

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
DE MINAS GERAIS



SOLDAGEM “MIG-BRAZING”: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E  
DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA JUNTA BRASADA/SOLDADA

**Aluno: Matheus Henrique Moreira Souza**

**Belo Horizonte**

**2013**

MATHEUS HENRIQUE MOREIRA SOUZA

SOLDAGEM “MIG-BRAZING”: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E  
DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA JUNTA BRASADA/SOLDADA

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Ivan J. de Santana

**Belo Horizonte**

**2013**

MATHEUS HENRIQUE MOREIRA SOUZA

SOLDAGEM “MIG-BRAZING”: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E  
DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA JUNTA BRASADA/SOLDADA

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 26/02/14

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Ivan J. de Santana

---

Prof. Joel Romano Brandão

---

Prof. Euclides Gonçalves Martins Filho

## RESUMO

O processo MIGBrazing, também conhecido como solda brasagem-MIG, utiliza o princípio do processo GMAW e faz o uso, em geral, de uma liga de bronze, cujo ponto de fusão é inferior ao do metal base. Esse processo de solda brasagem-MIG tem grande aplicação nas indústrias automobilísticas para a união de chapas de aço galvanizadas. Neste trabalho, investigou a união de chapas finas de aço carbono SAE 1020 utilizando dois processos distintos, a soldagem MIG/MAG convencional e a solda brasagem-MIG. Nesse contexto, após a realização dos testes de soldagem e solda brasagem-MIG, avaliou-se o aspecto físico dos cordões de solda e por intermédio da microscopia óptica foi possível obter imagens micro e macroestruturais dos cordões soldados. Por fim, foi feito ensaios de tração de modo a caracterizar as propriedades mecânicas das juntas soldadas e solda brasadas. Pode-se perceber que os valores de resistência mecânica obtidos pelo processo MIGBrazing foi bem próximo aos valores obtidos pelo processo GMAW convencional.

Palavras-Chave: MIGBrazing. Solda Brasagem-MIG. MIG/MAG. GMAW. Aço carbono.

## **ABSTRACT**

The MIGBrazing process, also known as braze welding-MIG , uses the principle of the process GMAW , and it uses in general a bronze alloy whose melting point is lower than the base metal. This braze welding-MIG process has large application in automobile industries for joining galvanized steel sheet. At this work , the joining of thin sheets of carbon steel SAE 1020 using two distinct processes, the conventional MIG / MAG welding and braze welding-MIG, were investigated. In this context, after the preformation of welding and weld brazing-MIG tests, the physical appearance of the weld was evaluated and through intermediate of optical microscopy was possible to obtain micro and macro-structural images of the weld. Finally, tensile tests were performed in order to characterize the mechanical properties of the welded joints and brazed weld. It can be noticed that the values of mechanical resistance obtained by the MIGBrazing process was very close to the values obtained by conventional GMAW process.

Words-Key: MIGBrazing. Braze Welding-MIG. MIG/MAG. GMAW. Carbon Steel

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida e por me manter em um caminho de dignidade e perseverança, a fim de atingir meus objetivos.

Aos meus familiares, em destaque, meus pais que sempre me apoiaram e que são os maiores responsáveis por minhas vitórias.

Ao meu orientador, Prof. Ivan José de Santana por sua dedicação e vontade em delinear as fases do meu trabalho, além de proporcionar uma ajuda imprescindível para a soldagem dos corpos de prova.

Ao engenheiro mecânico Marcelo Ferreira Batista e toda equipe da QualySolda, pela compreensão e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Joel Romano Brandão, pela ajuda na montagem do dispositivo de fixação, utilizado no processo de soldagem.

Ao Graduando Leonardo Viana Dias, pela ajuda fornecida na realização do procedimento de soldagem e na preparação dos corpos de prova para as análises macro e microestruturais.

A todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meu solene reconhecimento e agradecimento.

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 - Gases e misturas para soldagem GMAW .....	29
Tabela 2.2 - Condutividade elétrica e térmica de alguns materiais .....	40
Tabela 2.3 - Composição Química de Arames Consumíveis .....	42
Tabela 2.4 - Rendimento Térmico para Alguns Processos de Soldagem .....	46
Tabela.3.1 - Composição Química (% peso) dos Arames Eletrodos da BRASTAK ..	55
Tabela 3.2 - Composição Química (% peso) do Arame Eletrodo da ESAB .....	55
Tabela 3.3 – Parâmetros de Soldagem pelo Processo GMAW .....	57
Tabela 3.4 - Parâmetros de Utilizados na Solda Brasagem .....	58
Tabela 4.1 - Resultados dos Ensaios de Tração das Juntas de Topo .....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Soldagem por deformação.....	16
Figura 2.2 - Representação esquemática da soldagem por fusão .....	16
Figura 2.3 - Representação das Regiões do Arco Elétrico: (a) Queda Catódica, (b) Queda Anódica e (c) Queda na Coluna. ....	18
Figura 2.4 - Representação do Jato de Plasma .....	19
Figura 2.5 - Esquema do processo de soldagem GMAW .....	22
Figura 2.6 - Forças Atuantes na Transferência Metálica .....	24
Figura 2.7 - Representação Esquemática do Efeito Pinch .....	25
Figura 2.8 - Efeito da Reação por Vaporização.....	26
Figura 2.9 - Representação esquemática da transferência de curto circuito.....	27
Figura 2.10 - Representações esquemática da transferência globular .....	27
Figura 2.11 - Representações do modo de transferência metálica do tipo spray.....	28
Figura 2.12 - Modo de transferência metálica pulsada.....	29
Figura 2.13 - Representação do Fenômeno de Emissão Catódica .....	31
Figura 2.14 - Esquema de atração capilar: (a) o líquido molha o tubo (b) o líquido não molha o tubo.....	33
Figura 2.15 - Líquido Molhando o Sólido com um Ângulo $\theta < 90^\circ$ .....	34
Figura 2.16 - Líquido não Conseguir Molhar o Sólido Devido ao Ângulo $\theta > 90^\circ$ .....	34
Figura 2.17- Juntas Usadas no Processo de Brasagem .....	36
Figura 2.18 - Juntas Adequadas para Brasagem a arco .....	38
Figura 2.19 - Diagrama de Fases Cu-Si.....	41
Figura 2.20 – Diagrama de Fases Fe-C.....	43
Figura 2.21 – Microestrutura de um Aço Hipoeutetóide em Função da Velocidade de Resfriamento.....	45
Figura 2.22 – Ciclo Térmico .....	47
Figura 2.23 – Repartição Térmica de uma solda. A – Zona Fundida, B – Zona Termicamente Afetada e C – Material de base .....	48
Figura 2.24 – Escoamento do calor em juntas: (a) de topo e (b) em ângulo.....	49
Figura 2.25 – Medida da diluição de: (a) um cordão depositado sobre uma chapa e (b) uma solda de topo .....	50

Figura 2.26 – Estrutura da ZTA de um aço Carbono. A- Região de crescimento de grão, B- Região de refino de grão e C- Região intercrítica.....	52
Figura 3.1 – Fluxograma do trabalho experimental .....	53
Figura 3.2- Layout das Chapas para Soldagem e Brasagem a Arco .....	54
Figura 3.3 - Máquina MIG/MAG .....	56
Figura 3.4 - Dispositivo de Fixação .....	56
Figura 3.5 – Equipamentos Utilizados para o Ensaio Metalográfico .....	59
Figura 3.6 - Microscópio Óptico.....	59
Figura 3.7 – Máquina de Ensaio de Tração Universal Modelo WPM - ZD 20 .....	60
Figura 4.1 – Micrografia do Material de Base. Ataque Nital 3%. Aumento (400X) ....	61
Figura 4.2 – Aspecto Visual dos Cordões de Solda dos Procedimentos 3 e 4.....	62
Figura 4.3 – Aspectos dos Cordões de Solda dos Procedimentos 1 e 2.....	63
Figura 4.4 – Macrografia do cordão de solda utilizando o Procedimento 3.....	64
Figura 4.5 – Micrografias do Cordão de Solda Utilizando o Procedimento 3. Aumento (400X) .....	64
Figura 4.6 – Macrografia do Cordão de Solda Utilizando o Procedimento 4 .....	65
Figura 4.7 – Micrografia do Cordão de Solda Utilizando o Procedimento 4. ....	66
Figura 4.8 – Macrografia do Cordão de Solda Empregando o Procedimento 1 .....	66
Figura 4.9 – Micrografia do Cordão de Soda Utilizando o Procedimento 1.....	67
Figura 4.10 – Macrografia do Cordão de Solda Utilizando o Procedimentos 2 .....	68
Figura 4.11 – Micrografia do Cordão de Solda Empregando o Procedimento 2. ....	68
Figura 4.12 – Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Soldadas pelo Procedimentos 1 .....	70
Figura 4.13 - Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Soldadas pelo Procedimento 2 .....	70
Figura 4.14 - Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Brasadas pelo Procedimento 3 .....	71
Figura 4.15 - Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Brasadas pelo Procedimento 4 .....	72

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	12
1.1 Objetivo Geral .....	13
1.2 Objetivo Específico .....	13
1.3 Justificativa .....	14
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1- Características Gerais da Soldagem .....	15
2.2- Processo de soldagem a arco elétrico MIG/MAG .....	21
2.2.1- <i>Modos de transferências metálicas</i> .....	23
2.2.2- <i>Gases utilizados no processo MIG/MAG</i> .....	29
2.3- Brasagem .....	32
2.4- Processo de Solda Brasagem (MIG Brazing) .....	37
2.4.1 <i>Metal de Adição para Brasagem-MIG</i> .....	39
2.4.2 <i>Utilização do Processo MIG-Brasing para Brasagem de Chapas Galvanizadas com Zinco</i> .....	42
2.5- Metalurgia da Soldagem .....	43
2.5.1 <i>Fluxo de Calor em Soldagem</i> .....	45
2.5.2 <i>Características da Poça de Fusão</i> .....	49
2.5.3 <i>Características da Zona Termicamente Afetada</i> .....	51
3- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	53
3.1- Material Base e Consumíveis Utilizados .....	54
3.2- Equipamentos .....	55
3.3- Métodos .....	57
3.3.1- <i>Testes Práticos de soldagem e brasagem a arco</i> .....	57
3.3.2- <i>Ensaio Metalográfico</i> .....	58
3.3.2- <i>Ensaio de Tração</i> .....	60
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	61
4.1- Características do Metal de Base .....	61
4.2- Solda Brasagem-MIG em Chapas de Aço SAE 1020 .....	61
4.3- Solda GMAW em Chapas de Aço SAE 1020.....	63
4.4- Avaliação das Macrografias e Micrografias dos Procedimentos Realizados ..	63

4.4.1- Solda brasagem-MIG Utilizando Arame de Cu-Si como Material de Adição .....	63
4.4.2- Solda brasagem-MIG Utilizando Arame de Cu-Al como Material de Adição .....	65
4.4.3- Soldagem GMAW Utilizando Polaridade Inversa.....	66
Soldagem GMAW Utilizando Polaridade Direta .....	67
4.5- Avaliação das Propriedades Mecânicas das Juntas de Topo .....	69
4.5.1- Procedimentos 1- Soldagem GMAW com CC <sup>+</sup> .....	69
4.5.2- Procedimento 2- Soldagem GMAW com CC <sup>+</sup> .....	70
4.5.3- Procedimento 3- Solda Brasagem-MIG Utilizando metal de adição de Cu-Si .....	71
4.5.4- Procedimentos 4- Solda Brasagem-MIG Utilizando metal de adição de Cu-Al .....	71
4.6- Avaliação dos Procedimentos Realizados .....	72
CONCLUSÃO.....	73
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74

## 1- INTRODUÇÃO

A busca por processos de união de chapas finas de aço carbono galvanizados impulsionou o desenvolvimento do processo de solda Brasagem-MIG que emprega o princípio da soldagem MIG utilizando uma liga de cobre como metal de adição. Neste processo o material de deposição possui ponto de fusão inferior ao metal base, entre 1000° e 1080°C, valores estes menores que o ponto de fusão das ligas de aço (ESAB PULSED GAS-SHIELDED METAL ARC BRAZING OF SURFACE-COATED SHEETS, 2000). Neste processo espera-se obter a união dos metais, com a fusão, somente, do metal de adição.

A união dessas chapas galvanizadas vinha sendo supridas pelo processo de soldagem a arco elétrico convencional, tais como o processo MIG/MAG. Contudo, a junta soldada apresentava elevados níveis de porosidade, respingos e queima da proteção na zona termicamente afetada (ZTA), levando a uma junta de baixa resistência mecânica.

O emprego da Brasagem-MIG promoveu a solução desses problemas por apresentar um menor aporte térmico no processo o que proporcionou uma menor volatilização da camada de zinco, maior estabilidade do arco elétrico com baixa taxa de respingos e pouca geração de poros. Além disto, o metal de adição utilizado contém grande resistência à corrosão, o que garante ao cordão de solda formado essa propriedade. Entretanto, esse processo de união utiliza materiais dissimilares para o preenchimento da junta, gerando um potencial para a corrosão galvânica.

Para união de chapas de aço carbono é comum o emprego da soldagem por fusão para garantir a união. Um processo bastante empregado para esta situação é a soldagem GMAW que estabelece um arco elétrico entre o metal de adição e o metal de base a serem unidos garantindo a fusão e a coalescência das chapas. Neste processo, apesar de se conseguir uma junta soldada com boas propriedades mecânicas, o material de base fica sujeito à solidificação, mudanças de fases na zona termicamente afetada e precipitação, fatores estes, que podem prejudicar a qualidade da junta.

Este trabalho pretende estudar a aplicação do processo de Brasagem-MIG como uma possibilidade de união de chapas finas de aço carbono, sem que estas sejam danificadas devido ao aporte térmico do processo, garanta uma junção com boa resistência mecânica e que promova a redução da zona afetada pelo calor.

De modo a comparar a união de chapas finas utilizando o processo de Brasagem-MIG e o processo de soldagem MIG/MAG convencional realizaram-se testes de soldagem e brasagem-MIG em chapas de aço carbono SAE 1020. Após estes testes, foram feitos a inspeção visual dos cordões de solda e ensaios para caracterizar as juntas soldadas. Por meio da microscopia óptica foram obtidas imagens da micro e da macroestrutura dos cordões depositados. Com o auxílio do ensaio de tração foi possível observar e garantir que as juntas brasadas atingiram valores de resistência mecânica próxima ou mesmo superiores as juntas soldadas pelo processo de soldagem GMAW convencional.

## **1.1 Objetivo Geral**

Avaliar a aplicabilidade do processo de brasagem a arco em chapas finas e compara-lo ao processo de soldagem MAG convencional.

## **1.2 Objetivo Específico**

- Avaliar os parâmetros de soldagem para a brasagem a arco de chapas finas de aço carbono.
- Avaliar a ocorrência ou não de zonas termicamente afetadas nas juntas com a utilização de técnicas metalográficas.
- Analisar se houve diluição do metal de base no metal de adição.
- Avaliar se as chapas brasadas a arco elétrico possuem uma resistência mecânica semelhante a das chapas soldadas pelo processo de soldagem MAG convencional.
- Avaliar as características da interfase entre o metal de base e o metal de adição.

### 1.3 Justificativa

- A soldagem GMAW é um dos processos mais utilizados industrialmente para a união de aços carbono, portanto avaliar as particularidades de juntas de aço carbono soldadas por este processo pode ser de grande importância.
- A brasagem a arco é um processo pouco difundido no mercado industrial, mesmo este processo podendo apresentar soluções de problemas relacionados à soldagem de chapas finas de aço carbono e aço carbono galvanizado. Em virtude disto, se faz necessário o estudo de suas características e peculiaridades.

## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1- Características Gerais da Soldagem

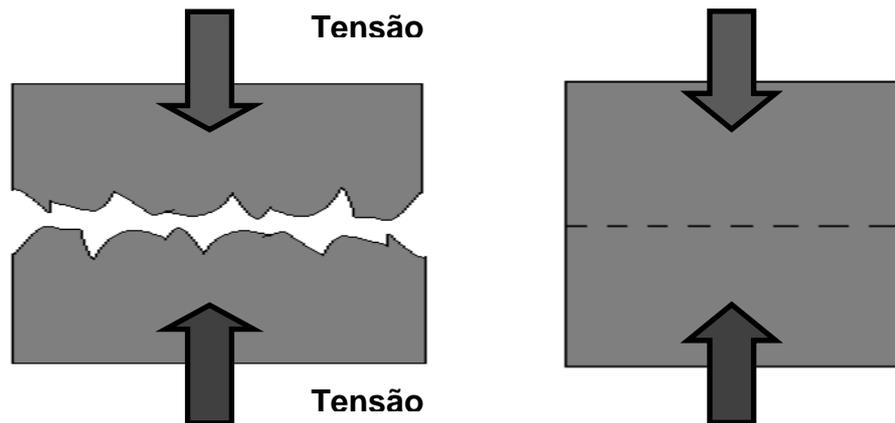
Os processos de soldagem constituem um dos principais métodos de união de metais ferrosos e não ferrosos tendo ampla aplicação industrial. A união dos metais é gerada por meio da aproximação dos átomos, até uma distância suficiente pequena, que garanta a formação de ligações químicas e metálicas. (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). Dentre várias abordagens, a *American Welding Society* (AWS) define soldagem como sendo um processo de união de materiais usado para obter a coalescência de metais e não metais, produzidas por um aquecimento até certa temperatura, com ou sem aplicação de pressão e/ou material de adição.

A formação de uma junta soldada poderia acontecer com a aproximação de superfícies a uma distância suficiente pequena, pois os átomos da superfície do sólido, ligados a menos átomos vizinhos, possuem maior nível de energia. Esse efeito pode ser visto colocando em contato íntimo dois blocos de gelo. Entretanto, isso não ocorre colocando duas superfícies metálicas em contato, exceto em casos especiais. O motivo para a soldagem, nesta situação, não ocorrer é devido a existência de obstáculos que impedem a aproximação efetiva dos átomos da superfície. Esses obstáculos acontecem, pois todas as superfícies, até as mais polidas, apresentam grande rugosidade. Além disso, as superfícies de metais estão geralmente recobertas por camadas de poeira, óleos, umidade e óxidos que juntamente com a rugosidade impedem o contato real entre as superfícies, evitando a formação da solda (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Os processos de soldagem podem ser divididos em dois grandes grupos principais. O primeiro grupo utiliza a deformação de superfícies em contato eliminando grande parte da rugosidade microscópica e submicroscópica e promovendo a diminuição da camada de óxido presente nas superfícies previamente limpas, ou seja, sem camadas de poeira e graxa. Esse grupo de soldagem permite a aproximação dos átomos das superfícies até distâncias extremamente pequenas, gerando a coalescência das superfícies. Essa aproximação garante a ligação química entre as

superfícies em contato como mostra a Figura 2.1. Uma maneira de facilitar a deformação das superfícies de contato é através do aquecimento local (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

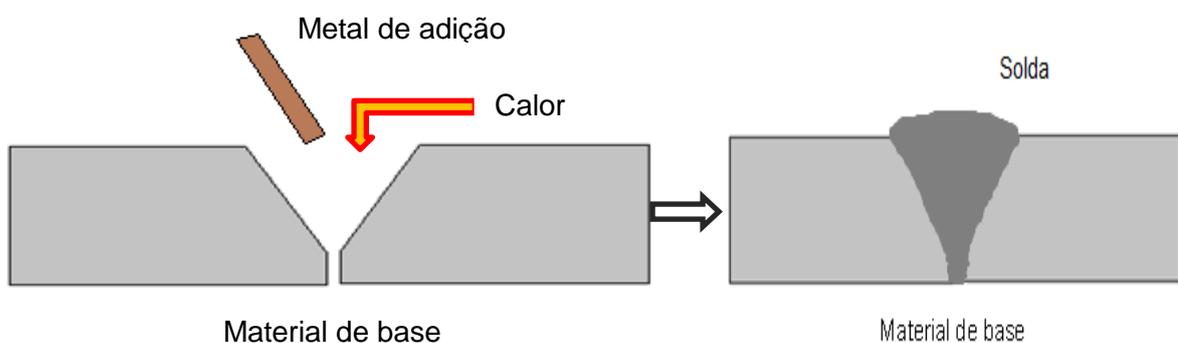
Figura 2.1 - Soldagem por deformação



Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

O segundo grupo é baseado na aplicação de calor local na região da junta até a fusão do metal base e/ou do metal de adição (quando esse for utilizado). Devido à fusão, as superfícies entre as peças são extintas, e a solda é formada após a solidificação do metal fundido (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). A Figura 2.2 detalha esse processo de soldagem

Figura 2.2 - Representação esquemática da soldagem por fusão



Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

Os processos de soldagem por fusão podem ser classificados de acordo com o tipo de energia utilizada para união e fusão das peças a serem soldadas. Duas fontes de calor bastante utilizadas são a química, como por exemplo: por meio do emprego da queima de um gás combustível, e a elétrica, que pode utilizar, por exemplo, como fonte de calor o arco elétrico constituído por plasma (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). A soldagem a arco elétrico é a de maior importância industrial na atualidade, pois consegue soldar peças de dimensões variadas apresentando alta resistência mecânica e garante, de modo geral, alta versatilidade, alta taxa de produção e, alta concentração de calor.

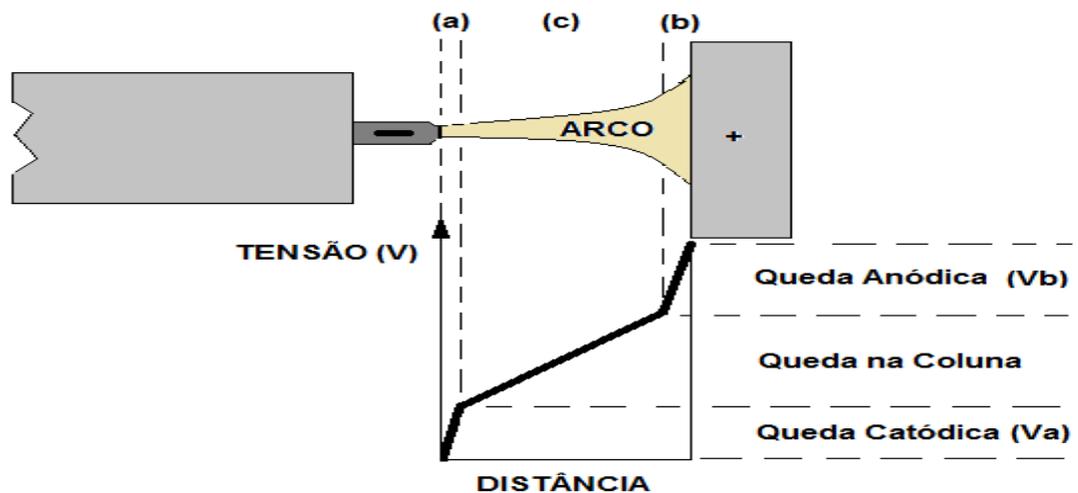
O arco elétrico pode ser definido como uma descarga elétrica entre o eletrodo e o metal de base mantida através de um gás ionizado. O arco elétrico é iniciado de diversas maneiras. A fonte de energia contém uma tensão característica, “tensão em vazio”, que favorece a abertura do arco. Quando o eletrodo entra em contato com o material de base, essa tensão em vazio cai para um valor próximo de zero e onde a corrente se torna máxima. A região de contato entre o eletrodo e a peça é fortemente aquecida por efeito Joule e, ao chegar à incandescência, ocorre o rompimento da rigidez dielétrica do ambiente e a liberação de elétrons por termoionização onde, ao mesmo tempo, há a formação de vapores metálicos que ajuda a ionização da atmosfera circundante. Ao distanciar o eletrodo da peça se dá a formação do arco elétrico, onde os valores de corrente e tensão atingiram os chamados valores de “soldagem”. O arco elétrico tem uma elevada capacidade de transformar a energia elétrica em energia térmica e conduzi-la para a peça. (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

Outra maneira de iniciar o arco elétrico é com a utilização de um dispositivo como, arco piloto, ignitor de alta frequência e controle de corrente inicial. Desde dispositivos o mais utilizado é o ignitor de alta frequência. Esse dispositivo gera um sinal de alta frequência e alta tensão que ioniza a coluna de gás entre a peça e o eletrodo, realizando a abertura do arco elétrico sem o contato entre o arame e o eletrodo. O ignitor de alta frequência é bastante empregado no processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). A ionização do gás é considerada como ionização térmica, pois ela ocorre devido à colisão entre os elétrons bem aquecidos com as moléculas de gás e íons

presentes no plasma. O calor fornecido a junta a ser soldada é formado pela movimentação de cargas elétricas (elétrons e íons) que ao colidirem geram uma enorme quantidade de calor. Porém, o verdadeiro responsável pela maior parte do calor da soldagem são os elétrons, devido sua alta velocidade no interior do arco elétrico (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

O arco elétrico é frequentemente caracterizado pela diferença de potencial entre as extremidades do arco elétrico. A queda de potencial na extensão do arco elétrico não se dá de forma uniforme, existindo três regiões distintas, como mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Representação das Regiões do Arco Elétrico: (a) Queda Catódica, (b) Queda Anódica e (c) Queda na Coluna.



Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

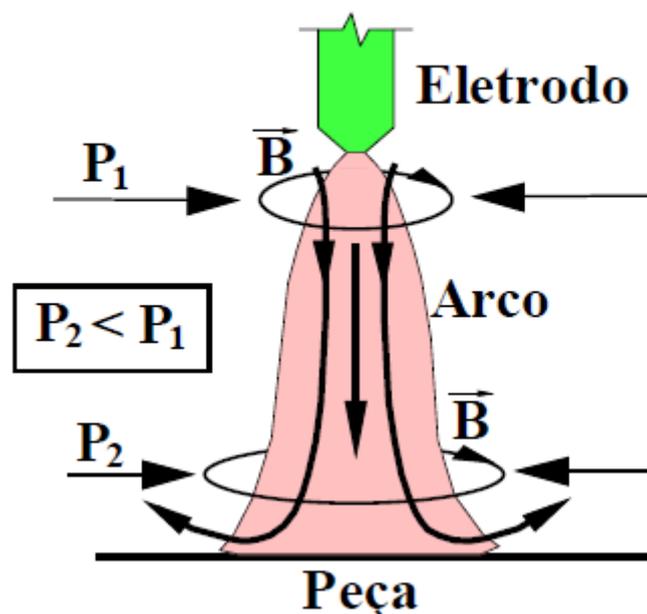
As regiões de quedas catódicas e anódicas possuem elevados gradientes térmicos e elétricos e as somas das quedas de potencial nessas regiões são praticamente constantes, não variando com as condições de operação do arco. Já a parte brilhante do arco elétrico é constituída por plasma e apresenta gradientes elétricos e térmicos bem inferiores que as regiões anteriores. O plasma é formado por moléculas, átomos, íons e elétrons em movimento. Sendo os dois últimos responsáveis pela passagem de corrente elétrica. A diferença de potencial nessa

região varia de forma linear com a variação do comprimento do arco (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Devido às cargas elétricas em movimento no arco ocorre o surgimento de campos magnéticos induzidos por essa corrente. Estes campos magnéticos promovem a ação de uma força de compressão no arco elétrico. Como o arco elétrico assume um formato cônico, a pressão que atua ao longo deste não é constante. Devido a este formato, a área do arco próxima ao eletrodo é menor que a área do arco próxima a peça a ser soldada. Como a força magnética que atua no arco é aproximadamente a mesma em toda sua extensão, a pressão que atua próximo ao eletrodo é maior que a pressão que atua próximo a peça. Essa diferença de pressão existente no arco induz um intenso fluxo de gás do eletrodo para a peça, este fenômeno é conhecido como “jato de plasma” (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

O jato de plasma é o responsável por proporcionar a penetração da solda, uma vez que, ele direciona os gases quentes do arco contra a peça. A Figura 2.4 representa o jato de plasma (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

Figura 2.4 - Representação do Jato de Plasma



Fonte: (MODENESI, 2012)

Tendo em vista que o processo de soldagem envolve sérios riscos pessoais, em equipamentos e instalações, considerações sobre a segurança nesse processo são bastante relevantes. São de fundamental importância o apoio, a orientação e envolvimento direto das chefias e gerências para o estabelecimento claro dos objetivos e dos planos de segurança da empresa (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Os principais riscos para as pessoas envolvidas incluem, a possibilidade de explosões e incêndios, choque elétrico, radiação gerado pelo arco elétrico e a exposição a fumos e gases causadores de danos à saúde. Para evitar queimaduras devido à radiação, é necessário o uso de vestimentas e equipamentos próprios para a proteção do corpo, da cabeça e dos olhos. Na prevenção de choques elétricos algumas precauções devem ser tomadas como o aterramento adequado dos equipamentos elétricos, trabalhar em ambientes secos, usar cabos elétricos de dimensões para evitar a perda do equipamento, evitar trabalhar sobre circuitos energizados e utilizar roupas, luvas e calçados secos. Uma maneira de minimizar danos devido aos gases e fumos gerados no processo é executar a soldagem em locais bem ventilados, e se necessário, utilizar ventiladores e exaustores (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Para minimizar os riscos de explosões e incêndios é de grande relevância manter materiais inflamáveis, como tintas, graxas, óleos, dentre outros, longe da área onde irá realizar o processo de soldagem. Vale ressaltar que a limpeza e organização das áreas de soldagem são necessárias para garantir a segurança (MARQUES, 1991).

Os processos de soldagem são empregados na construção de navios, aviões, veículos rodoviários e ferroviários, pontes, plataformas marítimas, componentes eletrônicos, dentre outros. Para favorecer a qualidade de uma peça a ser soldada, devem-se seguir alguns requisitos, como por exemplo: remover as contaminações das superfícies a serem unidas, evitar que ar atmosférico contamine a região da poça de fusão durante o processo de soldagem, propiciar o controle da transformação de fase que possam ocorrer, através de tratamentos térmicos antes e após a soldagem, para que a solda alcance as propriedades físicas, mecânicas e químicas desejadas (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

## 2.2- Processo de soldagem a arco elétrico MIG/MAG

O processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) ou MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) é um processo de soldagem a arco elétrico, onde o arco é mantido entre a extremidade de arame maciço consumível, alimentado continuamente, e a peça com o emprego de gases de proteção. A poça de fusão e o metal em transferência são protegidos por uma atmosfera gasosa protetora de gás inerte (argônio e hélio) ou ativo (CO<sub>2</sub> ou mistura de um ou mais gases sendo pelo menos um ativo). No processo MIG, a proteção da solda é feita por gás inerte ou mistura de gases inertes. Já no processo MAG o gás ou mistura de gases de proteção tem caráter ativo, ou seja, que reagem com algum componente da solda (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

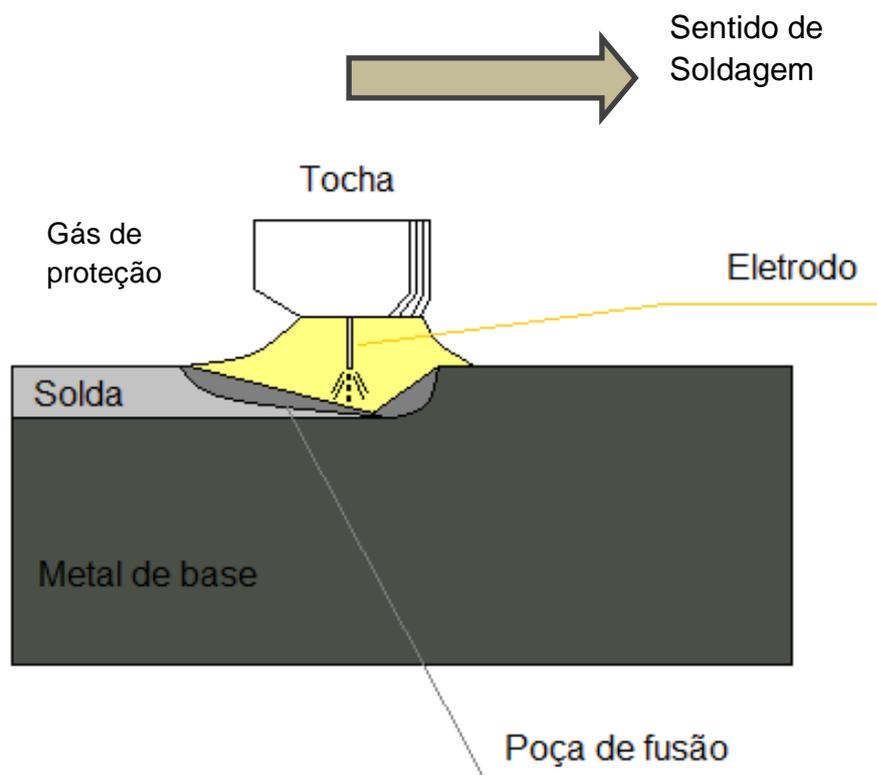
O processo GMAW pode ser aplicado de forma semiautomática, quando a tocha é movimentada pelo operador, ou automática, quando a tocha é conduzida por uma máquina. O arame também pode ser designado como eletrodo, pois ele tem a função de conduzir a corrente elétrica para o material de base, e assim, estabelecer o arco elétrico. A Figura 2.5 representa esquematicamente o processo.

Os gases de proteção têm como função principal proteger a região da solda como as gotas de metal fundido em transferência, a poça de fusão e o arame eletrodo contra a contaminação dos gases da atmosfera. Outra função do gás é garantir a estabilidade do arco elétrico, uma vez que esse gás é de fácil ionização, e controlar, através da força de arraste e da força de vaporização, a transferência metálica do metal fundido para a poça de fusão (SCOTTI, PONOMAREV, 2008). As forças presentes na transferência metálica e as características dos gases de proteção serão melhores descritas nos itens 2.2.1 e 2.2.2, respectivamente.

A eficiência da proteção gasosa depende da capacidade do sistema em eliminar os gases atmosféricos. Neste sentido, não somente os gases de proteção são importantes, mas também, as dimensões do bocal e da junta a ser soldada e a vazão do gás a ser utilizada. O fluxo adequado do gás de proteção para grande parte das condições de soldagem é de 10 a 16 L/min, sendo usadas vazões maiores quando se aplica elevadas correntes de soldagem. Valores acima destes são, geralmente, antieconômicos, ineficientes e podem provocar turbulência. A

turbulência pode provocar a diminuição da proteção gasosa por possibilitar o arraste do ar atmosférico para a poça de fusão. Valores de vazão de gás abaixo do recomendado pode causar falta de proteção, dependendo da geometria da junta e da corrente elétrica utilizada (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Figura 2.5 - Esquema do processo de soldagem GMAW



Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

O processo de soldagem GMAW apresenta algumas características importantes que possibilita sua aplicação para diversos produtos. Basicamente essas características são: alta taxa de deposição, em alguns casos ausência de operação de remoção de escória e limpeza, e exigência de pouca habilidade do soldador (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). Entretanto, este processo de soldagem possui maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos. Com isto, há a necessidade de ajuste rigoroso de parâmetros de soldagem como tensão em vazio, tensão de soldagem, corrente de soldagem, distância entre o bico de contato

a peça, vazão do gás de proteção, dentre outros (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

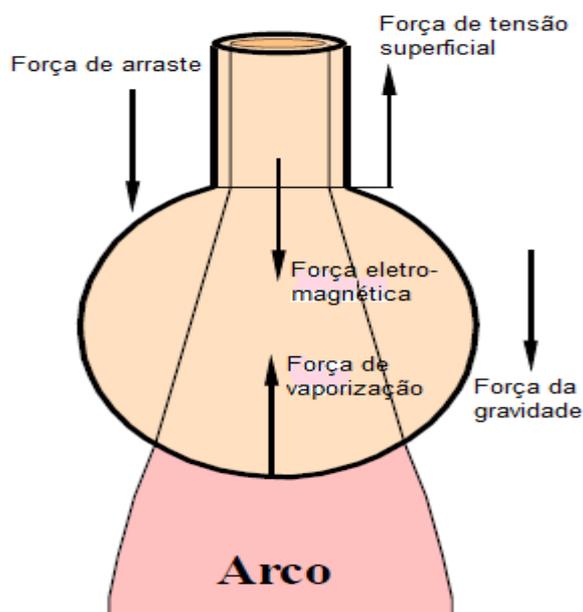
Na soldagem MIG/MAG o modo de transferência metálica é muito importante, pois afeta varias características do processo tais como: a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados. Em geral, considera-se que existem quatro tipos básicos de transferências metálicas, do metal de adição, para a poça de fusão. Essas transferências são: por curto circuito, globular, spray ou aerossol e controlada pulsada (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

### *2.2.1- Modos de transferências metálicas*

Por ser um processo que utiliza eletrodo consumível, a soldagem GMAW é caracterizada pela transferência de metal através do arco para o material de base. Gotas de metal fundido são transferidas da ponta do eletrodo para a poça de fusão e essa transferência é influenciada pelo material, diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, pela intensidade e polaridade da corrente de soldagem, pelo comprimento do arco e pela pressão ambiente (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Para se entender os modos de transferência metálica e de grande importância compreender as forças que governam a transferência metálica. A gota metálica, desde seu surgimento na ponta do arame-eletrodo, fica submetida a diversas forças que podem atuar de forma favorável ou não ao seu destacamento. A gota é transferida com a somatória das forças de destacamento são maiores que a forças de retenção da gota. As principais forças que atuam sobre a gota são: força gravitacional, força eletromagnética, tensão superficial do metal fundido, força de arraste dos gases e força de vaporização (SCOTTI, PONOMAREV, 2008). Essas forças estão ilustradas na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Forças Atuantes na Transferência Metálica



Fonte: Adaptado de (MODENESE, 2012)

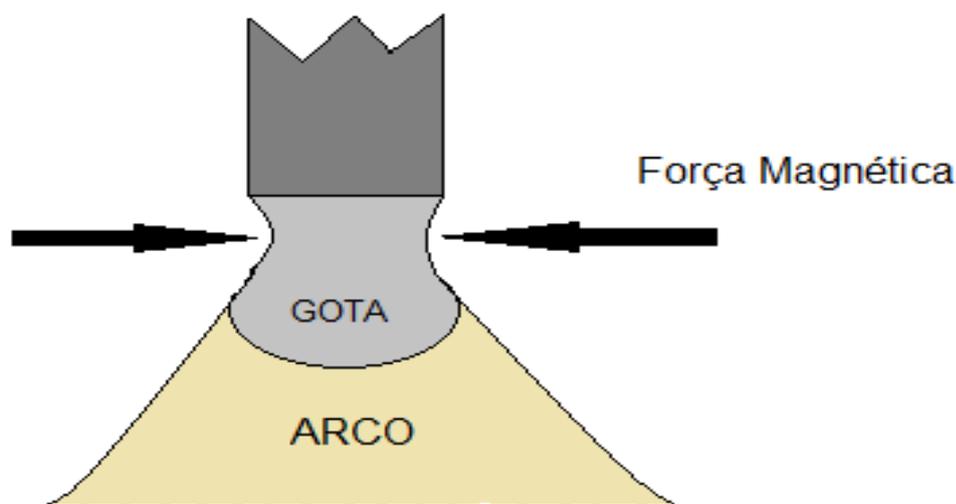
A força gravitacional é originada pela ação da gravidade sofrendo forte influência da massa da gota. Logo a intensidade de sua atuação é condicionada ao volume da gota que cresce até que rompa o equilíbrio das forças, promovendo o destacamento da gota. A força gravitacional pode atuar de forma favorável ou desfavorável ao destacamento da gota. Isso irá depender da posição de soldagem (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Sabe-se que no interior de um líquido a força resultante sobre cada átomo é pequena ou nula. Contudo, na superfície, a resultante de atração é para o interior do líquido. Essa força resultante é denominada tensão superficial que tende a reter a gota na ponta do eletrodo, se opondo a transferência metálica. Porém, há situações em que a tensão superficial facilita a transferência. Um exemplo, é quando a gota fundida toca na poça de fusão, e faz com que a força devido a tensão superficial puxe-a para a poça. Logo se não houver o contato poça/gota, a tensão superficial é contrária a transferência metálica. (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Um condutor elétrico gera em sua volta um campo magnético que, por sua vez, induz forças radiais na direção do centro do condutor. Sabe-se que quanto maior a

corrente maior são as forças eletromagnéticas (SCOTTI, PONOMAREV, 2008). Como já retratadas no item 2.1, forças magnéticas semelhantes que estão presentes no arco elétrico, que causam a formação do jato de plasma, exercem uma influência análoga na extremidade fundida do arame eletrodo consumível. Estas forças são capazes de estrangular, ou apertar (pinch) o metal fundido e dessa forma contribuem para separar a gota formada do fio sólido. Esse fenômeno é conhecido como efeito Pinch (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). A Figura 2.7 demonstra esse efeito.

Figura 2.7 - Representação Esquemática do Efeito Pinch



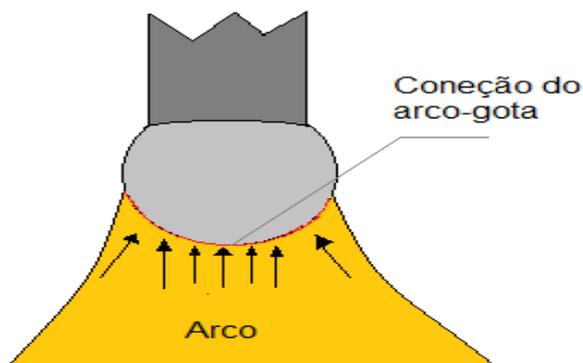
Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

A força de arraste origina-se quando a gota está em contato com o jato de plasma. Depressões são geradas sob a gota fazendo com que esta seja arrastada pelo fluxo do gás ionizado. A força de arraste age de forma contínua mesmo depois que a gota foi destacada e cresce à medida que se aproxima da chapa a ser soldada. A força de arraste depende das dimensões da gota, da densidade e da velocidade do jato de plasma e do respectivo coeficiente de arraste do sistema.

A força de reação por vaporização surge devido à vaporização dos componentes do arame eletrodo na região de contato entre a gota e o arco elétrico. Esta região de

contato é caracterizada por ter grande geração de calor, o que promove a formação de jatos de vapores metálicos.. A Figura 2.8 mostra A força de reação por vaporização.

Figura 2.8 - Efeito da Reação por Vaporização



Fonte: Adaptado de (SCOTTI, PONOMAREV, 2008)

Se o contato do arco se dá somente na parte inferior da gota, os jatos de vaporização realizam uma força de reação sobre a gota. Esta força é capaz de manter por mais tempo a gota retida no arame consumível. Porém, com a utilização de gases com baixa capacidade de troca de calor, como o gás argônio, são capazes de fazer com que o arco elétrico envolva toda a gota, podendo eliminar o efeito da vaporização no destacamento da gota.

A transferência por curto circuito, a ponta do eletrodo, onde contém uma gota de metal líquido atinge sucessivamente a poça de fusão, provocando um curto circuito que elimina momentaneamente o arco elétrico. Esse tipo de transferência ocorre, geralmente, com a utilização de baixos valores de correntes e tensões de soldagem e podem ser soldadas com qualquer tipo de gás de proteção. Entretanto a escolha do gás é dependente do material a ser soldado. (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

O aquecimento do arame por efeito Joule e a ação de forças eletromagnéticas, que comprimem a ponta do arame, junto com a ação da tensão superficial fazem que ocorra a separação da gota promovendo a ressurgimento do arco elétrico (ANDRADE, 2003). Com a possibilidade de uso de baixos valores de tensão e corrente de soldagem esse tipo de transferência é muito empregado na soldagem de

chapas finas. A Figura 2.9 mostra a sequência de acontecimentos que ocorrem na transferência por curto circuito.

**Figura 2.9 - Representação esquemática da transferência de curto circuito**



Fonte: (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

Já a transferência globular é caracterizada por apresentar gotas grandes e irregulares (maior que o diâmetro do eletrodo) na extremidade do eletrodo e por se destacarem com frequências muito baixas (1 a 10 gotas/segundo). Nesse processo de transferência ocorre com o emprego de correntes baixas e tensões de arcos alcançando valores moderados a altos. Devido ao surgimento de uma gota grande, seu peso consegue superar as forças contraria a transferência, como a tensão superficial e a força de reação por vaporização, e provocam o deslocamento da gota através do arco. Pelo fato da força gravitacional ser dominante nesse tipo de transferência metálica, sua aplicação é limitada a posição plana, cuja força da gravidade atua favorecendo o destacamento da gota. (SCOTTI, PONOMAREV, 2008). A Figura 2.10 representa o modo de transferência globular.

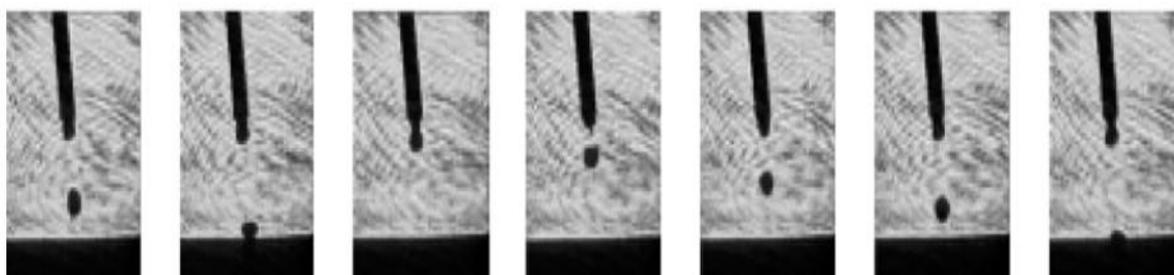
**Figura 2.10 - Representações esquemática da transferência globular**



Fonte: (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

Com o aumento da corrente de soldagem, ocorre a diminuição das gotas de metal líquido que se transferem para a poça de fusão. Em certo valor de corrente ocorre a mudança do modo de transferência de globular para *spray*. Essa corrente é denominada corrente de transição. A transferência *spray* só ocorre para determinado tipos de gases ou mistura de gases de proteção. Nesse tipo de transferência o arco é bastante estável, a ocorrência de respingos é praticamente eliminada e o cordão obtido é suave e regular (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). A transferência do tipo *spray* só pode ser utilizada no processo de soldagem em posição plana e em alguns casos na posição horizontal, devido à poça de fusão ser muito fluido por causa da alta energia envolvida no processo (ANDRADE, 2003). A Figura 2.11 apresenta o modo de transferência aerossol.

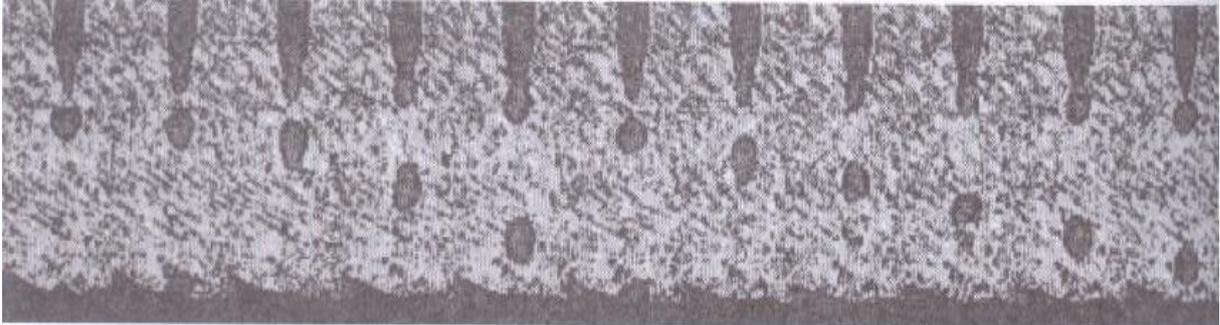
**Figura 2.11 - Representações do modo de transferência metálica do tipo spray**



Fonte: (MENDES, 2005)

A transferência de metal controlada utilizando corrente pulsada ocorre em dois períodos. No primeiro período a corrente de soldagem ultrapassa a corrente de transição globular-spray durante um intervalo de tempo, onde gotas de metal líquido são formadas. O segundo período a corrente elétrica fica abaixo da corrente de transição e apenas mantém o arco aberto. Com os parâmetros de soldagem bem definidos consegue-se uma transferência pulsada regular, com o diâmetro das gotas, menor que o diâmetro do eletrodo e utilizando correntes médias bem abaixo da corrente de transição. Esse tipo de transferência só é possível com o emprego de equipamentos eletrônicos modernos que podem controlar a transferência metálica (SCOTTI, PONOMAREV, 2008). A Figura 2.12 demonstra o modo de transferência pulsada.

Figura 2.12 - **Modo de transferência metálica pulsada**



Fonte: (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

### 2.2.2- Gases utilizados no processo MIG/MAG

Os gases utilizados para no processo de soldagem GMAW podem ser inertes ou ativos, ou mesmo, mistura destes. O gás empregado é uma variável importante no processo, pois este influencia nas características do arco, no modo de transferência do metal, na penetração, no formato do cordão de solda, no custo da operação e na tendência de formação de mordeduras. A Tabela 2.1 demonstra alguns tipos de gases e misturas de gases e o seus comportamentos químicos (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Tabela 2.1 - **Gases e misturas para soldagem GMAW**

<b>Gás ou Mistura</b>	<b>Comportamento Químico</b>
Argônio	Inerte
Hélio	Inerte
Argônio + Hélio	Inerte
CO <sub>2</sub>	Ativo
Argônio + (acima de 15 %) CO <sub>2</sub>	Ativo

Fonte: Adaptado de (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

Sabe-se que os gases ativos são aqueles que reagem quimicamente com algum dos componentes do processo de soldagem. Um tipo de gás bastante utilizado é o  $\text{CO}_2$  que é considerado como um gás inerte à temperatura ambiente, mas em altas temperaturas, como na soldagem, ele se decompõe em  $\text{CO}$  e  $\text{O}_2$ , tornando-se ativo. Esse gás, ou mistura desse gás com argônio promove a formação de óxidos que facilitam a emissão de elétrons, o que favorece a sua aplicação em aços carbono e aços baixas ligas (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

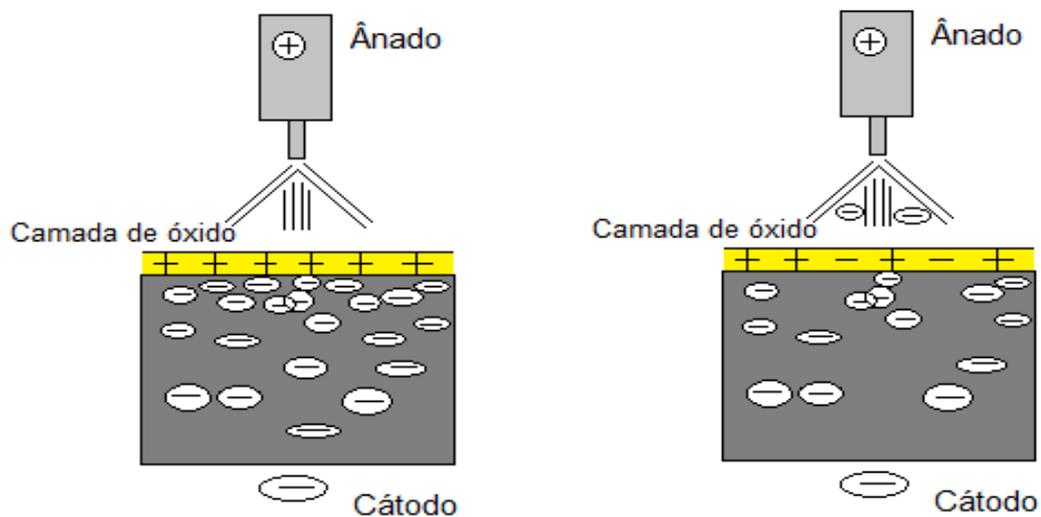
Os gases inertes são aqueles que não reagem quimicamente com o metal de solda e geralmente são utilizados em soldagem de ligas não ferrosas como as ligas de alumínio, magnésio e titânio, que são considerados materiais bastante reativos (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Uma das funções dos gases de proteção é garantir a estabilidade do arco. Esta propriedade está relacionada com as propriedades físico-químicas dos gases, por exemplo, o potencial de ionização, a condutividade térmica e o potencial de oxidação. Considerando o potencial de ionização, sabe-se que o argônio, contém baixo potencial de ionização, apresenta grande facilidade na abertura e na estabilização do arco elétrico se comparado com o hélio, que contém alto potencial de ionização. Visando os gases utilizados na soldagem MIG/MAG que contém compostos moleculares ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ ) em sua composição, é válido ressaltar que estas moléculas se dissociam e são ionizadas. A soma das energias de dissociação e de ionização dos gases constituídos de moléculas é maior que a energia de ionização do argônio o que não ocorre com o hélio, que possui altíssima energia de ionização (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

A capacidade de troca de calor refere-se à capacidade do gás em conduzir calor. Os gases como hélio e dióxido de carbono conseguem conduzir altas taxas de energia, e isso, favorece a eficiência da fusão. Gases moleculares como,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$ , conseguem transferir calor do arco elétrico, através de fenômenos físicos, para o material de base devido à dissociação e recombinação molecular (SCOTTI, PONOMAREV, 2008). A presença de uma camada de óxidos sobre a poça de fusão forma uma condição satisfatória para o arco ser estável devido ao efeito de emissão por campo ou emissão catódica. Camadas de óxidos formadas sobre a poça de fusão e arredores facilitam a emissão de elétrons e se tornam positivamente

carregadas. O surgimento dessa carga positiva na camada de óxido propicia aglomeração de elétrons na superfície do metal de base. Estes elétrons são acelerados em direção ao anodo, sem a necessidade de uma grande tensão elétrica entre o eletrodo e o material que está sendo soldado. Com essa aceleração os elétrons conseguem quebrar ou fundir as camadas de óxidos e passam a se mover pela coluna de plasma até o anodo. A Figura 2.13 demonstra o fenômeno de emissão catódica (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Figura 2.13 - Representação do Fenômeno de Emissão Catódica



Fonte: Adaptado de (SCOTTI, PONOMAREV, 2008)

Ao soldar materiais reativos, estes apresentam camada de óxidos necessária para facilitar a emissão de elétrons, não tendo problemas com a estabilidade do arco. Mas, materiais com baixa reatividade, como os aços carbono, apresentam maior estabilidade do arco com a utilização de gases reativos que favorecem a formação da camada de óxido. Por outro lado, gases reativos podem gerar porosidade e fragilização na junta soldada. Além disto, este tipo de gás pode levar a perdas significativas de elementos de liga, por reagir com elementos presentes no metal de adição e no metal de base, gerando escória, que podem ser prejudiciais para as propriedades mecânicas da região soldada (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Como o processo MIG-Brasing utiliza o argônio como gás de proteção faz-se necessário relatar algumas características desse gás. O argônio é um gás inerte, incolor, inodoro e não tóxico. Contém baixo potencial de ionização que garante facilidade na abertura do arco elétrico, e densidade maior que a do ar atmosférico gerando uma proteção eficiente na posição plana. Este gás é empregado no processo GMAW e é utilizado, quando puro, para soldagem de materiais não ferrosos e reativos, tais como: ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de níquel, ligas de titânio, dentre outras. Além disto, o gás argônio pode ser misturado com baixas concentrações de O<sub>2</sub>, até 5%, para soldagem de ligas não ferrosas. O oxigênio adicionado tem a função de aumentar a estabilidade do arco elétrico, devido ao fenômeno de emissão por campo. Além da função de estabilizar o arco, o O<sub>2</sub> é capaz de diminuir a tensão superficial da gota fundida do metal de adição aumentando a frequência de destacamento e proporcionando também, a redução do tamanho destas gotas (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

### **2.3- Brasagem**

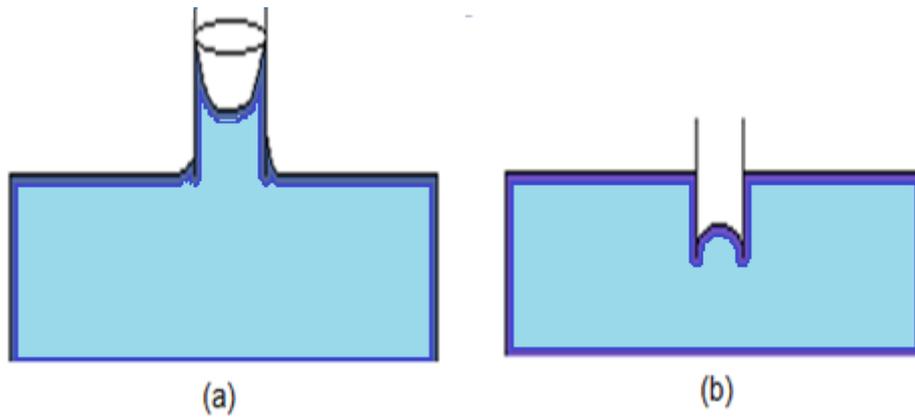
A brasagem é um processo de união que promove a coalescência de materiais metálicos por meio do aquecimento a certa temperatura, na qual o material de adição, que possui menor ponto de fusão que o metal a ser brasado, se funde sem fundir o metal de base. A junta a ser brasada é preenchida por ação capilar, pelo metal de adição na forma líquida. Quando o ponto de fusão do metal de adição é maior que 450°C o processo pode ser denominado por brasagem “forte”, abaixo desse valor o processo é chamado de brasagem “fraca” (MARQUES, 1991).

Para conseguir uma boa compreensão sobre o processo de brasagem, é necessário entender sobre os fundamentos que atuam no processo de brasagem. Neste processo o metal de adição fundido é capaz de penetrar no espaço livre das juntas por apresentarem fenômenos de capilaridade e molhamento. Estes fenômenos físicos estão relacionados com a tensão superficial dos materiais (ANDRADE, 2003).

Quando um líquido está confinado entre paredes de um tubo capilar, ele se manifesta como subindo ou descendo por entre as paredes, atingindo uma altura

geralmente diferente da altura do restante do líquido. Se o líquido consegue aderir nas paredes do tubo, ou seja, molha o tubo a coluna de líquido irá subir e quando não ocorre a adesão, a coluna de líquido irá descer. A Figura 2.14 mostra o princípio do fenômeno de capilaridade

Figura 2.14 - **Esquema de atração capilar: (a) o líquido molha o tubo (b) o líquido não molha o tubo**



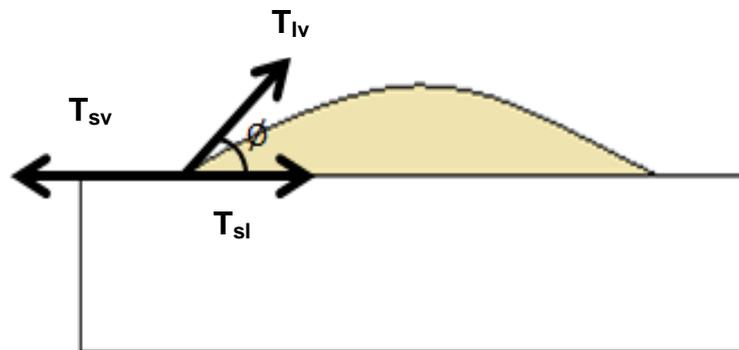
Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 2003)

O balanço de tensões superficiais sólido-líquido  $T_{sl}$ , sólido-vapor  $T_{sv}$  e líquido-vapor  $T_{lv}$  conduzem o fenômeno de molhabilidade. O ângulo de contato  $\theta$ , entre o sólido e o líquido, em condições de equilíbrio, pode ser definido como o ângulo entre os vetores que representam as tensões superficiais líquido-vapor e sólido-líquido. Obtém a relação entre o ângulo de contato e as tensões superficiais pela equação de *Young-Dupré* (ANDRADE, 2003). Esta equação está representada abaixo.

$$(2.1)$$

O líquido consegue molhar um sólido somente quando o ângulo  $\theta$  é menor que  $90^\circ$ , ou seja, somente quando a  $T_{sv}$  for maior que a  $T_{sl}$ . A Figura 2.15 representa o líquido molhando um sólido (ANDRADE, 2003).

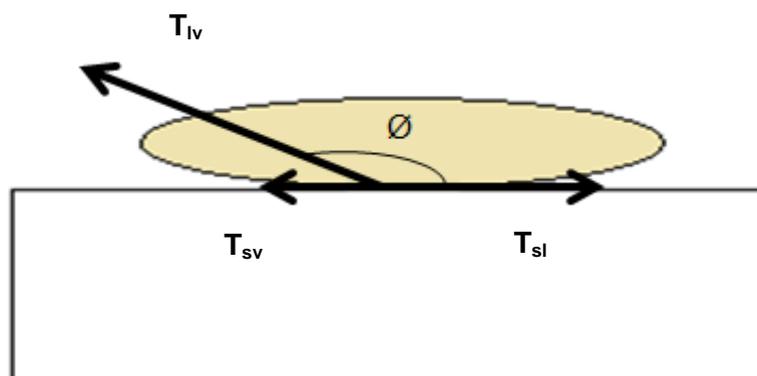
**Figura 2.15 - Líquido Molhando o Sólido com um Ângulo  $\theta < 90^\circ$**



Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 2003)

Por outro lado, se a tensão  $T_{sl}$  for maior que a  $T_{sv}$  o ângulo de contato  $\theta$  será maior que  $90^\circ$  o que caracteriza que o líquido não consegue molhar o sólido, como pode ser deduzido pela equação de *Young-Dupré*. A Figura 2.16 representa um líquido que não consegue molhar o sólido.

**Figura 2.16 - Líquido não Consegue Molhar o Sólido Devido ao Ângulo  $\theta > 90^\circ$**



Fonte: Adaptado (ANDRADE,2003)

O processo de brasagem poder ser feito em um sistema aberto empregando como fonte de calor uma chama oxí-gás ou por indução eletromagnética, ou em um sistema fechado com a utilização de fornos (SILVA, 2006). Em sistema aberto o

metal base é protegido com a utilização de um fluxo. O fluxo são substâncias químicas capaz de dissolver as camadas de óxidos que estão na superfície a serem unidas, permitindo que o metal de adição flua livremente nessas superfícies, garantindo bom molhamento, e consiga aderir ao metal de base devido ao fenômeno de difusão. (MARQUES, 1991).

Na brasagem por chama gases combustíveis como, o acetileno e propano, podem ser empregados e sua escolha irá depender se o gás reage ou não com o metal a ser brasado, qual a energia necessária para conduzir processo, qual a temperatura da chama adequada, dentre outros. O metal de adição pode ser colocado previamente na junta ou ser adicionado manualmente no decorrer do processo. Para esse processo o uso de fluxo se torna essencial (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

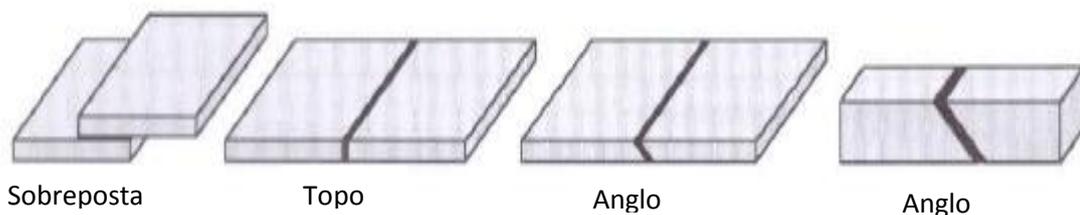
No processo de brasagem por indução magnética o calor é obtido por uma corrente induzida nas peças a serem unidas. As peças são posicionadas no interior ou próximo de uma bobina onde ocorre a passagem de uma corrente alternada de alta frequência. O material de adição é adicionado na junta antes da brasagem e a proteção é feita geralmente por fluxo (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

No sistema fechado a proteção do metal base se dá através da utilização de uma atmosfera gasosa, neutra ou ativa, não tendo a necessidade do emprego de fluxos, o que não implica que estes não possam ser usados. Gases como argônio, hidrogênio e nitrogênio podem prevenir a formação de óxidos gerando uma melhor molhabilidade e penetração do metal de adição (SILVA, 2006). O metal de adição pode ser colocado previamente na junta e este processo é bastante aplicado em produção em série e de grande escala (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Quando o metal de adição líquido consegue penetrar nos contornos de grãos do metal de base ocorre à formação de compostos intermetálicos (ANDRADE, 2003). A ligação intermetálica gerada por esses materiais é sólida e muito resistente. O mecanismo de difusão é o grande responsável pela ligação entre o metal de adição e o metal de base. (MARQUES, 1991).

Realiza-se uma brasagem com qualidade adequada quando se faz a limpeza da peça a ser brasada removendo as camadas, de poeira e óleo, presentes na superfície do material. Além disto, a escolha da junta é fundamental para fazer uma brasagem com boas propriedades mecânicas. A seleção da junta é dependente da composição do material de base, do metal de adição, das condições de serviço, do fluxo ou gás utilizado, do processo de brasagem, dentre outros. Basicamente, utilizam-se dois tipos de juntas são usados na brasagem: juntas sobrepostas e juntas de topo. Variações desses tipos de juntas podem ser empregadas para aumentar a área e a resistência mecânica da junta. Juntas sobrepostas são, geralmente, escolhidas por apresentarem melhor resistência (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009). Os tipos de juntas utilizadas no brasagem estão exibidas na Figura 2.8.

Figura 2.17- Juntas Usadas no Processo de Brasagem



Fonte: (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

Sabendo-se que as juntas brasadas são preenchidas pela ação capilar do material de adição e para que este fenômeno ocorra corretamente é necessário o controle da distância de separação entre as peças que formam a junta. Quando o espaçamento das peças é pequeno o preenchimento da junta se dá de forma muito lenta, o que pode inviabilizar seu preenchimento total. Grandes distâncias entre as peças a serem brasadas, também podem levar longos tempos para serem preenchidas promovendo a ocorrência de formação de bolhas de gás ou, mesmo, inclusão de fluxo e óxidos prejudiciais a resistência mecânica da junta brasada.

O processo de brasagem possui algumas vantagens relevantes por apresentarem mínima distorção da junta brasada, na possibilidade de obter juntas mais resistentes

que o metal de base, por gerar pouca ou nenhuma fusão do metal base, por provocar quase nenhuma mudança metalúrgica e por promover, em alguns casos, o alívio de tensão durante o processo (SILVA, 2006).

#### **2.4- Processo de Solda Brasagem (MIG Brazing)**

O processo solda brasagem-MIG foi difundido comercialmente em 1995 pela DAIHEN Corporation Welding Products Division- OTC, uma empresa japonesa (ANDRADE, 2003). Este processo possui características da brasagem e da soldagem MIG, por realizar a brasagem de materiais por meio da utilização de um arco elétrico com a utilização de gás de proteção inerte. Devido a estas características esta técnica de coalescência de materiais ficou conhecida como Brasagem-MIG, ou do inglês, MIG-Brazing. Com este processo pode-se conciliar os benefícios da brasagem convencional, como não promover a fusão do material de base e tem a capacidade de manter as propriedades mecânicas do metal depositado e do metal de base, com as vantagens do processo MIG, como por exemplo, alta taxa de deposição e elevada velocidade de soldagem (GUIMARÃES et al., 2006).

Pode-se dizer que o processo MIG-Brazing utiliza os princípios do processo GMAW, em virtude disto, possibilitam melhores resultados para união de metais com a aplicação de transferência metálica pulsada ou por curto circuito, pois estes modos de transferência possuem menor aporte térmico e a fusão somente do material de adição.

O processo de brasagem a arco estabelece como diferença principal do processo de brasagem convencional pelo fato do metal de adição não ser distribuído na junta por atração capilar (MENDES, 2005). O preenchimento da junta na solda-brasagem ocorre por meio da molhabilidade, onde o metal de adição líquido que está em contato com o metal de base se difunde neste, obtendo a união das peças metálicas. (ANDRADE, 2003).

O processo MIG-Brasing se tornou adequado para a soldagem de chapas finas de aço carbono, contendo ou não revestimento protetor contra a corrosão, por

apresentar a ausência de fusão do material de base, elevada velocidade de soldagem, baixo aporte térmico e por utilizar consumíveis com ponto de fusão inferior ao aço carbono (GUIMARÃES et al., 2006).

Apesar de garantir o baixo aporte térmico no processo Brasagem-MIG e a eficiência desse processo em soldar chapas de aço carbono, SILVA (2006) e JOSEPH (2003) afirmam que tecnicamente o processo de brasagem com arco elétrico não é uma brasagem, pois pode ocorrer a fusão localizada do metal de base o que caracteriza um processo de soldagem.

Os gases de proteção comumente utilizados são o argônio puro, ou mistura de argônio com pequenos teores de oxigênio ou CO<sub>2</sub>, ou até mesmo, misturas de argônio com baixos teores de H<sub>2</sub>. A finalidade da adição de gases ativos é garantir uma melhor fluidez do metal de adição, a estabilidade do arco, promover a transferência metálica por curto circuito (ANDRADE, 2003). O metal de adição geralmente utilizado é uma liga de cobre-silício ou bronze ao alumínio, onde ambas contém baixos pontos de fusão se comparadas ao aço carbono (RANGEL et al., 2005).

A Figura 2.18 representa as configurações das juntas que podem ser utilizadas no processo de Brasagem-MIG. Podem-se destacar as juntas de topo, sobreposta e ângulo como as mais utilizadas.



Fonte: (MENDES, 2005)

A distância entre as peças a se soldar podem conter abertura de raiz maiores que as aberturas da brasagem convencional, isso ocorre pelo fato do material de adição preenche a junta na Brasagem-MIG é feita por depósito de filetes que conseguem molhar todo o espaço entre as peças, sem nenhuma ação significativa do fenômeno de capilaridade, como acontece no caso da brasagem convencional (MENDES, 2005).

Algumas vantagens da brasagem a arco podem ser destacadas como a não necessidade de utilização de fluxo ou pastas, o processo é facilmente automatizado, gera baixas tensões residuais, promove a coalescências de materiais dissimilares e pode ser empregada em todas as posições de soldagem garantindo uma larga gama de aplicações. Porém, algumas desvantagens também podem ser ressaltadas, dentre elas: a resistência da junta está limitada a resistência do material de adição e as temperaturas de trabalho são baixas, pois a temperatura de fusão do metal de adição é inferior a temperatura do metal de base (MENDES,2005).

#### *2.4-1 Metal de Adição para Brasagem-MIG*

Os consumíveis utilizados na Brasagem-MIG deve possuir ponto de fusão inferior ao do metal de base, onde a ligação entre o metal de adição e a superfície a ser brasada deve possuir uma interface bem definida, prevenindo a formação de uma liga metálica. Para adquirir estas características pode se utilizar as ligas de cobre como material de adição (MENDES, 2005).

O cobre (Cu) apresenta facilidade de formar ligas com diversos elementos sendo eles, zinco (Zn), silício (Si), estanho (Sn), alumínio (Al) e prata (Ar). O cobre puro contém ponto de fusão de 1083°C, onde a temperaturas das ligas mencionadas apresentam temperaturas de fusão menores que esse valor (MENDES, 2005). O cobre puro à temperatura ambiente apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e um peso específico de 8,93 g/cm<sup>3</sup> (COUTINHO, 1980). Com exceção da prata o cobre apresenta os maiores valores de condução elétrica e térmica, como pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Condutividade elétrica e térmica de alguns materiais

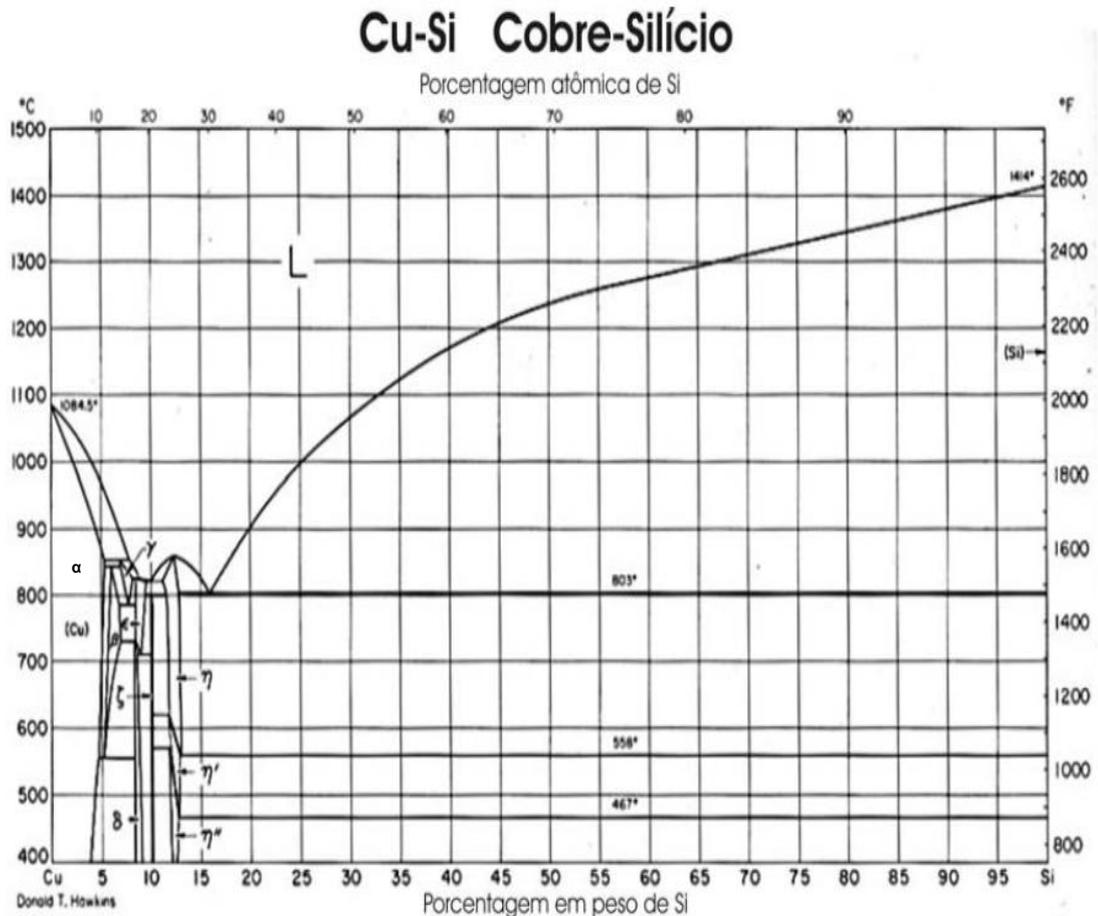
<b>MATERIAIS</b>				
<b>CARACTERISTICAS</b>	Cobre	Prata	Alumínio	Ouro
Condutividade elétrica ( $1/\Omega\text{m}$ )	61,7	62,5	34,2	43,5
Condutividade Térmica (W/m K)	398	428	247	317

Fonte: Adaptado de (BARCELOS, 2010)

O bronze comum é um liga de cobre tendo como principal elemento de liga o estanho. Ligas de bronze com silício e alumínio são empregadas como materiais de adição no processo MIG-BRAZING. A adição de silício no bronze proporciona um efeito bastante acentuado na mudança do ângulo de molhamento e, assim, varia o desempenho da liga de adição. Adições de 1 a 2% de silício melhoram a molhabilidade das ligas de cobre. Outra característica provocada pela adição de silício nas ligas de cobre é o aumento da resistência mecânica e da dureza da liga, devido ao mecanismo de endurecimento por solução sólida

substitucional (MENDES, 2005). A Figura 19 mostra o diagrama de fases cobre-silício.

Figura 2.19 - Diagrama de Fases Cu-Si



Fonte: (MENDES, 2005)

Sabe-se que a fase  $\alpha$  é uma microestrutura mais resistente mecanicamente que aparece de forma estável na liga Cu-Si. Sendo assim, a fase de maior interesse para o processo de brasagem a arco é esta, que pode ser conseguida com até aproximadamente 4% de Si. Entretanto, adições acima de 4% provocam um crescimento da região líquido mais  $\alpha$ , o que favorece as trincas por solidificação. Devido a isto, arames consumíveis comerciais da liga de Cu-Si possuem teores de silício até 3 %.

Ligas de bronze e alumínio são utilizadas com um máximo 14% de alumínio, usualmente contendo 10%, podendo apresentar pequenas porcentagens de níquel, manganês, fósforo, objetivando o refino de grão e o aumento da resistência mecânica à tração e à corrosão.

A Tabela 2.3 abaixo informa as composições químicas de três arames eletrodos comerciais denominados BT 511 e BT 513 e BT-531.

Tabela 2.3 - **Composição Química de Arames Consumíveis**

<b>Liga</b>	<b>Composição (% em peso)</b>			
<b>Elementos</b>	<b>Cu</b>	<b>Sn</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>
<b>511</b>	Restante	0,2	1.3	-
<b>513</b>	Restante	0,6	3.0	-
<b>531</b>	Restante	-	-	6 - 8,5

Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 2003)

#### *2.4-2 Utilização do Processo MIG-Brasing para Brasagem de Chapas Galvanizadas com Zinco*

Atualmente o processo Brasagem-MIG está sendo bastante aplicadas nas indústrias automobilísticas para a junção de chapas finas e galvanizadas. Chapas zincadas são aquelas que contêm um revestimento para proteger a base metálica. Essa camada protetora é feita a base de zinco ou ligas de zinco, que proporciona ao substrato maior resistência à corrosão para as condições atmosféricas. Essa camada de zinco em contato com o ar atmosférico reage e forma uma camada passiva de carbonato de zinco que é o responsável pela proteção (GUIMARÃES et al., 2006).

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 os vapores de zinco podem causar porosidades, falta de fusão, trincas e arco sem estabilidade (JOSEPH et al., 2003).

Com o processo de solda brasagem estes problemas são minimizados, devido ao menor aporte térmico, que tende a preservar a camada protetora. Então, com o emprego desse processo percebe-se: um arco elétrico mais estável, baixa taxa de

respingos, eliminação dos poros e trincas provenientes da inclusão de zinco no aço carbono, resultando em uma união de excelente qualidade e com boas propriedades mecânicas (ANDRADE, 2003).

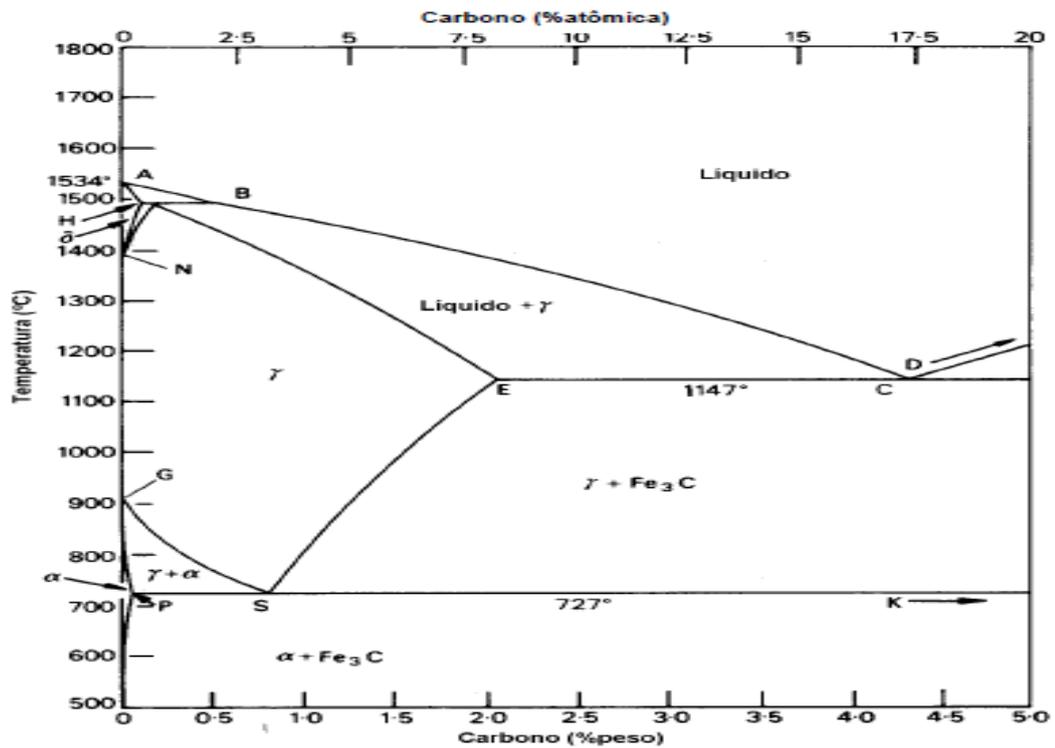
## 2.5- Metalurgia da Soldagem

Nos processos de soldagem a arco elétrico são realizados com aplicação localizada de calor. Como resultado, podem ocorrer na região da junta alterações nas propriedades do material, que nem sempre são desejáveis. Estas alterações são dependentes das reações que acontecem durante a solidificação e resfriamento do cordão de solda e da microestrutura resultante (MARQUES, MODENESI, BRACARENCE, 2009). Mediante ao exposto, nota-se que uma compreensão dos fenômenos metalúrgicos recorrentes ao processo de soldagem são bastante viáveis. De maneira geral, a discussão se baseará nos aços carbonos, embora os princípios básicos possam ser aplicados a outros materiais.

Os aços são ligas de ferro contendo carbono com até 2,11 % em peso, e com diversos outros elementos de liga residuais ou não. Uma maneira simples de adquirir informações fundamentais para o conhecimento sobre os aços carbono é através do diagrama Fe-C, representada na Figura 2.20. As fases presente neste diagrama são a fase líquida, austenita ( $\gamma$ ), ferrita ( $\alpha$  e  $\delta$ ) e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

De certo modo, a ferrita é uma fase dúctil e tenaz, enquanto a cementita é muito dura e frágil. A perlita, constituinte formada por estas duas fases, apresenta uma dureza relativamente elevada e baixa tenacidade. Assim aços com maiores teores de carbono terão a presença de maior quantidade de cementita, possuindo maiores valores de dureza e resistência mecânica, porém com menores ductilidade e tenacidade (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

Figura 2.20 – Diagrama de Fases Fe-C

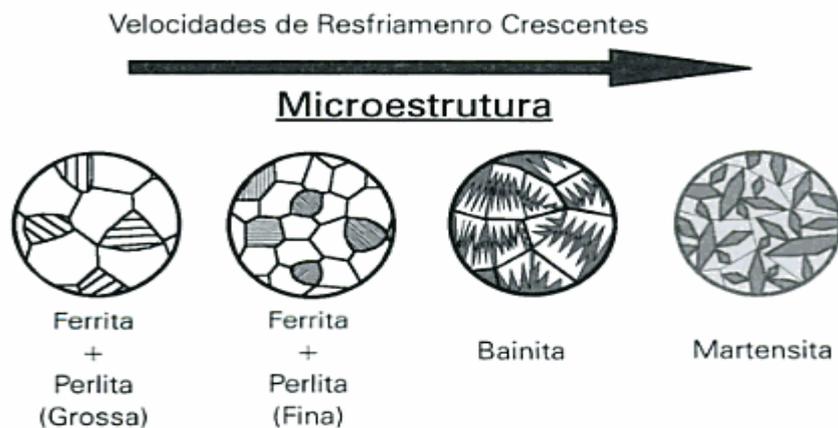


Fonte: (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012)

Contudo, as reações que ocorrem no diagrama Fe-C acontecem em condições de equilíbrio ou próxima deste. Sendo assim, as velocidades de resfriamento de ser suficiente baixa para que o tempo disponível permita a difusão dos elementos de liga, promovendo mudanças da estrutura cristalina associadas com a transformação (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

Com o aumento da velocidade de resfriamento, as transformações tendem a ocorrer em menores temperaturas, demandando um tempo maior para ocorrer o mecanismo de difusão. Logo, as transformações passam a ocorrer em condições bem distantes da do equilíbrio, resultando em mudanças na morfologia, dimensões e arranjos dos grãos ou partículas das fases formadas, ferrita e cementita. Finalmente, quando à velocidade de resfriamento atinge valor elevado, a austenita é super-resfriada, impedido o fenômeno difusional, ou seja, sem que ocorra a formação de cementita e ferrita. Assim, acontece a formação de uma nova fase, a martensita (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012). A Figura 2.21 mostra algumas microestruturas formadas de acordo com a velocidade de resfriamento.

Figura 2.21 – **Microestrutura de um Aço Hipoeutetóide em Função da Velocidade de Resfriamento**



Fonte: (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009)

A martensita é uma microestrutura metaestável, não existente no diagrama Fe-C e se forma por movimentos curtos e simultâneos de grupos de átomos, mecanismo displacivo, devido a enorme instabilidade da austenita. Esta fase tem uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012). A martensita tem uma elevada dureza que aumenta com o aumento do teor de carbono dos aços, ao mesmo tempo em que se torna extremamente frágil (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

### 2.5-1 Fluxo de Calor em Soldagem

O fluxo de calor pode afetar fortemente as transformações de fases durante a soldagem, e assim, as microestruturas resultantes e as propriedades da junta soldada. Além disto, a energia imposta pela soldagem pode provocar variações de temperatura, promovendo distorções e tensões residuais na peça soldada (KOU, 2003).

O fluxo de calor pode ser dividido, de maneira simplificada, em duas partes básicas: fornecimento de calor para a junta e dissipação de calor pela peça. Na primeira

etapa, para caracterizar a quantidade de calor fornecido, utiliza-se a energia de soldagem (aporte térmico ou heat input) que é definida como quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento. Na soldagem a arco elétrico, pode-se considerar que a única fonte de calor é o arco, então a energia de soldagem (H) é expressa pela equação 2.2 (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2009).

$$\text{---} \quad (2.2)$$

Onde V é a tensão no arco elétrico (V), I é a corrente de soldagem (A), v é a velocidade de soldagem (mm/s) e  $\mu$  é a eficiência térmica do processo.

A eficiência térmica do processo pode ser calculada como:

$$\text{---} \quad (2.3)$$

Onde  $Q_n$  é a energia total produzida pelo processo de soldagem. Sendo assim, percebe-se que a eficiência térmica é sempre menor que 1, pois a energia de soldagem é a energia total produzida pelo processo de soldagem menos as perdas do processo (KOU, 2003). A Tabela 2.4 mostra o rendimento térmico para alguns processos de soldagem a arco elétrico.

**Tabela 2.4 - Rendimento Térmico para Alguns Processos de Soldagem**

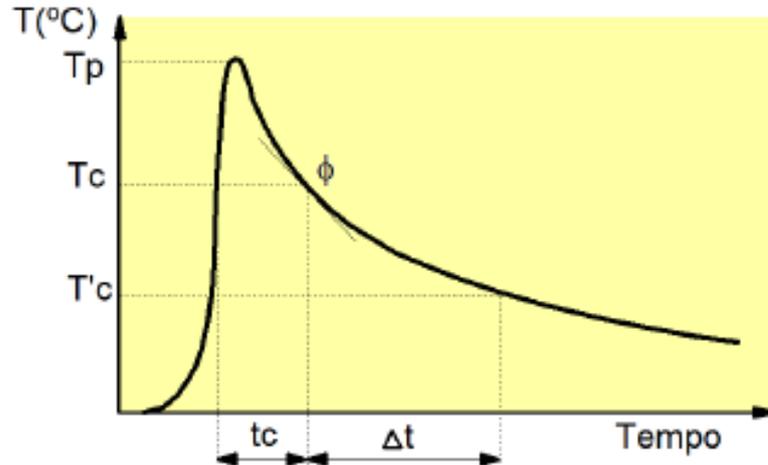
<b>Processos</b>	<b>Rendimento Térmico (<math>\mu</math>)</b>
Arco Submerso (SAW)	0,85-0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75-0,95
Eletrodo Revestido	0,70-0,90
TIG (CC)	0,50-0,80

Fonte: Adaptado de (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012)

Cada ponto de um material próximo à junta sofre uma variação de temperatura, resultado da passagem da fonte de calor. Esta variação de temperatura pode ser

estimada na forma de uma curva denominada, ciclo térmico (FORTES, 2004). Esta curva está representada na Figura 2.22.

Figura 2.22 – Ciclo Térmico



Fonte: (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012)

Esta curva apresenta certos pontos importantes como:

- Temperatura de pico ( $T_p$ ), temperatura máxima atingida no ponto.  $T_p$  diminui com a distância do ponto ao centro da solda e é utilizada para indicar a extensão da zona termicamente afetada pelo calor.
- Temperatura crítica ( $T_c$ ) é a temperatura mínima para que ocorram mudanças microestruturais.
- O tempo de permanência ( $t_p$ ) é um tempo cujo o ponto fica submetido a temperaturas superiores a temperatura crítica.
- Velocidade de resfriamento é dada pela equação 2.4, abaixo:

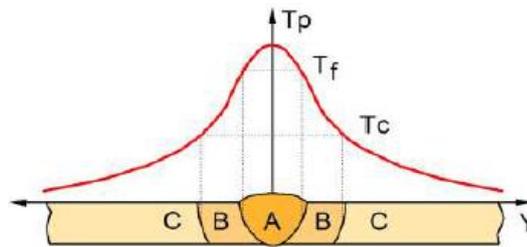
\_\_\_\_\_

(2.4)

Ao considerar o ciclo térmico de cada ponto próximo à junta, sabe-se que a temperatura de pico de cada ponto irá variar com a distância ao centro do cordão de

solda (FORTES, 2004). A Figura 2.23 é uma curva de repartição térmica que demonstra a temperatura de pico em relação à distância ao centro da peça.

**Figura 2.23 – Repartição Térmica de uma solda. A – Zona Fundida, B – Zona Termicamente Afetada e C – Material de base**



Fonte: (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012)

A partir dessa curva verificam-se três regiões básicas de um cordão de solda. Zona fundida (ZF), onde ocorreu a fusão e a solidificação do material durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico dessa região atingiram valores superiores à temperatura de fusão do material de base. Outra região apresentada é a zona termicamente afetada (ZTA). Nesta região não ocorre a fusão do metal de base, contudo, o material atinge temperaturas superiores à temperatura crítica, resultando em mudanças de microestrutura e de propriedades mecânicas. E por último, pode ser visto o material de base que são regiões mais afastadas do cordão de solda que não são afetadas pelo processo de soldagem. Sendo assim, as temperaturas atingidas nestas regiões são inferiores as críticas (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2009).

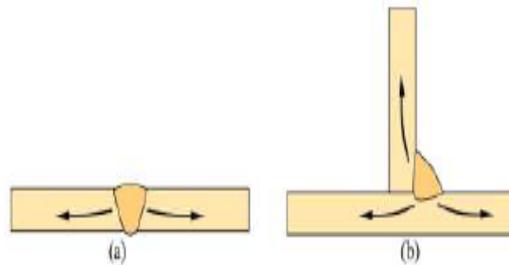
Tanto o ciclo térmico quanto a repartição térmica dependem de diversas variáveis do processo de soldagem, entre elas:

- Tipo de material de base: materiais de menor condutividade térmica dissipam o calor por condução mais lentamente e apresentam menores velocidades de resfriamento. Nestes materiais a energia do processo é melhor aproveitada para a fusão localizada. Entretanto, materiais com alta condutividade térmica, como o cobre, dissipam rapidamente o calor, aumentando a velocidade de

resfriamento e reduzindo a eficiência da fusão localizada (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012)

- Geometria da junta: sendo todos os outros parâmetros constantes, uma junta em ângulo possui três regiões para o fluxo de calor, enquanto uma junta de topo possui apenas duas regiões. Logo, na junta em ângulo tende a resfriar mais rápido do que a junta de topo (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2009). A Figura 2.24 demonstra a fluxo de calor nas duas juntas.

Figura 2.24 – Escoamento do calor em juntas: (a) de topo e (b) em ângulo



Fonte: (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012)

- Espessura da junta: Para uma mesma condição de soldagem, uma junta de maior espessura facilita o escoamento do calor gerado pelo processo de soldagem. Logo, quanto mais espessa a junta, mais rápido é o resfriamento da peça. Isto ocorre até uma espessura limite, acima do qual a velocidade de resfriamento independe da espessura da junta (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2009).
- Energia de soldagem e temperatura inicial da peça: A velocidade de resfriamento diminui com o aumento destes parâmetros e há um aumento na largura da ZF e ZTA da junta soldada (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2009).

### 2.5-2 Características da Poça de Fusão

No processo de soldagem por fusão com eletrodos consumíveis, o metal de adição é transferido para a poça de fusão na forma de gotas cuja temperatura é muito elevada. Nas partes mais quentes da poça de fusão, regiões logo abaixo do arco elétrico, o metal de adição é misturado, sob forte agitação, ao metal de base fundido, que posteriormente se solidifica (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2009).

Nas regiões superaquecidas ocorre interação entre o metal fundido com os gases e escórias presentes na região do arco elétrico. Estas interações envolvem a absorção de gases, como oxigênio e hidrogênio, a redução de óxidos, a transferência de elementos de liga e impurezas da poça de fusão para a escória, ou da escória para a poça de fusão e a volatilização de alguns elementos, como por exemplo, alumínio, zinco, cromo, etc. (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2009).

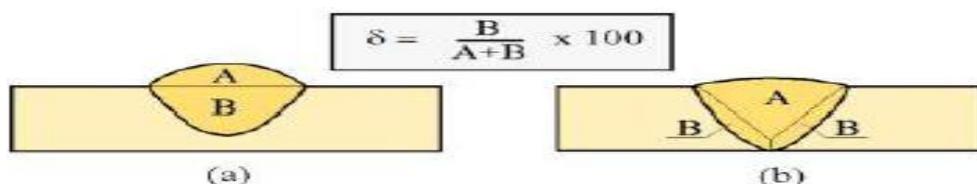
As intensidades destas interações, a composição química do metal de base e do metal de adição irá determinar a composição química final da ZF. Define-se como coeficiente de diluição ( $\delta$ ), ou diluição, a proporção do metal de base que participa da zona fundida. A equação 2.5 mostra como se calcula a diluição em uma junta.

---


$$(2.5)$$

A diluição pode ser medida em uma macrografia da seção transversal da solda, como mostra a Figura 2.25. O valor da diluição pode variar entre 100% para soldas sem metal de adição e 0% para a brasagem.

Figura 2.25 – Medida da diluição de: (a) um cordão depositado sobre uma chapa e (b) uma solda de topo



Fonte: (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012)

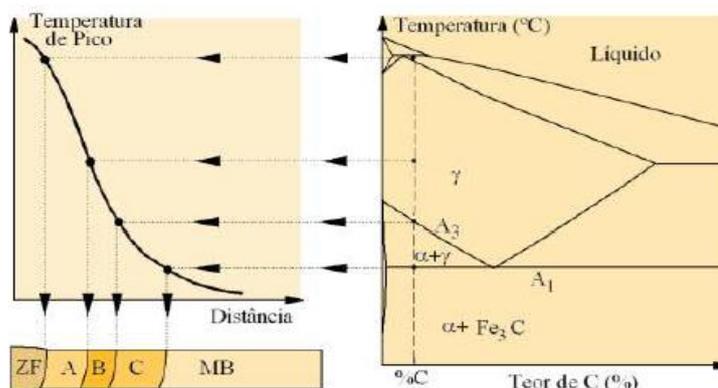
A importância do conceito de diluição pode estar associada quando deseja controlar a participação do metal de base na formação da solda, como por exemplo, na soldagem de materiais dissimilares, em processos de deposição de um revestimento especial em uma superfície metálica feito por soldagem e na soldagem de materiais de base cuja composição é desconhecida ou apresente elevados teores de impurezas ou elemento prejudiciais a zona fundida, como o enxofre, fosforo, carbono, dentre outros (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012).

### *5.2-3 Características da Zona Termicamente Afetada*

As características da ZTA são fundamentalmente dependente do tipo de metal de base e do processo e procedimento de soldagem, isto é, do ciclo térmico e da repartição térmica (MARQUES, MODENESE, BRACARENSE, 2009). Para facilitar a discussão sobre a ZTA e o metal base que esta sendo utilizado, as diferentes ligas metálicas serão divididas em quatro agrupamentos, sendo eles: ligas endurecidas por precipitação, ligas endurecidas por solução sólida, ligas endurecidas por encruamento e ligas transformáveis. Esta divisão é bastante simplificada, logo, vários materiais podem pertencer a mais de uma classe. Esta classificação tem como objetivo permitir uma visão geral e sistematizada das alterações que podem ocorrer na ZTA para diferentes materiais (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012). Como neste trabalho visa os aços carbonos, que de certa maneira pode ser tratada somente como ligas transformáveis. Devido a isto, o foco principal será nessa classe de liga.

Em metais transformáveis, a ZTA será bastante complexa. No caso dos aços carbono e aços baixa liga, está apresentará diferentes regiões características, como pode ser vista na Figura 2.26.

Figura 2.26 – Estrutura da ZTA de um aço Carbono. A- Região de crescimento de grão, B- Região de refino de grão e C- Região intercrítica



Fonte: (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012)

A região de crescimento de grão (A) é submetida a uma temperatura de pico acima de 1200°C, e é caracterizada por um grande crescimento de grão austenítico. A microestrutura final do aço é dependente de sua composição química e da sua velocidade de resfriamento. Em função do aumento da temperabilidade, devido ao aumento do tamanho dos grãos, esta região é caracterizada por um local rico em microestruturas martensítica e por isso, tende a ser a região mais problemática da ZTA, podendo apresentar elevada dureza, perda de tenacidade, e ser comum o surgimento de trincas (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012).

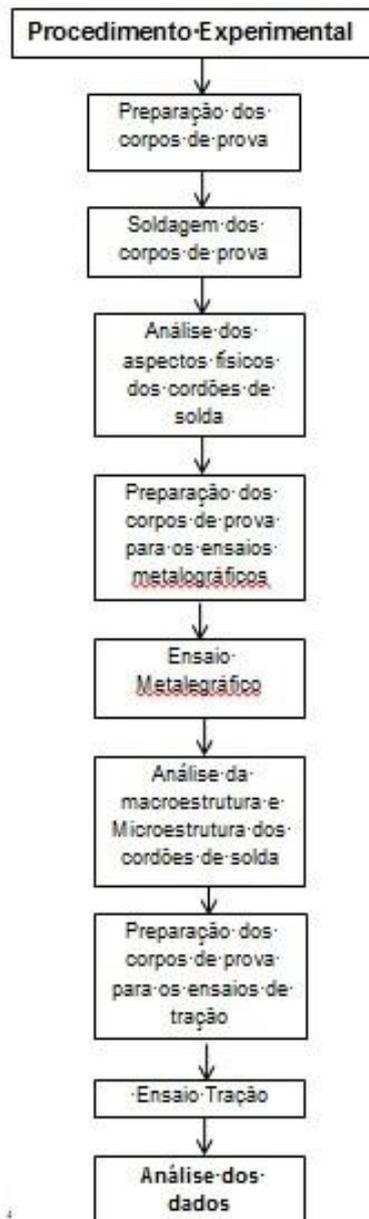
A região de refino de grão (B) atinge uma temperatura de pico entre A<sub>3</sub> e 1200°C, sua estrutura apresenta granulação fina da austenita, semelhante a um aço normalizado, sendo em geral, uma região não problemática na ZTA dos aços carbono, por apresentar, microestrutura fina de ferrita e perlita após o resfriamento da junta.

A região intercrítica (C) é uma região que apresenta transformação parcial de sua estrutura original e é submetida a temperaturas de pico entre A<sub>1</sub> e A<sub>3</sub>. Na soldagem multipasse pode surgir, nesta região, constituintes de elevada dureza e baixa tenacidade. Regiões mais afastadas da junta correspondem ao metal de base aquecido a temperaturas inferiores a A<sub>1</sub> e nestas regiões não há mudanças microestruturais (MODENESE, MARQUES, SANTOS, 2012).

### 3- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O trabalho experimental foi feito segundo o fluxograma abaixo, Figura 3.1.

Figura 27 – Fluxograma do trabalho experimental



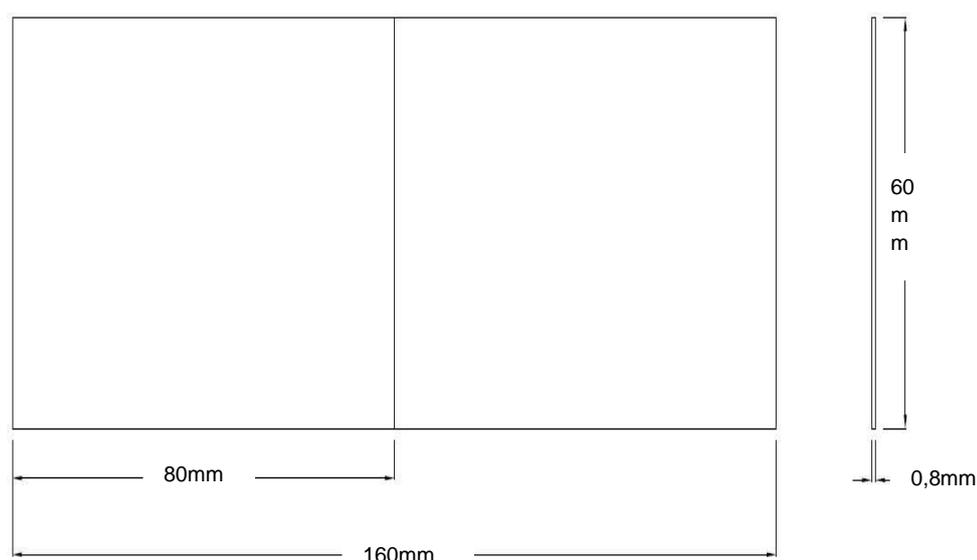
Fonte: Autor

Os corpos de prova foram preparados mediante corte de chapas de aço SAE 1020, em proporção definida, conforme figura 3.2. Posteriormente, foram soldados pelo processo MIG/MAG e brasagem a arco com análise de suas características, atentando-se a porosidade, largura de cordão, mordeduras, e outros aspectos indesejados no cordão. Procedeu-se a metalografia dos corpos de prova e ao ensaio de tração, com coleta de imagens macroestruturais e microestruturais, bem como a determinação do limite de resistência de tração das juntas soldadas e brasadas.

### 3.1- Material Base e Consumíveis Utilizados

Foram utilizados como corpos de prova, chapas de aço carbono SAE 1020, cujas dimensões são 60 mm de largura, 80 mm de comprimento e 0,8 mm de espessura, Figura 3.2. Estas chapas foram preparadas para os testes de soldagem, no qual a junta de topo foi escolhida para a realização dos procedimentos. .

Figura 28- Layout das Chapas para Soldagem e Brasagem a Arco



Fonte: Autor

Os materiais de adição escolhidos para a realização da brasagem a arco foram dois arames da marca Brastak. BT 531 e 513. Para a soldagem MAG foi utilizado um arame eletrodo ER 70S-6 da marca Esab. Os arames BT 531, BT 513 e ER 70S-6 possuíam diâmetro de 0,8 mm, 0,8mm e 1,0 mm, respectivamente.

As Tabelas 3.1 e 3.2 exibem as composições químicas dos arames empregados.

**Tabela.3.1 - Composição Química (% peso) dos Arames Eletrodos da BRASTAK**

<b>Arames</b>	<b>Cu</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Sn</b>	<b>Zn</b>
<b>BT 513</b>	Restante	2,80–4,00	-	1,50	0,50	1,00	1,00
<b>BT 531</b>	Restante	0,10	6,00-8,50	0,50	-	-	-

Fonte: Adaptado de (BRASTAK,2002)

**Tabela 3.2 - Composição Química (% peso) do Arame Eletrodo da ESAB**

<b>Arame</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>
<b>ER 70S-6</b>	Restante	0,06-1,15	0,80-1,15	1,40-1,85

Fonte: Adaptado de (ESAB, 2005)

Na brasagem a arco utilizou-se argônio puro como gás de proteção. Já a soldagem GMAW convencional valeu-se de uma mistura de 75% de argônio e 25% de CO<sub>2</sub>.

### **3.2- Equipamentos**

- Para a realização dos testes de solda-brasagem e soldagem pelo processo GMAW utilizou-se a máquina MIG/MAG modelo VI 475 da WHITE MARTINS operando em modo tensão constante.
- Para a realização dos testes de soldagem foi utilizado um dispositivo para a fixação do corpo de prova

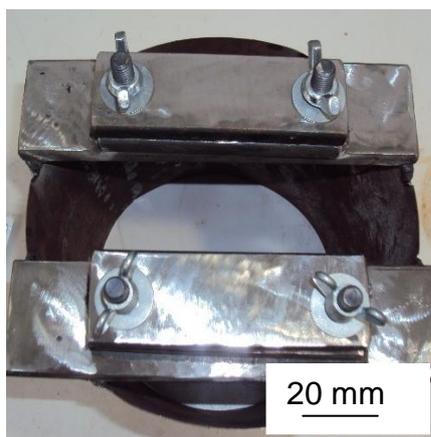
A Figura 3.3 e 3.4 apresenta a máquina de solda e o dispositivo para a fixação dos corpos de prova usados nos testes.

Figura 29 - Máquina MIG/MAG



Fonte: Autor

Figura 30 - Dispositivo de Fixação



Fonte: Autor

### 3.3- Métodos

#### 3.3.1- Testes Práticos de soldagem e brasagem a arco

Depois da preparação dos materiais e dos corpos-de-prova, através do corte de chapas de aço SAE 1020 de dimensões já especificadas e montagem do dispositivo, foram feitos testes preliminares de solda brasagem e soldagem MIG/MAG sobre as chapas de aço carbono. O objetivo dos testes preliminares foi definir parâmetros de soldagem adequados a união das juntas. Os parâmetros escolhidos foram os que apresentaram melhores padrões visuais dos cordões de solda e que ofereceram boa estabilidade do arco elétrico.

Quatro procedimentos distintos foram realizados manualmente, conforme descrição sucinta abaixo.

1. Soldagem pelo processo GMAW com polaridade inversa (CC<sup>+</sup>).
2. Soldagem pelo processo GMAW com polaridade direta (CC<sup>-</sup>).
3. Solda-Brasagem utilizando o arame eletrodo BT 513 com polaridade inversa (CC<sup>+</sup>).
4. Solda-Brasagem utilizando o arame eletrodo BT 531 com polaridade inversa (CC<sup>+</sup>).

Os parâmetros de soldagem para os procedimentos 1 e 2 estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros de Soldagem pelo Processo GMAW

<i>Tensão em vazio (V)</i>	<i>Tensão de soldagem (V)</i>	<i>Corrente de soldagem (A)</i>	<i>Velocidade de alimentação (mm/s)</i>	<i>Vazão de Gás (L/mim)</i>
16,0	13,0-15,0	60,0-70,0	14,0 ± 0,2	15,0

Fonte: Autor

Os procedimentos de brasagem, 2 e 3, foram feitos utilizando como gás de proteção o argônio puro, cujo parâmetros de soldagem estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - **Parâmetros de Utilizados na Solda Brasagem**

<i>Tensão em vazio (V)</i>	<i>Tensão de soldagem (V)</i>	<i>Corrente de soldagem (A)</i>	<i>Velocidade de alimentação (mm/s)</i>	<i>Vazão de Gás (L/mim)</i>
15,0	13,0	65,0-70,0	4,85 ± 0,2	17,0

Fonte: Autor

Para cada procedimento foram realizados quatro testes nos quais a junta de topo foi à empregada, sem abertura de raiz. No primeiro teste de cada procedimento retirou-se uma amostra que foi designada para ensaio metalográfico que possibilitou as análises macroscópica e microscópica. Para os demais testes, as juntas soldadas foram enviadas para ensaio mecânico de tração.

### 3.3.2- *Ensaio Metalográfico*

As juntas soldadas e brasadas que foram designadas para análises macroestrutural e microestrutural passaram por um procedimento convencional, envolvendo corte com disco abrasivo, embutimento a frio com resina de poliéster, lixamento com carbetto de silício em diferentes granulometrias (#240, #320, #400, #600) e polimento com pasta de diamante (9µm, 3µm e 1µm). Os principais equipamentos empregados foram: cortadeira Struers, lixadeiras Struers, e politrizes Arotec. O ataque químico foi realizado por aplicação com o reativo Nital (ácido nítrico em solução de álcool etílico), nas proporções de 3% e 5%. Os equipamentos empregados neste procedimento estão apresentados na Figura 3.5.

Figura 31 – Equipamentos Utilizados para o Ensaio Metalográfico



(a) Cortadeira Struers



(b) Lixadeiras Struers



(c) Pulverizadores Arotec

Fonte: Autor

Após a preparação das amostras foram feitas as macrografias e as micrografias. Para análise micrográfica utilizou-se microscópio óptico da marca Fortel como pode ser visto na Figura 3.6.

Figura 32 - Microscópio Óptico



Fonte: Autor

### 3.3.2- Ensaio de Tração

Os testes de tração foram conduzidos em uma máquina universal de tração modelo WPM - ZD 20 como mostra a Figura 3.7. Realizaram-se testes de tração com a mesma velocidade de deslocamento para todos os corpos de prova. A carga empregada para este ensaio foi de 2000 Kgf.

**Figura 33 – Máquina de Ensaio de Tração Universal Modelo WPM - ZD 20**



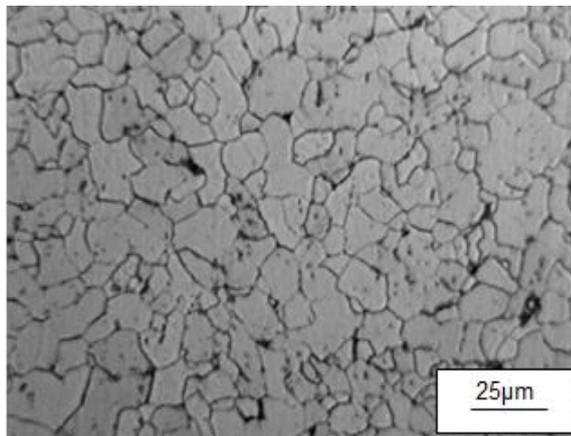
Fonte: Autor

## 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1- Características do Metal de Base

Como já exposto anteriormente, o metal de base utilizado para os procedimentos realizados foi um aço carbono SAE 1020. A Figura 4.1 a seguir mostra a microestrutura deste material. Percebe-se que a microestrutura presente é predominantemente de uma matriz ferrítica, distribuída em pequenos grãos.

Figura 34 – Micrografia do Material de Base. Ataque Nital 3%. Aumento (400X)



Fonte: Autor

O aço carbono utilizado apresenta baixa dureza, boa ductilidade e certa facilidade de ser soldado uma vez que, em seu resfriamento, as microestruturas presentes na ZTA não serão de alta dureza e baixa ductilidade como, a microestrutura martensítica (MODENESI, 2012).

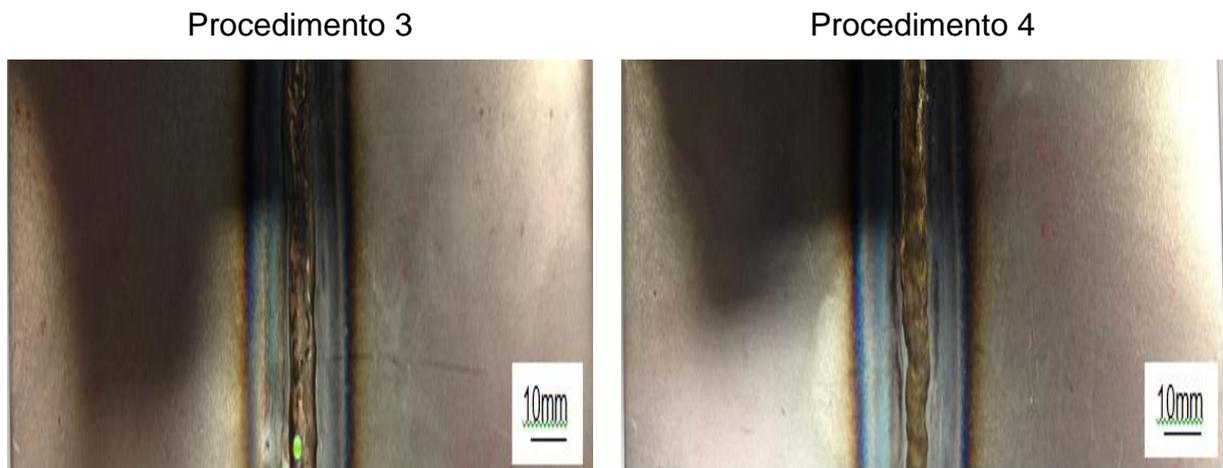
### 4.2- Solda Brasagem-MIG em Chapas de Aço SAE 1020

O gás de proteção escolhido para os procedimentos 3 e 4 foi o argônio, uma vez que é mais denso que o ar atmosférico sendo um fator positivo para a soldagem na

posição plana. Ademais, no processo MIG-Brazing no qual se utiliza como metal de adição uma liga de cobre, e esta por sua vez em contato com oxigênio e exposição a altas temperaturas tende a oxidar. Assim, o processo de união é dificultado pelo alto ponto de fusão do óxido de cobre.

Foi notório que o processo de brasagem a arco elétrico apresentou baixo nível de respingo e que não foi observado a presença de trincas, poros, mordeduras, como evidenciado pela Figura 4.2. Observou-se que o modo de transferência metálica presente nos procedimentos 3 e 4 foi curto circuito

**Figura 35 – Aspecto Visual dos Cordões de Solda dos Procedimentos 3 e 4**



Fonte: Autor

Outro ponto a comentar é que mesmo variando a vazão de gás para os testes do procedimento 3 os cordões de solda apresentaram grande quantidade de uma mancha escura.

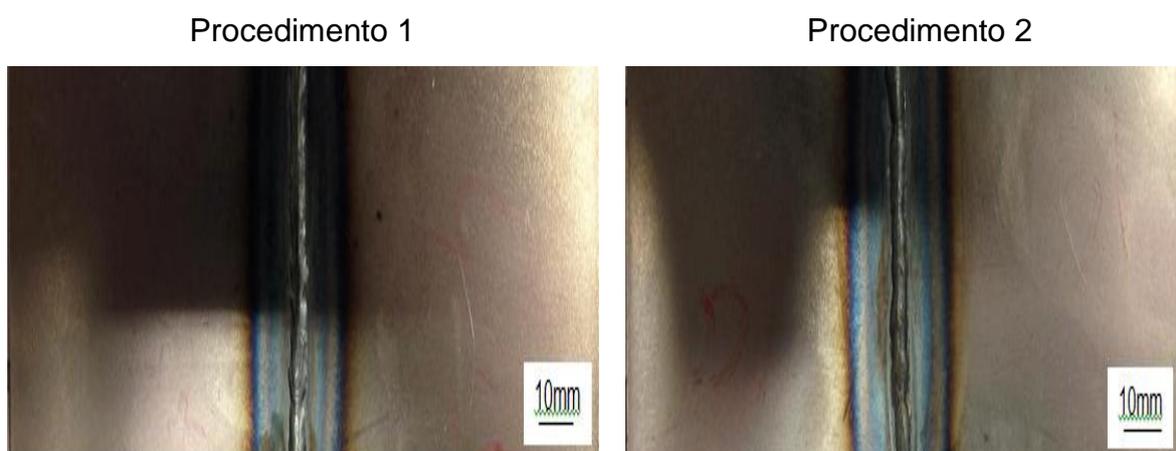
Por se tratar de um processo manual, a distância do bico de contato até a peça (DBCP) não pode ser verificada, contudo foi percebido que valores altos de DBCP levam um aumento da instabilidade do arco e falta de proteção da junta soldada contra os gases atmosféricos.

### 4.3- Solda GMAW em Chapas de Aço SAE 1020

Como relatado no capítulo 2, para a soldagem de aços carbono devem ser feitas com gás ativo para viabilizar a emissão catódica e assim garantir a boa estabilidade do arco elétrico.

Nos procedimentos nos quais se utilizaram a soldagem também apresentou baixo índice de respingos como pode ser visto na Figura 4.3. Não foi notada a ocorrência de poros e mordeduras, e que os cordões de solda apresentaram bons aspectos físicos. O modo de transferência metálica observado na soldagem GMAW nos procedimento 1 e 2 foi o curto circuito

Figura 36 – Aspectos dos Cordões de Solda dos Procedimentos 1 e 2



Fonte: Autor

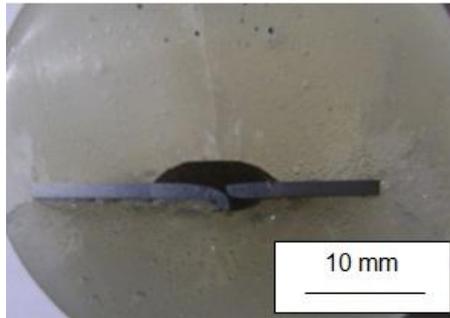
### 4.4- Avaliação das Macrografias e Micrografias dos Procedimentos Realizados

#### 4.4.1- Solda brasagem-MIG Utilizando Arame de Cu-Si como Material de Adição

Foram feitas macro e micrografias de um cordão de solda realizado pelo procedimento 3. A macrografia está exibida na Figura 4.4. Verifica-se que o perfil do

cordão de solda é de boa qualidade, apesar de apresentar falta de penetração na raiz. Percebe-se também que aparentemente ocorreu pouca fusão do metal de base.

Figura 37 – **Macrografia do cordão de solda utilizando o Procedimento 3**

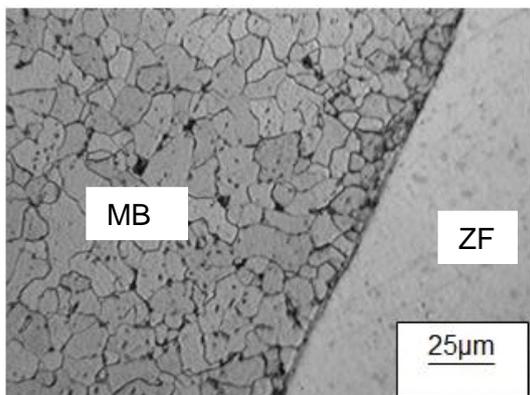


Fonte: Autor

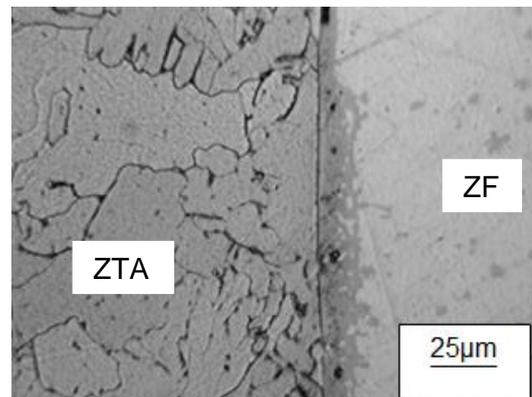
Analisando a microestrutura notou-se que realmente não houve fusão considerável do material de base para o procedimento 3. Nota-se, que há regiões de crescimento de grão próximo à zona fundida o que caracteriza a ZTA. Entretanto também, há regiões próximas a ZF que não cresceram grão o que é um indício que neste local não ocorreu zona termicamente afetada como pode ser visto na Figura 4.5.

Figura 38 – **Micrografias do Cordão de Solda Utilizando o Procedimento 3.**  
**Aumento (400X)**

Região de não ocorrência de ZTA



Região onde ocorreu ZTA



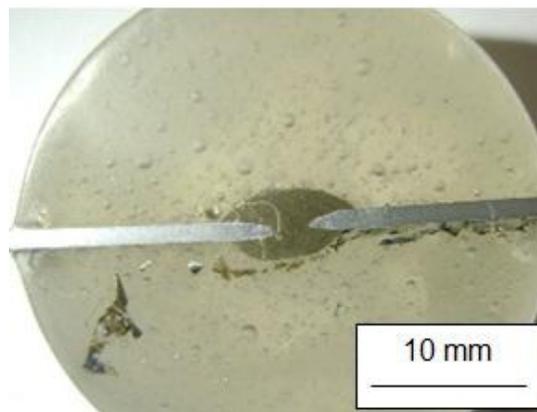
Fonte: Autor

Verifica-se que regiões onde ocorre a fusão do metal de base há também a presença da zona termicamente afetada e que regiões onde não ocorre fusão do metal de base não há ZTA.

#### 4.4.2- Solda brasagem-MIG Utilizando Arame de Cu-Al como Material de Adição

A macrografia a seguir mostra um cordão de solda utilizando o procedimento 4, Figura 4.6. Percebe-se uma junta brasada tem bom aspecto físico e com relativa molhabilidade. Verifica-se também que ocorreu penetração total da junta com adequado espalhamento na raiz. Neste caso, observa-se também que visivelmente ocorreu a fusão do metal de base.

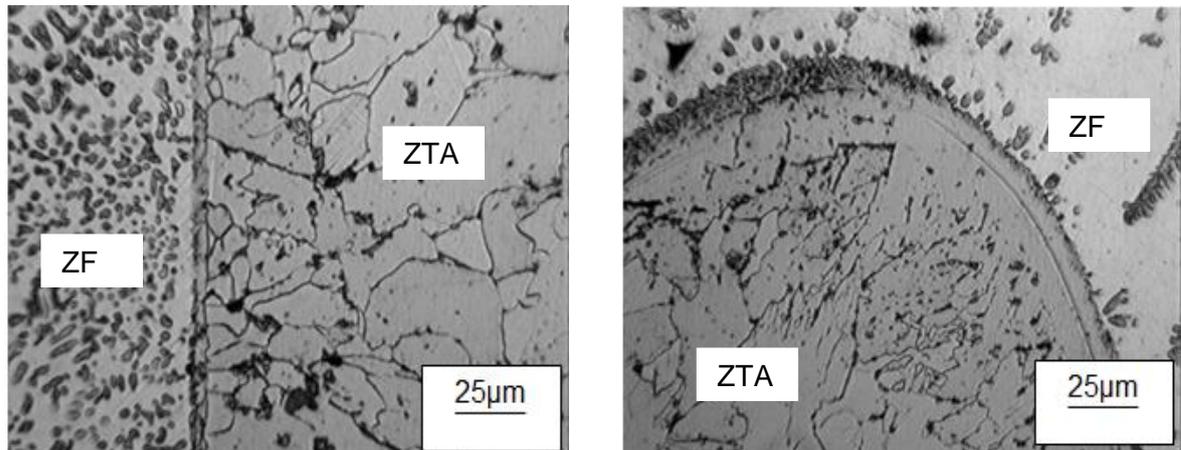
Figura 39 – **Macrografia do Cordão de Solda Utilizando o Procedimento 4**



Fonte: Autor

Diferentemente do caso anterior (tópico 4.4.1) notou-se crescimento dos grãos de ferrita próximo à zona fundida caracterizando a ZTA, Figura 4.7. Esta matriz ferrítica grosseira é caracterizada por apresentar baixa resistência mecânica (MODENESI, 2012). Outra diferença que se pode perceber é que ocorreu excessiva fusão do metal de base.

Figura 40 – Micrografia do Cordão de Solda Utilizando o Procedimento 4.

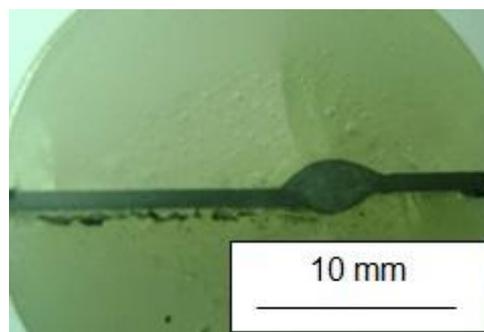


Fonte: Autor

#### 4.4.3- Soldagem GMAW Utilizando Polaridade Inversa

Foi realizado macrografia do cordão de solda empregando o procedimentos 1, Figura 4.8. Nota-se que ocorreu a fusão total da junta soldada e que o cordão atingiu boa molhabilidade e penetração adequada.

Figura 41 – Macrografia do Cordão de Solda Empregando o Procedimento 1



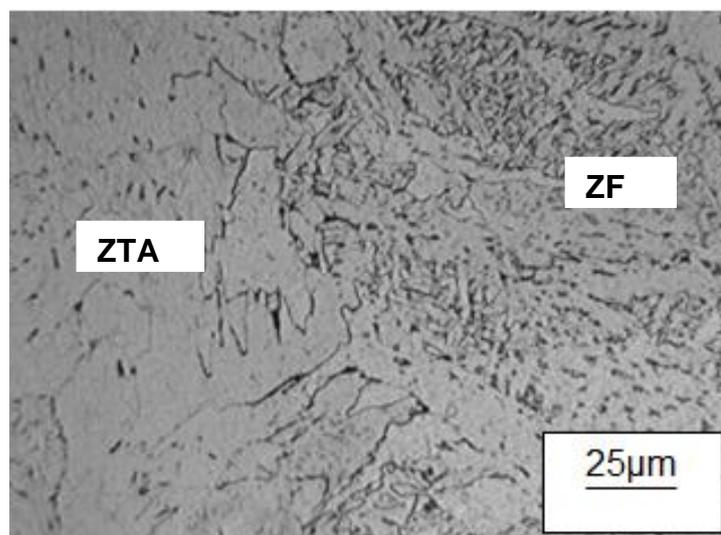
Fonte: Autor

Observando a micrografia apresentada na Figura 4.9 percebe-se a ocorrência de uma grande região de crescimento de grão ferrítico em toda a extensão da ZTA. E

como já era de se esperar houve a fusão total da junta soldada. Na zona fundida ocorre a formação de uma matriz ferrítica constituída, principalmente, por ferrita acicular fina. Porém, pode-se notar também a presença de ferrita de segunda fase. Este fenômeno ocorre em função da grande velocidade de resfriamento do cordão de solda que dificulta a difusão total dos átomos.

A ferrita acicular dispostas em pequenos grãos, apresenta alta resistência mecânica e tenacidade em relação as outra microestruturas que podem ser formadas na soldagem de aços carbonos como a ferrita de contorno de grão, a ferrita de segunda fase, dentre outras (MODENESI, 2012).

Figura 42 – Micrografia do Cordão de Soda Utilizando o Procedimento 1.

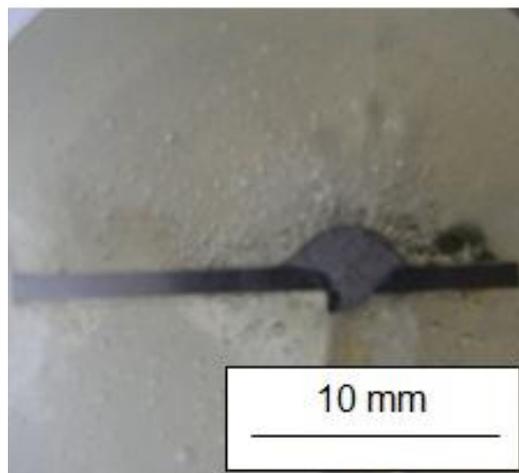


Fonte: Autor

#### *Soldagem GMAW Utilizando Polaridade Direta*

A macrografia a seguir mostra o cordão de solda utilizando o procedimento 2, Figura 4.10. Observa-se que o houve baixa molhabilidade na superfície da junta e que não houve penetração adequada na raiz. É visto também a ocorrência de fusão total da junta soldada.

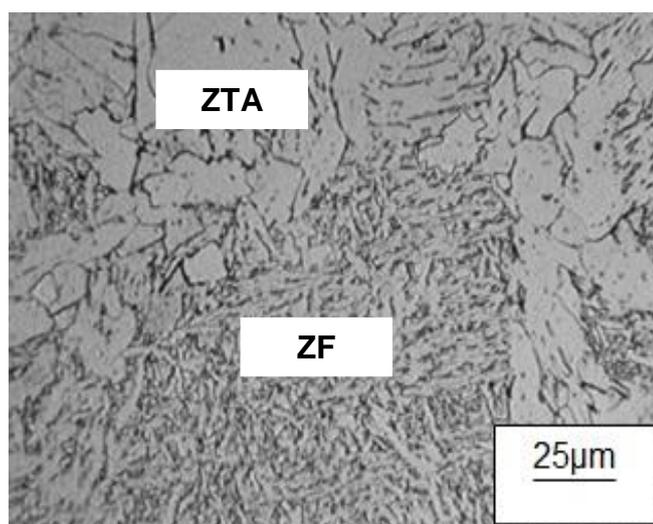
Figura 43 – Macrografia do Cordão de Solda Utilizando o Procedimentos 2



Fonte: Autor

A micrografia deste cordão de solda é bem semelhante ao cordão anterior (tópico 4.4.3), Figura 4.11. Observam-se regiões de crescimento de grão ferrítico na ZTA e a presença de grande quantidade de ferrita acicular na ZF. Diferentemente do cordão de solda anterior, percebe-se a presença de pequena quantidade de ferrita acicular também na ZTA.

Figura 44 – Micrografia do Cordão de Solda Empregando o Procedimento 2.



Fonte: Autor

#### 4.5- Avaliação das Propriedades Mecânicas das Juntas de Topo

Foi realizado ensaio de tração nas juntas soldadas e brasadas dos diferentes procedimentos realizados. Como foi mencionado foi separado 3 corpos de prova de cada procedimento para a realização do ensaio. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.1 - Resultados dos Ensaio de Tração das Juntas de Topo

Procedimentos	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão Limite de Resistência (MPa)			Média das tensões limite de resistência (MPa)
				LR1	LR2	LR3	LRM
1	38,0	0,8	31,0	339	348	-	344
2	38,0	0,8	31,0	-	335	332	334
3	38,0	0,8	31,0	33,9	345	355	346
4	38,0	0,8	31,0	348	348	316	337

Fonte: Autor

##### 4.5.1- Procedimentos 1- Soldagem GMAW com CC<sup>+</sup>

Para os corpos de prova no qual foi empregado o procedimento 1 considerou somente o valor de dois resultados obtidos pelo ensaio de tração devido à discrepância do terceiro resultado que estava muito abaixo do esperado. Obteve-se uma media das juntas soldadas de 344 MPa, sendo que as fraturas das juntas soldadas ocorreram no metal de base como visto na Figura 4.12.

**Figura 45 – Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Soldadas pelo Procedimentos 1**

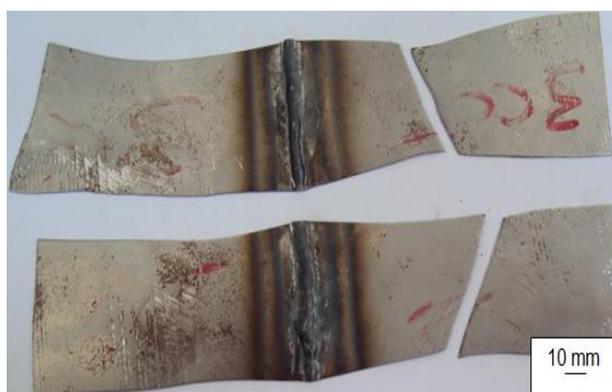


Fonte: Autor

#### *4.5.2- Procedimento 2- Soldagem GMAW com CC<sup>+</sup>*

Já as juntas soldadas utilizando o procedimento 2, o LRM foi de 334 MPa. Neste caso também se desprezou um dos valores de tração obtidos por este apresentar valor muito inferior aos outros dois ensaios. Notou-se que nos dois casos considerados a ruptura dos corpos de prova aconteceu no metal de base. A Figura 4.13 a seguir mostra a região da fratura dos corpos de prova soldados pelo procedimento 2.

**Figura 46 - Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Soldadas pelo Procedimento 2**



Fonte: Autor

#### 4.5.3- Procedimento 3- Solda Brasagem-MIG Utilizando metal de adição de Cu-Si

Os corpos de prova brasados a arco utilizando o procedimento 3 apresentaram os maiores valores de tensão limite de resistência dos procedimentos feitos, no qual a media destes valores de limite de resistência foi de 346 MPa. Todos os corpos de prova neste caso a fratura ocorreu no material de base como pode ser visto na Figura 4.14.

Figura 47 - **Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Brasadas pelo Procedimento 3**

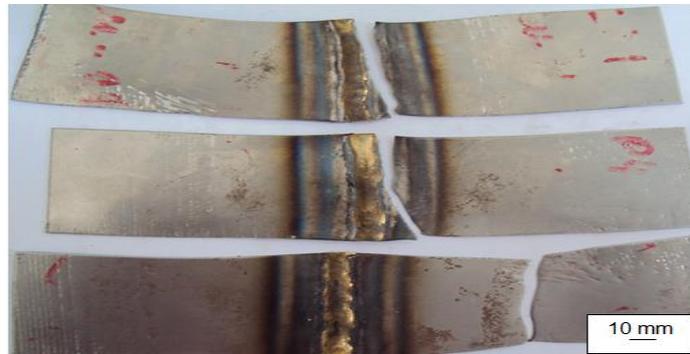


Fonte: Autor

#### 4.5.4- Procedimentos 4- Solda Brasagem-MIG Utilizando metal de adição de Cu-Al

A solda brasagem utilizando o procedimento 4 dos corpos de prova retornaram uma media de limite de resistência a tração de 337 MPa. Notou-se que neste caso duas das três amostras romperam na ZTA e uma delas rompeu no metal de base como mostrado na Figura 4.15.

**Figura 48 - Corpos de Prova após o Teste de Tração de Juntas Brasadas pelo Procedimento 4**



Fonte: Autor

#### **4.6- Avaliação dos Procedimentos Realizados**

Empregando o procedimento 3, foi observado regiões bem próximas a zona fundida sem alterações no tamanho dos grão de ferrita, Figura 4.5. Nota-se também, que com a utilização deste experimento que houve pouca fusão do metal de base. Então, pode-se dizer que com a utilização de parâmetros corretos de brasagem a arco se consegue obter a união de chapas finas de aço sem a presença de fusão do metal de base e da ZTA.

Percebe-se que as chapas brasadas a arco elétrico atingiram resistência mecânica próxima e até mesmo superior as chapas que foram soldadas. Este fenômeno pode ser explicado devido às ligas de cobre quando são deformadas sofrem um grande encruamento que tende a impedir a deformação plástica.

## CONCLUSÃO

- Foi visto que na brasagem a arco elétrico com o emprego do arame eletrodo de Cu-Si não houve fusão significativa do metal de base. Observou-se também, que para este procedimento, ocorreu o crescimento dos grãos de ferrita, somente, próximas a regiões onde o metal de base atingiu a fusão.
- No processo de brasagem-MIG a ligação entre o metal base e o metal de adição se dá, preferencialmente, por difusão atômica. Entretanto este processo é passível de ocorrer à fusão e diluição do metal de base e metal de adição que influencia na ligação metálica presente.
- A resistência mecânica alcançada pela junta empregando o processo de brasagem foi próxima e até mesmo superior à resistência mecânica alcançada pela junta utilizando processo de soldagem GMAW convencional, com polaridade direta ou inversa.
- Em virtude do metal de base utilizado ser um aço com baixo teor de carbono ocorreu na ZTA somente um aumento dos grãos de ferrita, sem a presença de microestruturas frágeis como a martensita. Contudo, verificou-se, através da microestrutura gerada, que com o emprego do procedimento 3 houve a redução da ZTA e que há regiões próximas a zona fundida que não foram afetadas termicamente.
- Verificou-se que as juntas soldadas e brasadas foram de boa qualidade, uma vez que, as fraturas dos corpos de prova no ensaio de tração ocorreram fora do cordão de solda.
- Percebe-se que mediante a alta velocidade de resfriamento dos cordões de solda, das juntas soldadas pelos procedimentos 1 e 2, conferiu na zona fundida uma grande quantidade de ferrita acicular.
- Percebe-se que com a otimização dos parâmetros de soldagem para o processo de brasagem a arco elétrico pode-se obter união de chapas finas de aço carbono sem a presença de fusão localiza do metal de base e com a redução ou mesmo a eliminação da ZTA.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANDRADE, Aurélio Silva de. **Estudo da união do aço inoxidável austenítico 304 pelo processo de solda brasagem-MIG**. 2003. 91 f. Dissertação (Mestrado) - UFMG, Belo Horizonte, 2003.
- 2 BARCELOS, Sérgio Martins. **Influência da temperatura e corrente de trabalho nas características elétricas e mecânicas do cobre eletrolítico**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado) - UFRGS, Rio Grande do Sul, 2010.
- 3 BRASTAK. **Soldas e fluxos**. Brastak. São Paulo, 2002.
- 4 COUTINHO, T. A. **Metalografia de não-ferrosos**, Edgard Blücher, p. 41-58, 1980.
- 5 **ESAB PULSED GAS-SHIELDED METAL ARC BRAZING OF SURFACE-COATED SHEETS**. Göteborg: Esab, v. 54, 2000.
- 6 ESAB. **Fixa do Fabricante do Produto: Material Safety Data Sheet - MSDS** . 2005.
- 7 FORTES, Cleber. **Metalurgia da soldagem**. 2004. Apostila da ESAB.
- 8 GUIMARÃES, Ari Sauer et al. Uma avaliação do comportamento da camada de zinco em chapas galvanizadas brasada por arco elétrico. **Soldagem & Inspeção**, Rio de Janeiro, n. , p.70-78, 29 mar. 2006.
- 9 JOSEPH, Andy et al. Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 56., 2003, Bucharest. **XX-11779-03**. Bucharest, 2003.
- 10 KOU, Sindo. **Welding metallurgy**. 2º ed. Nova Jersey: A John Wiley & Sons, 2003.
- 11 MARQUES, Paulo Villani. **Tecnologia da soldagem**. Belo Horizonte: Esab, 1991. 352 p.
- 12 MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363 p.
- 13 MENDES, Marcelo Tavares. **União de chapas galvanizadas através de brasagem por processo "MIG-Brasing"**. 2003. 135 f. Tese (Doutorado) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- 14 MODENESI, Paulo. **Introdução a Física do Arco: Soldagem I**. Belo Horizonte, 2012. 41 p.
- 15 MODENESI, Paulo J. Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Ufmg, Belo Horizonte, 2012.
- 16 RANGEL, Alessandro Fontão et al. Avaliação de Junta Soldada pelo Processo MIG-BRAZING por Meio de Técnicas Metalográficas. **Soldagem & Inspeção**, Rio de Janeiro, n. , p.48-53, 02 abr. 2005.
- 17 SCOTT, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: Artliber, 2008. 284 p.
- 18 SILVA, Guilherme Marconi. **Estudos para observação da ocorrência da fragilização induzida por metal líquido em um processo de solda**

- brasagem-MIG de aços inoxidáveis e aços galvanizados com metal de adição à base cobre e alumínio.** 2006. 79 f. Dissertação (Mestrado) - UFMG, Belo Horizonte, 2006.
- 19 WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem:** Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1992. 504 p.