificadores é denominado contínua, mas na verdade é ligeiramente ondulada, sendo facilmente identificada. Na prática de soldagem se comporta como uma corrente contínua, mas se tiver dois pontos ligados por um condutor e eles possuírem uma tensão alternadamente positiva e negativa em relação ao outro, entre eles escoam uma corrente que muda de sentido na mesma frequência que a tensão. Esta corrente é conhecida como corrente alternada, CA (NERIS, 2012).

A polaridade pode ser definida sabendo que os pólos do arco elétrico, não se comportam de maneira igual, e o bombardeio a que os elétrons provocam no anodo (eletrodo positivo) é mais eficiente em relação aos de íons no catodo, em função da energia cinética de cada elétron ser maior que a de cada íon, e pelo fato da saída dos elétrons do catodo consumir energia, enquanto a chegada ao anodo se faz com entrega de energia. Isso identifica que a temperatura do anodo é maior que a do catodo, e sendo assim em função do comportamento dos pólos do arco ser diferentes, se determinou chamar de polaridade direta aquela em que o eletrodo é o catodo (polo negativo) e a peça é o anodo, representada por CC-, e quando o eletrodo é o anodo (polo positivo) e a peça o catodo, a polaridade é dita inversa, CC+, representadas pela figura 14, (NERIS, 2012).



Figura 14 - Tipo de polaridade na soldagem



Fonte: NERIS, 2012.

## 2.7 - Descontinuidades formadas no processo de soldagem:

De acordo com Marques (2007), a soldagem por ser um processo de fusão que envolve o aquecimento demasiado da região onde se aplica, gera tensões concentradas no material, devido à fonte de calor concentrada em um ponto, o que causa na peça o aparecimento de deformações elásticas e em alguns casos plásticas na região soldada e ainda deformações permanentes de dimensões, resultados estes causados por tensões internas. O desenvolvimento das tensões pode gerar ainda, uma série de problemas como a maior propensão a ocorrência de fratura por fadiga, e perda da estabilidade dimensional.

Conforme o Neves (2014), descontinuidades são formadas por interrupções que ocorrem em uma estrutura ou peça soldada, afetando assim a sua homogeneidade física, mecânica e metalúrgica, podendo assim ser considerada um defeito formado no processo, quando as suas dimensões, natureza ou efeito combinado, tornar a peça inaceitável, não possibilitando à aplicação de medidas para corrigir o problema, onde podemos destacar como principais descontinuidades os seguintes efeitos:

- Ângulo excessivo de reforço: ângulo acima do especificado entre os planos da superfície do metal base e do tangente ao reforço da solda.
- Concavidade da raiz: reentrância central ou lateral da raiz da solda.

- Deformação angular: distorção angular na junta, em relação ao projeto original.
- Deposição insuficiente: insuficiência de metal na face da solda.
- Desalinhamento: juntas de topo não paralelas.
- Falta de fusão: fusão incompleta entre a zona fundida e metal base, podendo estar localizada entre passes ou na raiz.
- Falta de penetração: insuficiência de metal na raiz.
- Inclusão de escória: material não metálico retido na zona fundida.
- Inclusão metálica: metal estranho ao metal base.
- Mordedura: depressão sob a forma de entalhe no metal base ao lado da zona fundida.
- Penetração excessiva: metal da zona fundida em excesso na raiz.
- Porosidades: vazios internos na zona fundida.
- Rechupe de cratera: falta de metal causado por contração da zona fundida.
- Respingos: gotas de metal aderidas nas superfícies frias.
- Trincas: descontinuidade bidimensional produzida pela ruptura local do metal base.
- Trinca interlamelar: trinca em forma de degraus devido à laminação.
- Trinca longitudinal: Paralelo ao eixo longitudinal da solda na zona fundida, zona de ligação, zona afetada pelo calor e no metal base.
- Trinca transversal: perpendicular ao eixo longitudinal da solda na zona fundida, zona de ligação, zona afetada pelo calor e no metal base.
- Trinca na raiz: inicia-se na raiz podendo estar localizada na raiz ou na zona afetada pelo calor.

## **2.8 - Tensões residuais em juntas soldadas:**

As tensões residuais que se formam nas juntas soldadas são criadas pela deformação inelástica não uniforme, gerada pelo efeito térmico no processo de soldagem por fusão, onde é utilizada uma fonte de calor localizada em um ponto, produzindo assim uma temperatura muito elevada. As dilatações e contrações

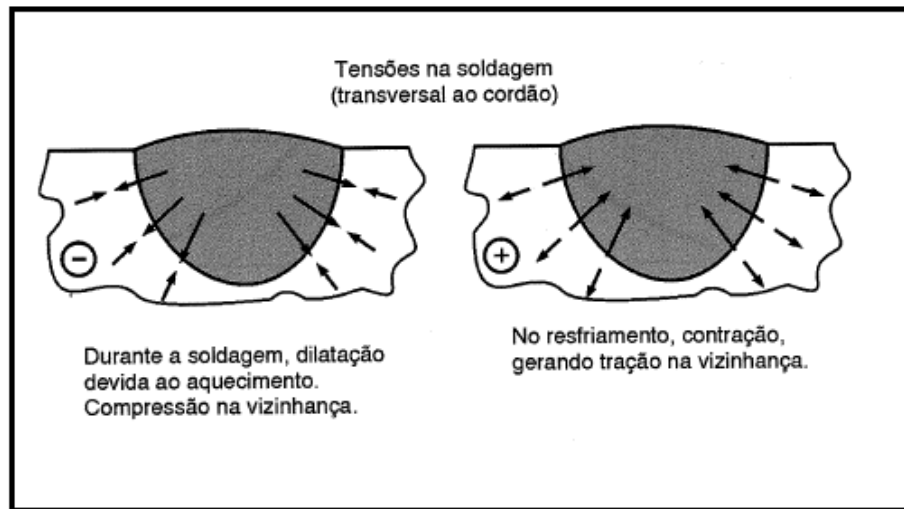
térmicas do metal de adição, e do material da peça, formam campos de tensões e deformações (BRANCO et al, 1999).

Em uma peça soldada os ciclos térmicos gerados, formam gradientes térmicos importantes na zona soldada. O campo de temperaturas gerado muda de acordo com o processo de soldagem, sendo ele não uniforme, criando assim tensões de origem térmica de grandeza elevada. As tensões formadas pelo ciclo térmico da soldagem pode não ser acomodadas sem se exceder o limite elástico do material, o que resulta tensões residuais e deformações permanentes, a não ser que os materiais no caso, não sejam suscetíveis a se dilatar sob a ação do calor, não podendo assim, ser a fonte de deformações e tensões residuais (BRANCO et al, 1999).

Quando uma peça soldada contém uma distribuição inicial de tensões residuais é carregada por tensões de tração, as tensões residuais tendem a somar com as tensões de carregamento, fazendo assim, que as regiões com tensões residuais mais elevadas atingem primeiro a tensão de escoamento, se deformando plasticamente. A deformação localizada diminui as diferenças de dimensões responsáveis pelas tensões residuais, sendo que desta forma reduz as tensões causadas quando o carregamento externo é retirado. As tensões residuais podem afetar de forma significativa, apenas fenômenos ocorridos com as tensões aplicadas baixas, ou seja, inferior ao limite de escoamento, no caso de peças que são submetidas a carregamentos, quanto maior for o carregamento menor será a tensão residual, ainda se a peça for carregada além do limite de escoamento, o efeito das tensões residuais é desprezível (MARQUES et al, 2007).

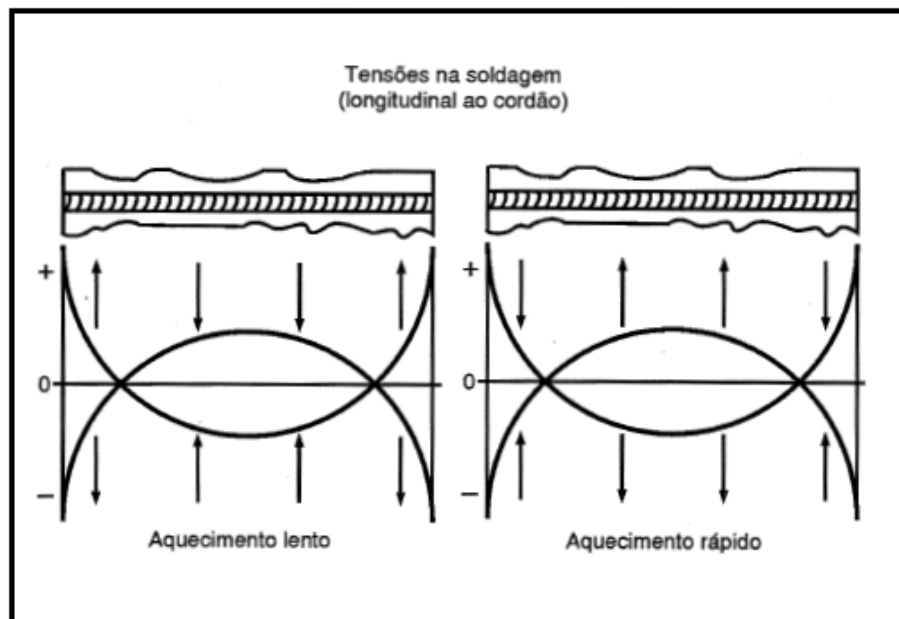
Quanto a formações de tensões no cordão de solda, Cunha (2005), cita que as tensões que a compressão e a tração dependem da peça a ser soldada e também da dimensão do cordão de solda. Um cordão de solda pequeno com grande largura significa que a compressão será mais evidente, já para um caso onde o cordão de solda for grande com a largura pequena, a tração vai ficar mais evidente, e pode ser visto na figura 15 e na figura 13.

Figura 15 - Deformações na junta soldada, transversalmente ao cordão executado.



Fonte: Cunha, 2005.

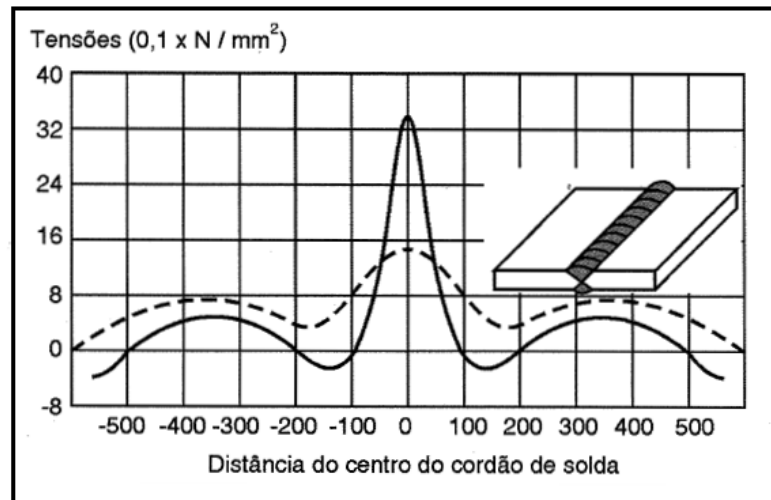
Figura 16 - Deformações na junta soldada, longitudinalmente ao cordão executado.



Fonte: Cunha, 2005.

A compressão também será menos evidente, tendo em vista que a maior dimensão, na maioria dos casos, é longitudinal, fazendo com isso, a tensão de tração ser mais grave, como situa a figura 17, em razão do comprimento do cordão de solda formado (CUNHA, 2005).

Figura 17 - Distribuição de tensões no sentido longitudinal.



Fonte: Cunha, 2005.

No quadro 3, abaixo podemos verificar as tensões admissíveis, conforme Jennigs, para soldas de topo e em ângulo.

Quadro 3 - Tensões admissíveis nas soldas (N/mm<sup>2</sup> ou MPa).

| Tipos de soldas e solicitações |              | Soldas desprotegidas |                   | Soldas blindadas |                   |
|--------------------------------|--------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                                |              | Cargas Estáticas     | Cargas Alternadas | Cargas Estáticas | Cargas Alternadas |
| Soldas                         | Solicitação  |                      |                   |                  |                   |
| De topo                        | Tração       | 91,0                 | 35,0              | 112,0            | 56,0              |
|                                | Compressão   | 105,0                | 35,0              | 126,0            | 56,0              |
|                                | Cisalhamento | 56,0                 | 21,0              | 70,0             | 35,0              |
| Em ângulo                      | Todas        | 79,0                 | 21,0              | 98,0             | 35,0              |

Fonte: Cunha 2005.

### 2.8.1 - Controle e alívio de tensões residuais:

A quantidade de tensões residuais que são formadas na junta de uma peça soldada pode ser diminuída reduzindo o calor que é gerado pelo arco elétrico, no ponto de solda, ou seja, na junta. Pode também se diminuir as tensões, reduzindo o

ângulo de chanfro e evitando depositar material em excesso e utilizando metal de adição com menor resistência permissível (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

O alívio de tensões pode ser aliviados de forma mecânica ou térmica, que pode ser compreendidas pelo quadro 4, abaixo.

Quadro 4 - Métodos para aliviar as tensões residuais.

| Procedimento |   | Descrição   | Características   | Limitações  |
|--------------|---|---|---|---|
| (a)          | Martelamento                            | Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem.  | Método simples, pode causar refino de grão.             | Inadequado para materiais de baixa ductilidade.   |
|              | Encruamento                             | A junta soldada é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração.   | Bastante eficiente para tanques esféricos e tubulações. | Inadequado para estruturas complicadas pela dificuldade de aplicar tensões uniformes.         |
|              | Vibração                                | Vibrações são aplicadas na estrutura causando uma ressonância de baixa frequência, o que ocasiona deformação plástica parcial da estrutura e alívio de tensões. | Operação simples.                                       | Inadequado para chapas grossas ou grandes estruturas. O alívio de tensões não é uniforme.     |
| (b)          | Recozimento para alívio de tensões      | Aquecimento a 600-700°C (aços ferríticos) ou 900°C (aços austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.                                  | Muito utilizado e bastante eficiente.                   | Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo elevado.       |
|              | Recozimento a alta temperatura          | Aquecimento a 900-950°C (aços ferríticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.   | Pode eliminar completamente as tensões residuais.       | Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo muito elevado. |
|              | Alívio de tensões a baixas temperaturas | Aquecimento do local da solda a 150-200°C em uma largura total de 60 a 130 mm.  | Adequado para grandes estruturas.                       | O alívio de tensões é parcial.  |

Fonte: Engenharia da soldagem e aplicação, 1978.

### 3 - METODOLOGIA

Severino (2013) descreve o trabalho científico numa visão ampla, onde engloba as perspectivas e as fundamentações, referindo assim ao processo de produção do conhecimento próprio.

A metodologia utilizada para o trabalho tem como fonte, o estudo realizado sobre as tensões residuais geradas pelo processo de soldagem, e a forma mais adequada de aplicar os tratamentos alívio de tensões para uma peça soldada.

Na visão de Prodanov e Freitas (2013), a metodologia é a construção do conhecimento a partir de um objetivo de pesquisa, utilizando para isso procedimentos e técnicas, comprovando a validade e a utilidade como resultados em diversos meios.

O estudo deste método é complexo e pode envolver muitas variáveis e uma série de pesquisas e experimentos até chegar a um resultado quantitativo relativo ao processo de soldagem e o alívio das tensões.

A pesquisa científica tem como principais objetivos conhecer e explicar os fenômenos, fornecendo as respostas para as questões significativas e ajudar assim na compreensão e no entendimento (PRODANOV, FREITAS, 2013).

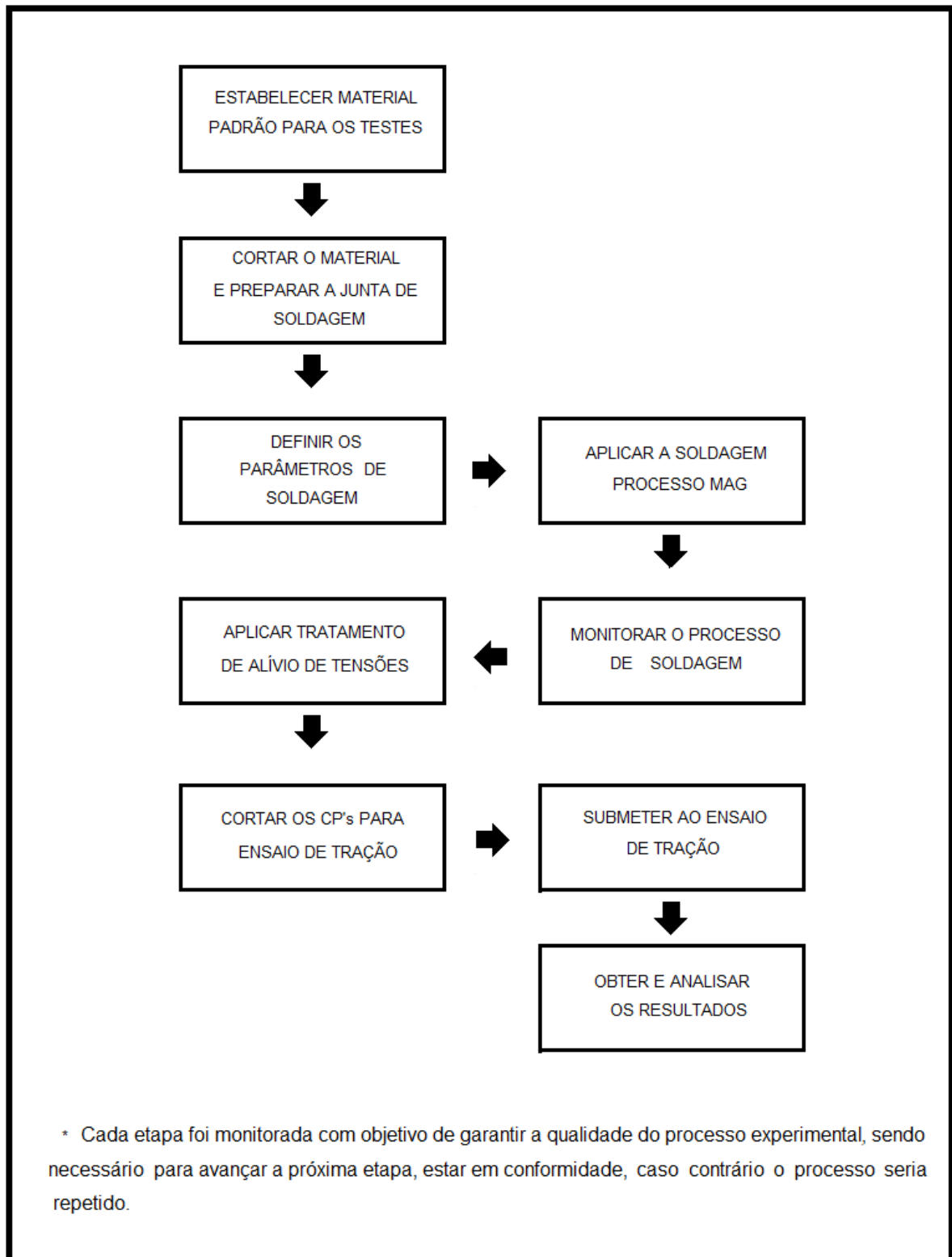
Para a confecção deste trabalho, a pesquisa realizada foi aprofundada no processo de soldagem MAG, que será utilizada nos testes experimentais e no controle de alívio de tensões, onde o objetivo é determinar o melhor tratamento para uma peça soldada e que sofre tração.

Os testes ainda consistem em utilizar o processo de soldagem sendo do tipo MAG, no qual é um dos processos mais usuais na indústria metal mecânica e cinco tipos de controle de alívio, aplicar um teste de tração e comparar os resultados encontrados.

Os estudos teóricos e preliminares realizados anteriormente sobre o tema tem como objetivo buscar informações para ser analisadas e interpretadas. A atividade é fundamental e de extrema importância para os mais variados tipos de pesquisa (ZANELLA, 2009).

Para que fosse cumprido o que foi proposto, seguindo a pesquisa bibliográfica feita e alcançar os objetivos, foram seguidas as seguintes etapas conforme a figura 18.

Figura 18 - Fluxograma das etapas do trabalho







## 4 - DESENVOLVIMENTO

### 4.1 - Material utilizado para teste:

O material adotado como corpo de prova foi o aço ASTM – A36, com espessura de 7,937 mm (5/16”), com perfil retangular de 152,4 mm (6”), que tem seu certificado mostrado na figura 19. Os corpos de prova foram todos retirados da mesma barra conservando assim o mesmo tipo, série, lote e composição química, assegurando que não houvesse alterações quanto a essas propriedades e mantendo um padrão.

Figura 19 - Certificado de qualidade do material de ensaio.

|   |  |   |                           |  |  |   |        |        |    |
|---|--|---|---------------------------|--|--|---|--------|--------|----|
|                                      |  | AÇOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-MATRIZ<br>AV. FREDERICO AUGUSTO RITTER, 2570<br>94930-000 -CACHOEIRINHARS<br>FONE: (51)3470.9000 FAX: (51)3471.1002<br>CNPJ: 92.216.209/0001-05 INSC. EST.: 177/0103446 |                           |  |  | <b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b><br><b>QUALITY CERTIFICATE</b><br><br><b>Nº : 420541 / 002</b>   |        |        |    |
|   |  | <b>CLIENTE / CUSTOMER</b> ASSOCIACAO PRO ENSINO EM SANTA CRUZ DO SUL  |                           |  |  |   |        |        |    |
| <b>Produto / Product</b><br>ACO ASTM A36 FERRO CHATO 7.940X152.400X 6.000 ( 1 BR )                                      |  | <b>I.L.</b><br>M37107   |                           | <b>Nota Fiscal / Invoice</b><br>420541 |  | <b>Data / Date</b><br>03/05/2016  |        |        |    |
| <b>OC</b><br>59.693   | <b>IC</b><br>nr Fluxo 215615           | <b>Peso / Weight (Kg)</b><br>56.560   |                           | <b>Corrida / Heat</b><br>4135181402    |  |   |        |        |    |
| <b>Composição Química / Chemical Composition</b>  |  |   |                           |  |  |   |        |        |    |
| C   | MN                                     | P   | S                         | SI                                     | AL   | NI  | CR     | MO     | N2 |
| 0.1400  | 0.6700                                 | 0.0130  | 0.0150                    | 0.2100                                 |  |   | 0.1300 |        |    |
| BI  | N                                      | V   | SN                        | PB                                     | SB   | TI  | NB     | CU     |    |
|   |  |   |                           |  |  |   |        | 0.1800 |    |
| <b>Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop</b>   |  |   |                           |  |  |   |        |        |    |
| Dureza<br>Hardness  | Limite Resistência<br>Tensile Strength | Limite escoamento<br>Yield Point  | Alongamento<br>Elongation | Estricção<br>Reduction of Area         | Tam. Grão Austenítico<br>Austenitic Grain Size | Grau Esferoidização<br>Degree of Globularizing  |        |        |    |
| HB  | MPa                                    | MPa   | %                         | %                                      | ASTM   | %   |        |        |    |
|   | 495                                    | 372   | 25,5                      |  |  |   |        |        |    |
| <b>Observações / Observation</b>  |  |   |                           |  |  | <br><b>GELSON JUNG</b><br>Controle de Qualidade<br>Quality Control |        |        |    |
| <b>CÓPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA</b><br>COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL |  |   |                           |  |  |   |        |        |    |
| CACHOEIRINHA 3 DE MAIO DE 2016  |  |   |                           |  |  |   |        |        |    |

Fonte: Favorit, 2016.

Além disso, a escolha do material foi devida ser um aço carbono muito utilizado na indústria de máquinas e equipamentos, também tendo boa aplicação como material estrutural em alguns casos, mantendo assim ótimas propriedades mecânicas e excelente soldabilidade, como pode ser notado na figura 20, retirado do catálogo online do fornecedor.

Figura 20 - Dados técnicos do material conforme o fornecedor.

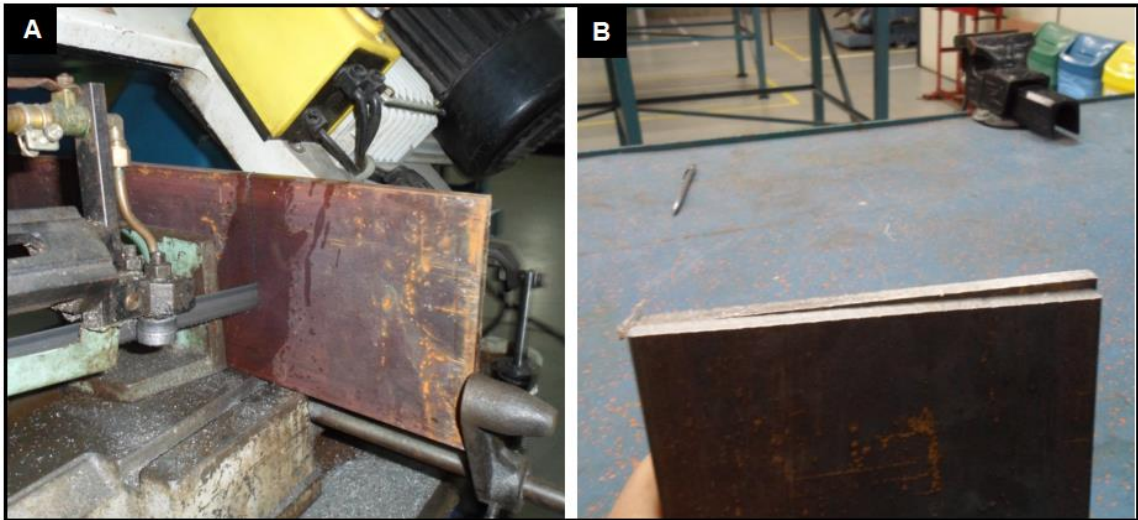
| Legenda                              |                      | ● Ótima       | ● Boa                           | ● Média         | ● Ruim     |  |           |    |    |    |        |                 |
|--------------------------------------|----------------------|---------------|---------------------------------|-----------------|------------|--|-----------|----|----|----|--------|-----------------|
| <b>AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA</b> |                      |               |                                 |                 |            |  |           |    |    |    |        |                 |
| Denominações                         |                      |               | Composições Químicas Médias (%) |                 |            |  |           |    |    |    |        |                 |
| Sae                                  | Gerdau               | Villares      | C                               | Si              | Mn         | P  | S         | Cr | Ni | Mo | Outros | Características |
| ASMT A36                             | -                    | -             | 0,28 máx.                       | 0,40 máx.       | 1,20       | 0,04 máx.  | 0,05 máx. | -  | -  | -  | -      |                 |
| Comparativo entre características    |                      |               |                                 |                 |            | Aplicações   |           |    |    |    |        |                 |
| Usinabilidade                        | Resistência Mecânica | Soldabilidade | Forjabilidade                   | Temperabilidade | Tenacidade |  |           |    |    |    |        |                 |
| ● Ruim                               | ● Ótima              | ● Ótima       | ● Média                         | ● Média         | ● Boa      | Estruturas metálicas, serralheiras, passarelas, máquinas e implementos agrícolas, implementos rodo ferroviários. |           |    |    |    |        |                 |

Fonte: Adaptado de Favorit, 2016.

#### 4.2 - Preparação do material para a soldagem:

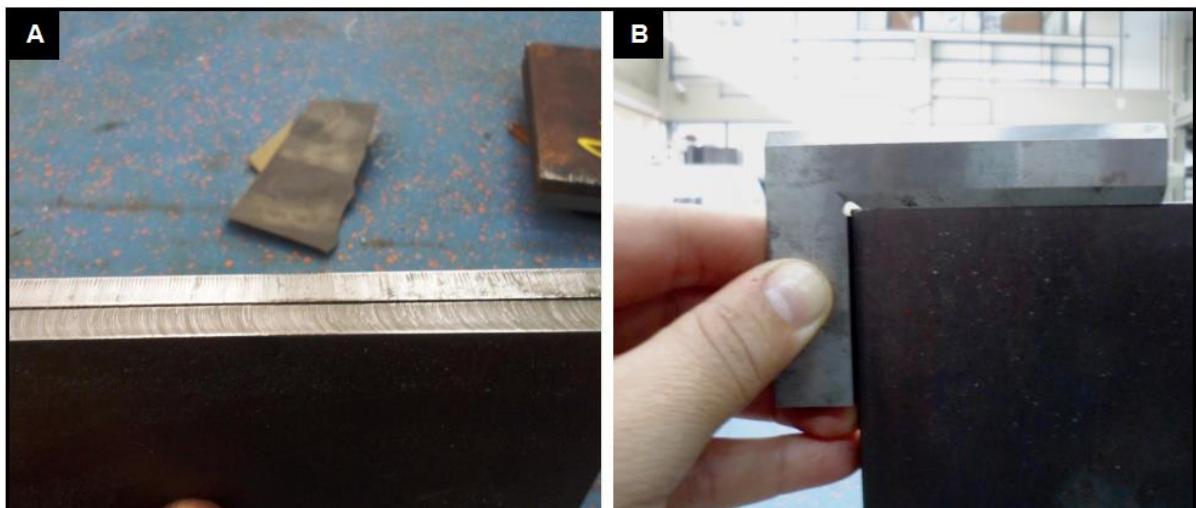
O material para a realização dos testes veio da siderúrgica em barra com 6m de comprimento, onde foi cortado em pedaços de forma retangular de 150 mm x 152,4 mm, em uma serra circular *Diplomat 3001*, modelo DPT. 180/300A com uma rotação da serra de 33 RPM, conservando a mesma espessura de 7,937 mm, conforme a figura 21, onde é possível observar no quadro (A) que o corte na serra não proporcionava um corte totalmente retilíneo, podendo ser observado a diferença entre as peças no quadro (B), sendo necessário após o corte o esquadrejamento da peça para que a mesma ficasse alinhada tanto na parte do chanfro quanto na outra extremidade.

Figura 21 - Processo de corte do material para os testes.



O esquadrejamento se tornou necessário para que a peça mantivesse o padrão retangular ao final da soldagem, além de facilitar o posicionamento do material no gabarito como pode ser observado através da figura 22, onde no quadro (A) mostra a usinagem feita da peça e no quadro (B), a verificação de esquadrejamento utilizando um esquadro de precisão. Para isso foi dado um passe na fresadora ferramenteira nas duas extremidades onde ocorreu o corte com serra, onde os parâmetros de usinagem foram calculados de acordo com o material e a ferramenta utilizada, proporcionando ao material, um menor dano em relação à concentração de tensões internas causadas por esse processo.

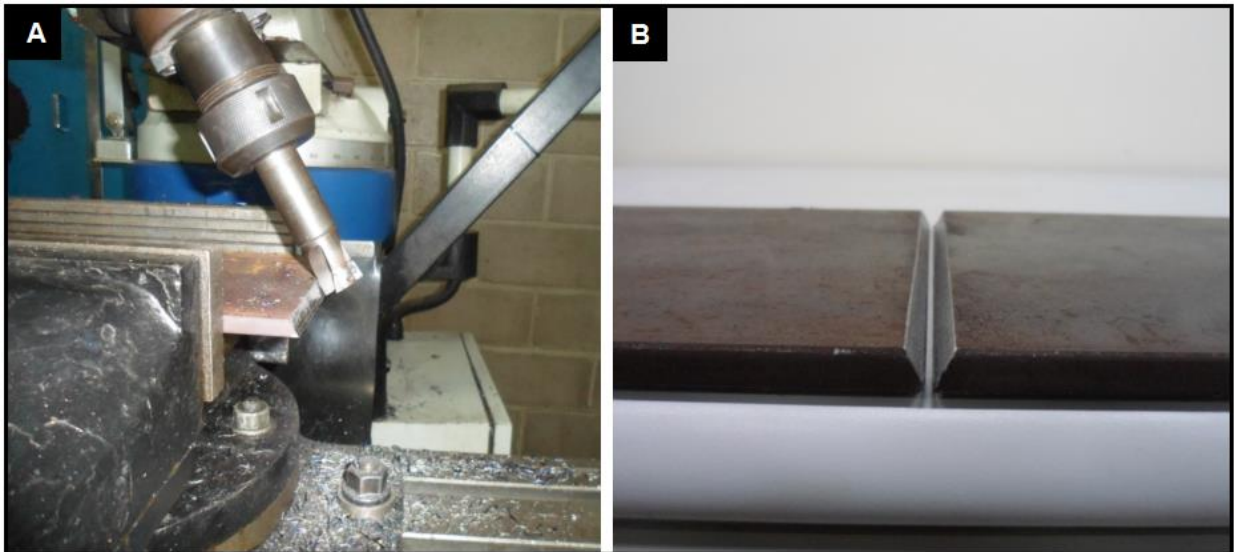
Figura 22 - Esquadrejamento do corpo de prova após o corte.



Para a fabricação do chanfro foi utilizado uma fresadora ferramenteira *Diplomat 3001*, modelo FVF.2000.VS como pode ser observado no quadro (A), da figura 23, onde a máquina teve seu cabeçote fresador inclinado à  $30^\circ$  para a usinagem do chanfro, atingindo o ângulo desejado, sendo que para a usinagem foi utilizado um cabeçote com pastilhas de metal duro e uma rotação de 800 RPM calculada de acordo com a ferramenta e o material utilizado, onde por passe foi retirado 0.4 mm a fim de restringir danos consideráveis em relação as tensões internas causadas pela usinagem.

O chanfro utilizado para processo de soldagem MAG, foi do tipo “V” como identificado no quadro (B), com ângulo de Bisel de  $30^\circ$  e um ângulo de chanfro de  $60^\circ$ , nariz e fresta de 2 mm por se tratar o mais adequado para o tipo de processo e principalmente por ser uma soldagem de topo.

Figura 23 - Preparação da junta de soldagem do corpo de prova.



### 4.3 - Definição dos parâmetros de soldagem:

Com o material cortado e preparado para o processo de soldagem, basta então definir alguns parâmetros de soldagem antes da aplicação do cordão de solda. A máquina é uma fonte geradora para a soldagem MIG/MAG, modelo *ESAB – Smashweld 257*, com especificações técnicas conforme o quadro 5, e que tem grande aplicação industrial, pois permite uma regulagem de até dez posições através de uma chave seletora, onde permite a regulagem dos parâmetros para vários tipos de aplicação.

Quadro 5 - Dados técnicos do equipamento ESAB - Smashweld 257.

|                                     | Smashweld 257             |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Tensão da rede                      | 220, 380, 440V,3~50/60Hz  |
| Corrente primária $I_{m\acute{a}x}$ | 24 – 16 - 12 A            |
| Corrente primária $I_{eff}$         | 15 - 10 - 7,5A            |
| Faixa de corrente/tensão            | 30A/15,5 V - 250 A/ 26,5V |
| Carga máxima permitida              |                           |
| 20 % do fator de trabalho           | -                         |
| 35 % do fator de trabalho           | 250A / 26,5 V             |
| 60% do fator de trabalho            | 200A/24V                  |
| 100% do fator de trabalho           | 150A/21,5V                |
| Fator de potência corrente máxima   | 0,96                      |
| Eficiência corrente máxima          | 67%                       |
| Tensão em circuito aberto           | 17,5 - 36,5 V             |
| Temperatura de Funcionamento        | - 10 °C a + 40 °C         |
| Dimensões, C x L x A                | 840 x 275 x 765           |
| Peso                                | 72 kg                     |
| Classe de proteção                  | IP 23                     |
| Classe de aplicação                 | S                         |
| Normatização                        | IEC 60974-1               |

Fonte: Manual ESAB, 2013.

A soldagem aplicada foi de polaridade inversa, onde o arame – eletrodo era de polo positivo e a peça negativa, e a forma de soldagem contínua em passe único de cordão. O arame eletrodo foi o AWS ER 70 S - 6, de 0,8 mm que pode ser visto na figura 24, com especificações que podem ser conferidas no anexo A.

O gás de proteção utilizado foi uma mistura de CO<sub>2</sub> e argônio em uma proporção média de aproximadamente 85% - 15 %, mostrado no certificado de conformidade no anexo B, pelo fato de misturar um gás ativo a um gás inerte, onde a proporção da mistura é considerada ideal para a soldagem de aços carbono, conforme o fabricante de arames eletrodo usados nos testes.

Figura 24 - Arame - eletrodo utilizado na soldagem.



Fonte: Disponível em <<http://www.soldasbrasil.com.br/arame-solido-ok-autrod-12-51-er-70S-6.php>>. Acesso em: 22 abril de 2016.

Além da definição do arame eletrodo e do gás de proteção que serão utilizados no processo de soldagem, alguns parâmetros fundamentais do equipamento foram regulados de acordo com o material, o arame eletrodo, o gás de proteção, o chanfro e o tipo de solda.

Esses parâmetros ajustados foram o de avanço do arame – eletrodo que também ajusta a corrente de soldagem em relação à tensão, e é feito através de um botão com faixas de velocidades definidas e o ajuste de tensão que no caso da máquina, possui uma regulagem de até dez posições para tensões, onde a graduação segundo o fabricante do equipamento corresponde a uma referência para os valores de tensão em vazio. Essa regulagem de velocidade e tensão foi feita pelo operador em um pedaço do material, onde se obteve a velocidade do arame desejada para a sua habilidade e conseqüentemente ajustando a corrente, e pode ser observada através da figura 25, abaixo onde podemos notar a regulagem da tensão, velocidade do arame – eletrodo, além dos dados mostrados no display do equipamento.

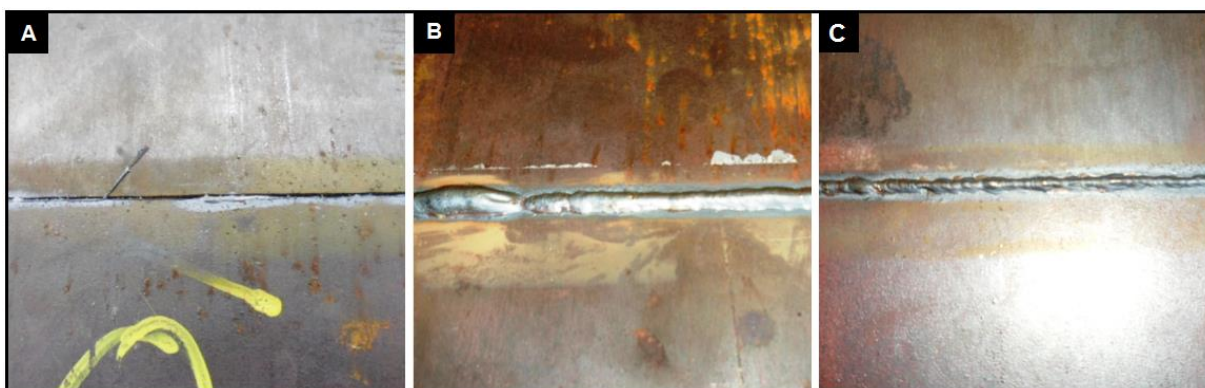
Figura 25 - Equipamento de soldagem



Para que os testes fossem válidos, os corpos de prova deveriam apresentar características semelhantes referentes ao cordão de solda, ou seja, deveriam preencher o chanfro no total, desde a raiz até a parte superior. A regulagem da máquina tem influencia quanto à penetração de soldagem, por isso testes de

regulagem foram feitos em corpos de prova testes, até que a regulagem atendesse ao cordão desejado. Na figura 26 é possível observar no quadro (A) uma penetração insuficiente na solda, no quadro (B) uma penetração excessiva e no quadro (C) a penetração desejada para uma solda de boa qualidade, onde foi preenchida a raiz por completa de forma homogênea.

Figura 26 - Penetração de soldagem



#### 4.4 - Processo soldagem:

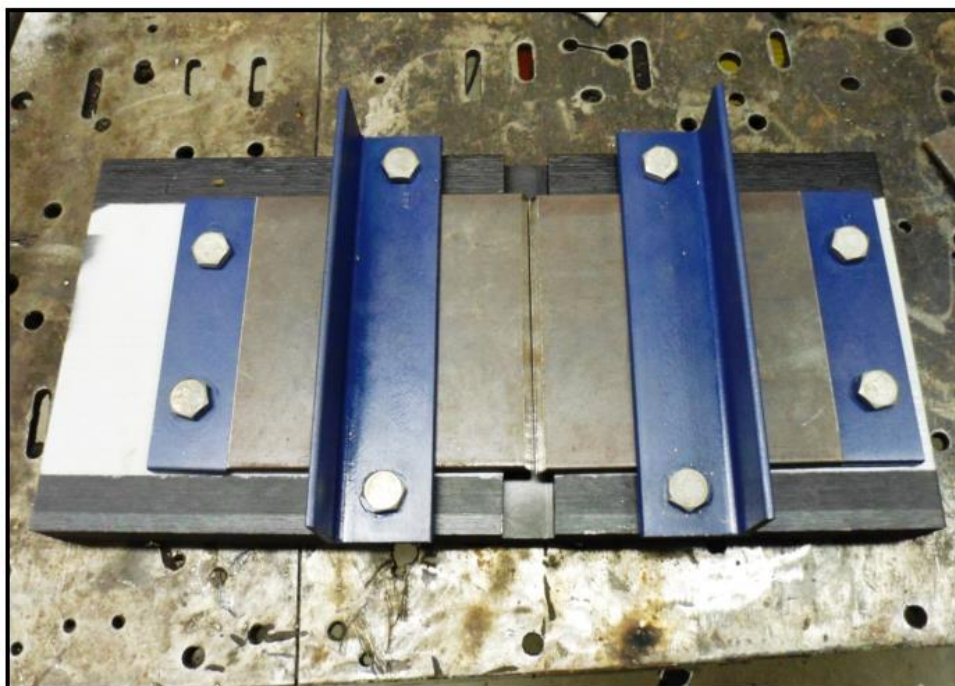
O processo de soldagem utilizado para a pesquisa foi o tipo MAG (*Metal Active Gas*), conforme a metodologia que foi adotada, onde foram utilizados os parâmetros de soldagem destacados anteriormente no que se refere a arame eletrodo, gás de proteção e regulagem de equipamento no que se refere à tensão, corrente e velocidade do arame.

O corpo de prova foi travado em um gabarito de soldagem fabricado para este tipo de ensaio, para que atingisse a máxima concentração de tensões na peça como pode ser visto na figura 26, no qual mantinha o corpo de prova no esquadro desejado, com a fresta de soldagem do tamanho ideal e impossibilitando a formação de empenamentos gerados no processo.

Os parafusos utilizados para a fixação são M12 x 1.75 e foram apertados com um torquímetro com uma força de 88 KN que é recomendado para um parafuso de resistência 8.8, obtendo assim um aperto correto para a trava.



Figura 27 - Gabarito de soldagem com a peça posicionada.



Para aplicar a soldagem manual mostrada no quadro (A) da figura 27, e evitar o mínimo de alterações quanto à deposição de material, foi empregado nos testes o mesmo operador que contempla certa experiência no ramo de soldagem, obtendo assim uma soldagem uniforme na peça.

A deposição de material foi feita em dois passes sendo um de raiz e um de preenchimento devido à espessura da chapa e a regulagem de deposição foi feita quanto ao tempo de soldagem total da peça, e para isso foi utilizado um cronometro mostrado no quadro (B), obtendo assim a soldagem de todos os corpos de prova com o tempo muito próximo, validando assim o ensaio quanto ao calor gerado e taxa de deposição.

Figura 28 - Processo de soldagem.



Os tempos cronometrados na soldagem dos corpos de prova podem ser observados no quadro 6 abaixo, onde mostra uma proximidade muito grande entre eles, sendo que uma diferença de até três segundos para mais ou para menos foi desconsiderada por ser um tempo de posicionamento do operador para fazer o cordão de preenchimento.

Quadro 6 - Tempo de soldagem dos corpos de prova.

| ENSAIOS | TEMPO DE SOLDAGEM (Min) |
|---------|-------------------------|
| CP – 01 | 01:56.27                |
| CP – 02 | 01:57.42                |
| CP – 03 | 01:56.34                |
| CP – 04 | 01:58.16                |
| CP – 05 | 01:58.50                |
| CP – 06 | 01:57.23                |

#### 4.5 - Monitorar o processo de soldagem:

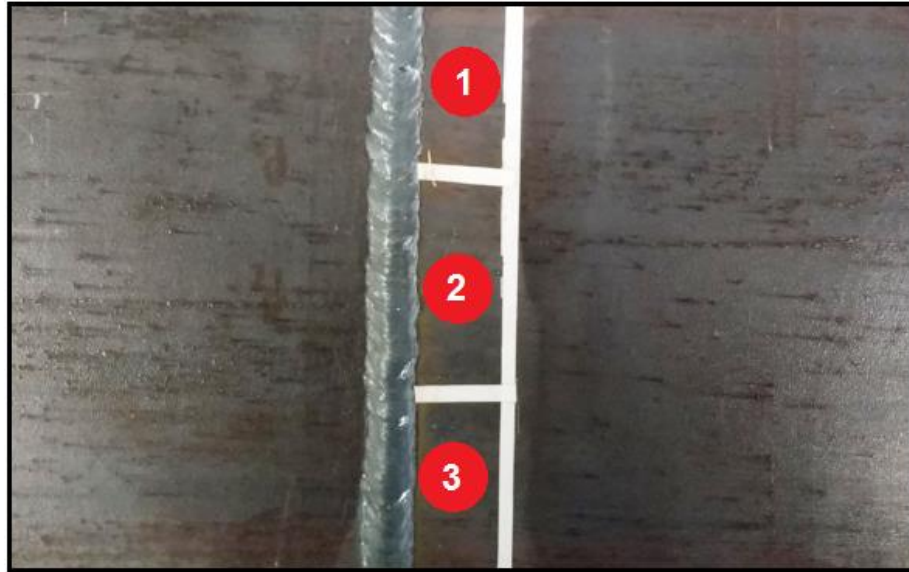
Nesta parte do trabalho de pesquisa, foi feito o monitoramento dos processos de soldagem em relação à temperatura, descontinuidades no material e no cordão de solda. O gabarito de soldagem foi medido inicialmente como pode ser observado na figura 29, obtendo um tamanho de 302,5mm entre as extremidades para que ao medir o comprimento da peça, fosse verificada a existência ou não da variação de medida.

Figura 29 - Medição do gabarito de soldagem.



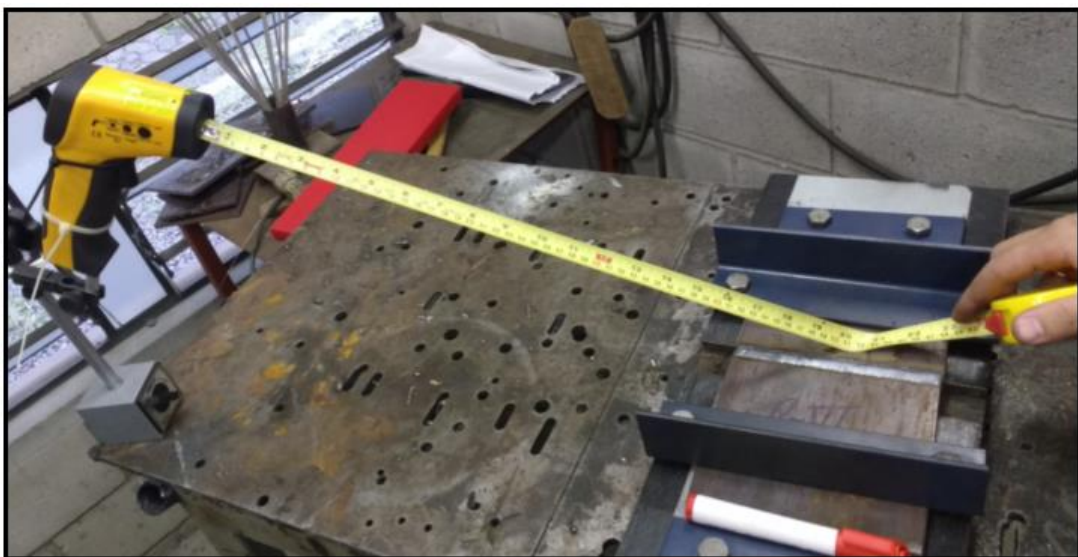
Além disso, o material soldado foi monitorado quanto à temperatura em três pontos distintos mostrado na figura 30, afim de, verificar a variação térmica do material em relação aos outros pontos, onde no ponto 1, é o início do processo de soldagem na raiz do chanfro e também o fim do processo no passe de preenchimento. Já no ponto 2 é localizado o meio da peça, onde concentra além da temperatura provocada pela fusão, a dissipação de calor dos pontos 1 e 3, finalizando assim este monitoramento com o ponto 3, que recebe o fim do processo de soldagem de raiz e o início do processo de preenchimento do restante do chanfro.

Figura 30 - Pontos de verificação de temperatura na peça.



Com o objetivo de manter um padrão para a retirada dos dados, foi instalado um pirômetro digital a laser *Homis*, modelo 455 A, posicionado com o sensor a 500 mm da peça, que foi fixado à mesa de soldagem para facilitar a leitura, visto na figura 31.

Figura 31 - Posicionamento do pirômetro em relação à peça.



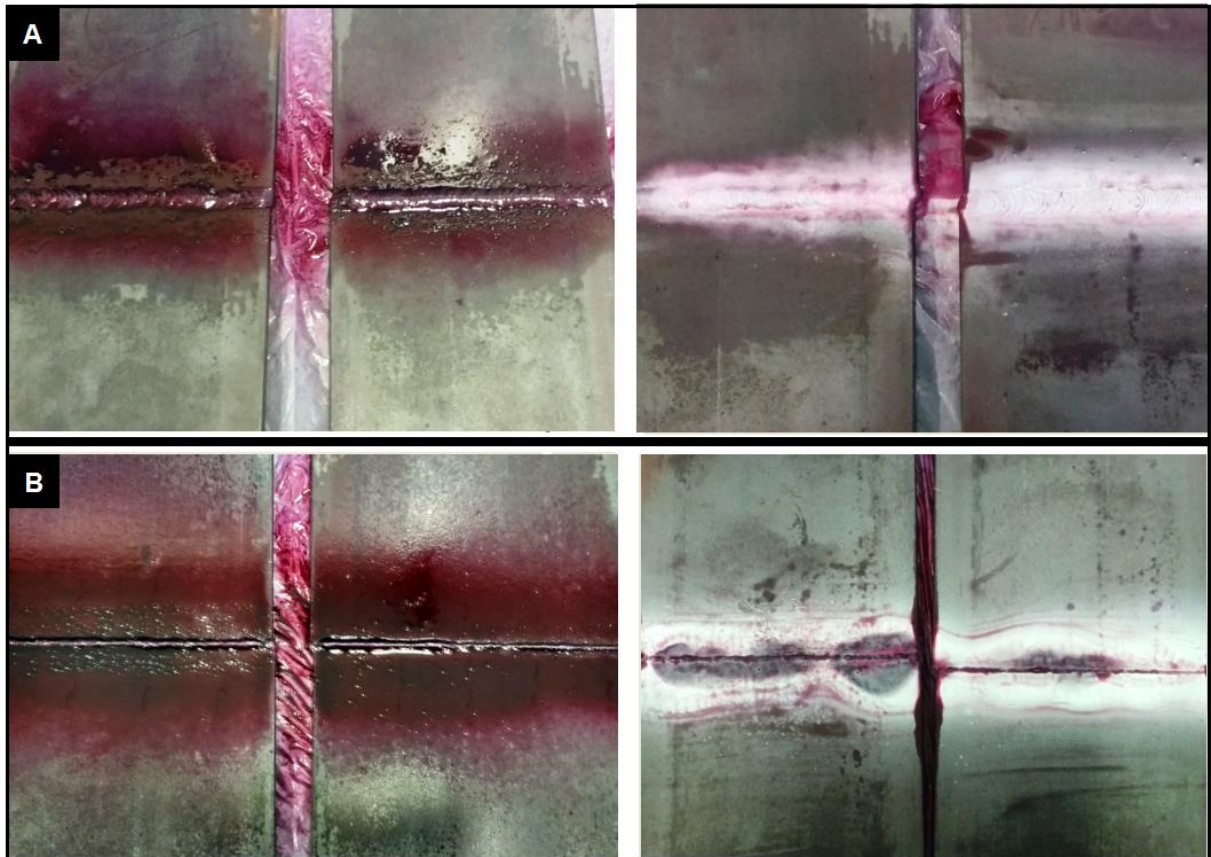
Também uma inspeção visual para verificar se existia uma descontinuidade na peça, como empenamentos, alta taxa de deposição de material, falta de preenchimento, entre outras e também uma verificação de medidas para obter resultados quanto às mudanças geométricas do material, que podem ser vista na figura 32.

Figura 32 - Inspeção visual da solda e de medias.



Por último e não menos importante o ensaio de líquidos penetrantes visto na figura 33, para validar o cordão de solda tanto na parte superior mostrada no quadro (A), quanto na raiz da solda vista no quadro (B), e com isso verificar quanto à existência de trincas ou falta de penetração. Como em todos os corpos de prova a solda se apresentou uniformemente, sem trincas ou qualquer outro tipo de problema, o cordão foi validado, podendo assim avançar para a próxima etapa do trabalho.

Figura 33 - Ensaio de líquidos penetrantes no cordão de solda e na raiz.



Com os dados obtidos no processo de soldagem, chegamos aos seguintes dados expressados no quadro 7, onde mostra a temperatura inicial do CP, a temperatura nos pontos 1, 2 e 3, a medida inicial e final. As peças foram retiradas do gabarito quando atingiram uma temperatura de 50 °C para menos, e foram soldadas com a temperatura do gabarito de 40°C para baixo, com o objetivo de não aumentar a taxa de resfriamento do corpo de prova, o que provocaria um leve alívio de tensões, não sendo aplicados para o CP – 5 e CP – 6.

Quadro 7 - Dados retirados da inspeção do processo de soldagem

|        | Temp. Inicial<br>(°C) | Temp. ponto 1<br>(°C) | Temp. ponto 2<br>(°C) | Temp. ponto 3<br>(°C) | Medida Inicial<br>(mm) | Medida Final<br>(mm) |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| CP - 1 | 21,6                  | 401,5                 | 355,3                 | 315,6                 | 302,3                  | 301,9                |
| CP - 2 | 21,2                  | 404,1                 | 356,3                 | 317,4                 | 302,2                  | 301,9                |
| CP - 3 | 20,4                  | 410,2                 | 361,7                 | 321,5                 | 302,2                  | 301,8                |
| CP - 4 | 20,2                  | 408,7                 | 357,8                 | 322,1                 | 302,2                  | 301,7                |
| CP - 5 | 234,7                 | 465,6                 | 411,4                 | 396,8                 | 302,5                  | 302,1                |
| CP - 6 | 20,1                  | 458,2                 | 435,1                 | 378,0                 | 302,3                  | 301,8                |

#### 4.6 - Aplicar o Alívio das Tensões:

Nesta parte do trabalho, diferentes tipos de alívio de tensões foram realizados para que no final pudessem ser comparados e obter os resultados, para então indicar qual o melhor tratamento de alívio.

Os corpos de prova foram classificados de acordo com o quadro 8 abaixo, onde mostra o tratamento aplicado.

Quadro 8 - Relação dos tratamentos aplicados nos corpos de prova.

| ESPECIFICAÇÃO DO CORPO DE PROVA |   |
|---------------------------------|---|
| CP - 0                          | Corpo de prova, sem cordão de solda aplicado.   |
| CP - 1                          | Corpo de prova soldado, mas sem tratamento de alívio aplicado.  |
| CP - 2                          | Corpo de prova soldado, com o tratamento de jato de granalha.   |
| CP - 3                          | Corpo de prova soldado, com o tratamento de martelamento.   |
| CP - 4                          | Corpo de prova soldado, com o tratamento térmico a alta temperatura aplicado.   |
| CP - 5                          | Corpo de prova soldado, com o tratamento térmico aplicado a baixa temperatura.  |
| CP - 6                          | Corpo de prova soldado, com o tratamento térmico aplicado a baixa temperatura, inverso ao processo normalmente utilizado. |

#### 4.6.1 - Martelamento:

O processo de martelamento é muito utilizado para o alívio de tensões em peças de grandes dimensões como casco de navios, oleodutos, torres de alta tensão entre outros. As tensões formadas na soldagem de grandes equipamentos, se não aliviadas, permite que a peça sofra danos que muitas vezes são irreparáveis.

Pela facilidade de poder aplicar este tratamento de alívio em campo, o martelamento é visto como a forma mais prática e barata no processo. As tensões aliviadas por este método dependem muito do operador, já que o processo é totalmente manual, para isso é necessário que o operador mantenha um martelo pneumático ou elétrico com uma ponteira adequada para aplicação.

Para fazer o alívio das tensões no corpo de prova soldado, foi utilizado um martelete rompedor elétrico *Makita*, modelo HK 0500, mostrado na figura 34, com uma ponteira de diâmetro de 16 mm, onde o tempo de martelamento foi de 30 segundos, e aplicado uniformemente em toda a parte superior da peça e próximo ao cordão de solda, e 30 segundos na parte inferior da peça próximo a raiz, para obter ao máximo o alívio na área do cordão de solda onde concentrou maiores tensões.

Figura 34 - Martelo rompedor elétrico e ponteira utilizada no processo.





Foram aplicados então no tempo de 60 segundos, um total de 2300 impactos em todo o corpo de prova, com uma força de 1,9 N.m, conforme os dados retirados do manual do fabricante contido no anexo C, aplicando assim um alívio de tensões resultantes do processo de soldagem no corpo de prova por meio de um martelamento controlado.

#### **4.6.2 - Jato de Granalha:**

O jato de granalha assim como o martelamento é um processo muito comum e barato em relação aos processos térmicos. É constantemente utilizado em estaleiros, onde as embarcações que sofrem reparos no casco através da soldagem, montadoras de implementos agrícolas e veículos pesados. A granalha utilizada pode variar quanto a sua granulometria e para este estudo utilizamos conforme a norma SAE J444, uma granalha de 0,7 mm e especificações conforme o anexo D, retirados do catálogo do fabricante.

Foi aplicado um jato de granalha uniformemente em toda a peça, o tempo estimado foi de dois minutos, nos dois lados da peça junto ao cordão de solda. A cabine de jateamento que foi utilizada para a realização deste ensaio foi fabricada de acordo com as necessidades de trabalho, onde é possível fazer o jateamento para alívio de tensões quanto uma simples limpeza peças pequenas quanto as grande como pode ser vista na figura 35, sendo um equipamento que atende a norma NR – 10, NR – 12 e NR – 15, quanto à segurança do operador e a controle de jateamento.

Figura 35 - Cabine de jateamento.



A peça ficou com aspecto rugoso e totalmente limpo, mostradas na figura 36, pois o processo de jateamento tem como principal função a retirada de todas as incrustações contidas no material e preparação para receber algum tratamento posterior, além de ser um processo de alívio de tensões. O diâmetro do bocal da pistola de jateamento é de 50mm, e a pressão do compressor para a impulsionar a granalha contra a peça é de 8 Kgf/m<sup>3</sup>.

Figura 36 - Peça jateada por granalha de 0,7mm.



#### 4.6.3 - Alívio das tensões a baixas temperaturas:

O tratamento de alívio a baixas temperaturas consiste em reduzir a taxa de resfriamento do material soldado, aplicando nele um pré – aquecimento, a uma faixa de 200°C a 300°C antes de executar a solda.

Este tipo tratamento a baixas temperaturas, não elimina por completo as tensões residuais formadas no material, mas como ponto positivo destacável é a fácil aplicação e o baixo custo do processo, em relação ao recozimento para alívio, sendo que ainda pode ser praticado em campo, pois não exige um controle absoluto de temperatura, mesmo que tenha influencia direta na formação e no alívio de tensões.

Este processo pode ser aplicado em peças de pequenas e grandes dimensões, mas, no entanto é pouco utilizado, por existir processos mecânicos com maior facilidade de controle e menores riscos de aplicação. A sua aplicação no campo de trabalho pode ser feita através de uma fonte de calor portátil, como um maçarico, ou até mesmo um soprador térmico gerando calor concentrado na região de solda.

Neste ensaio o material foi submetido a uma temperatura de 250°C, mostrada na figura 37, e para isto foi um forno de indução *JUNG*, com temperatura controlada, deixando pelo período de 1 hora, para a homogeneização do material.

Também foi feito o mesmo processo de alívio de tensões, utilizando o processo inverso, sendo a peça soldada em temperatura ambiente e após a soldagem ser aquecida a temperatura de 236°C, para comparar se existe a mudança em relação ao processo anterior.

Figura 37 - Forno com temperatura a 250°C para alívio a baixa temperatura.



Assim que o material foi aquecido por completo, foi retirado do forno e colocado e preso em seguida ao gabarito de soldagem, com uma temperatura de 234,7°C iniciou-se a aplicação do cordão de solda na peça, onde após o término da solda foi deixado em repouso no gabarito até que atingisse uma temperatura de 45°C para que fosse então retirado e completasse o resfriamento até a temperatura ambiente.

#### **4.6.4 - Recozimento para alívio das tensões:**

Este tipo de tratamento é o mais correto para se aplicar tanto em materiais soldados como outros tipos de processo que tem por consequência a geração de tensões, pois este processo elimina as tensões residuais formadas no processo quase que completamente.

Para a execução deste tipo de alívio no corpo de prova, também foi utilizado um forno por indução *JUNG*, completamente vedado, e que mantivesse a temperatura controlada como mostra a figura 38, onde o processo foi feito a

temperatura 650 °C, com resfriamento lento, ou seja, dentro do forno com o objetivo de aliviara as tensões. O material foi colocado dentro do forno à temperatura de 21,6°C e o forno ligado posteriormente até que atingisse a temperatura desejada, ficando por uma hora para a homogeneização da peça ficando num total de quatro horas para esse processo, sendo que após com o forno desligado, a peça permaneceu no interior até que atingisse a temperatura ambiente, ficando num total de vinte horas durante todo o processo.

Figura 38 - Forno com temperatura controlada a 650°C para alívio de tensões.



Esse processo pode ser o mais indicado para o alívio das tensões residuais, mas tem como grande inconveniente, o custo elevado devido à necessidade de controle e de energia térmica, tempo de aplicação, além de que este método torna muito difícil sua aplicação em grandes estruturas, e praticamente impossível ser executado no campo de trabalho.

#### 4.7 - Corte do CP para ensaio de Tração:

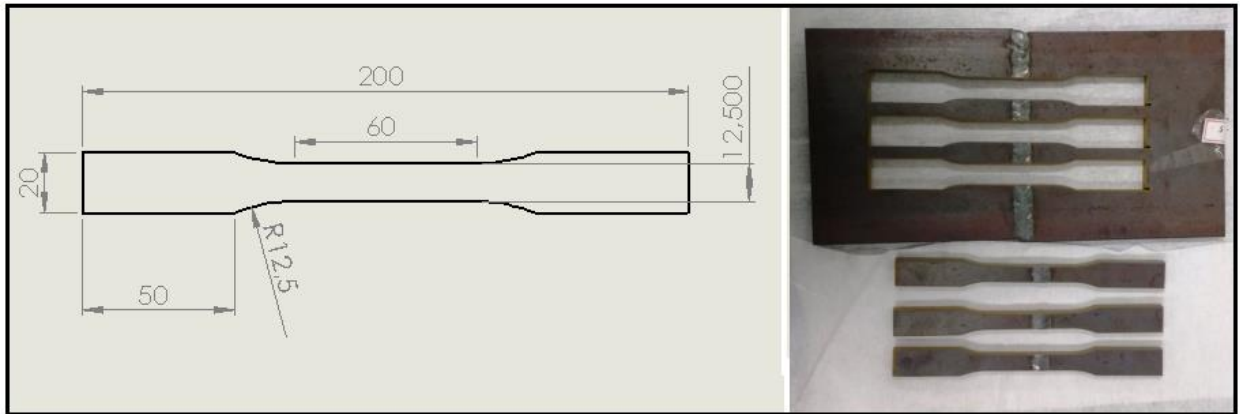
Finalizado os tratamentos de alívio de tensões, nos corpos de prova foi feito então o corte do corpo de prova para o ensaio de tração conforme a norma ABNT NBR 6152 Materiais Metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Para isso foi utilizada uma máquina CNC de corte a jato d'água, *Jettek Mono* apoiada, conforme a figura 39, para que não afetasse termicamente o material ao ponto de criar novas tensões ou aliviar as tensões existentes.

Figura 39 - Máquina de corte a jato de água.



Os corpos de prova confeccionados de acordo com a norma ABNT NBR 6152 para o ensaio, mantem as dimensões especificadas na figura 40 abaixo, onde de cada corpo de prova soldados foram retirados três para ensaio de tração, mantendo assim o cordão de solda o máximo ao centro da área útil do corpo de prova.

Figura 40 - Medidas e corpo de prova para ensaio de tração.



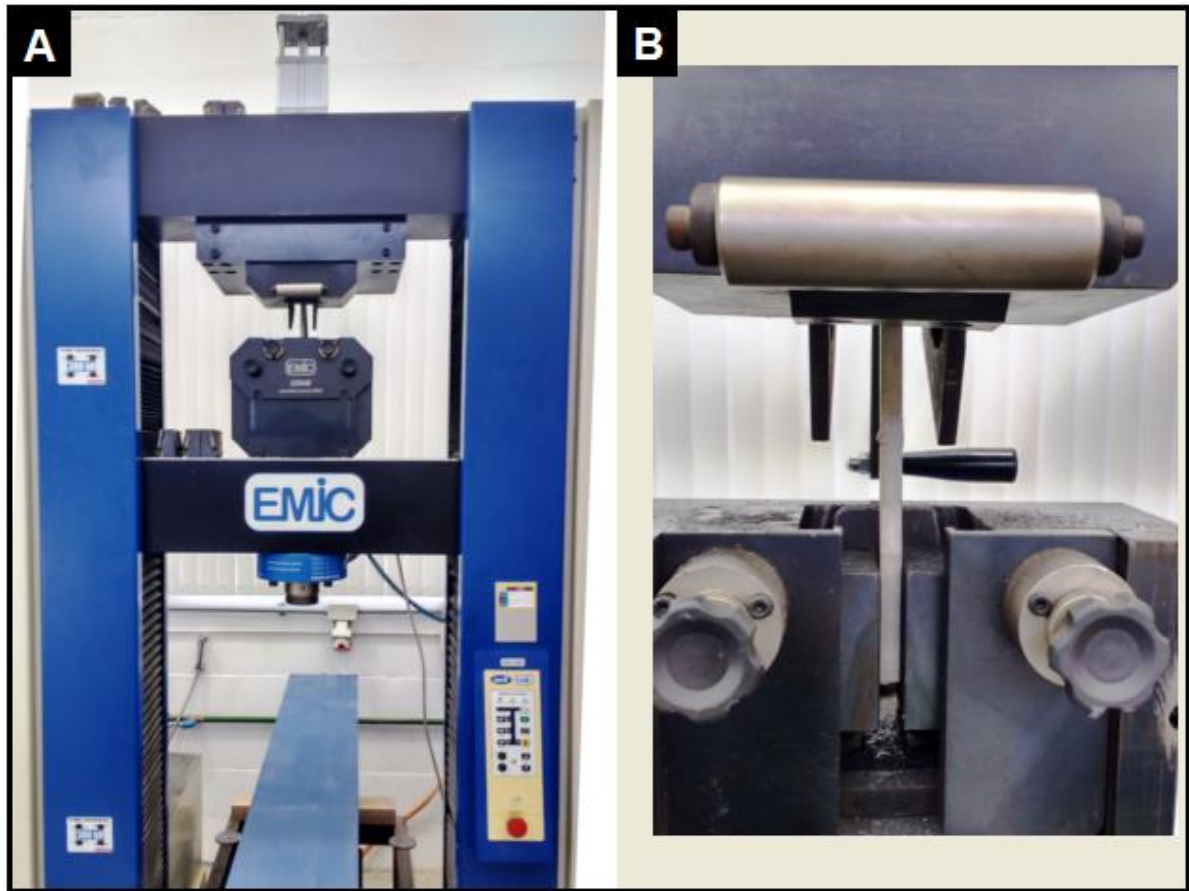
#### 4.8 - Ensaio de Tração:

Como um dos últimos passos da pesquisa, o ensaio de tração foi realizado nos corpos de prova soldados e com o tratamento de alívio. Com isso podemos verificar e quantificar quanto à fadiga por tração para os diferentes tipos de processo de alívio, e com isso quantificar o melhor tratamento para o tipo de soldagem realizada.

A soldagem, por muitas vezes, é um meio rápido para fazer o reparo de uma peça, e escolher o processo de soldagem é fundamental, principalmente onde a peça sofre tração, afim de, evitar possíveis danos ao material bem como a formações de descontinuidades e tensões residuais geradas.

O ensaio de tração foi feito na máquina *EMIC*, modelo DL – 30000, mostrada no quadro (A) da figura 41, onde foram atendidas todas as medidas necessárias, para a execução dos ensaios conforme a norma NBR 6152, sendo o corpo de prova prendido ao dispositivo da máquina visto no quadro (B), da figura.

Figura 41 - Máquina universal de ensaios EMIC e dispositivo de ensaio.



Foi medidos os comprimentos e as larguras de todos os corpos de prova antes e após o ensaio a fim de obter resultados quanto ao alongamento e encolha da área útil do corpo de prova, sendo eles marcados manualmente após o raio de alívio antes da realização do ensaio, podendo ser visto na figura 42.

Com isso, foi possível calcular o alongamento que o corpo de prova sofreu no ensaio, podendo comparar as medidas dos corpos de prova tratados e dos não tratados, verificando assim a influência do controle de alívio de tensões aplicados sendo eles mecânicos ou térmicos.



Figura 42 - Medida dos corpos de prova antes e depois do ensaio.

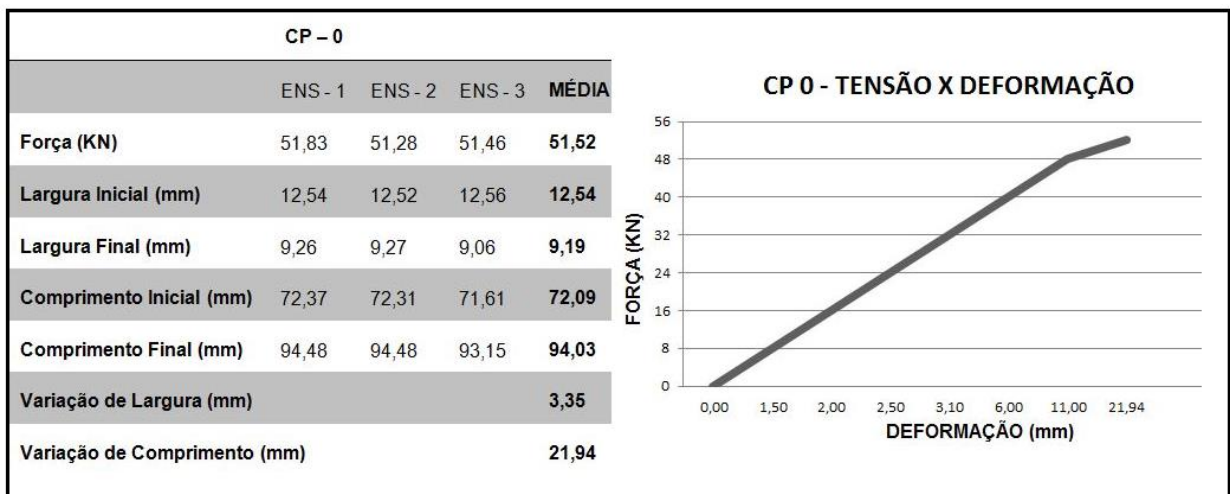


## 5 - RESULTADOS E DISCUSÕES

Como última etapa do processo de pesquisa, foi feita a análise dos resultados e quantificado o quanto cada processo de alívio influencia no material. O processo de ensaio foi feito em triplicata, onde uma média dos resultados foi feita para obter um refino dos dados.

Os resultados do CP – 0, que não teve aplicação de solda, foram comparados aos demais resultados, sendo ele estabelecido como controle. Por isso, ao aplicar os tratamentos de alívio os resultados mais próximos dos dados do material foram qualificados como o melhor tratamento de alívio. Os resultados estão expressos na figura 43.

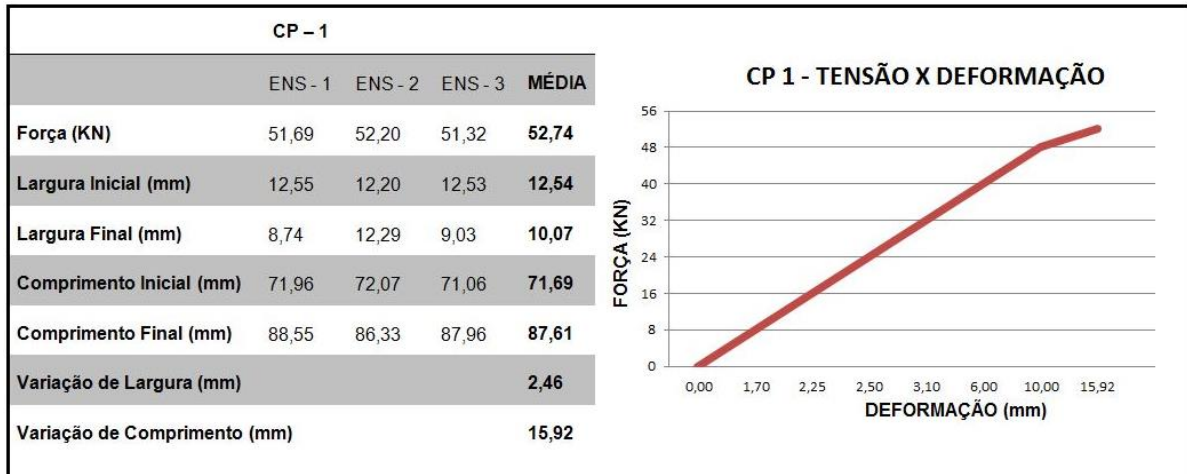
Figura 43 - Resultados do corpo de prova sem a aplicação de solda.



Como visto na figura acima, nos resultados expressados pelo CP – 0, para uma força máxima de 51,52 KN, o mesmo teve um alongamento de 21,94 mm em relação à medida inicial, sendo que a largura teve uma variação de 3,36mm.

Para o CP – 1, que foi soldado normalmente utilizando os parâmetros de soldagem dos demais corpos de prova, e que não foi tratado posteriormente com o tratamento de alívio de tensões, foi condicionado como o pior caso possível para efeitos comparativos, sendo os resultados obtidos, expressados na figura 44.

Figura 44 - Resultados do corpo de prova soldado sem o tratamento de alívio.

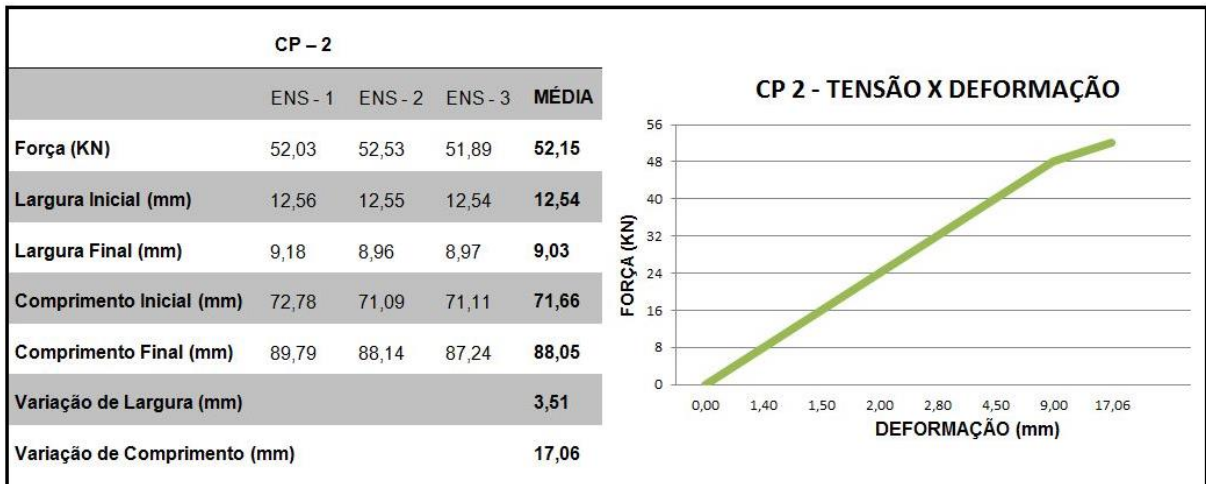


Os resultados expressados do CP – 1 mostra que o material, mudou o seu comportamento em relação ao teste de tração do CP – 0. Neste corpo de prova o material a força executada pela maquina teve pouca variação e o material rompeu, atingindo uma força máxima de 51,74 KN, já a variação de comprimento mudou em 6,02 mm e de largura 0,9 mm, diminuindo assim a ductilidade do material.

Os materiais que forma tratados com o alívio de tensões, deve fornecer melhores resultados em relação ao CP – 1, isto por que o tratamento de alívio melhora as condições do material, possibilitando assim, uma maior resistência à fadiga por tração.

Na figura 45, podem ser observados os resultados expressados pelo CP – 2, que teve o tratamento de alívio por jato de granalha, mostra que houve uma mudança em relação ao corpo não tratado, e que este método pode ser eficiente em alguns casos de aplicação.

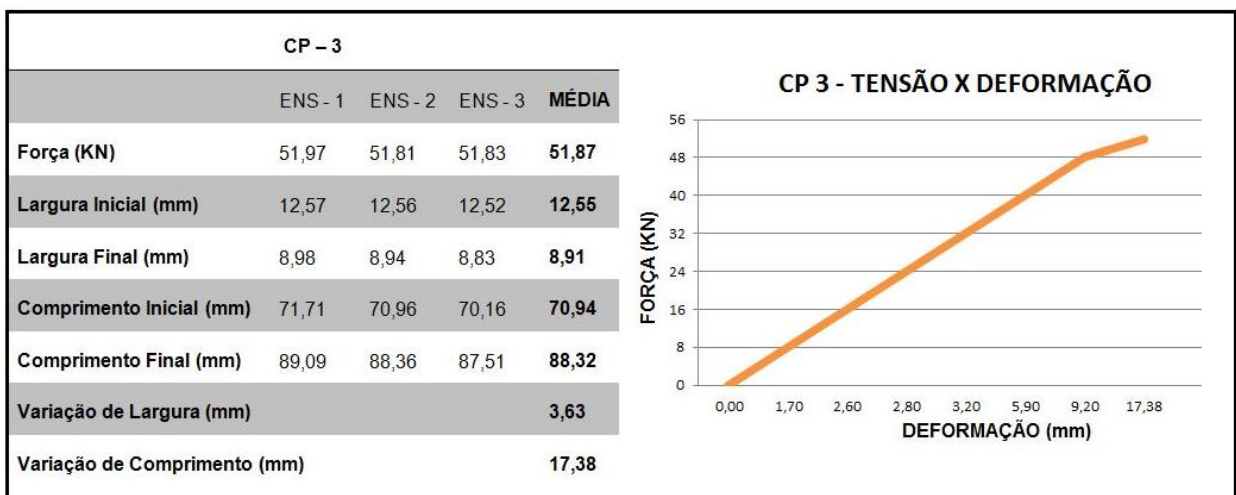
Figura 45 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado por granalha.



É notável através que o CP - 2 teve uma melhora significativa quanto a sua ductilidade, em relação ao material não tratado. A força máxima exercida no material também aumentou aproximadamente 410 N, e a variação de comprimento da medida original foi de 17,06 mm, comprovando assim que o material teve obtido o alívio de tensões.

Já os resultados do CP - 3, que teve o tratamento de alívio por martelamento, indica que o material também obteve melhorias que pode ser vista na figura 46, e que também sofreu um processo de alívio das tensões.

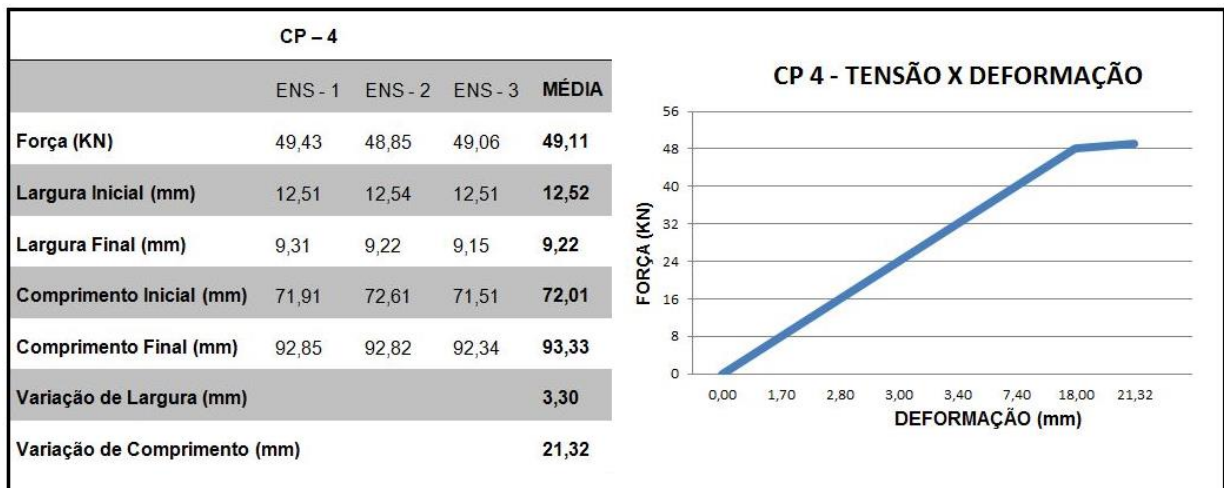
Figura 46 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado por martelamento.



O martelamento como tratamento de alívio, teve mudanças pontuais na ductilidade do material, praticamente igualando a variação de largura com o CP – 2, que foi tratado com granalha, com diferença de 0,32 mm. A diferença considerável foi na força máxima que o material sofreu, sendo de 280 N a menos que o material tratado por chuva de granalha.

Como tratamento de alívio de tensões, o CP – 4 foi tratado termicamente pelo método de alta temperatura, sendo os resultados expressados na figura 47, onde mostra que existe uma diferença considerável em relação aos métodos aplicados no CP – 2 e CP – 3, que foram tratados de forma mecânica.

Figura 47 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado termicamente a alta temperatura.



Como visto na figura, o CP – 4 a força máxima de tração aplicada no material foi de 49,11 KN, sendo a menor força aplicada para cisalhar o material, e o alongamento foi de 21,32 mm, sendo este o maior dentre todos os tratamentos aplicados.

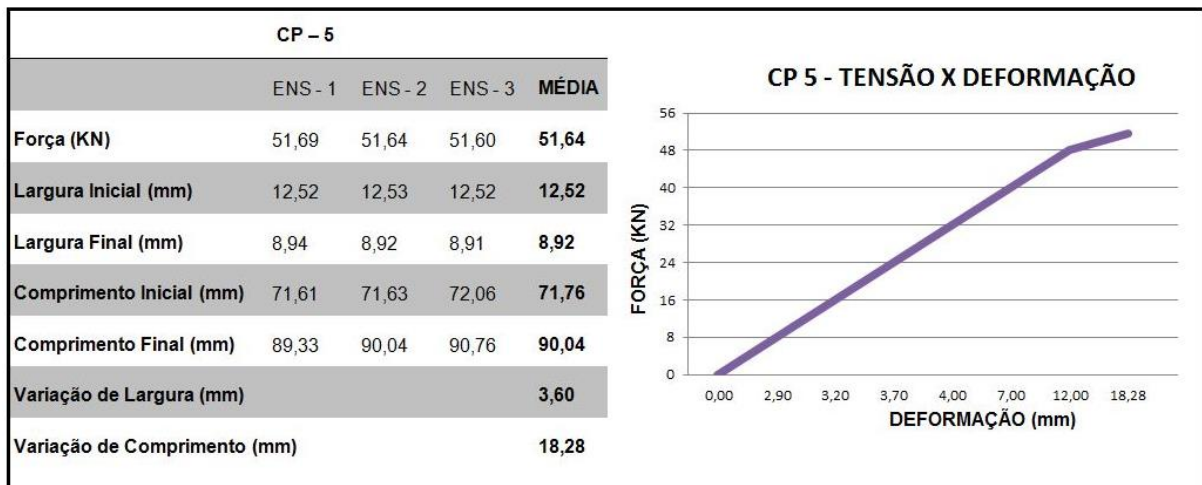
O tratamento a altas temperaturas, praticamente elimina todas as tensões do material, sendo elas provocadas pelo beneficiamento na aciaria ou pelo processo de soldagem, também é o de maior custo por utilizar energia térmica controlada e maior tempo de processo.

Também foi feito um tratamento térmico a baixa temperatura, aquecendo o material a ser soldado a 250°C, onde o objetivo deste tratamento era reduzir a taxa

de resfriamento do material, provocando através disto, uma redução nas tensões formadas pelo processo de soldagem.

Os resultados da figura 48, mostra que o material também sofreu alívio de tensões se comparado ao CP – 2, onde o material se comportou de forma parecida com os processos mecânicos.

Figura 48 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado termicamente a baixa temperatura.

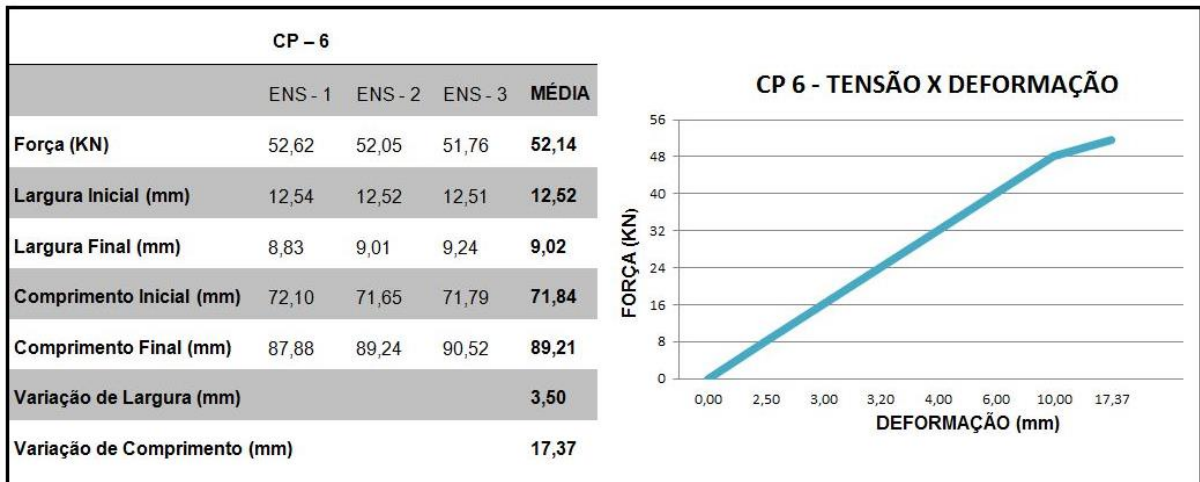


O material sofreu uma força máxima de 51,64KN, para romper sendo que o mais destacado no resultado deste corpo de prova foi o alongamento que superou os processos mecânicos, chegando a uma variação de 18,28mm e de 3,60mm na largura.

O tratamento do CP – 6, também foi feito a baixas temperaturas, porém feito de forma inversa em relação ao CP – 5, sendo que o material foi soldado com temperatura ambiente e aquecido à temperatura de 240°C, ficando na faixa de tratamento entre 200°C – 300°C, e deixado resfriar de forma lenta.

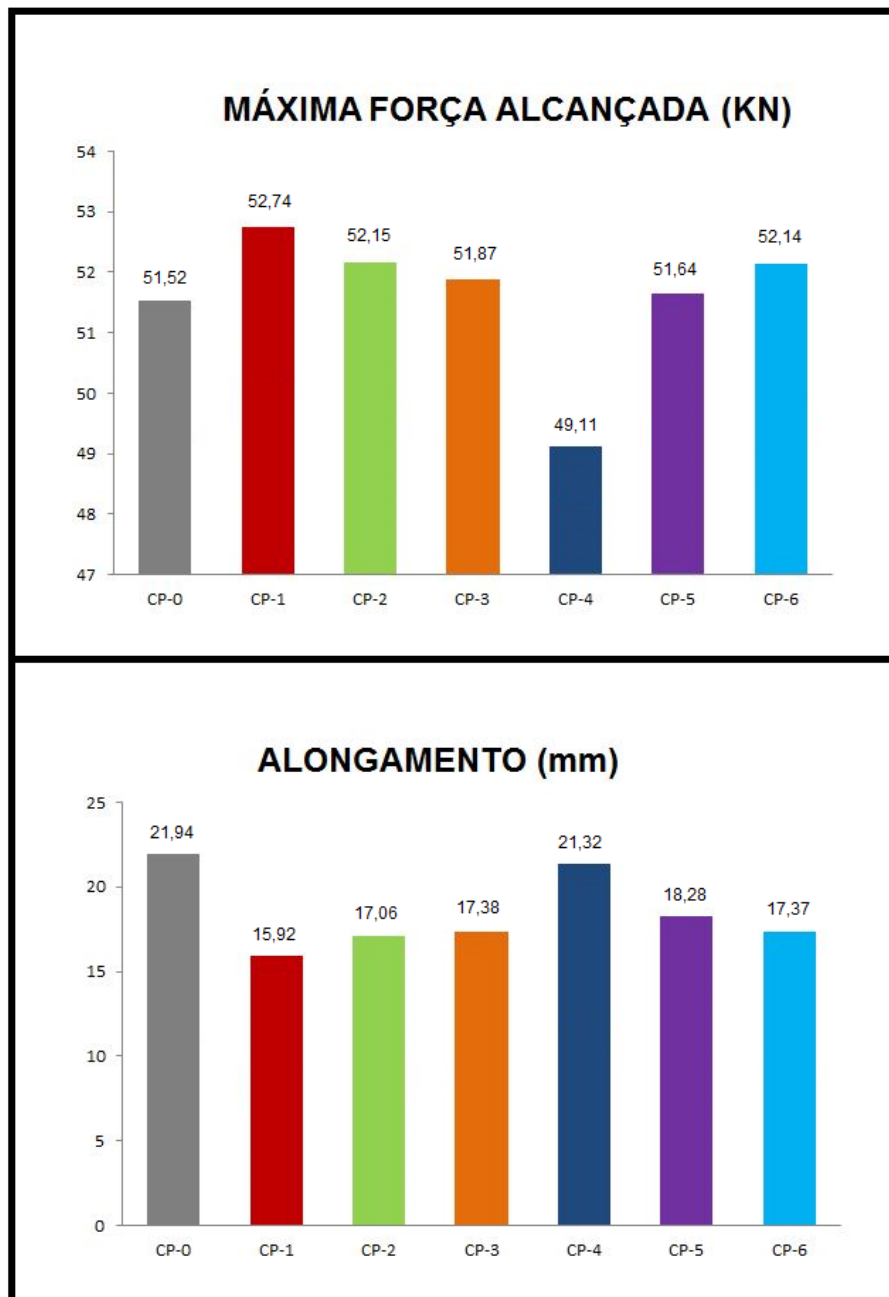
Com isso, os resultados obtidos neste tratamento podem ser visto na figura 49, onde mostra que o material sofreu uma força máxima de tração no regime plástico de 52,14KN para que ocorresse o rompimento, e o alongamento de 17,37mm, que em comparação ao CP – 5, teve uma diferença na força de 500N maior e de alongamento de 0,91mm menor.

Figura 49 - Resultados do corpo de prova soldado, tratado termicamente a baixa temperatura de forma inversa.



Ao verificar os resultados obtidos de todos os corpos de prova, notou-se que a variação de máxima força atingida para romper o material soldado e o alongamento do material antes da ruptura mudou. Em alguns casos a variação de força ficou próxima e o alongamento mudou, já para outros casos ficaram inversos e no caso do CP – 2 e CP – 3, tratados de forma diferentes sendo um com tratamento mecânico e outro com tratamento térmico, tem valores muito próximos, obtendo uma variação de força máxima de 10N sendo que a de medida foi 0,31mm, para os outros casos também houve mudanças consideráveis, podendo ser visto na figura 50, a comparação de todos os resultados de força e de alongamento.

Figura 50 - Resultados de todos os corpos de prova ensaiados.

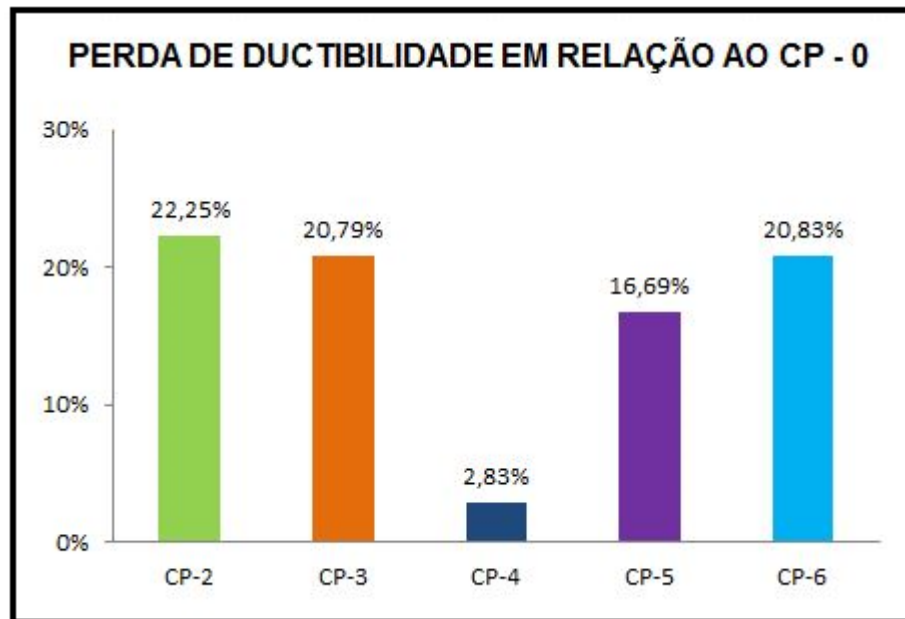


Sendo o CP – 0 considerado como melhor condição, por não ter sofrido nenhum tipo de processo e conseqüentemente de alterações no material, foi o corpo de prova que sofreu maior alongamento mas em contra partida, o segundo que pior a aguentar a carga de tração. Isso porque o material apenas acumulava as tensões provenientes do processo de beneficiamento na aciaria.

Como pode ser conferida na figura 51, a perda de ductibilidade dos materiais tratados em relação ao CP – 0.



Figura 51 - Perda de ductibilidade dos materiais tratados em relação ao material utilizado.

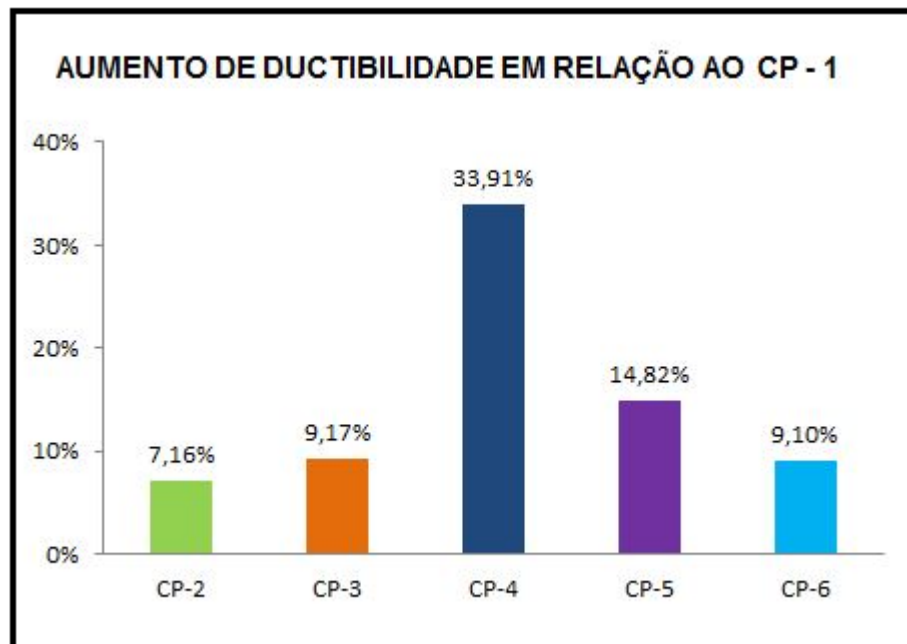


O CP – 4 teve um tratamento térmico que praticamente findou com as tensões do processo de soldagem bem como os de beneficiamento do material, por isso foi o corpo de prova que obteve o maior alongamento entre os tratados e o que aguentou a menor força de tração.

O comportamento do material tratado com o processo de alívio de tensões teve resultados esperados de melhorias quanto à ductilidade e a resistência, se comparados com o CP -1, que não teve tratamento.

Os corpos de prova CP – 2, CP – 3, CP – 4, CP – 5 e CP – 6, tiveram resultados distintos, comprovando que cada tipo de tratamento de alívio proporciona ao material uma condição, comparação dos materiais tratados em relação ao CP -1, que para efeito comparativo foi considerado o pior caso, pode ser visto na figura 52.

Figura 52 - Resultados do aumento de ductibilidade dos materiais tratados em relação ao material não tratado.



Com os resultados obtidos nessa pesquisa, é possível observar a mudança de comportamento dos materiais tratados entre si, assim como os não tratados, possibilitando buscar um tratamento após o processo de soldagem que seja conveniente a aplicação.

Resultados expressados por autores distintos que fizeram trabalhos de processos de alívio, mostra que os processos de alívio de tensões são muito eficazes e como citado por Zeemann (2003), o alívio de tensões em materiais soldados deve ser feita, sempre que possam causar falhas prematuras.

## 6 - CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos nos materiais que sofreram processo de soldagem e que tiveram o tratamento de controle de alívio, houveram como principais fatores, a alteração no alongamento e na força máxima aplicada no corpo de prova.

Visto que os materiais sofreram alterações, pôde-se concluir que os métodos de alívio de tensões foram eficazes para os diferentes tipos, podendo assim ser determinantes na escolha de um processo de alívio de uma peça. Assim, é possível, a partir dos resultados, se fazer a melhor escolha entre os processos mecânicos e térmicos estudados nesse trabalho.

Também verificou-se na pesquisa, a impossibilidade em se determinar o volume de tensões residuais formadas no processo de soldagem, e em contrapartida, também a dificuldade em quantificar o quanto das tensões foram aliviadas. Entretanto, para todos os ensaios realizados foi feito o máximo esforço para a máxima padronização das muitas variáveis do processo de soldagem, a fim de concentrar o máximo de tensões possíveis no corpo de prova, e dessa forma, atingir os objetivos propostos.

O tratamento de alívio de tensões por processo mecânico mais satisfatório, foi o processo de martelamento, que atingiu os melhores resultados quanto ao aumento da ductibilidade com equilíbrio de força de tração máxima aplicada. Para os tratamentos térmicos, o processo de controle de alívio mais eficaz foi o recozimento a altas temperaturas, o qual atingiu maior resultado quanto ao aumento da ductibilidade em relação aos demais, se aproximando ao material sem processo de soldagem.

É possível destacar os resultados mostrados nos corpos de prova que sofreram tratamento térmico a baixa temperatura, sendo que o corpo de prova aquecido antes do processo de soldagem apresentou os melhores resultados quanto ao ganho de ductibilidade e de força máxima em relação ao corpo de prova soldado e sem tratamento.

A soldagem é um processo de fabricação com muitas variáveis, e em função da possibilidade do mesmo influenciar a formação das tensões, existe espaço para que estudos, ainda mais aprofundados quanto ao controle de alívio sejam feitos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152: Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente. ABNT: Materiais Metálicos. Rio de Janeiro: 2002.

BERGAMO, Ricardo Toledo. Avaliação da Eficácia do Martelamento para o alívio de Tensões em Soldas de Aços. UFSC: Dissertação de Mestrado. Florianópolis: 2006.

BRANCO, C. M.; FERNANDES, A.A.; CASTRO, P.T. Fadiga de Estruturas Soldadas, 2ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

BRANCO, C. M. et al. Projecto de órgãos de Máquinas, 3ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

CASTELO, Xavier. et al. Simulação das Tensões Residuais de Chapas Soldadas na construção Naval: 20--.

CUNHA, Lamartine Bezerra. Elementos de Máquina, Rio de Janeiro: LTC, 2005.

DOBIGNES, Alex Augusto. Estudo do Rendimento de Deposição de Material na Soldagem MIG/MAG em Condições de Transferência Metálica por Curto - Circuito Forçado. UFPR: Dissertação de Mestrado. Curitiba: 2008.

ESTEFEN, Segen. et al. Análise de Evolução do Estado das Tensões Residuais de Soldagem 2008. Exposol: Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção. Rio de Janeiro: 2008.

ESAB. Apostila de soldagem MIG/MAG. Adaptado por Cléber Fortes e revisado por Claudio Turani Vaz. 2005.

ESAB. Catálogo de consumíveis de soldagem – arames sólidos. Apresenta dados de consumíveis de soldagem. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410121>>. Acesso em: 22 de abril de 2016.

ESAB. Suporte técnico. Manual de máquinas de soldagem – Smashweld 257. Apresenta dados de técnicos de máquinas de soldagem MIG/MAG. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/0217596\\_rev1\\_smashweld\\_257\\_pt.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/0217596_rev1_smashweld_257_pt.pdf)>. Acesso em: 28 de abril de 2016.

FERREIRA, Miguel L Ribeiro. Martelamento Como Método de Alívio de Tensões em Juntas Soldadas. UFRJ: Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: 1984.

GOHR, Raul Júnior. Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG. Tese de doutorado, UFSC. 2002.

LAMY, Carlos Alfredo, et. al.; Avaliação por Ultra-som do Tratamento Térmico para Alívio de Tensões. XXI Congresso de Ensaios não destrutivos. Salvador: 2012.

MACHADO, Ivan Guerra. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996.

MAKITA. Catálogo de Produtos: Martelete Rompedor. Disponível em: <<http://www.makita.com.br/produtos/produto.asp?cod=HK0500&l=1>>. Acesso em: 02 de maio de 2016.

MARQUES, P.V.;MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MODENESI, Paulo J., et al. Estudo de Alguns Parâmetros Básicos de Soldagem GMAW com transferência por Curto – Circuito. Soldagem e Inspeção, Vol. 16. São Paulo: 2011.

NERIS, Manuel M. Apostila de Soldagem da Universidade de Santa Cecília. Santos: Unisanta, 2012.

NEVES, Mauricio D.M. Apostila Metalurgia da Soldagem, Rio de Janeiro: ABM 2014.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicação. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PRODANOV, Cléber Cristiano; de FREITAS, Ernani César. Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

QUITES, Almir. Introdução à soldagem a arco voltaico. Florianópolis: Soldasoft, 2002.

RODRIGUES, Telmo Viana. Tratamento Térmico Pós – Soldagem Para Alívio de Tensões Residuais em Chapas de Aço Soldadas: Modelagem e Análise Experimental. CEFET/RJ: Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: 2011.

SEVERINO, Anônio Joaquim. Metodologia do Trabalho Científico. São Paulo: Cortez, 2013.

SHIGLEY, J.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R. G.; Projeto de Engenharia Mecânica. 7ª ed. Porto Alegre: Brookmam, 2005.

SILVA, Benedito Marcio. Alívio de tensões Residuais em juntas soldadas de caixa espiral de turbina hidráulica. UNESP: Dissertação de Mestrado. Guaratinguetá: 2005.

SINTO. Catálogo de Granalhas para Jateamento. Disponível em: <<http://www.sinto.com.br/pt-br/granalhas-de-aco-para-jateamento>>. Acesso em: 25 abril de 2016.

SOLDAS BRASIL. Catálogo de consumíveis de soldagem – arames de soldagem MIG/MAG. Apresenta dados de consumíveis de soldagem. Disponível em: <<http://www.soldasbrasil.com.br/arame-solido-ok-autrod-12-51-er-70S-6.php>>. Acesso em: 22 de abril de 2016.

SOUSA, Diogo Antônio. Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por Meio de Ensaio de Dureza. UFSJ: Dissertação de Mestrado. São João del – Rei: 2012.

STRASSER, Victor E. A. Soldagem Moderna dos Metais Ferrosos Pelo Arco Elétrico. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1963.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F.D. Soldagem: Processos e Metalurgia, São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

ZEEMANN, Annelise. Tensões residuais de Soldagem. INFOSOLDA: Artigo Disponível <<http://www.infosolda.com.br/artigos/metalurgia/394-tensoes-residuais-de-soldagem.html>>. Acesso em: 03 de março de 2016.

## ANEXOS

## ANEXO A

## Dados técnicos do arame eletrodo

|   |   |  |                                    |                                     |
|---|---|--|------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Classificações:</b>  | AWS/ASME SFA 5.18, ER70S-6, EN 440, G3Si1   |  |                                    |                                     |
| <b>Aprovações:</b>  | AWS / ASME SFA 5.18, ER70S-6, EN 440, G3Si1, FBTS, (CO <sub>2</sub> ) ER70S-6, ABS, (CO <sub>2</sub> ) 3YMS, BV, (CO <sub>2</sub> ) SA3,3YM, DNV, (CO <sub>2</sub> ) 3YMS, LR, (CO <sub>2</sub> ) 3YMS, GL, 3YS, VdTÜV, 00899 |  |                                    |                                     |
| <i>Approvals are based on factory location. Please contact ESAB for more information.</i> |   |  |                                    |                                     |
| <b>Alloy Type:</b>  | Carbon-manganese steel (Mn/Si-alloyed)  |  |                                    |                                     |
| <b>Teste Charpy</b>   |   |  |                                    |                                     |
| <b>Resultado - Como soldado</b>   |   | <b>Temperatura de Teste - Como Soldado</b> |                                    |                                     |
| <b>Ar + 20% CO<sub>2</sub></b>  |   |  |                                    |                                     |
| 130 J   |   | 20 °C                                      |                                    |                                     |
| 90 J  |   | -20 °C                                     |                                    |                                     |
| 70 J  |   | -29 °C                                     |                                    |                                     |
| <b>100% CO<sub>2</sub></b>  |   |  |                                    |                                     |
| 110 J   |   | 20 °C                                      |                                    |                                     |
| 70 J  |   | -20 °C                                     |                                    |                                     |
| <b>Typical Tensile Properties</b>   |   |  |                                    |                                     |
| <b>Elongation</b>   | <b>Tensile Strength</b>   | <b>Yield Strength</b>                      | <b>Stress Relieved Temperature</b> | <b>Stress Relieved Testing Time</b> |
| <b>EN 80Ar 20CO<sub>2</sub> As welded</b>   |   |  |                                    |                                     |
| 26 %  | 560 MPa   | 480 MPa                                    | -                                  | -                                   |
| <b>EN 80Ar 20CO<sub>2</sub> Stress relieved</b>   |   |  |                                    |                                     |
| 28 %  | 495 MPa   | 380 MPa                                    | 620 °C                             | 15 hr                               |
| <b>Deposição</b>  |   |  |                                    |                                     |
| <b>Corrente</b>   | <b>Diâmetro</b>   | <b>Taxa de Deposição</b>                   |                                    | <b>Tensão</b>                       |
| 60-200 A  | 0.8 mm  | 0.8 - 3.0 kg/h                             |                                    | 18-24 V                             |
| 70-250 A  | 0.9 mm  | 0.9 - 3.6 kg/h                             |                                    | 18-26 V                             |
| 80-300 A  | 1 mm  | 1.0 - 5.6 kg/h                             |                                    | 18-32 V                             |
| 120-380 A   | 1.2 mm  | 1.3 - 8.0 kg/h                             |                                    | 18-34 V                             |
| 225-550 A   | 1.6 mm  | 2.0 - 11.4 kg/h                            |                                    | 28-38 V                             |
| <b>Extra Information</b>  |   |  |                                    |                                     |
| <b>*APPROVAL COMMENT</b>  |   |  |                                    |                                     |
| Approval valid for lot numbers with prefix in right column.                               |   |  |                                    |                                     |

Fonte: Catálogo, ESAB, 2016.

## ANEXO B

Certificado de conformidade do gás de proteção.

|  |
|--|
|  <p>White Martins Gases Industriais SA</p>  |
| <p><b>Sapucaia do Sul 03 de Maio de 2016</b></p> <p><b>CERTIFICADO DE CONFORMIDADE</b></p>   |
| <p><b>Cliente: UNISC</b></p>   |
| <p><b>Produto: Stargold PLUS</b></p>   |
| <p>Certificamos que o produto em epígrafe fornecido pela WHITE MARTINS GASES INDUSTRIAIS LTDA, foi produzido de acordo com as normas aplicáveis e atende as especificações :</p> |
| <p>CO2 : 13,5 a 16,5 % , balanço argônio.</p>  |
| <p><b>Antonio Carlos Farias</b><br/>White Martins Gases Industriais Ltda.<br/>Br 116 Km 19 , 865 -Sapucaia do Sul - RS</p>   |

Fonte: Write Martins, 2016.



## ANEXO C

Dados técnicos do martetele rompedor.

**MARTELETE ROMPEDOR**

Modelo - HK0500

**CARACTERÍSTICAS**

Para recortes e remoções de materiais.  
Leve, resistente, com melhor proteção contra poeira.  
12 ajustes de ângulo da talhadeira.  
Encaixe SDS PLUS para rápida troca do acessório.

**ESPECIFICAÇÕES**

Potência 550 Watts  
Impacto por min. 2.000-3.500 ipm  
Comprimento Total : 468mm (18-7/16")  
Energia de Impacto : 1.6-2.8 joules  
Massa (peso) 3.2 kg  
Cabo de Energia : 5m

Fonte: Makita, 2016.

ANEXO D

Dados técnicos da granalha utilizada.


**Granalha de Aço para Jateamento**

A SINTO BRASIL PRODUTOS LIMITADA pertence a um dos maiores grupos produtores de granalha de aço do mundo, a Sintokogio do Japão, também presente nos principais países da Ásia. Décadas de pesquisa e experiência garantem os melhores produtos e as escolhas certas para cada aplicação.

A SINTO BRASIL também fabrica equipamentos para jateamento, fundição e controle de poluição do ar, peças de reposição originais para máquinas SINTO e WHEELABRATOR, e outras peças para diversas marcas e tecnologias do setor.

**Especificações da Norma SAE para Granalhas Esféricas e Angulares**  
**Porcentagens Máximas e Mínimas Acumuladas Permitidas nas Respectivas**  
**Peneiras Especificadas por Número e Tamanho da Abertura - Norma SAE J444**

**ESFÉRICA**  
GRANALHA DE AÇO



| Peneira Nº | Tamanho Abertura Pot. | Tamanho Abertura mm | \$-700             |    | \$-660 |    | \$-550             |                    | \$-460             |                    | \$-390             |                    | \$-330             |                    | \$-260             |                    | \$-230             |                    | \$-170             |    | \$-110 |    | \$-70 |    |
|------------|-----------------------|---------------------|--------------------|----|--------|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----|--------|----|-------|----|
|            |                       |                     | MN                 | MO | MN     | MO | MN                 | MO                 | MN                 | MO                 | MN                 | MO                 | MN                 | MO                 | MN                 | MO                 | MN                 | MO                 | MN                 | MO | MN     | MO | MN    | MO |
| 7          | 0,1110                | 2,80                | ∇                  |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 8          | 0,0937                | 2,36                |                    | ∇  |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 10         | 0,0787                | 2,00                | 85% min<br>97% min |    | ∇      |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 12         | 0,0661                | 1,70                |                    |    |        | ∇  |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 14         | 0,0555                | 1,40                |                    |    |        |    | 85% min<br>97% min |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 16         | 0,0469                | 1,18                |                    |    |        |    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 18         | 0,0394                | 1,00                |                    |    |        |    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 20         | 0,0331                | 0,850               |                    |    |        |    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 25         | 0,0280                | 0,710               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 30         | 0,0232                | 0,600               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 35         | 0,0197                | 0,500               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 40         | 0,0165                | 0,425               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 45         | 0,0138                | 0,355               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 50         | 0,0117                | 0,300               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 80         | 0,0070                | 0,180               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |                    |    |        |    |       |    |
| 120        | 0,0049                | 0,125               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |                    |    |        |    |       |    |
| 200        | 0,0029                | 0,075               |                    |    |        |    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 85% min<br>96% min |    |        |    |       |    |

| TAMANHOS PARA REMOÇÃO SUGERIDOS |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |                 |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| Limpeza                         | 0,0232 | 0,0165 | 0,0165 | 0,0138 | 0,0117 | 0,0117 | 0,0082 | 0,0070 | 0,0059 | 0,0049 | 0,0029 |                 |
| Peening - 85% min. retido       | 0,0661 | 0,0555 | 0,0469 | 0,0394 | 0,0331 | 0,0282 | 0,0232 | 0,0197 | 0,0117 | 0,0070 | 0,0049 | 80% min. retido |

Fonte: Catálogo Sinto, 2016.