

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG



Matheus Henrique Moreira Souza-

Wellington Pedro Quintão

**Análise da Influência dos Metais de Adição na Soldagem de Chapas de Aço Microligado Galvanizadas Soldadas Pelo Processo GMAW Robotizado**

Belo Horizonte

2016

Matheus Henrique Moreira Souza

Wellington Pedro Quintão

**Análise da Influência dos Metais de Adição na Soldagem de Chapas de Aço Microligado Galvanizadas Soldadas Pelo Processo GMAW Robotizado**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de pós-graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito final para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Paulo José Modenesi

Belo Horizonte

2016

**Análise da Influência dos Metais de Adição na Soldagem de Chapas de Aço Microligado Galvanizadas Soldadas Pelo Processo GMAW Robotizado**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de pós-graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito final para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Aprovado em: 07/12/2016

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof: Paulo José Modenesi

---

Prof: Ariel Rodrigues Arias

---

Prof: Claudio Turani Vaz

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho e, em especial:

- A Deus por ter permitido que chegássemos até aqui;
- Aos nossos familiares que sempre nos apoiaram;
- Ao Professor Paulo José Modenesi que nos orientou;
- A empresa Magneti Marelli Holding Suspension Systems por ter cedido o espaço e os equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho;
- Ao Senhor Márcio Luiz Moura Engenheiro de Assistência Técnica da empresa Belgo Bekaert que gentilmente cedeu as amostras dos arames para a realização dos testes.

## RESUMO

A adição de elementos de liga tem como um importante objetivo controlar a microestrutura do material, o que se reflete nas suas propriedades microscópicas, macroscópicas, físicas, mecânicas e elétricas permitindo ao material desempenhar funções específicas. No presente trabalho, foi analisada a influência dos elementos de liga, em especial, o Silício (Si) e o Manganês (Mn), na macroestrutura de cordões de solda executados em chapas zincadas de aço de Alta Resistência e Baixa Liga Microligados. Foi utilizado o processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) robotizado com mistura gasosa de 82% Argônio e 18%CO<sub>2</sub>. Os corpos de prova foram extraídos de um produto corrente de produção em série de uma empresa de autopeças soldados com dois tipos de arame o ER70S-6 e o ER70S-3, cuja diferença são os teores de silício e manganês. Foram observadas alterações nos parâmetros de saída da fonte de soldagem (Corrente e Tensão) para a mesma velocidade de alimentação do arame em função do tipo de arame. Aspectos referentes à morfologia dos cordões de solda, como penetração, comprimento das pernas do filete e dimensão da garganta efetiva, foram medidos. A análise dos resultados foi feita através de imagens macrográficas geradas pelo equipamento Welding Expert 5 e pela coleta de dados realizada durante o experimento. Ficou evidenciada uma diferente resposta dinâmica da fonte da soldagem quando houve a troca do arame de ER70S-6 para o ER70S-3 e ainda foi revelado pelas imagens macrográficas uma diferença considerável entre as geometrias dos cordões de solda executados com cada arame. Os cordões de solda feitos com o arame ER70S-3 apresentaram uma menor formação de porosidades internas em relação aos cordões de solda soldados com o arame ER70S-6.

**Palavras chaves:** Elementos de Liga, aços microligados, soldagem GMAW, geometria dos cordões de solda e porosidade.

## ABSTRACT

The addition of alloying elements has the main purpose to control the microstructure of the material, reflecting in its microscopic, macroscopic, physical, mechanical and electrical properties, allowing the material to perform specific functions. The present work evaluates the influence of silicon (Si) and manganese (Mn) on the macrostructure of weld beads executed in high strength and low alloy microalloyed steels galvanized sheets. Robotized Gas Metal Arc Welding (GMAW) welding was used with 82% Argon/18% CO<sub>2</sub> gas mixture, and two wire types (AWS ER70S-6 and ER70S-3) whose main difference is their silicon and manganese contents. Test specimens were extracted from a standard series production product of a car component. Possible changes in the output parameters of the welding power source (Current and Voltage) for the same wire feeding speed and weld bead shape parameters (penetration, length of fillet legs and effective throat size) were evaluated. Weld sections were analyzed by macrographic images generated by the Welding Expert 5 equipment and data collection during the experiment. It was evidenced a different dynamic response of the welding source when the wire was changed from ER70S-6 to ER70S-3. The macrographic images revealed a considerable difference between the weld bead geometries performed with each wire. The weld beads executed with ER70S-3 wire presented a smaller formation of internal porosities in relation to weld beads welded with the wire ER70S-6.

Key words: Alloy elements, microalloyed steels, GMAW welding, weld bead geometry and porosity.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Diagrama Ferro Carbono.....  | 4  |
| Figura 2 – Aço Hipoeutetóide com 0,4% de Carbono. Aumento de 635X. ....   | 6  |
| Figura 3 – Aço Eutetóide com 0,77%C. Microestrutura Perlítica. Aumento 500 x. Ataque nital 2% .....   | 7  |
| Figura 4 – Aço Hipereutetóide com 1,4% de carbono. Aumento de 1000x.....  | 7  |
| Figura 5 – Influência da adição de elementos de liga no aço de matriz ferritica .....   | 10 |
| Figura 6 – Influência de elementos de liga na estabilidade das fases Ferro: a) Elementos Gamagêneos e b) Elementos Afagêneos .....  | 11 |
| Figura 7 – Efeito dos elementos de liga na temperatura eutetóide .....  | 12 |
| Figura 8 – Laminação controlada .....   | 13 |
| Figura 9 – Efeito do elemento microligante no limite de escoamento de aços carbono comuns, em função do teor de carbono.....  | 15 |
| Figura 10 – Região da ZTA de um aço soldado .....   | 16 |
| Figura 11 – Perfil de dureza Vickres dos três aços microligados soldados, ZRA230.....   | 18 |
| Figura 12 – Desenho Esquemático do processo GMAW .....  | 19 |
| Figura 13 - Equipamentos básicos para a soldagem MIG/MAG. a) Desenho esquemático e b) Fonte de Soldagem GMAW .....  | 22 |
| Figura 14 - Perfil típico dos cordões de solda realizados com diferentes gases e misturas. ....   | 25 |
| Figura 15 – Configurações básicas de robôs industriais empregados na soldagem. a) retangular; b) cilíndrico; c) esférico e d) articulado. ....  | 30 |
| Figura 16 – Célula robótica para soldagem. a) robô; b) controle do robô; c) fonte de soldagem; d) alimentador de arame; e) rolo de arame; f) cilindro de gás; g) tocha e h) mesa de soldagem .....  | 31 |
| Figura 17 –Corpo de Prova, junta em T .....   | 33 |
| Figura 18 - Sistema esquemático do processo de soldagem. 1) Fonte de soldagem 2) Controlador de robô, 3) Alimentador de Arame, 4)Tocha de soldagem, 5) Dispositivo de soldagem, 6) Corpo de prova, 7) Filete e 8) Braço manipulador do robô. .... | 34 |
| Figura 19 - Braço Comau Smart 5-NS 12-1.85 Arc .....  | 35 |
| Figura 20 – Fonte de soldagem TPS 4000.....   | 35 |
| Figura 21 - Alimentador de arame Fronius VR 1500.....   | 36 |
| Figura 22 - Tocha Robacta 500 .....   | 36 |
| Figura 23 - Dispositivo de Soldagem .....   | 37 |
| Figura 24 - Equipamento Welding Expert.....   | 37 |
| Figura 25- Cordões de Solda: a) Arame ER70S-6 e b) Arame ER70S-3.....   | 39 |
| Figura 26 - Seções do cordão de solda .....   | 40 |
| Figura 27 - Seções dos cordões de solda empregando o arame ER70S-6.....   | 41 |
| Figura 28 - Seções dos cordões de solda empregando o arame ER70S-3.....   | 42 |
| Figura 29 - Critério de Aceitação da Geometria da Junta Soldada .....   | 44 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Tendência de distribuição dos elementos de liga no aço.....  | 9  |
| Tabela 2 - Classificação de arames eletrodos empregados na soldagem GMAW .....  | 24 |
| Tabela 3 - Gases e Misturas empregadas na soldagem GMAW .....   | 24 |
| Tabela 4 - Faixa de correntes empregadas com arames sólidos de diferentes diâmetros para aço carbono e de baixa liga..... | 27 |
| Tabela 5 – Classificação dos processos de soldagem em relação à automatização .....                                       | 28 |
| Tabela 6 - Propriedades Mecânicas Especificadas do Metal de Base .....  | 32 |
| Tabela 7 - Composição Química Especificadas do Metal de Base .....  | 32 |
| Tabela 8 - Composição Química Especificada do Metal de Adição .....   | 33 |
| Tabela 9 - Parâmetros de Soldagem .....   | 38 |
| Tabela 10 - Critérios de Aceitação de Porosidade.....   | 43 |
| Tabela 11 - Geometria dos Cordões de Solda .....  | 44 |
| Tabela 12 – Corrente de Soldagem utilizada com os arames ER70S-6 e ER70S-3.....   | 45 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1 – INTRODUÇÃO.....  | 1  |
| 1.1- Objetivo.....   | 2  |
| 1.2- Justificativa.....  | 2  |
| 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 3  |
| 2.1- Aço Carbono .....   | 3  |
| 2.1.1- Definição .....   | 3  |
| 2.1.2 – Diagrama Ferro-Carbono.....  | 3  |
| 2.1.3- Distribuição e Influência dos Elementos de Liga.....                  | 8  |
| 2.2- Aço Microligado .....   | 12 |
| 2.2.1- Soldabilidade.....  | 15 |
| 2.3- Soldagem dos Aços Galvanizados .....                                    | 18 |
| 2.4- Soldagem GMAW.....  | 19 |
| 2.3.1- Fundamentos da Soldagem.....  | 19 |
| 2.3.2- Equipamentos .....  | 22 |
| 2.3.3- Consumíveis .....   | 23 |
| 2.3.4- Técnicas de Operação.....   | 26 |
| 2.4- Automação na Soldagem.....  | 28 |
| 2.4.1- Automação no Processo GMAW .....                                      | 29 |
| 3 – METODOLOGIA.....   | 32 |
| 3.1 Materiais utilizados.....  | 32 |
| 3.1.1 Material base.....   | 32 |
| 3.1.2 Metal de adição.....   | 33 |
| 3.1.3 Gás de Proteção .....  | 33 |
| 3.2 Equipamentos Utilizados .....  | 34 |
| 3.3 - Procedimento Experimental .....  | 38 |
| 3.3.1 - Inspeção visual dos cordões de solda.....                            | 38 |
| 3.3.2 Análise macrográfica das amostras .....                                | 39 |
| 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 41 |
| 4.1 – Análise da Formação de Porosidade no Interior do Cordão de Solda ..... | 41 |
| 4.2 – Análise da Geometria dos Cordões de Solda.....                         | 43 |
| 5 – CONCLUSÃO.....   | 46 |
| 6 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....   | 47 |

## 1 – INTRODUÇÃO

Os aços microligados começaram a serem estudados a partir da década de 50 com a introdução de vanádio, tungstênio e nióbio em pequenas quantidades em aços carbono. Foi percebido que a introdução destes elementos de liga, em conjunto com tratamentos termomecânicos, resultava em aços com estrutura extremamente refinada o que garantia, ao mesmo, aumento de resistência mecânica e de tenacidade.

Devido a esta característica, estes aços começaram a serem utilizados nas indústrias automobilísticas, em componentes estampados que, na maioria dos casos, eram soldados. De modo geral, aços microligados apresentam boa soldabilidade, mas tal comportamento tende a decrescer à medida que o teor de elementos de liga aumenta.

Um fator que dificulta bastante a soldagem de um aço é a presença de uma camada galvanizada que, em geral, provoca durante a soldagem uma maior instabilidade do arco e uma elevação do nível de respingos, levando ao aumento da densidade de poros superficiais e/ou internos.

O presente trabalho visa estudar a influência de dois arames comerciais, ER70S-6 e ER70S-3, na geometria dos cordões de solda e na tendência de formação de poros quando se realiza a soldagem robotizada em aços microligados galvanizados, empregando os mesmos parâmetros de soldagem para os dois eletrodos.

Para a conferência da presença de porosidade superficial nos cordões de solda foi realizada inspeção visual e, para a verificação da porosidade interna, realizou-se a técnica de macrografia, sendo feitos cortes transversais nos cordões, a preparação da amostra e o seu ataque com reativos químicos.

A análise dimensional dos cordões foi realizada com a utilização do software Welding Expert após o ensaio macrográfico, o dimensionamento das geometrias dos cordões de solda a fim de definir as pernas do cordão, a garganta, a penetração da solda e a presença ou não de mordeduras.

Por fim, observou-se que a solda realizada com o arame ER70S-6 apresentou maior presença de poros internos do que as soldas realizadas com o eletrodo ER70S-3. Além disso, os

cordões feitos com o ER70S-3 exibiram maiores penetração e garganta de solda em relação ao obtido com o outro eletrodo.

### ***1.1- Objetivo***

Verificar se o arame ER70S-3 atende as normas internas de uma empresa ligada ao setor de autopeças e comparar a tendência de formação de poros na soldagem de chapas de aço microligados galvanizados com este arame em relação à obtida com o eletrodo ER70S-6 que é o consumível usado atualmente.

### ***1.2- Justificativa***

- Garantir a integridade da junta soldada através da redução ou eliminação dos poros que tendem a estarem presentes na soldagem de chapas de aço galvanizadas e podem prejudicar a resistência mecânica da junta soldada.

## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### **2.1- Aço Carbono**

#### 2.1.1- Definição

Aço é uma liga formada, principalmente, por ferro e carbono, mas que pode conter outros elementos residuais resultantes do processo de fabricação ou adicionados intencionalmente para adequação de certas propriedades. Em geral, ligas de ferro e carbono, que contém teor de carbono entre 0,008% até cerca 2,11%, podem ser subdivididas em três grupos distintos (CHIAVERINI, 2002):

- I. Aço de baixo carbono: teor de C inferior a 0,3%;
- II. Aço de médio carbono: teor de C entre 0,3% a 0,6%;
- III. Aço de alto carbono: teor de C acima de 0,6%

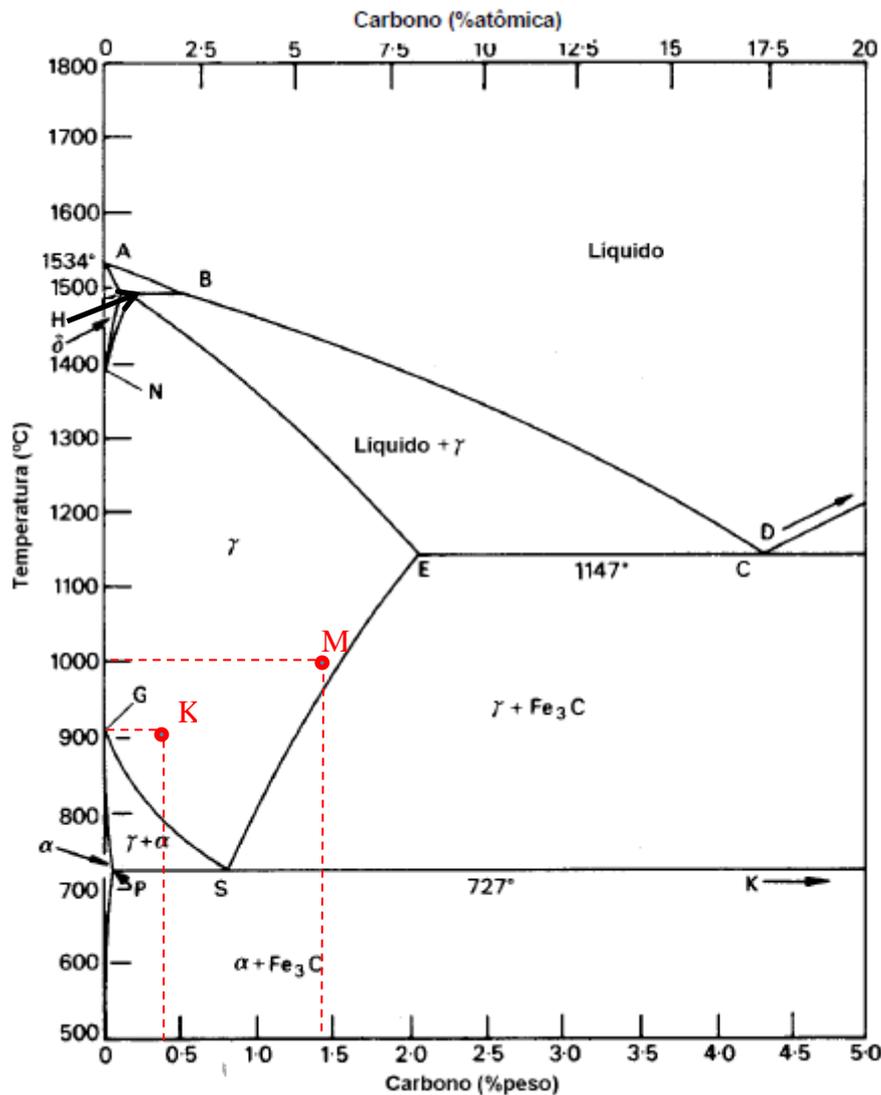
Quando elementos de liga são adicionados intencionalmente, os aços passam a serem chamados de aços-liga que podem ser classificados como:

- I. Aço de baixa liga: contém teor de elementos de liga abaixo de 5%;
- II. Aços de média liga: possuem teor de elementos de liga entre 5% a 10%;
- III. Aços de alta liga: apresentam teor de elementos de liga acima de 10%.

#### 2.1.2 – Diagrama Ferro-Carbono

Para garantir a total compreensão das ligas formadas por ferro e carbono (aços e Ferros Fundidos) é imprescindível o estudo do diagrama de fases Fe-C. Este diagrama fornece informações sobre as características básicas de aços carbono simples, que podem ser estendidas até aços de alta liga extremamente complexos (MODENESI, 2012).

A Figura 1 mostra o diagrama binário Fe-C, para teores de carbono de até 6,7%. Tal teor de carbono é assumido porque esse elemento forma com o ferro um composto intermetálico ( $Fe_3C$ ) que contém, aproximadamente, 6,7% C. Em geral, acima de 4,5% de carbono, as ligas formadas, a princípio, não apresentam importância comercial (CHIAVERINI, 2002).



**Figura 1** – Diagrama Ferro Carbono.

Fonte: MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012.

As principais fases que aparecem no diagrama são: o ferro líquido, a austenita ( $\gamma$ ), a ferrita ( $\alpha$  e  $\delta$ ) e a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

A austenita é uma solução sólida intersticial de carbono em ferro gama que assume estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Similar à austenita, a ferrita é uma solução sólida intersticial de carbono em ferro alfa (ou delta) que apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). A cementita, por sua vez, é um composto intermetálico (carboneto de ferro) formado por ferro e carbono cuja estrutura cristalina é ortorrômbica.

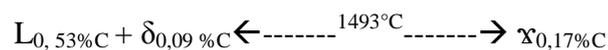
O diagrama mostrado, na verdade, representa um diagrama Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ , visto que a extremidade a direita, correspondente a 6,7% de carbono, corresponde ao carboneto de ferro (cementita). O

diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C é considerado como metaestável, uma vez que, a cementita é menos estável que a grafita. Entretanto, como não é comum encontrar carbono livre em aços, na prática, o diagrama metaestável (Fe-Fe<sub>3</sub>C) é usualmente utilizado.

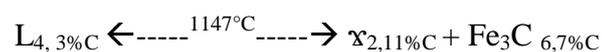
O diagrama metaestável Fe-Fe<sub>3</sub>C apresenta três reações invariantes que estão caracterizadas na Figura 1 pelos pontos:

- Ponto H, peritético;
- Ponto C, eutético;
- Ponto S, eutetóide.

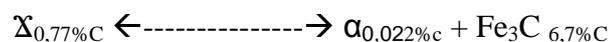
A reação peritética ocorre em uma liga que contém até 0,5% de carbono resfriada a partir da fase líquida. Essa reação é caracterizada pela reação da fase líquida e da ferrita δ formando a austenita, segundo a reação:



A reação eutética ocorre quando o líquido se transforma em duas fases sólidas, ou seja, a austenita e a cementita durante o resfriamento em que o líquido se solidifica a 1147°C. Essa reação ocorre em ligas que apresentem teores de carbono entre 2,11% a 6,7% e é bastante importante no processo de obtenção de ferros fundidos. A equação que descreve a reação é:



A 727°C ocorre a reação eutetóide para um teor de carbono de 0,77%. Esse ponto é de suma importância para o estudo dos aços. A equação que descreve esta reação é:



Um constituinte resultante dessa reação é a perlita que apresenta uma estrutura formada por uma matriz ferrítica com lamelas regularmente espaçadas de Fe<sub>3</sub>C.

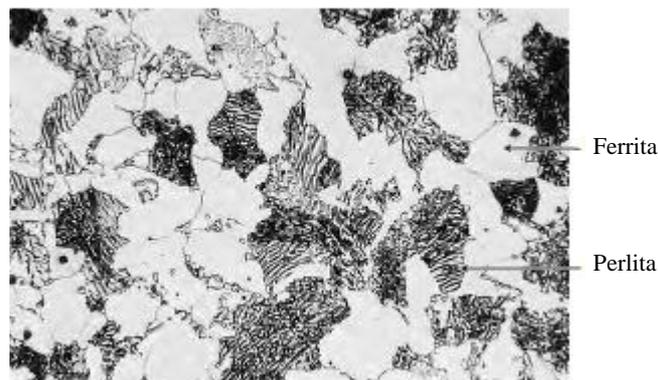
A decomposição da austenita, durante o resfriamento lento, a partir de elevadas temperaturas ocorre assistida pelo processo de difusão e envolve a movimentação e rearranjo atômicos para a formação de um núcleo de uma nova fase. Neste contexto, a austenita, durante o resfriamento lento, se transforma em ferrita e cementita.

De acordo com o teor de carbono e os constituintes resultantes dessa transformação, os aços podem ser divididos em três grupos:

- Aços hipoeutetóides, contêm teor de carbono inferior a 0,77%;
- Aços eutetóides, apresentem teores de carbono em torno de 0,77%;
- Aços hipereutetóides, são formados com teores de carbono acima de 0,77%.

Um aço com teor de carbono de 0,45%, a uma temperatura de 900°C, é constituído por austenita com estrutura cristalina CFC, conforme mostra o ponto K da Figura 1. Se o aço for resfriado lentamente, a uma temperatura em torno de 775°C (linha GS), núcleos de ferrita começam a serem nucleados e, à medida que o resfriamento avança, mais ferrita se forma resultando na diminuição da quantidade de austenita.

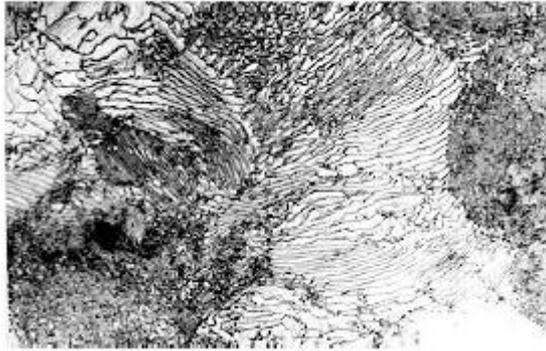
Ao alcançar a temperatura de 727°C, a austenita remanescente se transforma em perlita através da reação eutetóide. Assim, a microestrutura final do aço, à temperatura ambiente, é formada por ferrita proeutetóide e perlita. A Figura 2 mostra a microestrutura típica de um aço hipoeutetóide.



**Figura 2** – Aço Hipoetotóide com 0,4% de Carbono. Aumento de 635X.

Fonte: CALLISTER, 2008.

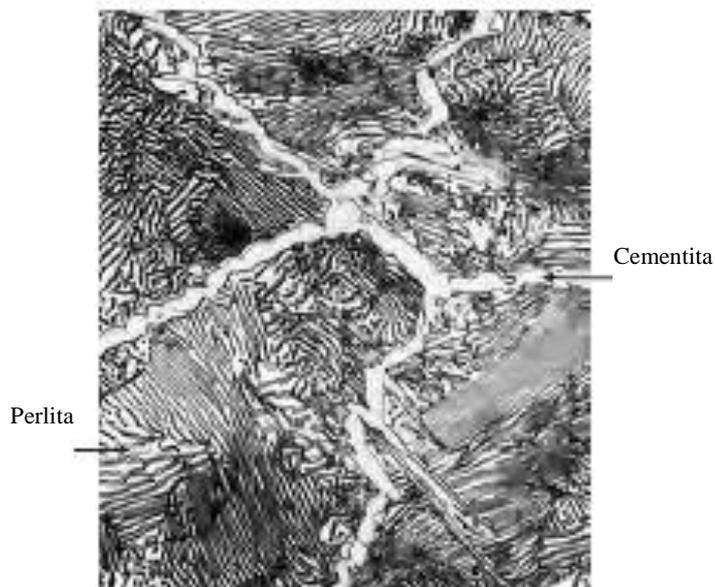
Um aço carbono com 0,77% C, a uma temperatura de 900°C, similarmente ao aço hipoeutetóide anterior, é constituído por austenita. No resfriamento, a transformação da austenita só ocorre quando a liga atinge a temperatura eutetóide (no ponto S da Figura 1). À temperatura ambiente, este aço apresenta uma microestrutura formada somente de perlita, Figura 3.



**Figura 3** – Aço Eutetóide com 0,77%C. Microestrutura Perlítica. Aumento 500 x. Ataque nital 2%

Fonte: MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012

Um aço com 1,4 % de carbono, ao sofrer um resfriamento lento a partir do campo austenítico (ponto M da Figura 1), terá como microestrutura resultante, à temperatura ambiente, cementita proeutetóide e perlita. A fase  $Fe_3C$  começa a se formar quando a liga, no resfriamento, atinge a linha SE do diagrama Fe- $Fe_3C$ . À medida que o resfriamento continua, a quantidade de cementita aumenta e a de austenita diminui. Na temperatura de  $727^{\circ}C$ , toda austenita remanescente se transforma em perlita. A Figura 4 exhibe uma microestrutura usual de um aço hipereutetóide.



**Figura 4** – Aço Hipereutetóide com 1,4% de carbono. Aumento de 1000x.

Fonte: CALLISTER, 2008.

As estruturas descritas acima são formadas em condições próximas do equilíbrio com resfriamento muito lento. À medida que a velocidade de resfriamento é aumentada, as condições de transformação tendem a se alterar e a granulação da estrutura se torna cada vez mais fina e a perlita apresenta lamelas cada vez menos espaçadas entre si. Se a velocidade de resfriamento se tornar suficientemente elevada, novos constituintes, alguns formados por fases não previstas pelo diagrama Fe-C, podem surgir, tais como a martensita e a bainita.

A microestrutura final de um aço depende de sua composição química, do tamanho, da homogeneidade dos grãos austeníticos e de suas condições de processamento.

### 2.1.3- Distribuição e Influência dos Elementos de Liga

Atualmente, existe uma tendência para a construção de estruturas mais leves feitas com aços mais resistentes. Para tal, elementos de liga são empregados. Estes podem ajudar a obter, por exemplo, as seguintes características:

1. Maior resistência mecânica, proporcionando o emprego de componentes mecânicos mais leves;
2. Maior resistência à corrosão atmosférica. Fator muito importante, pois a utilização de estruturas mais finas resulta em vida mais curta do componente submetido a corrosão.
3. Melhor resistência ao impacto e à fadiga;

Os elementos de liga se distribuem em um aço de diversas maneiras que são dependentes da capacidade destes elementos de permanecerem em solução sólida, de formar compostos intermetálicos, de precipitar em uma nova fase ou, mesmo, de formar inclusões não metálicas. A Tabela 1 mostra a tendência de distribuição de alguns elementos de liga utilizados nos aços.

O carbono e o nitrogênio possuem átomos pequenos em relação ao ferro que podem estar dissolvidos nos interstícios da matriz de ferro ou formar compostos. O oxigênio, embora apresente baixo raio atômico, tende a ser mais estável na forma de óxido e não em solução sólida. Já o hidrogênio possui um átomo muito pequeno que pode difundir rapidamente na matriz e, eventualmente, voltar à forma molecular em descontinuidades da estrutura.

Destes elementos, o carbono é o principal responsável pelo o aumento de resistência mecânica dos aços carbono.

Elementos como o cromo, níquel, cobre, manganês e silício possuem raios atômicos próximos ao do ferro. Neste contexto, estes elementos metálicos podem substituir átomos de ferro na sua estrutura cristalina formando uma solução sólida substitucional.

**Tabela 1** – Tendência de distribuição dos elementos de liga no aço

| <b>Elementos</b> | <b>Em solução sólida</b> | <b>Formando Carbonetos</b> | <b>Formando inclusões não metálicas</b>                                   | <b>Formando composto intermetálicos</b> |
|------------------|--------------------------|----------------------------|---|---|
| Níquel           | Ni                       |                            |   | Ni <sub>3</sub> Si e Ni <sub>3</sub> Al |
| Silício          | Si                       |                            |   |   |
| Alumínio         | Al                       |                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Al <sub>x</sub> N <sub>y</sub>           |   |
| Manganês         | Mn ← → Mn                |                            | MnS e MnO   |   |
| Cromo            | Cr ← → Cr                |                            | Cr <sub>x</sub> O <sub>y</sub>  |   |
| Tungstênio       | W ← → W                  |                            |   |   |
| Molibdênio       | Mo ← → Mo                |                            |   |   |
| Vanádio          | V ← → V                  |                            | V <sub>x</sub> O <sub>y</sub> e V <sub>x</sub> N <sub>y</sub>             |   |
| Titânio          | Ti ← → Ti                |                            | Ti <sub>x</sub> O <sub>y</sub> , Ti <sub>x</sub> N <sub>y</sub> , Ti(C,N) |   |
| Nióbio           | Nb ← → Nb                |                            |   |   |
| Enxofre          | S                        |                            | MnS   |   |

Fonte: Adaptado de MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012

O silício é um elemento utilizado como agente desoxidante. Normalmente, atua aumentando a resistência mecânica dos aços, mas em quantidades excessivas reduz bastante a sua ductilidade. Em consumíveis de soldagem, este elemento às vezes é adicionado para aumentar a fluidez da poça de fusão.

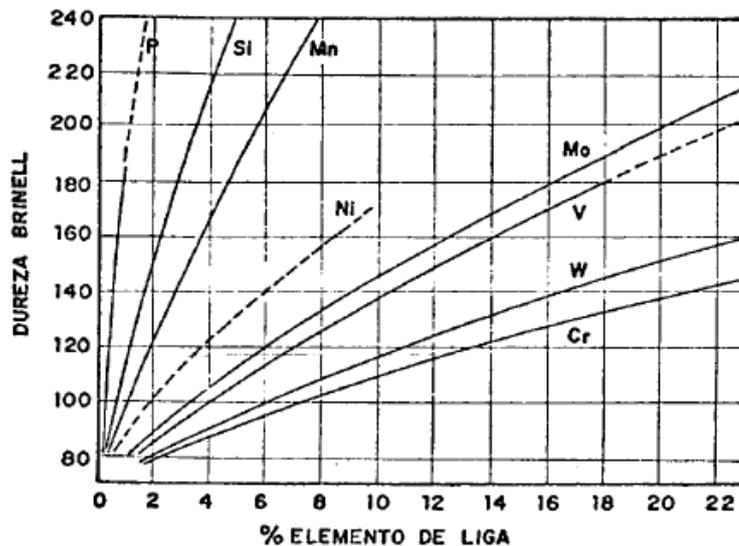
O manganês atua no aço aumentando a sua resistência mecânica. Esse elemento também eleva a temperabilidade do aço.

Os elementos cobre, níquel e cromo, aumentam a resistência mecânica e à corrosão dos aços. Dentre esses, o cobre tem como principal objetivo a resistência à corrosão. O níquel, por sua vez, tende a aumentar a tenacidade e a ductilidade do aço, mesmo a baixas temperaturas. O cromo é um elemento que pode aumentar a tenacidade do material e, em elevadas concentrações, a resistência ao desgaste (formação de carbonetos).

A solubilidade dos elementos de liga em uma liga de ferro e carbono depende de alguns fatores, tais como: estrutura cristalina do aço, temperatura e quantidade de outros elementos. Em geral, a solubilidade de um elemento tende a aumentar com o aumento da temperatura.

Elementos como o cromo e o silício possuem maior solubilidade no ferro alfa, enquanto o níquel, carbono, nitrogênio e o manganês possuem maior capacidade de se dissolverem na austenita.

A adição de elementos metálicos em solução sólida promove o aumento de dureza e resistência mecânica de uma fase, conhecido como endurecimento por solução sólida. A Figura 5 exibe a influência de diferentes elementos de liga na dureza de um aço de matriz ferrítica.



**Figura 5** – Influência da adição de elementos de liga no aço de matriz ferrítica

Fonte: MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012

Alguns elementos de liga apresentam grande afinidade pelo carbono solubilizado na matriz de ferro dos aços e carbonetos podem se formar. Tais carbonetos tendem a influenciar no comportamento mecânico da liga, melhorando, principalmente, a resistência mecânica a altas temperaturas e a resistência à abrasão.

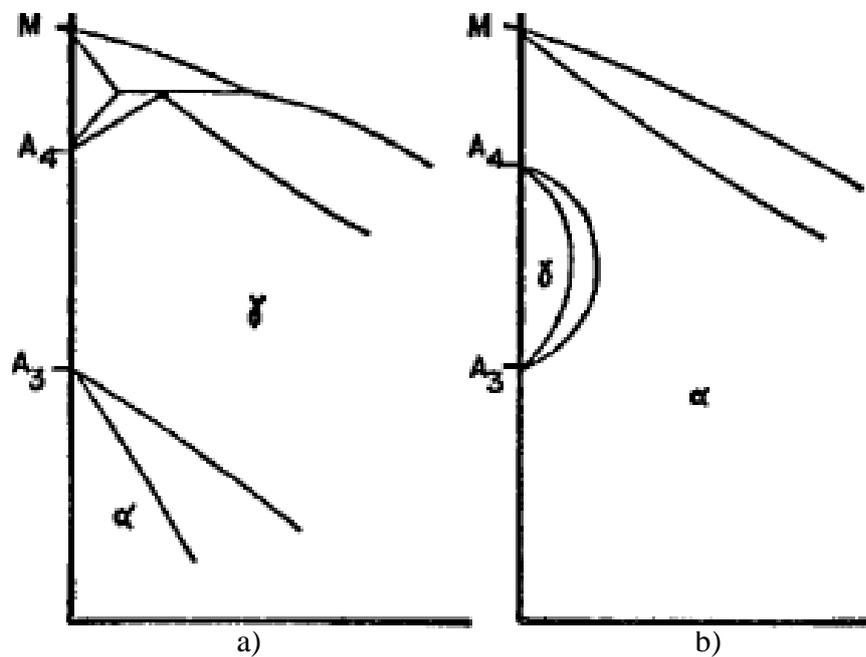
Elementos comuns que apresentam este comportamento são: o manganês, cromo, molibdênio, tungstênio e nióbio. A afinidade pelo carbono aumenta do manganês para o nióbio. Em geral, os carbonetos formados por estes elementos se dissolvem em pequenas quantidades na cementita e, por isso, formam novos tipos de carbonetos.

Os elementos de liga também podem alterar a forma do diagrama Fe-C. Conforme apresentado, os aços, em condições de equilíbrio, podem apresentar algumas fases, principalmente, a ferrita e a austenita que são estáveis em certas faixas de temperatura. As diferentes solubilidades dos elementos de liga nessas duas fases levam à modificação das temperaturas de transformação de fase.

A princípio, os elementos de liga podem ser divididos em dois grandes grupos:

- I. Elementos gamagêneos: Favorecem a expansão do campo de estabilidade da fase austenita.
- II. Elemento alfa gêmeos: Favorecem a formação da ferrita, ampliando a faixa de temperatura de sua existência.

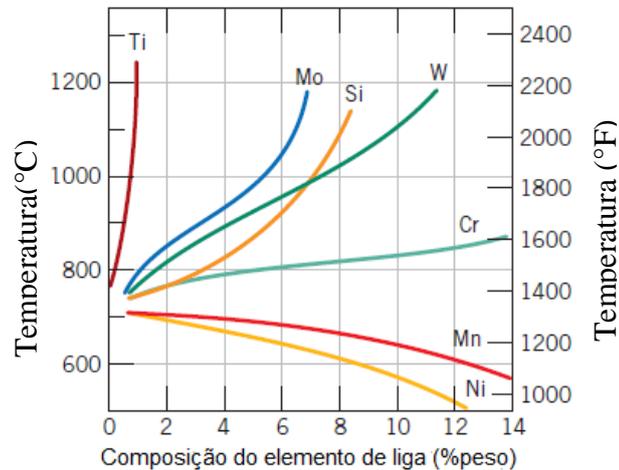
Alguns elementos que atuam com estabilizadores da austenita são: carbono, níquel, cobre, manganês e cobalto. Já alguns elementos capazes de contrair o campo austenítico são: o cromo, o silício, molibdênio e o vanádio. A Figura 6 mostra de modo esquemático diagramas de equilíbrio do ferro com diferentes elementos de liga.



**Figura 6** – Influência de elementos de liga na estabilidade das fases Ferro: a) Elementos Gamagêneos e b) Elementos Afagêneos

Fonte: Adaptado de MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012

Considerando o sistema Fe-C, um elemento de liga pode, por exemplo, modificar a temperatura eutetóide. Elementos alfacênicos, a princípio, fazem com que esta temperatura aumente, enquanto que os elementos gamagênicos provocam a sua diminuição como pode ser observado na Figura 7.



**Figura 7** – Efeito dos elementos de liga na temperatura eutetóide

Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2008.

## 2.2- Aço Microligado

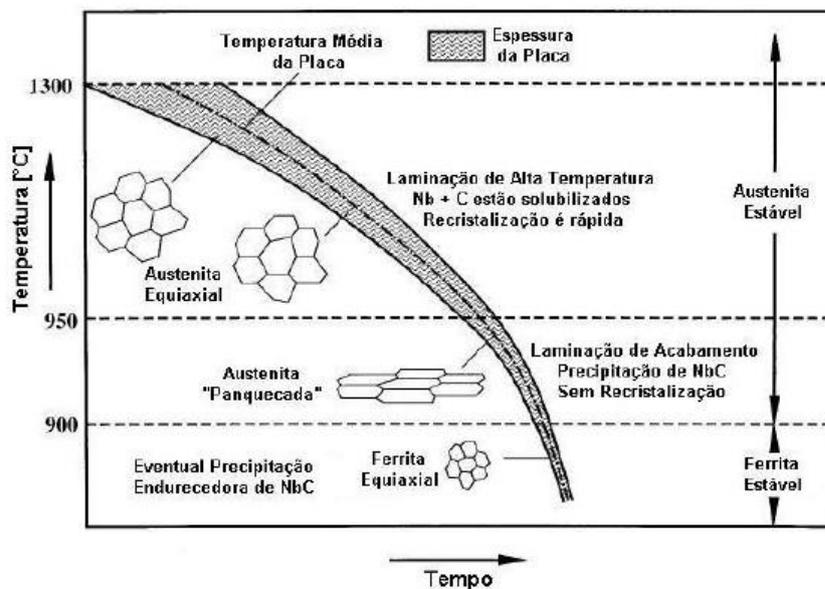
Aços microligados são constituídos por uma liga Fe-C-Mn com pequenas adições de elementos de liga, principalmente, vanádio, titânio e /ou nióbio, além de poder apresentar em alguns casos adições de alumínio, boro e zircônio e outros elementos. A adição de V, Ti e Nb revolucionou a siderurgia na década de 1950, pois estes aços apresentam microestrutura extremamente refinada que atua como um mecanismo de endurecimento capaz de aumentar, simultaneamente, a resistência mecânica e a tenacidade do material.

Os elementos microligantes podem proporcionar a precipitação de carbonetos, nitretos e/ou carbonitretos que também aumentam a resistência mecânica do aço. As partículas de precipitados ficam dispersas na matriz metálica e atuam como barreira à propagação das discordâncias, promovendo endurecimento por precipitação.

A inserção de microligantes possibilita o uso, em fabricação (conformação e soldagem), de chapas de maior resistência mecânica e, portanto, de menor espessura.

Para a fabricação de aços microligados utiliza-se a laminação controlada. Este processo de laminação pode ser dividido em três fases (Figura 8):

1. Laminação na fase de recristalização da austenita – Realizada acima da temperatura de recristalização para tirar vantagem da baixa resistência mecânica do material.
2. Laminação na fase de não recristalização da austenita – A austenita não recristaliza, encruando progressivamente e formando grãos achatados que facilitam a nucleação, posterior, da ferrita.
3. Laminação no campo bifásico  $\alpha + \chi$  (opcional)/Resfriamento acelerado – Nesta fase, ocorre a nucleação de grãos de ferrita nos contornos de grãos e subgrãos (regiões encruadas) da austenita. O resfriamento acelerado, quando usado, causa maior refinamento da estrutura e permite a formação de constituintes como a bainita.



**Figura 8** – Laminação controlada

Fonte: GORNI, SILVEIRA E REIS, 2009.

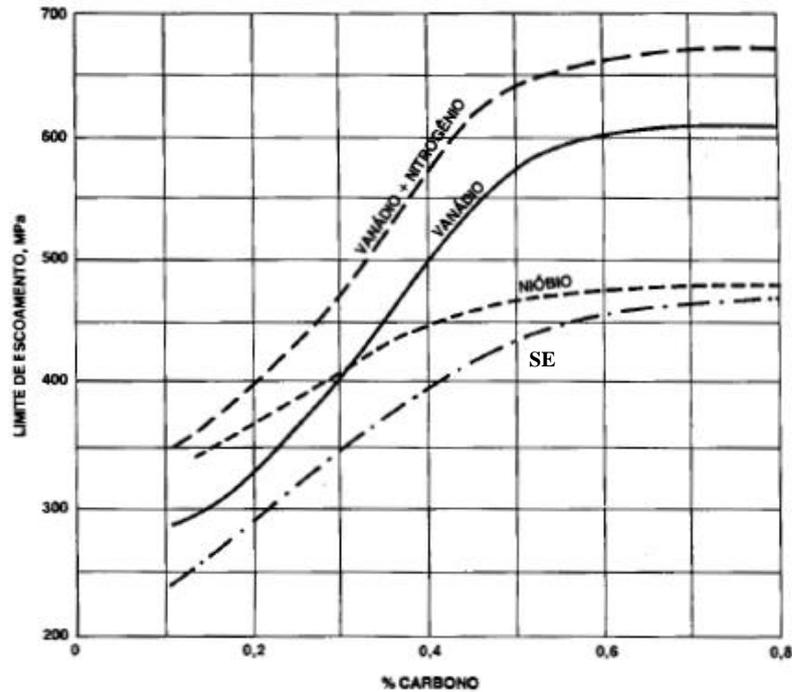
Os aços microligados apresentam pequenas concentrações ( $\leq 0,1\%$  em massa) de elementos de liga que possuem grande afinidade pelo carbono e nitrogênio. Em geral, os elementos mais utilizados neste tipo de aço são:

- **VANÁDIO:** Apresenta alta solubilidade na austenita em elevadas temperaturas. Durante o resfriamento e decomposição da austenita, o vanádio se precipita como partículas extremamente finas de carbonitretos dispersos na matriz de ferro. Devido à formação destas pequenas partículas, o vanádio melhora a resistência mecânica do aço

por endurecimento por precipitação. Em geral, o teor de vanádio situa-se em uma faixa de 0,03 a 0,1 %.

- **TITÂNIO:** Esse elemento possui alta afinidade pelo carbono e nitrogênio mesmo em elevadas temperaturas, tendo baixa solubilidade na austenita. Sendo assim, na laminação a quente, compostos de titânio (TiC e TiN) se precipitam e atuam como controladores do crescimento de grão a elevada temperatura. Em virtude deste comportamento, pode-se ocorrer refino de grão e endurecimento por precipitação, dependendo do percentual utilizado. Em geral, a adição de Ti se encontra entre 0,01 a 0,02 % para os aços microligados.
- **NIÓBIO:** Pequenas adições de nióbio retardam a recristalização da austenita entre os passes de laminação a quente, garantindo o refino de grão do aço microligado (laminação controlada). Esse elemento pode se apresentar tanto na forma solubilizada quanto na forma de precipitados (NbC e NbN). Como os precipitados são formados em elevadas temperaturas, este elemento pode atuar tanto como barreira contra o crescimento de grão quanto como endurecedor por precipitação.  
Durante a fase de acabamento da laminação controlada, cuja temperatura se encontra abaixo de 900°C, os grãos ficam completamente achatados e encruados, facilitando a nucleação dos grãos de ferrita, na transformação de fases, durante o resfriamento posterior.
- **ALUMÍNIO:** Apesar de alguns autores não considera-lo como um elemento microligante, este elemento é um forte formador de nitreto em altas temperaturas. Estas inclusões não metálicas, que assumem a morfologia de pequenas partículas, são dispersas por toda matriz de ferro e também atuam como barreiras contra o crescimento de grão. Além disso, o alumínio atua como agente desoxidante e, geralmente, está presente em uma faixa de 0,02 a 0,04 % em massa.

A Figura 9 abaixo mostra o efeito da adição de elementos microligantes em um aço carbono comum. Observe, que, como se era de esperar, com o aumento do teor de carbono maior é o limite de escoamento do aço.



**Figura 9** – Efeito do elemento microligante no limite de escoamento de aços carbono comuns, em função do teor de carbono.

\* SE – Sem adição de elementos de liga.

Fonte: CHIAVERINI, 2002

### 2.2.1- Soldabilidade

A soldabilidade dos aços microligados, similar ao que ocorre com outros metais, depende do metal de base, do metal de adição, do processo de soldagem utilizados e das variáveis que governam tal processo. Dentre todos estes fatores o que representa o maior impacto é o metal de base.

Para definir as propriedades mecânicas de uma junta soldada devem se conhecidas as composições químicas do metal de base e do metal de adição, assim como a microestrutura resultante do cordão de solda e da zona termicamente afetada (ZTA).

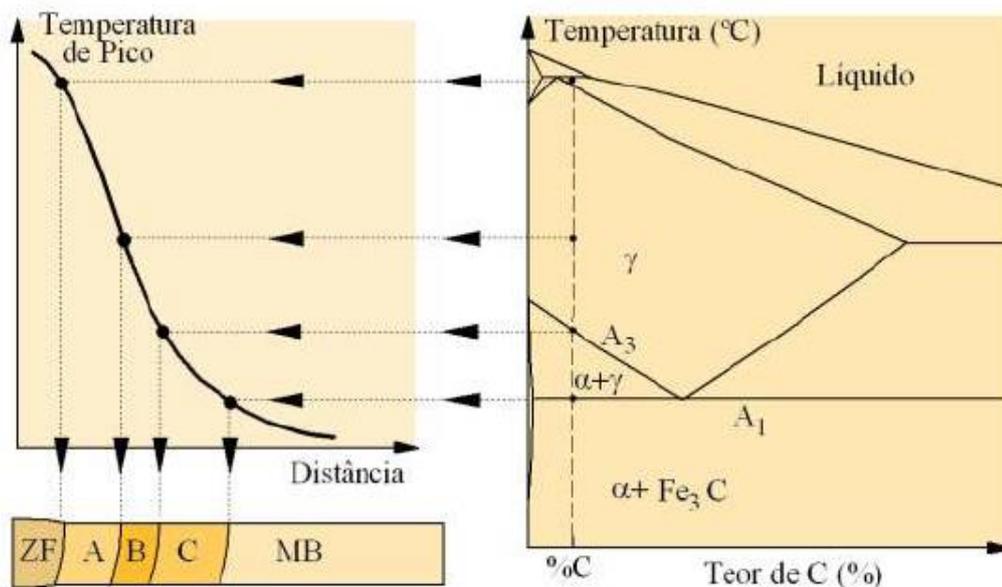
A microestrutura do metal de solda, em geral, pode ser formada pelos seguintes microconstituintes: ferrita (acicular, com segunda fase alinhada ou não, de contorno de grão, poligonal, etc.), agregado de ferrita-carboneto (perlita e outros) e martensita. A formação destes microconstituintes é dependente, dentre outros fatores, do ciclo térmico atuante na zona fundida.

A estrutura da ZTA depende das características do metal de base, do aporte térmico (heat input) utilizado e da velocidade de resfriamento da região.

A ZTA dos aços carbono e de baixa liga pode ser dividida em diferentes regiões dependendo, exclusivamente, do afastamento do cordão de solda, como:

- ❖ Região de granulação grosseira (GGZTA);
- ❖ Região de granulação fina (GFZTA);
- ❖ Região intercrítica (ICZTA);
- ❖ Região subcrítica (SCZTA).

A Figura 10 mostra esquematicamente as regiões da ZTA de acordo com a temperatura de pico atingida pela distância do centro da solda (curva de repartição térmica).



**Figura 10** – Região da ZTA de um aço soldado

Fonte: MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012

**Região de Granulação Grosseira (A):** Região submetida a temperaturas de pico superiores a 1200°C e é caracterizada por um grande tamanho de grão austenítico. Esse tamanho de grão é determinado, basicamente, pela temperatura de pico e pelo tempo de permanência acima da temperatura de crescimento de grão (em torno de 1200°C).

A microestrutura resultante dessa região depende da composição química do aço e da sua velocidade de resfriamento. Em função da velocidade de resfriamento, do aumento do teor de carbono e/ou elemento de liga (aumento da temperabilidade), essa região pode ser

caracterizada por uma microestrutura predominantemente martensítica. Assim, essa estrutura tende a ser problemática, por apresentar alta dureza, baixa tenacidade e tendência à formação de trincas a frio (por hidrogênio).

**Região de Granulação Fina (B):** A temperatura de pico pode variar entre 1200°C e a temperatura  $A_3$ , Figura 10. Nesta região a estrutura assume uma granulação fina, não sendo, em geral, um local prejudicial na ZTA dos aços.

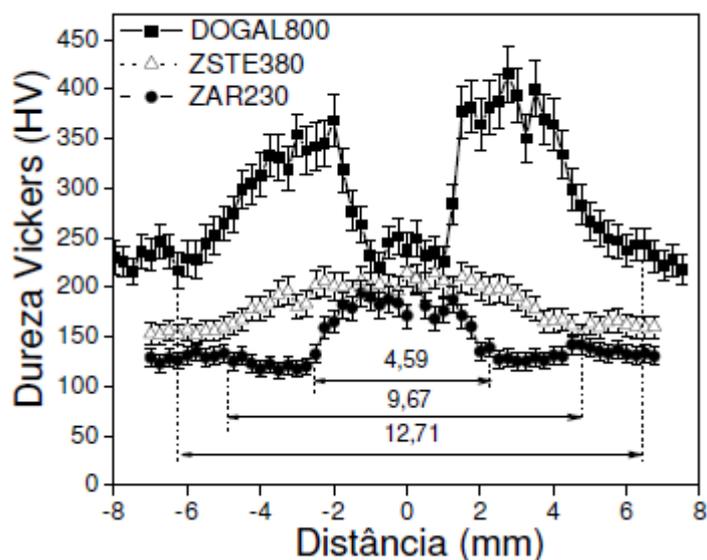
**Região Intercrítica (C):** Caracterizada por apresentar transformação parcial de sua estrutura original em austenita e é submetida a temperaturas entre  $A_3$  e  $A_1$ . Em alguns casos, se o resfriamento dessas regiões for rápido o suficiente, parte da estrutura que se transformou em austenita pode decompor em martensita. Neste caso, esta região será constituída de locais de alta dureza e locais macios.

**Região Subcrítica (MB):** Em aços laminados ou normalizados essa região promove, em alguns casos alguma esferoidização da perlita. Em aços temperados e revenidos, essas regiões podem alterar de forma mais intensa, promovendo um super-revenimento do material aquecido acima da temperatura de revenido. Neste caso, essa região apresenta menor dureza que o próprio metal base.

Tal fato foi observado por BAJIC et al. (2011) que soldaram um aço microligado API-5L com o processo SMAW. Em seu trabalho foi visto que a ZTA dos cordões de solda realizados apresentou cada uma destas regiões destacadas, e que na região de crescimento de grão foi evidenciada a formação de bainita junto à ferrita.

PERINI (2008) ao soldar três tipos de aços microligados (ZAR230, ZSTE380 e DOGAL800) pelo processo de soldagem GMAW, com o mesmo metal de adição, notou que ocorreu crescimento de grão nas regiões mais próximas ao cordão de solda para o aço ZAR230 e a formação de uma microestrutura martensítica nesta mesma região para o aço DOGAL800. A Figura 11 exhibe o perfil de dureza da junta soldada destes três aços (PERINI, 2008).

Apesar dos aços transformáveis formarem várias regiões na ZTA e apresentem alterações em suas propriedades mecânicas e em suas microestruturas, em relação ao metal de base, a região que tende a apresentar maior degradação de suas propriedades é a de granulação grosseira (GGZTA).



**Figura 11** – Perfil de dureza Vickers dos três aços microligados soldados, ZRA230

Fonte: PERINI, 2008

### 2.3- Soldagem dos Aços Galvanizados

O processo de galvanização dos aços consiste basicamente em adicionar uma camada de zinco no produto laminado e esta camada confere ao aço uma grande resistência à corrosão atmosférica. Chapas galvanizadas são amplamente aplicadas na indústria automobilística e na construção civil. A indústria automobilística exige elevado grau de acabamento superficial das chapas laminadas e um rígido controle da uniformidade e espessura da camada galvanizada (SILVA, 2006).

O tecnologia da soldagem a arco elétrico com proteção gasosa para aços galvanizados ainda está em desenvolvimento e existem diferentes procedimentos de soldagem recomendados na literatura (ANDRADE, 2003).

Os principais problemas encontrados na soldagem de chapas galvanizadas estão associados com a camada de zinco que recobre o material, pois o zinco possui baixa temperatura de fusão (420°C) e evaporação (910°C). Com isso, na soldagem a arco elétrico, a vaporização do zinco pode causar instabilidade do arco, formação de porosidade, falta de fusão, trincas, além de danificar a camada galvanizada que protege o aço contra a corrosão (JOSEPH et. Al., 2003).

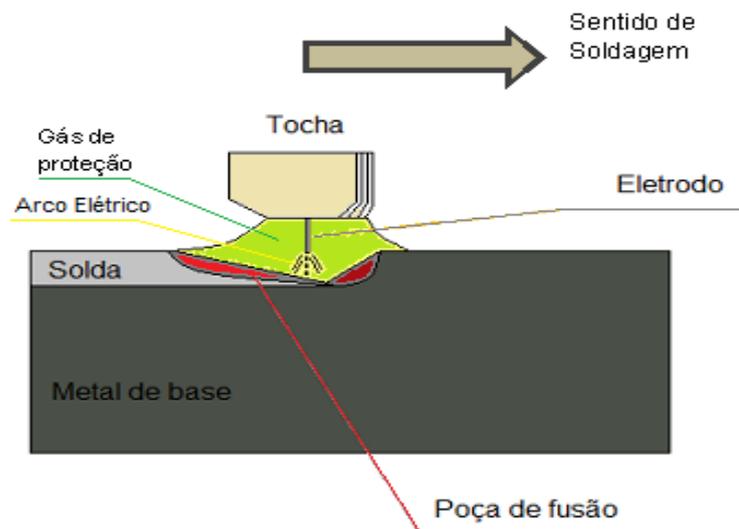
Estes problemas podem ser minimizados com a utilização de baixos aportes térmicos que contribuem para menor queima da camada de zinco garantindo arco elétrico mais estável com baixa taxa de respingos (ANDRADE, 2003).

BADRI et. al. (2015) conseguiram excelentes resultados na soldagem de chapas de aço galvanizadas de 2 mm de espessura utilizando o processo de soldagem GMAW com arame do tipo “metal cored” com diâmetro de 1,0 mm e com corrente alternada. Foi verificada a ausência de porosidade no interior do cordão e apenas pequenas áreas onde a camada de zinco foi queimada.

## 2.4- Soldagem GMAW

### 2.3.1- Fundamentos da Soldagem

A soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) utiliza o arco elétrico como fonte de calor, com proteção gasosa externa, para realizar a fusão e a união de peças metálicas (figura 12). Este arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo nu (isento de revestimento), consumível, e a peça a ser soldada. Essa soldagem também pode ser denominada como MIG/MAG.



**Figura 12** – Desenho Esquemático do processo GMAW

Fonte: Adaptado de MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2008

A proteção contra a contaminação atmosférica do arco e da região da solda é feita por um gás ou por mistura de gases, que podem ser ativos ou inertes. O processo MIG (Metal Inert Gas) emprega gases inertes ou mistura rica em gases inertes para executar a proteção da solda. Já o processo MAG (Metal Active Gas) utiliza para a proteção da região da solda, gases ativos ou misturas ricas nestes.

O processo MAG é empregado para materiais ferrosos, usando como gás de proteção o CO<sub>2</sub> ou misturas ricas desse gás. Já o processo MIG pode ser utilizado para a soldagem de

materiais ferrosos (aços inoxidáveis) e não ferrosos, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas.

Neste processo a alimentação do arame é feita de forma mecanizada, por meio de um alimentador motorizado, e o soldador é responsável por iniciar e interromper a soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta.

A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua do arame eletrodo, na qual o comprimento do arco é mantido, a princípio, constante pelo próprio sistema. Assim, diferentemente da soldagem com eletrodo revestido, a movimentação da tocha promovida, dentro de certos limites, pelo soldador não altera o comprimento do arco elétrico.

Materiais ferrosos e não ferrosos com amplas faixas de espessura podem ser soldados pelo processo GMAW. Comumente, os diâmetros dos eletrodos variam de 0,6 a 2,4 mm.

De maneira geral, o processo GMAW apresenta as seguintes características:

- Alta taxa de deposição;
- Alto fator de ocupação do soldador;
- Ausência da necessidade de remoção de escória (limpeza facilitada);
- Grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessura aplicáveis;
- Facilidade de mecanização e automação.

Embora esse processo tenha vantagens fundamentais sobre outros processos de soldagem, ele também apresenta limitações consideráveis como:

- Maior sensibilidade às variações dos parâmetros elétricos de operação do arco;
- Maior dificuldade na ajustagem dos parâmetros corretos para se obter determinadas características para o cordão de solda;
- Maior custo e necessidade de manutenção dos equipamentos, se comparado com o processo SMAW;
- Menor variedade de consumíveis disponível no mercado, se comparado com a soldagem SMAW.

Na soldagem em que se emprega eletrodo consumível, o metal fundido na ponta do eletrodo se transfere para a poça de fusão por diferentes formas. Na soldagem GMAW, o modo com

que a gota se transfere afeta muitas características do processo como, por exemplo, a estabilidade do arco, quantidade de gases absorvido no metal e o nível de respingos gerados.

De forma geral, considera-se que existam três modos básicos de transferência do metal de adição para a peça. São eles: transferência por curto circuito, transferência globular e transferência por spray. Estas formas de transferência são governadas por alguns fatores como o tipo de material, tipo de gás de proteção e parâmetros de soldagem, principalmente a corrente e a tensão elétrica.

- **Transferência por curto circuito**

Esse modo de transferência metálica ocorre quando se utiliza baixos valores de corrente e tensão. Esse tipo de transferência pode ser aplicado em soldagem fora de posição e para a união de peças de pequena espessura.

Em síntese, o eletrodo é aquecido até a fusão de sua extremidade, em contato com o arco elétrico, formando uma gota que vai aumentando o seu diâmetro, até tocar a poça de fusão, sendo rapidamente transferida para essa, mediante a ação da tensão superficial.

- **Transferência Globular**

Quando se emprega valores intermediários de tensão e corrente elétrica de soldagem, passa a atuar um novo modo de transferência metálica, a transferência globular. Essa forma de transferência resulta em um arco mais estável que o do modo anterior, contudo, a transferência metálica é mais caótica e imprevisível.

A transferência globular é caracterizada pela formação de gotas de diâmetro, em geral, maior que o diâmetro do eletrodo. O nível de respingos desse modo de transferência pode ser relativamente elevado e as gotas de metal transferem-se para a peça, principalmente pela ação da gravidade.

- **Transferência Spray**

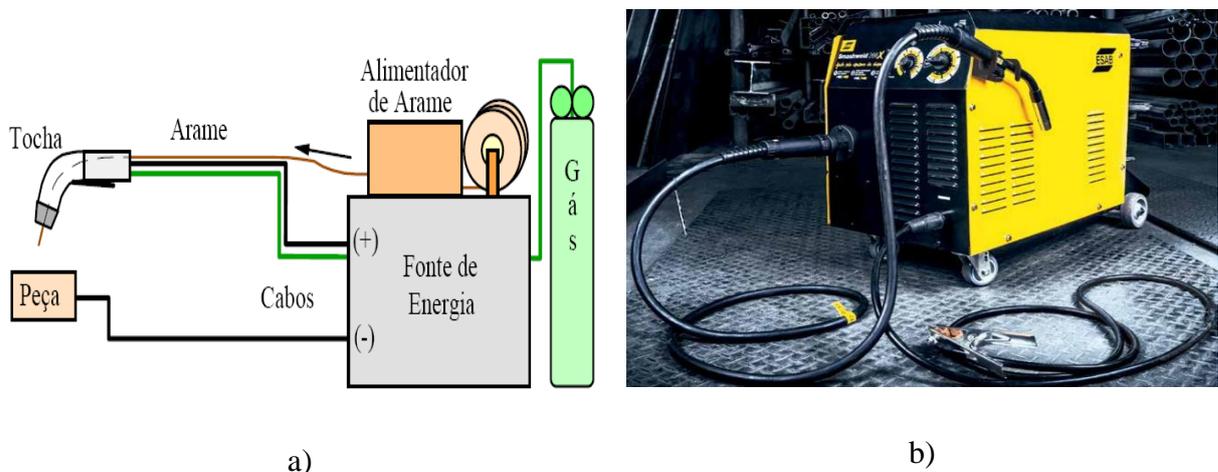
À medida que a corrente vai aumentando, o diâmetro médio das gotas de metal fundido diminui até que, acima de certa faixa de valores, denominada como “corrente de transição”, ocorre uma mudança brusca na forma com que o metal é transferido para a peça, que passa de globular para spray.

Em tal modo de transferências as gotas de metal fundido assumem pequenas dimensões com diâmetro menor do que o do próprio eletrodo. A transferência por spray é caracterizada por ocorrer quando se utiliza argônio ou mistura rica neste gás e por apresentar um arco elétrico bastante estável em que praticamente não são formados respingos.

Embora este modo de transferência seja caracterizado por um arco estável e resulte em cordões regulares e suaves, sua aplicação em soldas fora de posição pode ser problemática, uma vez que, as correntes empregadas são relativamente altas e resultam em uma poça de fusão de tamanho elevado e de difícil controle.

### 2.3.2- Equipamentos

Os equipamentos básicos necessários para a soldagem GMAW são: fonte de energia, fonte de gás de proteção, alimentador de arame, tocha e cabos e mangueiras, como mostra a Figura 13.



**Figura 13** - Equipamentos básicos para a soldagem GMAW. a) Desenho esquemático e b) Fonte de Soldagem GMAW

Fonte: a) MODENESI E MARQUES, 2000/ b) CATÁLOGO DA ESAB, 2013.

Embora existam fontes do tipo corrente constante, em sua grande maioria, as fontes de energia empregadas na soldagem GMAW são do tipo tensão constante, cujo alimentador fornece arame com uma velocidade também constante. Esse tipo de sistema é mais barato e mais simples, além de apresentar bons resultados na soldagem com arames mais finos, até 3,2 mm de diâmetro.

Os alimentadores de arames, em geral, são acionados por um motor de corrente contínua, fornecendo arame com velocidade constante, ajustável em uma faixa de velocidades. Apesar de não existir, em geral, comunicação entre o alimentador e a fonte, alterando-se a velocidade do arame, modifica-se também a corrente de soldagem fornecida pela máquina.

A tocha de soldagem é constituída por um punho e corpo, que sustenta um bico de contato responsável por energizar o arame eletrodo, um bocal, que orienta o fluxo de gás de proteção, e um gatilho, que aciona o sistema elétrico (e controla a saída de gás e arame).

Por fim, a fonte de gás de proteção consiste normalmente de um cilindro do gás ou mistura de gases que serão aplicados no processo de soldagem. Acoplado a fonte de gás existe um regulador de pressão e mangueiras para condução do gás. Em empresas que possuem grandes quantidades de equipamentos de soldagem, podem ser utilizados centrais de armazenamento e distribuição de gases.

### 2.3.3- Consumíveis

Os principais consumíveis para a soldagem GMAW são o arame eletrodo e o gás de proteção. Define-se cada um destes consumíveis de forma mais clara nos próximos subtópicos.

#### 2.3.3.1- Arame Eletrodo

Os arames empregados na soldagem GMAW são constituídos pelas ligas metálicas que serão o metal de adição do processo. Os arames empregados são maciços e comumente cobreados sob a justificativa de que a camada de cobre protege o arame contra a corrosão, além de melhorar o contato elétrico entre o bico e este.

Arames não cobreados também são encontrados no mercado internacional. Embora esses arames não resultem em diferenças significativas em questões de estabilidade do processo de soldagem, se comparados com os arames cobreados, o emprego de arames sem a camada de cobre tende a desgastar mais o bico de contato.

A classificação dos arames para a soldagem de aços carbono e baixa liga é especificada pela AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). As especificações AWS A 5.18 e A 5.28 são aplicadas para a soldagem dos aços carbono e de baixa liga. A Tabela 2 mostra alguns arames empregados na soldagem GMAW destes tipos de aço.

**Tabela 2** - Classificação de arames eletrodos empregados na soldagem GMAW

| <b>CLASSIFICAÇÃO</b> | <b>LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)</b> | <b>LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)</b> | <b>Alongamento (% min.)</b> | <b>APLICAÇÃO</b> |
|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|
| ER70S-6              | 480                                | 400                               | 22                          | Aço carbono      |
| ER70S-B2             | 515                                | 400                               | 19                          | Aços baixa liga  |
| ER80S-G              | 550                                | 470                               | 19                          |                  |
| ER90S-G              | 620                                | 540                               | 17                          |                  |

Fonte: Autor

### 2.3.3.2- Gás de Proteção

Como já mencionado, os gases ativos podem ser constituídos por CO<sub>2</sub> puro ou por uma mistura rica neste gás. Os gases inertes são formados por argônio, hélio ou mistura destes. Estes não interagem com a poça de fusão nem com a gota de metal que é transferido pelo arco elétrico.

O tipo de gás influencia o arco elétrico, o modo de transferência do metal de adição, as dimensões e o formato do cordão de solda. Os gases inertes puros são aplicados em metais não ferrosos, principalmente aqueles reativos, como o alumínio, magnésio, titânio.

Na soldagem dos metais ferrosos, a adição de pequenas quantidades de gases ativos melhora a estabilidade do arco (facilidade de emissão de elétrons) e a transferência metálica.

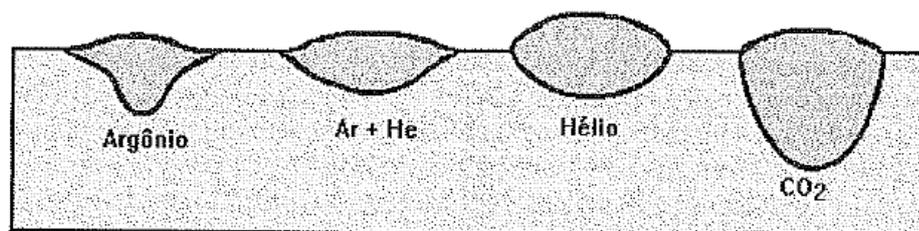
O custo de soldagem de aços carbono e de baixa liga pode ser reduzido com a utilização de CO<sub>2</sub> como gás de proteção. Contudo, a maior perda de material por respingo e o pior acabamento do cordão de solda devem ser avaliados. O dióxido do carbono é um gás estável e inerte à temperatura ambiente, mas nas temperaturas geradas pelo arco elétrico ele se decompõe em CO e O, tornando-se ativo. Alguns dos principais gases utilizados na soldagem GMAW são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Gases e Misturas empregadas na soldagem GMAW

| Gás ou Mistura                    | Comportamento Químico |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Argônio                           | Inerte                |
| Hélio                             | Inerte                |
| Argônio + Hélio                   | Inerte                |
| CO <sub>2</sub>                   | Ativo                 |
| Argônio + 8-50% CO <sub>2</sub>   | Ativo                 |
| Argônio + 1-2 % de O <sub>2</sub> | Levemente ativo       |
| Argônio + 3-5 % de O <sub>2</sub> | Ativo                 |

Fonte: Adaptado de MODENESI E MARQUES, 2000

De modo geral, na soldagem com hélio e CO<sub>2</sub>, maiores quantidade de calor são geradas pelo arco elétrico para a mesma distância eletrodo-peça e corrente em relação à soldagem com argônio, devido à maior condutividade térmica dos dois primeiros gases. Misturas ricas em hélio são bastante utilizadas na soldagem de metais de alta condutividade térmica (cobre, alumínio e suas ligas) e para peças de maiores espessuras. A Figura 14 mostra esquematicamente o perfil transversal de cordões de solda feitos por diferentes gases e misturas.



**Figura 14** - Perfil típico dos cordões de solda realizados com diferentes gases e misturas.

Fonte: MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2014.

O baixo potencial de ionização do argônio cria uma maior facilidade para condução de corrente elétrica e favorece uma maior estabilidade do arco, facilitando a soldagem com o modo de transferência metálica por spray.

O hélio é aplicado em soldagens que necessitem de um maior aporte térmico para gerar maior penetração e maior velocidade de soldagem. Na soldagem MIG, o arco elétrico produzido pelo hélio não é tão estável quando o gerado pelo argônio e isso pode acarretar em algumas descontinuidades na junta a ser soldada.

#### 2.3.4- Técnicas de Operação

No processo GMAW, a abertura do arco se dá pelo toque do arame eletrodo na peça após o acionamento do gatilho da tocha. A partir da abertura do arco, é usualmente realizado um movimento de translação ao longo da junta com velocidade uniforme. Se necessário pode-se realizar o movimento de tecimento em conjunto com o de translação. Uma vez que a alimentação do arame é feita de forma constante, neste processo não é necessário realizar o movimento de mergulho típico da soldagem com eletrodo revestido.

Ao final da operação, o arco pode ser extinto simplesmente soltando o gatilho da tocha, interrompendo a corrente de soldagem, a alimentação do arame e a vazão de gás.

As principais variáveis do processo GMAW são a corrente, tensão, polaridade da corrente, vazão de gás, velocidade de alimentação do arame, diâmetro do eletrodo e o comprimento do eletrodo energizado, conhecido como “stickout”.

Similar ao processo de soldagem com eletrodo revestido, o diâmetro do eletrodo é escolhido em função da espessura da peça, da posição de soldagem e de outros fatores que afetam o tamanho da poça de fusão, como a energia imposta na soldagem. Para cada diâmetro de arame existe uma faixa de corrente adequada, de maneira que o arco elétrico apresenta boa estabilidade. A Tabela 4 mostra essa faixa de corrente para arames eletrodos de aços carbono e de baixa liga.

Normalmente, para o processo MIG/MAG utiliza-se corrente contínua e polaridade inversa (CC+), eletrodo no polo positivo, que resulta em maiores penetração e estabilidade do arco elétrico. Eventualmente, em situações que se queira aumentar a taxa de deposição e que a menor penetração não seja um problema, a soldagem com polaridade direta (CC-) pode ser usada.

A corrente de soldagem influencia de maneira direta a penetração, a largura do cordão, a taxa de deposição, a energia de soldagem e os modos de transferência metálica. A escolha da corrente é feita em função da espessura da peça a se unir, da posição de soldagem, do diâmetro do eletrodo e da geometria do cordão de solda desejado.

**Tabela 4** - Faixa de correntes empregadas com arames sólidos de diferentes diâmetros para aço carbono e de baixa liga

| Material                               | Diâmetro do Eletrodo (mm) | Faixa de Corrente (A) |
|--|---------------------------|-----------------------|
| <i>AÇO CARBONO E DE<br/>BAIXA LIGA</i> | 0,8                       | 70-180                |
|  | 1,0                       | 90-220                |
|  | 1,2                       | 100-270               |
|  | 1,6                       | 190-360               |
|  | 2,4                       | 280-490               |
|  | 3,2                       | 270-580               |

Fonte: Autor

A tensão elétrica deve ser escolhida de acordo com a corrente de soldagem e o gás de proteção. Este parâmetro de soldagem afeta o comprimento do arco, o modo de transferência e o formato do cordão de solda. Tensões baixas favorecem a transferência por curto circuito e menor estabilidade do arco, além de facilitar a formação de poros. Tensões elevadas resultam em maior largura do cordão e tendem a aumentar a quantidade de respingos.

O comprimento energizado do eletrodo (stickout) comumente é definido como sendo a distância da extremidade do bico de contato até a peça. Quanto maior for esta distância maior será a taxa de deposição, se mantidos os outros parâmetros de soldagem constantes. Logo, dentro de certos limites, o aumento do stickout pode ser usado para aumentar a taxa de deposição.

A vazão do gás de proteção deve ser escolhida de tal forma que proporcione uma proteção eficiente contra a contaminação dos gases atmosféricos. Em geral, quanto maior a corrente, maior será a poça de fusão e, em suma, maior deverá ser a vazão de gás para proteger esta área.

Baixa vazão de gás pode ocasionar problemas como porosidade e deterioração das propriedades da solda mediante a perda de elementos de liga. Vazões elevadas podem gerar cordões irregulares, promover porosidade devido à turbulência do gás de proteção, além de aumentar desnecessariamente o custo da operação.

Por fim, a velocidade de soldagem tem influência direta no aporte térmico de soldagem. Assim, velocidades muito baixas, além de elevar o custo, podem provocar problemas metalúrgicos devido à elevada energia imposta no processo. Velocidades excessivas provocam baixa penetração, menor largura do cordão, além de induzir descontinuidades como: mordeduras, falta de fusão e falta de penetração da solda.

#### **2.4- Automação na Soldagem**

Soldagem automática pode ser conseguida pela aplicação de componentes mecanizados ou eletrônicos que garantam a execução das funções básicas de um procedimento de soldagem comumente executadas pelo soldador. São necessários componentes para a movimentação do arco elétrico, fixadores e dispositivos para prender, movimentar e/ou posicionar a peça de trabalho e, eventualmente, de sensores capazes de monitorar os parâmetros de soldagem.

Um processo de soldagem manual ocorre quando todas as atividades necessárias são realizadas e controladas pelo soldador. No outro extremo, um processo de soldagem automatizado ocorre quando todas as tarefas em relação à soldagem são executadas pela máquina. A Tabela 5 compara a execução manual, mecanizada e automática na soldagem.

**Tabela 5** – Classificação dos processos de soldagem em relação à automatização

| ATIVIDADES                       | TIPO DE OPERAÇÃO |            |                             |
|----------------------------------|------------------|------------|-----------------------------|
|                                  | Manual           | Mecanizado | Automático                  |
| Abertura e Manutenção do Arco    | Soldador         | Máquina    | Máquina                     |
| Alimentação do Arame             | Soldador         | Máquina    | Máquina                     |
| Deslocamento e Controle da Tocha | Soldador         | Máquina    | Máquina                     |
| Controle do Arco                 | Soldador         | Máquina    | Máquina                     |
| Correção e Compensações          | Soldador         | Soldador   | Máquina (quando necessário) |

Fonte: Adaptado de MARQUES, BACARENSE E MODENESI, 2008

Uma forma específica de soldagem automática é a robotizada, a qual é definida pela American Welding Society (AWS) como “Soldagem que emprega equipamentos (robôs, manipulares, fonte de energia, etc.) para executar operações de soldagem, após a programação, sem a influência, por parte do operador, no ajuste e controle do processo”.

Nas práticas de soldagem, a automação é realizada para garantir a integridade da junta soldada, reduzir custo de peças seriadas, aumentar a produtividade e repetitividade do processo.

A soldagem por resistência elétrica por pontos (RSW) foi o primeiro processo a ser robotizado, na década de 70, para suprir a demanda da indústria automobilística. Atualmente vários processos de soldagem e corte operam de forma robotizada. Dentre estes processos, a soldagem GMAW é o mais utilizado na soldagem por robô. Outros processos que podem ser robotizados são:

- Gas Tungsten Arc Welding – GTAW ou TIG;
- Laser Beam Welding and Cutting – LBW e LBC;
- Plasma Arc Welding and Cutting – PAW e PAC;
- Resistance Spot Welding – RSW.

#### 2.4.1- Automação no Processo GMAW

Um robô industrial consiste em um conjunto de juntas conectadas capazes de se articular. O primeiro elo, em geral, é vinculado em uma base fixa e o último contém a ferramenta (por exemplo, a tocha de soldagem) fixada e é denominado de extremidade terminal. Neste contexto, o movimento da tocha é controlado pela movimentação do robô que, por sua vez, é controlada pela programação especificada.

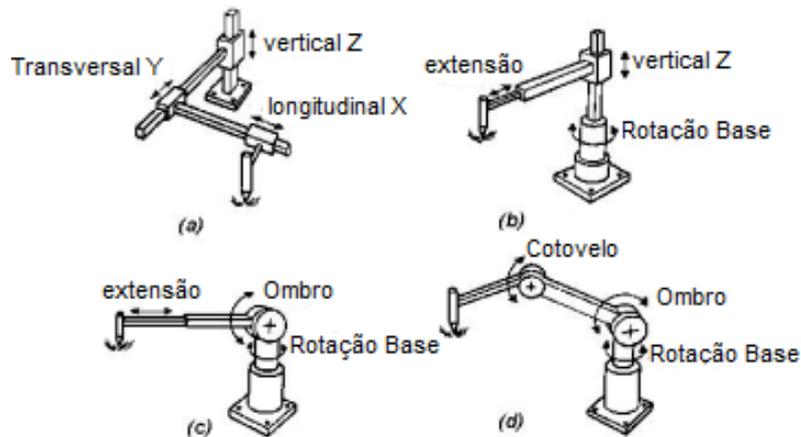
Em síntese, existem quatro tipos principais de robôs industriais empregados nas práticas de soldagem, como mostra a Figura 15. Os robôs do tipo retangular ou cartesiano movem a tocha nas três direções, x, y e z, dentro de um volume de forma retangular. Esse tipo de robô é bastante empregado para a produção de soldas com perfis lineares.

O robô cilíndrico, de forma similar ao retangular, utiliza-se movimentos de deslizamentos em duas direções (vertical “z” e extensão “x”) e movimento de rotação em uma das juntas. Tal robô consegue estabelecer um espaço de trabalho cilíndrico.

Outro tipo de robô, também, empregado na soldagem é o esférico ou polar que apresentam um eixo deslizante e dois eixos de rotação. Este robô assume um volume de trabalho na forma esférica.

Por fim, o robô do tipo articulado assume somente movimentos de rotação e, por isso, apresenta um espaço de trabalho mais complexo e irregular. Por este motivo, este tipo de robô

é bastante adequado para desempenhar as atividades de soldagem, lineares ou fora de posição. Por apresentar grande mobilidade, este robô é o mais utilizado nos setores de soldagem.



**Figura 15** – Configurações básicas de robôs industriais empregados na soldagem. a) retangular; b) cilíndrico; c) esférico e d) articulado.

Fonte: Bracarense et al., 2002

De modo geral, um sistema de soldagem por robô ou célula robótica (Figura 16) apresenta alguns componentes básicos, tais como:

1. **Robô:** Deve apresentar vários graus de liberdade, idealmente 6, destreza (precisão), elevado envelope de trabalho, repetibilidade, alta velocidade de deslocamento, etc.
2. **Controle computacional do robô:** Deve apresentar técnicas de programação, sistema de feedback de controle, tamanho da memória, armazenamento de programas, interfaces e softwares especiais de soldagem.
3. **Fonte de energia para soldagem:** Deve apresentar ciclo de trabalho elevado, desejável 100%, interfaces com o controle do robô.
4. **Equipamentos e acessórios para soldagem a arco elétrico:** Deve conter alimentador de arame, interface com o controle do robô, tocha de soldagem, cabos de energia, estação do operador, equipamentos de segurança e ferramentas para alinhamento.



**Figura 16** – Célula robótica para soldagem. a) robô; b) controle do robô; c) fonte de soldagem; d) alimentador de arame; e) rolo de arame; f) cilindro de gás; g) tocha e h) mesa de soldagem.

Fonte: Bracarense et al., 2002

Um robô, similarmente a um soldador, pode soldar qualquer tipo de junta. Entretanto, para considerar a robotização do processo de soldagem para a fabricação de uma determinada peça ou dispositivo, deve-se considerar a possibilidade de repetibilidade e a quantidade de peças a serem produzidas, ou seja, um sistema automatizado para a soldagem deve ser empregado em produções seriadas que necessitam de cordões de solda similares.

Normalmente, a soldagem robotizada é utilizada, de forma eficiente, em juntas sobrepostas, de topo, em T ou em L, em que se utiliza um único passe. Isso não quer dizer que a soldagem de peças de grande espessura e chanfradas não sejam possíveis de serem feitas.

Na prática, algumas regras são empregadas para garantir o sucesso do processo. Uma destas regras diz que a abertura entre as partes a serem soldadas não pode ser superior a metade do diâmetro do eletrodo. Sendo assim, assumindo um eletrodo de 1,0 mm de diâmetro, a repetibilidade do processo só ocorrerá se o espaço entre as juntas forem menor que 0,5 mm.

### 3 – METODOLOGIA

Os testes práticos foram realizados na linha de produção de uma empresa de autopeças de grande porte, onde os corpos de prova foram extraídos de componentes estampados dos próprios produtos fabricados.

#### **3.1 Materiais utilizados**

##### 3.1.1 Material base

Como material de base, foram utilizadas chapas de aço HSLA (*High Strength Low Alloy*) cobertas por uma camada galvânica de zinco. Este aço é muito empregado na indústria automotiva para a fabricação de componentes estruturais dos veículos, tais como a carroceria e alguns componentes da suspensão.

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas as principais propriedades mecânicas e a composição química deste aço, respectivamente.

**Tabela 6 - Propriedades Mecânicas Especificadas do Metal de Base**

| PROPRIEDADES MECÂNICAS AÇO HSLA MICROLIGADO |                      |                       |                      |                      |                      |
|---|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Classificação                               | Limite de Escoamento | Limite de Resistência | A <sub>50%</sub> Min | A <sub>80%</sub> Min | Camada de Zinco (µm) |
| HSLA  | 420                  | 480                   | 22                   | 20                   | 10-12                |

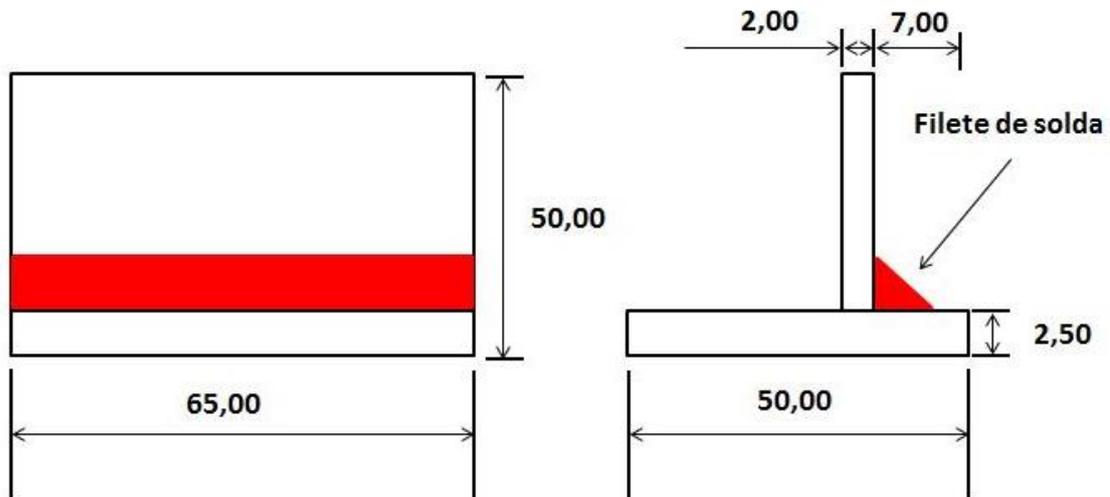
Fonte: Autor

**Tabela 7 - Composição Química Especificadas do Metal de Base**

| COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO HSLA MICROLIGADO |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Classificação                           | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Al    | Ti    | Nb    | Nb+Ti+V   |
|   | % Max | % Min | % Max | % Max | % Range   |
| HSLA                                    | 0,12  | 0,60  | 1,60  | 0,030 | 0,025 | 0,015 | 0,15  | 0,09  | 0,01-0,22 |

Fonte: Autor

Os corpos de prova apresentam uma junta em T e são compostos por chapas finas de aço microligado de duas espessuras distintas (2,0 mm e 2,50 mm), conforme esquema mostrado na Figura 17.



**Figura 17** – Corpo de Prova, junta em T dimensões em mm.

Fonte: Autor

### 3.1.2 Metal de adição

Para execução dos testes, foram utilizados arames maciços, ER 70S-6 e ER 70S-3, com diâmetro de 1,2 mm. Os arames utilizados foram fabricados conforme norma AWS A 5.18 pela empresa Belgo Bekaert Arames. A composição química dos arames é mostrada na tabela 8.

**Tabela 8** - Composição Química Especificada do Metal de Adição

| COMPOSIÇÃO QUÍMICA ARAMES ER70-S3 E ER70-S6 |            |         |           |       |       |      |      |      |      |      |
|---|------------|---------|-----------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| Classificação                               | C          | Mn      | Si        | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   | V    | Cu   |
| ER70S-3                                     | 0,06-0,015 | 0,9-1,4 | 0,45-0,75 | 0,025 | 0,035 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,03 | 0,50 |
| ER70S-6                                     | 0,06-0,015 | 1,4-1,8 | 0,8-1,15  |       |       |      |      |      |      |      |

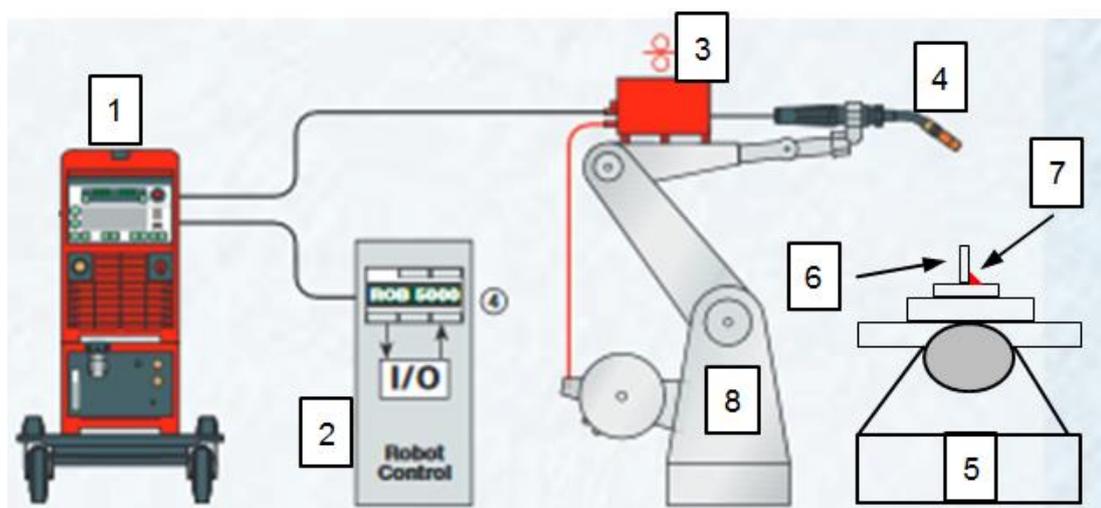
Fonte: Autor

### 3.1.3 Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado neste experimento foi uma mistura gasosa contendo 82% Argônio e 18% CO<sub>2</sub>. A vazão do gás de proteção foi ajustada em 15 l/min e medida no bocal da tocha do robô com o auxílio de um bibímetro.

### 3.2 Equipamentos Utilizados

Os testes de soldagem foram realizados com os seguintes equipamentos: Robô Comau C5G, Braço Comau Smart 5NS 12 – 1.85, Fonte para soldagem a arco Fronius TPS 4000, Alimentador do arame Fronius VR 1500 acoplado ao Braço Comau, Tocha de soldagem Fronius Robacta 500, dispositivo de soldagem automatizado para posicionamento e travamento das peças antes da soldagem, Figura 18.



**Figura 18** - Sistema esquemático do processo de soldagem. 1) Fonte de soldagem 2) Controlador de robô, 3) Alimentador de Arame, 4) Tocha de soldagem, 5) Dispositivo de soldagem, 6) Corpo de prova, 7) Filete e 8) Braço manipulador do robô.

Fonte: Catálogo Técnico Fronius – Robacta – Robacta Drive (2008) / Autor

A família de robôs Comau Smart 5NS é específica para aplicações de manipulação rápida e soldagem a arco. O Braço Comau Smart 5NS 12 – 1.85 Arc é do tipo Antropomorfo com 6 graus de liberdade. A fixação do braço pode ser feita no solo (modo standard) ou customizada conforme necessidade do cliente. A Figura 19 exibe, de forma esquemática, o Braço Comau.

As fontes de soldagem sinérgicas Trans Puls Synergic TPS 4000, Figura 20, do tipo inversora sinérgica são altamente versáteis tendo uma ampla aplicação na soldagem dos aços e de outros metais não ferrosos.



**Figura 19** - Braço Comau Smart 5-NS 12-1.85 Arc

Fonte: Manual de Instrução Comau / Especificações Técnicas (2010)



**Figura 20** – Fonte de soldagem TPS 4000

Fonte: Autor

Alimentador de arame Fronius VR 1500 (Figura 21) para robôs é pequeno, leve, regulado digitalmente, equipado com sistema de 4 roletes. De acordo com a necessidade, o arame pode ser alimentado com as seguintes faixas de velocidade: 0-12, 0-22 e 0-30 m/min.



**Figura 21** - Alimentador de arame Fronius VR 1500

Fonte: Catálogo Técnico Fronius (2008)

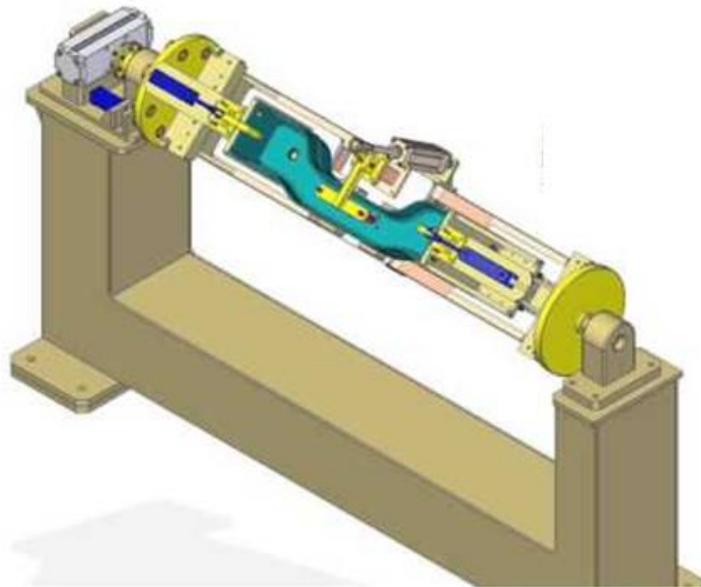
A tocha de soldagem para robôs Robacta 500 do Fabricante Fronius, é refrigerada a água com capacidade de trabalho de até 500 A com ciclo de trabalho de 100%.



**Figura 22** - Tocha Robacta 500

Fonte: Catálogo Técnico Fronius – Robacta – Robacta Drive (2008)

Para soldagem dos corpos de prova, foi utilizado um dispositivo de soldagem automatizado que trabalha sincronizado com o Braço Comau Smart 5NS 12 – 1.85 Arc, similar ao mostrado no desenho esquemático da Figura 23.



**Figura 23 - Dispositivo de Soldagem**

Fonte: <https://i.ytimg.com/vi/ef8M4TMcK5w/hqdefault.jpg>

Após a soldagem, os corpos de prova foram cortados por uma serra fita horizontal do fabricante Shark e modelo 332 SXI EVO. Cada corpo de prova cortado resultou em amostras que foram lixadas com o emprego de uma politriz universal do fabricante Arotec, modelo AROPOL-E.

As amostras retiradas dos corpos de prova foram avaliadas macrograficamente com o auxílio do equipamento Welding Expert 5, Figura 24.



**Figura 24 - Equipamento Welding Expert 5**

Fonte: Autor

### 3.3 - Procedimento Experimental

Para executar o procedimento experimental foram soldados 10 corpos de prova cujas cinco primeiras peças foram unidas utilizando o arame ER 70S-6 e as cinco últimas empregando o eletrodo ER 70S-3.

Para a execução da soldagem, o bico de contato da tocha foi trocado por um novo para iniciar a série de testes e as peças foram limpas com desengraxante, identificadas, posicionadas e travadas no dispositivo automático. Em seguida foi realizada a soldagem empregando os parâmetros exibidos na Tabela 9.

**Tabela 9 - Parâmetros de Soldagem**

| Tensão (V) | Velocidade de alimentação (m/min) | Velocidade de Soldagem (mm/min) | DBCP (mm) | Vazão de Gás (L/min) | Transferência metálica | Rendimento Térmico ( $\eta$ ) |
|------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------|----------------------|------------------------|-------------------------------|
| 19         | 6,8                               | 720                             | 16        | 15                   | Curto-circuito         | 0,85                          |

Fonte: Autor

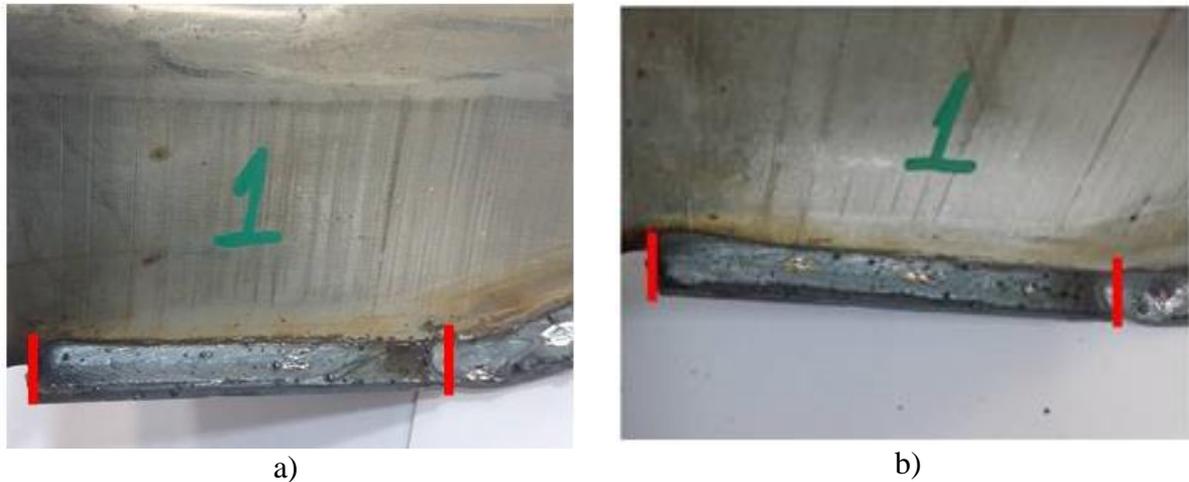
#### 3.3.1 - Inspeção visual dos cordões de solda

Após a soldagem foi realizada inspeção visual dos corpos de prova. A Figura 26 mostra fotografias dos cordões soldados com o arame ER 70S-6 (a), e com o eletrodo ER70S-3 (b). Tais cordões referem-se ao primeiro corpo de prova soldado respectivamente pelos dois arames. O restante dos corpos de prova apresentou um perfil morfológico similar os cordões apresentados na Figura 25.

Percebe-se nos cordões a presença de certa quantidade de respingos e de escória vítrea (regiões dourada). O componente soldado, como relatado, faz parte da suspensão do veículo e está sujeito a diversas cargas (verticais, laterais, longitudinais) estáticas ou dinâmicas que em conjunto com descontinuidades superficiais pode resultar em falha precoce do componente.

A princípio, os cordões de solda não apresentaram defeitos superficiais, mordeduras, porosidades e falta de fusão da margem da solda (sobreposição), que na presença de

carregamento cíclicos ou constantes poderiam atuar como concentradores de tensão e pontos de nucleação de trincas.



**Figura 25-** Cordões de Solda: a) Arame ER70S-6 e b) Arame ER70S-3

Fonte: Autor

### 3.3.2 Análise macrográfica das amostras

Após a soldagem dos corpos de prova, estes foram encaminhados para o laboratório onde se realizou o seu corte. O corte inicial foi apenas para extrair as partes de interesse dos corpos de prova.

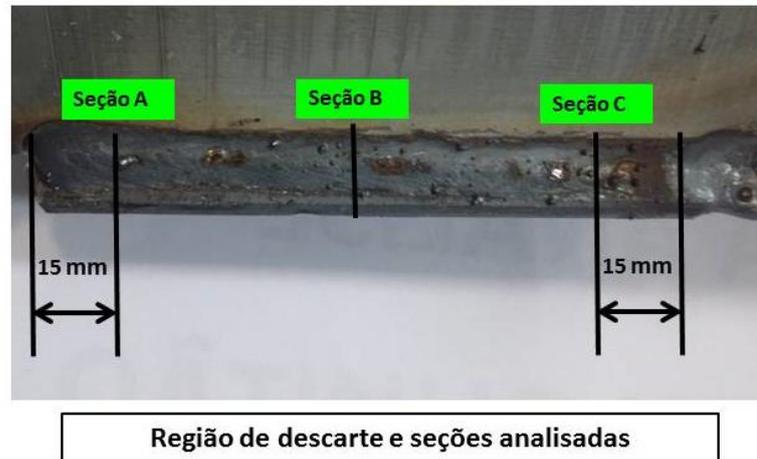
Na segunda etapa, as regiões de interesse extraídas foram cortadas, por uma máquina policorte, em três seções distintas, a fim de realizar o ensaio macrográfico das amostras. A Figura 26 mostra as três seções do corpo de prova que foram cortadas.

Após o corte dos corpos de prova, as seções obtidas foram lixadas utilizando as lixas 80#, 100# e 120#, com o auxílio de uma politriz, e, em seguida, foram atacadas com nital 2%.

As amostras atacadas, então, foram analisadas com a utilização do equipamento Welding Expert 5, em que se procurou identificar:

- Existência de porosidade interna,
- Comprimento das pernas de solda,
- Comprimento da garganta de solda;

- Penetração da solda;
- Profundidade de mordedura.



**Figura 26** - Seções do cordão de solda

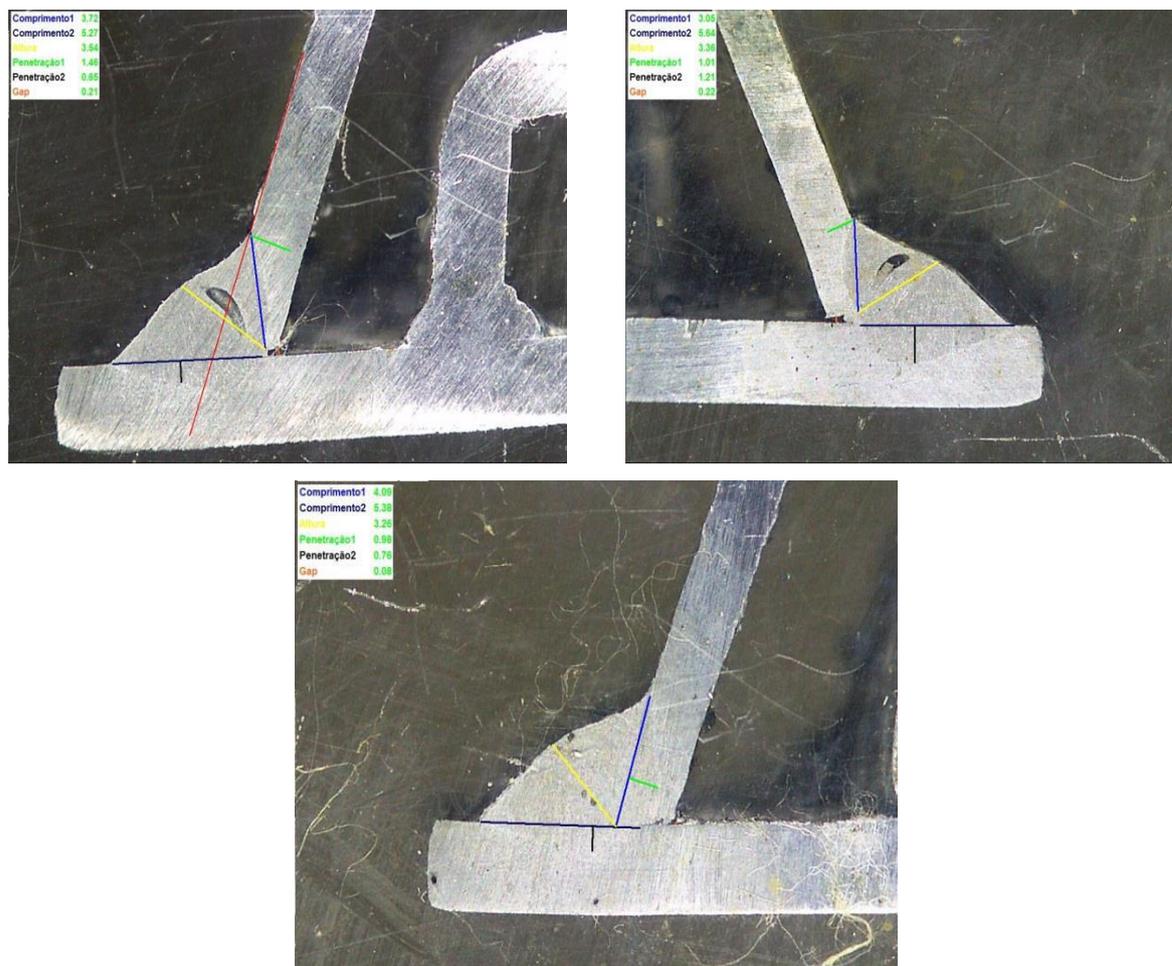
Fonte: Autor

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *4.1 – Análise da Formação de Porosidade no Interior do Cordão de Solda*

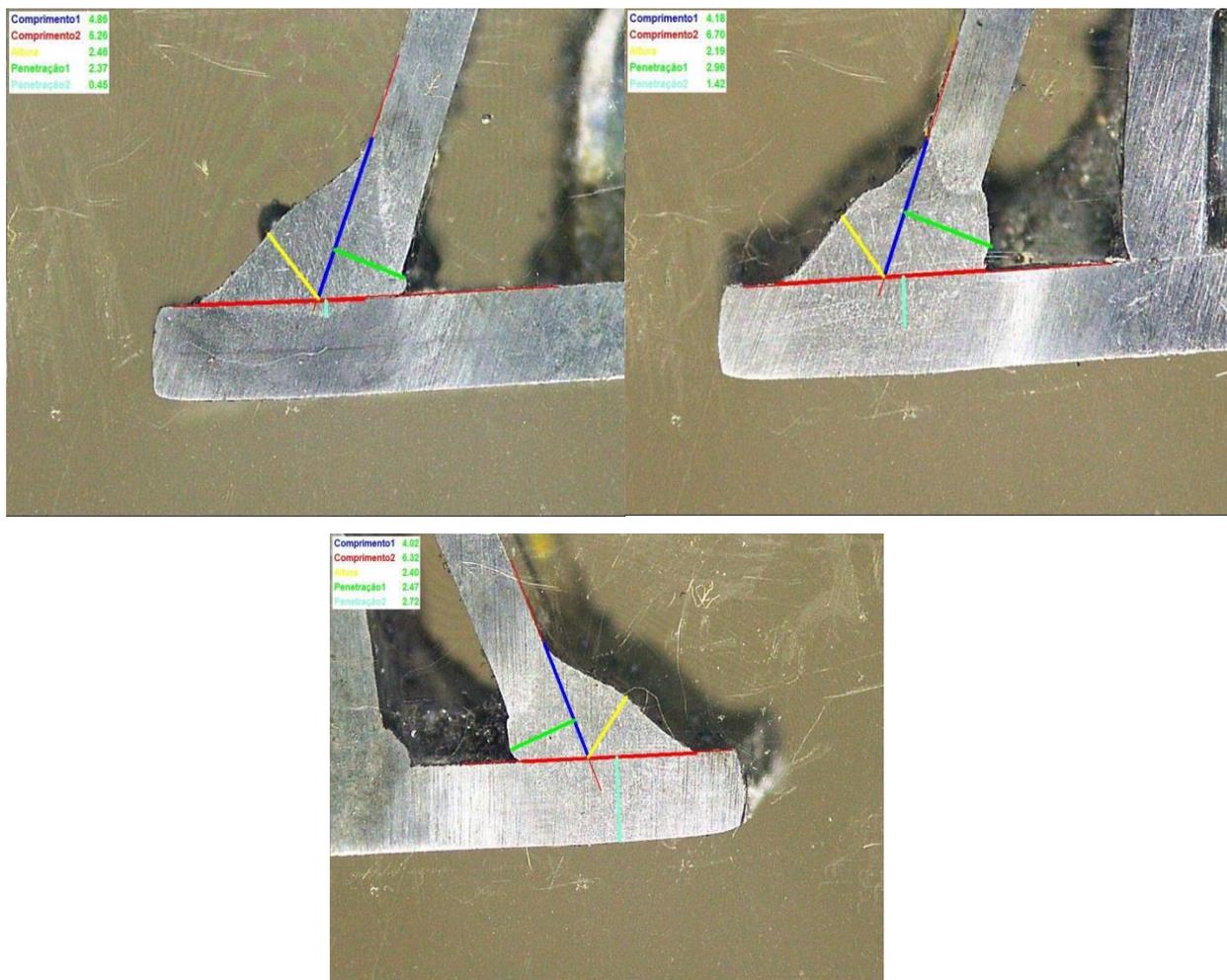
Através das análises macrográficas verifica-se que os corpos de prova soldados com o arame ER 70S-6 apresentaram uma densidade de poros maior que os cordões soldados com o arame ER70S-3. A Figura 27 e 28 mostram algumas seções dos corpos de prova soldados com os dois arames.

Em resumo, 6 das 15 seções analisadas (40%) soldadas com o primeiro arame apresentaram poros internos, enquanto os corpos de prova soldados com o segundo arame apresentaram porosidade somente em 1 das 15 seções analisadas (6,67%).



**Figura 27** - Seções dos cordões de solda feitos empregando o arame ER70S-6

Fonte: Autor



**Figura 28** - Seções dos cordões de solda empregando o arame ER70S-3

Fonte: Autor

Nas duas primeiras imagens da Figura 27, os cordões de solda apresentaram porosidades com morfologia vermiforme. Já a última macrografia apresentou poros alinhados de pequeno diâmetro. Poros com morfologias vermiformes devem ser analisados com mais cuidado, pois estes apresentam um perfil não esférico e dimensões maiores que os poros alinhados. Neste contexto, o perfil vermiforme atua como maior concentrador de tensão se comparado com perfis esféricos.

A princípio, poros vermiformes acontecem quando a velocidade de evolução do gás é aproximadamente igual à velocidade de solidificação do metal de solda. A ocorrência de poros alinhados, em geral, acontece quando a velocidade de solidificação é maior que a velocidade de evolução do gás.

Levando em consideração que a peça foi devidamente limpa e que não existem impurezas no metal de base, de adição e no gás de proteção, acredita-se que tais porosidades sejam causadas

pela presença da camada de zinco que é vaporizada pelo arco elétrico se evapora resultando nesta descontinuidade.

A norma da empresa onde os ensaios foram realizados que define os critérios de aceitação de descontinuidades em soldas estabelece a realização de ensaios específicos com o objetivo de mensurar a severidade de cada tipo de descontinuidade.

Os critérios de aceitação para porosidade em soldas contemplam somente poros externos e estão exibidas na Tabela 10.

**Tabela 10 - Critérios de Aceitação de Porosidade**

| <b>Critérios de aceitação de porosidade</b>               |  |
|---|--|
| <b>Tipos de Porosidade</b>                                | <b>Para cada 35 mm de comprimento do cordão de solda</b> |
| Porosidade Superficial Agrupada $\varnothing \leq 0,7$ mm | 5  |
| Porosidade Superficial $\varnothing \leq 2,0$ mm          | 3  |

Fonte: Autor

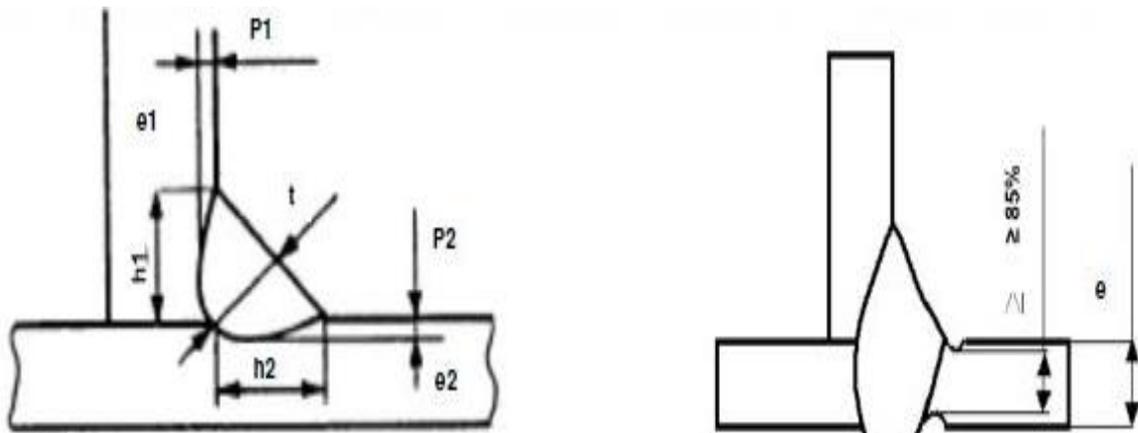
Segundo MODENESI, MARQUES E SANTOS (2012) porosidade fina e dispersa pode ser tolerada em muitas aplicações, pois não afeta apreciavelmente as resistências mecânica e à fadiga da solda. Além disso, MACHADO (2010) afirma que a resistência à fadiga é menor no caso da existência de poros superficiais do que no caso de poros internos.

A Figura 28 exhibe os cordões de solda feitos utilizando o arame ER 70S-3. Nota-se que todos os cordões de solda apresentaram penetração total da junta. O mesmo resultado não foi observado nos cordões realizados com o eletrodo ER70S-6. Além disso, de modo geral, não foram observadas porosidades internas nos cordões de solda quando se utilizou o arame ER70S-3.

Estas diferenças foram associadas às correntes de soldagem empregadas nos dois casos. Apesar de se ter usado os mesmos parâmetros, em particular a velocidade de alimentação, a soldagem com o arame ER70S-6 apresentou uma menor corrente elétrica em comparação com a soldagem com o arame ER70S-3. Este fato será melhor detalhado no tópico 4.2.

#### **4.2 – Análise da Geometria dos Cordões de Solda**

Os cordões de solda para serem aprovados precisam atender critérios mínimos de aceitação referentes a comprimento da perna do filete, penetração, comprimento da garganta e profundidade de mordedura. Todas as seções analisadas foram aprovadas conforme critérios de aceitação do conjunto de normas internas da empresa. A Figura 29 exibe de forma esquemática os valores de aceitação para cada uma das dimensões, da junta soldada, relatas.



| Perna 1 (h1)                   | Perna 2 (h2)                   | Penetração 1(P1)                      | Penetração 2(P2)                        | Garganta (t)                            | Mordedura                               |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---|---|---|
| ≥ espessura da chapa mais fina | ≥ espessura da chapa mais fina | ≥ 20% da espessura da chapa mais fina | ≥ a 20% da espessura da chapa mais fina | ≥ a 70% da espessura da chapa mais fina | ≤ a 15% da espessura da chapa mais fina |

**Figura 29** - Critério de Aceitação da Geometria da Junta Soldada

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 11 percebe-se que as juntas soldadas com o eletrodo ER70S-3 apresentaram pernas e penetrações maiores em comparação com juntas soldadas com o arame ER 70S-6.

Tal fato pode estar associado a menor resistividade elétrica do primeiro arame em relação ao segundo.

MODENESI, FERNANDES E AVELLAR (1999) revelam que para uma mesma condição de soldagem o arame ER 70S-3, por conter um menor teor de silício e manganês, apresenta menor resistividade elétrica em relação ao arame ER 70S-6. Neste contexto, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, o ER 70S-3 deve requerer uma corrente superior ao arame ER 70S-6, o que parece ter acontecido no presente trabalho (Tabela 12).

**Tabela 11** - Geometria dos Cordões de Solda

| ARAME          | GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA |                 |             |             |                      |                   |
|----------------|--------------------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|-------------------|
|                | Perna 1<br>(mm)                | Perna 2<br>(mm) | P1<br>(mm)  | P2<br>(mm)  | t (garganta)<br>(mm) | Mordedura<br>(mm) |
| <b>ER70S-6</b> | 3,62 ± 0,25                    | 5,36 ± 0,26     | 1,15 ± 0,30 | 0,86 ± 0,22 | 3,02±0,18            | 0,00              |
| <b>ER70S-3</b> | 4,31 ± 0,37                    | 7,10 ± 0,52     | 2,18 ± 0,21 | 1,32 ± 0,45 | 3,32±0,37            | 0,00              |

Fonte: Autor

**Tabela 12** – Corrente de Soldagem utilizada com os arames ER70S-6 e ER70S-3

| <i>CORRENTE DE SOLDAGEM (A)</i> |             |
|---------------------------------|-------------|
| <b>ER70S-6</b>                  | 178,6 ± 2,1 |
| <b>ER70S-3</b>                  | 194,4 ± 2,5 |

Fonte: Autor

Com base nesses resultados, a soldagem com o arame ER70S-3 apresenta uma corrente de soldagem aproximadamente 15 A maior do que a obtida na operação que utiliza o outro eletrodo. Esta diferença pode ser uma causa para a diferença da morfologia do cordão de solda apresentada em função do emprego dos dois arames. Sabe-se que um aumento da corrente proporciona um aumento do aporte térmico de soldagem que contribui para uma maior penetração, maior largura do cordão de solda, além de, propiciar um tempo maior para a evolução dos gases da poça de fusão, podendo reduzir, assim, o índice de porosidade. Tal fato pode ser comprovado pelos dados apresentados na Tabela 11, Tabela 12 e nas imagens macrográficas das Figuras 27 e 28.

## 5 – CONCLUSÃO

- Os cordões de solda realizados com os dois arames atendem às normas internas da empresa do setor de autopeças onde os testes foram realizados no quesito de geometria dos cordões de solda, conforme mostram os dados apresentados na Figura 29, Tabela 11 e Tabela 12.
- A corrente de soldagem obtida com o eletrodo ER70S-3 foi maior do que a obtida utilizando o arame ER70S-6 com a mesma velocidade de alimentação de arame. Este efeito pode ser explicado pela diferença de resistividade elétrica dos arames resultante de suas diferenças de composição química.
- A análise da geometria dos cordões de solda realizados com os dois arames mostra que a utilização do arame ER70S-3 proporcionou cordões com maiores penetrações, larguras de cordão e garganta de solda. Este efeito foi associado à maior corrente de soldagem obtida quando este arame foi usado,
- Os cordões obtidos com o arame ER70S-3 apresentaram menor densidade de poros em relação aos feitos com o eletrodo ER70S-6. Tal fato, também, pode estar ligado ao aumento da energia de soldagem quando se utiliza o arame ER70S-3.
- Alguns cordões feitos com o arame ER70S-6 apresentaram poros vermiformes que requerem uma atenção especial, pois podem significar perda de resistência mecânica do conjunto soldado.
- Os resultados obtidos sugerem que um aumento da corrente de soldagem quando se utiliza o arame ER70S-6 pode reduzir o problema de porosidade interna observado nos cordões feitos com este arame. Esta medida poderia aumentar o tempo de evolução dos gases da poça de fusão.

## **6 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

- BADRI, Narayanan et. al. Solutions for Welding Zinc Coated Steels. Cleveland, 2015.
- BAJIC, Byn et.al. *The impact of changes in filler metal chemical composition and heat input on microstructure and Mechanical Properties During Welding X65 Steel was Evaluated*. Welding Journal, 2011.
- BHATTACHARYA, Debanshu. *Microalloyed Steels For The Automotive Industry*. São Paulo, 2014.
- BOUMERZOU, Zakaria et. al. *Effect of Welding on Microstructure an Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel*. Scientific Research Publishing, 2010.
- CALLISTER, William D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.
- CATÁLOGO de produtos ESAB: consumíveis e equipamentos para soldagem e corte. Contagem (MG): ESAB, 2013.
- CHIAVERINI, Vicente. *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos*. 7. ed. São Paulo: ABM, 2002.
- COLPAERT, P. H. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2008. 672 p.
- EKICI, M; OZSARAC, U. *Investigation of Mechanical Properties of Microalloyed Steels Joined by GMAW and Electrical Arc*. Antalya, 2012.
- GORNI, Antônio Augusto et. al. *Influência dos Elementos de Liga sobre o efeito da Temperatura na Resistência À Deformação dos Aços*. Rio de Janeiro. 2006.
- GORNI, Antônio Augusto. *Aços Avançados de Alta Resistência: microestrutura e propriedades mecânicas*. Revista Corte e Conformação de Metais. São Paulo, 2008.
- GORNI, Antônio Augusto; CAVALCANTI, Celso Gomes. *Efeito dos Elementos de Liga Sobre a Resistência a Quente de Aços Carbono e Microligados*. São Paulo, 1997.
- GORNI, Antônio Augusto; SILVEIRA, Jose H. Dolabela; REIS, Jackson S. de Souza. *Aço Microligado na Fabricação de tubos Soldados com Grande Diâmetro*. São Paulo, 2009.
- JOSEPH, Andy et al. Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 56, 2003, Bucharest. XX-11779-03. Bucharest, 2003.
- LIMA, Márcio Lobo Rocha. *Estudo Comparativo entre Aços Laminados a Quente Microligados com Vanádio, Nióbio e Titânio*. Departamento de Metalurgia e Materiais. Universidade Federal de Ceará, UFC. Monografia Bacharel em Engenharia Mecânica. Fortaleza, 2013.
- MACHADO, Paulo Jorge. *Avaliação da Resistência Estrutural de Juntas Soldadas de Um Quadro de Uma Bicicleta*. Departamento de Engenharia de Produção. Instituto Politécnico de Setúbal. Escola Superior de Tecnologia de Setúbal. Dissertação de Mestrado. Setúbal.2010.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

- MODENESI, Paulo J. *Soldabilidade dos aços transformáveis*. Belo Horizonte: [s.n.], 2012.
- MODENESI, Paulo J; MARQUES, Paulo Villani e SANTOS, Dagoberto B. *Introdução a Metalurgia da soldagem*. Belo Horizonte: [s.n.], 2012.
- MODENESI, Paulo J; MARQUES, Paulo Villani. *Introdução aos processos de soldagem*. Belo Horizonte: [s.n.], 2000.
- MODENESI, Paulo José; FERNANDES, Mônica Cruz; RICARDO C. Avellar. *Influência dos Teores de Silício e Manganês do Arame Eletrodo nas Características Operacionais da Soldagem GMAW-CO<sub>2</sub>*. Congresso Nacional de Soldagem, CONSOLDA. Belo Horizonte, 1999.
- MODENESI, Paulo. J. *Introdução à física do arco elétrico*. Belo Horizonte: UFMG, 2002.
- PERINI, Gustavo Felipe. *Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga Soldados*. Departamento de Materiais. Universidade de Caxias do Sul. Dissertação de Mestrado. Caxias do Sul, 2008.
- ROMANO, Vitor Ferreira. *Robótica Industrial: aplicação na indústria de manufatura e de processos*. Capítulo 8. Ed. Edgard Blucher. São Paulo. 2002.
- SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo: Artliber, 2008. 284 p.
- SOLDAGEM MIG/MAG. Brasil: ESAB, 2005.
- WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Eduardo; MELLO, Fábio Décourt Homem de (Coord.). *Soldagem: processos e metalurgia*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 494 p.