

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

VENILTON MENEZES VIEIRA FERREIRA

**PROCESSO “MIG-BRAZING”: VARIÁVEIS, APLICABILIDADE E AVALIAÇÃO
DAS PROPRIEDADES DA JUNTA**

BELO HORIZONTE

2019

VENILTON MENEZES VIEIRA FERREIRA

**PROCESSO “MIG-BRAZING”: VARIÁVEIS, APLICABILIDADE E AVALIAÇÃO
DAS PROPRIEDADES DA JUNTA**

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 a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Ivan J. de Santana
Co-orientadora: Prof. Elaine C. Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2019

VENILTON MENEZES VIEIRA FERREIRA

**PROCESSO “MIG-BRAZING”: VARIÁVEIS, APLICABILIDADE E AVALIAÇÃO
DAS PROPRIEDADES DA JUNTA**

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 a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 27/11/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ivan J. de Santana

Prof. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Anderson Edson da Silva

À minha amada família, por sempre me apoiar durante todo esse trajeto e ser a minha base para todas as minhas conquistas e felicidades e o colo onde recebo consolo nos momentos de dificuldade e de tristezas

AGRADECIMENTOS

Agradeço e louvo primeiramente a Deus que sempre me guiou e me iluminou em toda essa caminhada. Nos momentos de luz e de escuridão Ele sempre esteve comigo me dando forças para completar esse ciclo.

Agradeço ao CEFET-MG por todo o suporte oferecido e por me acolher tão bem, me disponibilizando a estrutura e as condições necessárias para a realização desse trabalho.

Presto meus agradecimentos especiais ao Prof. Ivan J. de Santana, que se mostrou muito mais do que um orientador nesses dois últimos semestres, sabendo me aconselhar com sabedoria, me instruir com discernimento e me nortear em meio a dúvidas. Agradeço ainda por todas as conversas que tivemos que muito me engrandeceram como ser humano e pelas suas exímias aulas que contribuíram de forma única para a minha formação como engenheiro.

Estendo ainda meus sinceros agradecimentos à Prof. Elaine C. Siqueira Corrêa, que como co-orientadora me auxiliou de forma brilhante na realização desse trabalho, além de me fazer apaixonar ainda mais pelas Ciências dos Materiais com suas notáveis aulas; agradeço imensamente também ao Prof. Anderson Edson da Silva que se mostrou de uma gentileza sem igual para me ajudar e à todos os professores que contribuíram de alguma forma para a concretização desse trabalho ou para o meu aprendizado e minha formação como estudante e profissional.

Devo deixar meu agradecimento a todos os servidores do CEFET-MG por toda a ajuda que me foi prestada direta ou indiretamente, seja com algum favor ou com um simples "Bom dia!" sorridente. Em especial, meu sincero agradecimento ao técnico do laboratório de Fundação Gilberto Caldeira Faria que muito se dispôs a me ajudar e também por todas as nossas conversas que tornaram o frenesi do dia a dia mais suave.

Agradeço ainda à minha família e a todos os amigos que me apoiaram e acreditaram em mim, em especial à minha namorada Verônica por todo o carinho e apoio que me foram dados e à amiga Laura de Oliveira Ribeiro, por toda ajuda prestada.

Por fim agradeço a todas as pessoas que, mesmo no seu anonimato, contribuíram de alguma forma para a conclusão desse trabalho ou para a conclusão dessa etapa da minha vida. A todas essas, o meu "Muito obrigado!".

“O conhecimento torna a alma jovem e diminui a amargura da velhice. Colhe, pois, a sabedoria. Armazena suavidade para o amanhã.”

(DA VINCI, 14-?)

RESUMO

Em virtude do aumento da utilização de chapas de aço galvanizadas nas indústrias automobilísticas, houve nos últimos anos uma busca por processos de união que não comprometessem de forma muito severa o revestimento desses materiais. Nesse contexto, o processo “MIG-Brazing” tem se mostrado bastante interessante, aliando uma alta produtividade e um baixo aporte de energia, reduzindo a queima de revestimento de chapas galvanizadas em relação a processos convencionais de soldagem a arco. Esse trabalho avalia a aplicabilidade e as variáveis do processo “MIG-Brazing” na união de chapas finas de aço com e sem revestimento de zinco (chapas galvanizadas) e avalia as propriedades de juntas de topo brasadas a partir desse processo. Foi elaborada uma metodologia de brasagem mecanizada empregando o modo de corrente pulsada e utilizando um dispositivo de fixação desenvolvido para garantir melhores resultados do processo. Foram comparados dois diferentes materiais de deposição (ligas de bronze BT 531 e BT 513) em dois tipos de chapas de aço (com e sem revestimento de zinco). Foram feitas uniões de juntas de topo com diferentes espaçamentos, para verificar a influência deste parâmetro na resistência à tração da junta brasada. Os corpos de prova brasados passaram por análises visuais e metalográficas e os sinais elétricos do processo foram coletados por *software* (*WeldView*), para posterior análise do modo de transferência metálica atuante. Especificamente em relação às chapas galvanizadas, também foram feitas comparações entre a queima de revestimento de zinco provocada pelo processo de soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) em relação ao processo “MIG-Brazing”. Foram feitas ainda análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das regiões de fratura dos corpos de prova ensaiados por tração. Os resultados obtidos possibilitaram avaliar de forma positiva a aplicabilidade do processo “MIG-Brazing” na união de chapas finas com e sem revestimento, uma vez que os cordões brasados obtiveram bons aspectos visuais e as juntas apresentaram boa resistência mecânica à tração. O processo ainda se mostrou vantajoso na união de chapas galvanizadas em relação ao processo de soldagem GTAW, podendo-se concluir a possibilidade de uma metodologia viável da realização mecanizada do processo “MIG-Brazing” na união de chapas finas.

Palavras-chave: “MIG-Brazing”. Chapas de aço galvanizadas. Corrente pulsada. GTAW.

ABSTRACT

Due to the increased use of galvanized steel sheets in the automotive industries, there has been a search in recent years for joining processes that do not cause severe damage to the coating of these materials. In this context, MIG-Brazing process proves to be very interesting, combining high efficiency and low heat input, reducing the burning of galvanized sheet coating compared to conventional arc welding processes. This work evaluates the applicability and the variables of MIG-Brazing process in the joining of uncoated and zinc coated (galvanized sheets) thin steel sheets and evaluates the properties of brazed butt joints from this process. A mechanized brazing methodology has been developed using pulsed current and using a fixation device designed to ensure better process results. Two different filler metals (BT 531 and BT 513 bronze alloys) were compared on two types of steel sheets (zinc coated and uncoated). Butt-top joints with different gap distances were made to verify the influence of this parameter in brazed joint resistance. The brazed specimens were submitted for visual and metallographic examination and the electrical signals of the process were collected by software (WeldView) for further analysis of the metal transfer mode. Specifically in relation to galvanized sheets, comparisons were also made between zinc burning caused by Tungsten Gas Arc Welding (GTAW) compared to MIG-Brazing process. Scanning electron microscopy (SEM) analyzes were also performed of the fracture regions of the tension test specimens. The obtained results allowed to evaluate in a positive form the applicability of MIG-Brazing process for joining of uncoated and zinc coated thin steel sheets, since the brazed beads had good visual aspects and the joints had good mechanical resistance. The process still showed advantages for joining of galvanized steel sheets over GTAW process, concluding the possibility of a viable methodology for executing mechanized MIG-Brazing for the joining of thin steel sheets.

Keywords: MIG-Brazing. Galvanized steel sheets. Pulsed current. GTAW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representações de curvas características das fontes juntamente com uma curva característica do arco. (a) corrente constante e (b) tensão constante.....	20
Figura 3.2 – Representação esquemática das regiões do arco elétrico ao longo do eixo longitudinal.....	23
Figura 3.3 – Representação esquemática de curvas de CEA para diferentes comprimentos de arco	24
Figura 3.4 – Representação esquemática do processo “MIG-Brazing”	27
Figura 3.5 – Representações de juntas adequadas à brasagem a arco	28
Figura 3.6 – Diagrama de equilíbrio Cu-Si	31
Figura 3.7 – Ilustração da transferência no processo MIG-P	35
Figura 3.8 – Representação esquemática do ciclo térmico de soldagem.....	38
Figura 3.9 – Diagrama Fe-Fe ₃ C, mostrando as fases em equilíbrio nos aços	40
Figura 3.10 – Microestrutura esquemática de um aço em função da velocidade de resfriamento a partir da fase austenita	41
Figura 3.11 – Representação esquemática das regiões de uma junta soldada.....	42
Figura 3.12 – Representação esquemática da estrutura da ZTA de um aço baixo carbono	43
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas do trabalho	50
Figura 4.2 – Dimensões dos corpos de prova.....	51
Figura 4.3 – Projeto do dispositivo de fixação	52
Figura 4.4 – Dimensões do dispositivo de fixação.....	52
Figura 4.5 – Representação esquemática do processo de brasagem mecanizado	53
Figura 4.6 – Utilização do espessímetro para junta de 1,0 mm de espaçamento	54
Figura 4.7 – Corpos de prova a serem unidos com espaçamento de 1,0 mm.....	55
Figura 4.8 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração	56
Figura 4.9 – Amostras analisadas por MEV	57
Figura 5.1 – Emaranhamento do arame-eletrodo no alimentador	58
Figura 5.2 – Visão geral do processo “MIG-Brazing”	59
Figura 5.3 – Oscilograma da brasagem com arame BT 531 em chapa sem revestimento	60
Figura 5.4 – Oscilograma da brasagem com arame BT 513 em chapa sem revestimento	60
Figura 5.5 – Oscilograma da brasagem com arame BT 531 em chapa galvanizada	61
Figura 5.6 – Oscilograma da brasagem com arame BT 513 em chapa galvanizada	61
Figura 5.7 – Corpos de prova de chapa sem revestimento brasados	63

Figura 5.8 – Corpos de prova de chapa galvanizada brasados	63
Figura 5.9 – Macrografia dos corpos de prova brasados e soldados por GTAW	65
Figura 5.10 – Macrografia do arame BT 531 em chapa galvanizada.....	66
Figura 5.11 – Macrografia do arame BT 513 em chapa galvanizada.....	66
Figura 5.12 – Macrografia do arame BT 513 em chapa sem revestimento.....	67
Figura 5.13 – Macrografia do arame BT 531 em chapa sem revestimento.....	67
Figura 5.14 – Chapa galvanizada com arame BT 513.....	68
Figura 5.15 – Chapa galvanizada com arame BT 531.....	68
Figura 5.16 – Chapa galvanizada com cordão soldado por GTAW	69
Figura 5.17 – Resultados do ensaio de tração em chapas sem revestimento.....	70
Figura 5.18 – Preenchimento do metal de adição nas juntas.....	71
Figura 5.19 – Resultados do ensaio de tração em chapas galvanizadas	72
Figura 5.20 – Corpos de prova ensaiados (chapa sem revestimento; arame BT 531; sem espaçamento)	73
Figura 5.21 – Curva carga x deslocamento (chapa sem revestimento; arame BT 531; sem espaçamento)	73
Figura 5.22 – Corpos de prova ensaiados (chapa galvanizada; arame BT 531; espaçamento de 0,5 mm).....	74
Figura 5.23 – Curva carga x deslocamento (chapa galvanizada; arame BT 531; espaçamento de 0,5 mm).....	74
Figura 5.24 – Imagem da fratura da chapa de aço galvanizada com arame BT 531 e espaçamento de 0,5 mm.....	75
Figura 5.25 – Imagem da fratura da chapa de aço sem revestimento com arame BT 531 e espaçamento de 0,5 mm.....	75
Figura 5.26 – Imagem da fratura da chapa de aço sem revestimento com liga arame 513, sem espaçamento.....	76
Figura 5.27 – Imagem da fratura da chapa de aço sem revestimento com arame BT 531, sem espaçamento.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Composição química e faixa de temperatura dos arames utilizados	48
Tabela 4.2 – Parâmetros de brasagem utilizados.....	53
Tabela 4.3 – Parâmetros de soldagem utilizados.....	55
Tabela 5.1 – Composição química do revestimento da chapa galvanizada.....	58
Tabela 5.2 – Aporte térmico dos processos de brasagem e soldagem.....	66
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração em chapas sem revestimento	70
Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de tração em chapas galvanizadas.....	72

LISTA DE SIGLAS

AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CEA	Curva Estática do Arco
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CFC	Cúbica de Face Centrada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
DRX	Difração de Raio X
FRX	Espectroscopia de Raio X
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding-Pulse</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
IF	<i>Interstitial Free</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal Base
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
<i>MIG-P</i>	<i>Metal Inert Gas-Pulse</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TCC	Tetraedro de Corpo Centrado
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UHSS	<i>Ultra High Strength Steel</i>
VP-GMAW	<i>Variable Polarity Gas Metal Arc Welding</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Soldagem.....	17
3.2	Aspectos relacionados à segurança na soldagem.....	18
3.3	Fontes de energia.....	19
3.3.1	Fontes de energia para soldagem a arco elétrico.....	19
3.4	Soldagem a arco elétrico.....	21
3.5	Brasagem.....	25
3.5.1	Solda-brasagem.....	26
3.6	Processo MIG-Brazing.....	26
3.6.1	Visão geral, vantagens, desvantagens e aplicações.....	26
3.6.2	Equipamentos.....	29
3.6.3	Consumíveis.....	30
3.6.3.1	Metais de adição.....	30
3.6.3.2	Gases de proteção.....	31
3.6.4	Transferência metálica.....	32
3.7	Metalurgia da soldagem.....	36
3.7.1	Transferência de calor.....	36
3.7.2	Microestrutura das ligas de aço.....	39
3.7.3	Macroestrutura de juntas soldadas.....	42
3.8	O estado da arte.....	44
4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	48
4.1	Materiais.....	48
4.2	Equipamentos.....	48
4.3	Métodos.....	49
4.3.1	Caracterização do revestimento da chapa galvanizada.....	50
4.3.2	Preparação dos corpos de prova.....	51
4.3.3	Desenvolvimento do dispositivo de fixação dos corpos de prova.....	51

4.3.4	Procedimento de brasagem e soldagem.....	53
4.3.5	Aquisição dos sinais elétricos de brasagem.....	55
4.3.6	Confecção dos corpos de prova para ensaio de tração	56
4.3.7	Procedimentos do ensaio de tração.....	56
4.3.8	Procedimentos das análises metalográficas	57
4.3.9	Procedimentos do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5.1	Ensaio de FRX.....	58
5.2	Metodologia de brasagem.....	58
5.3	Avaliação dos sinais elétricos de brasagem.....	59
5.4	Avaliação visual dos cordões depositados	63
5.5	Análises metalográficas	64
5.5.1	Análise da ZTA e molhabilidade dos cordões depositados.....	64
5.5.2	Análise de diluição	66
5.5.3	Análise de queima de revestimento	68
5.6	Ensaio de tração.....	69
5.7	Análise da fratura do material tracionado.....	75
6	CONCLUSÕES	78
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Desde o final da década de 1990, houve um grande aumento na utilização de chapas de aço com revestimento de zinco (galvanizadas) em vários ramos da indústria de bens de consumo, principalmente na indústria automobilística, aplicados na construção da carroceria dos automóveis, por aliar boas propriedades mecânicas, boa resistência à corrosão e também um bom custo benefício. Os revestimentos de zinco em chapas de aço costumam ter espessuras entre 4 a 55 μm , dependendo das condições do processo de galvanização, aumentando consideravelmente a resistência à corrosão e assim a sua durabilidade (JOSEPH *et al.*, 2003).

Nesse contexto, uma das principais dificuldades encontradas para a união de chapas de aço galvanizadas por processos convencionais de soldagem a arco elétrico, tais como *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e GTAW está relacionada à alta energia associada a esses processos que, devido à baixa temperatura de vaporização do zinco (cerca de 908 °C), causa sua evaporação não só na região soldada, mas abrangendo uma região considerável, perdendo a proteção da chapa contra corrosão, podendo também gerar uma ZTA expressiva, além de tensões residuais que podem acarretar em grandes distorções das chapas soldadas. Além desses problemas, o vapor de zinco formado pode levar a instabilidades no arco elétrico de soldagem, podendo gerar uma alta incidência de respingos no processo e também descontinuidades nos cordões soldados. Considerando a indústria automobilística, o método de soldagem mais utilizado na construção de carrocerias é a soldagem por resistência, especificamente por pontos, na qual se utilizam eletrodos de ligas de cobre, que sofrem uma acelerada deterioração quando utilizadas para união de chapas de aço galvanizadas por conta do zinco, o que requer uma frequente troca dos eletrodos (BASAK *et al.*, 2013).

Com o intuito de contornar tais problemas, foi desenvolvido um processo aliando as características do processo GMAW com os processos de brasagem chamado de “GMA Brazing” ou “MIG-Brazing”. Neste processo a fonte de energia e a fonte de alimentação do eletrodo são os mesmos do processo GMAW e os arames utilizados (geralmente à base de ligas de cobre) possuem pontos de fusão abaixo do ponto de fusão do metal de base, possibilitando a não ocorrência de fusão do metal de base. Esse menor aporte de energia associado ao processo permite que nas uniões de chapas de aço galvanizadas, a vaporização de zinco ocorra apenas na região do cordão, deixando a chapa mais protegida contra corrosão do que chapas unidas por processos de soldagem a arco convencionais, além do processo gerar menor quantidade de vapor de zinco, o que tende a diminuir os problemas decorrentes

desse vapor (BASAK *et al.*, 2013). O processo “MIG-Brazing” geralmente utiliza o modo de corrente pulsada para reduzir o aporte de calor no processo, além de permitir maior estabilidade do processo, controlando-se os parâmetros de pulso de corrente, possibilitando uma transferência metálica com baixos valores médios de corrente, mantendo ainda um arco elétrico mais estável e o processo livre de respingos (JOSEPH *et al.*, 2003).

O processo “MIG-Brazing”, apesar de ser relativamente bem difundido, principalmente na Europa, possui muitas aberturas para novos estudos quanto à avaliação das juntas unidas por esse processo. Diante deste panorama, este trabalho propôs uma avaliação experimental da aplicabilidade e as principais variáveis do processo “MIG-Brazing” na união de chapas finas com e sem revestimento de zinco (chapas galvanizadas) e também uma avaliação das propriedades de juntas de topo brasadas a partir deste processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicabilidade e as variáveis do processo “MIG-Brazing” na união de chapas finas de aço com e sem revestimento de zinco (chapas galvanizadas) e avaliar as propriedades mecânicas das juntas brasadas.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma metodologia satisfatória para aplicação do processo “MIG-Brazing”.
- Analisar a aplicabilidade e as variáveis do processo “MIG-Brazing” em chapas finas de aço carbono e aço carbono galvanizadas.
- Analisar os sinais elétricos de tensão e corrente durante o processo “MIG-Brazing”.
- Avaliar a influência do revestimento de zinco na aplicabilidade do processo “MIG-Brazing”.
- Comparar a influência de diferentes materiais de deposição no processo “MIG-Brazing”.
- Analisar a ocorrência ou não de zonas termicamente afetadas nas juntas brasadas com o processo “MIG-Brazing”.
- Verificar se houve ou não a fusão do metal de base e diluição do metal de deposição nas juntas brasadas com o processo “MIG-Brazing”.
- Comparar a queima do revestimento de zinco ocorrida do processo “MIG-Brazing” com o processo GTAW.
- Comparar a resistência mecânica à tração de juntas de topo com diferentes espaçamentos após a aplicação do processo “MIG-Brazing”.
- Analisar a superfície de fratura das chapas de aço carbono e aço carbono galvanizadas unidas por “MIG-Brazing” após ensaio de tração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Soldagem

O termo “Soldagem” engloba diversos processos utilizados na fabricação, recuperação e manutenção de peças e componentes. Apesar de ser classicamente denominada como um processo de união de materiais, a soldagem abrange também a recuperação de componentes via deposição de material em sua superfície e a formação de revestimentos com propriedades de interesse. Além disso, ela se relaciona a processos com aspectos semelhantes empregados em operações de corte de materiais metálicos (MARQUES *et al.*, 2005).

A literatura define a soldagem como “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”. Tal definição abrange também o processo de brasagem, podendo ser classificado como uma subdivisão da soldagem (MARQUES *et al.*, 2005).

Para que se dê a união entre dois materiais é necessário que os átomos das superfícies a serem unidas fiquem próximos o suficiente para que haja atração interatômica, tendo que vencer a rugosidade superficial, a presença de impurezas, imperfeições e a diferença de propriedades entre os dois materiais. Os processos de soldagem foram desenvolvidos para superar esses problemas, tendo que empregar para isso um aquecimento e/ou aplicação de tensão localizados (AWS, 1991).

Uma das formas de classificação dos processos de soldagem é pelo método que se dá a união dos materiais, sendo divididos em soldagem por deformação e soldagem por fusão. No processo de soldagem por deformação, a aproximação dos átomos é permitida pela deformação das superfícies em contato, de forma que as peças ainda podem ser aquecidas, colaborando assim para que ocorra essa deformação. Dentre os representantes desse processo estão a soldagem por forjamento, por ultrassom, por fricção, por difusão e por explosão. Já no método de soldagem por fusão, é aplicada uma fonte localizada de calor na região a ser soldada, de forma que o material base e material de adição (quando utilizado) se fundam, resultando na coalescência das superfícies, após a solidificação dos materiais. Dentro desse método de soldagem existem vários subgrupos que podem ser divididos quanto à fonte de energia utilizada para promover a fusão dos materiais (MARQUES *et al.*, 2005).

A soldagem, juntamente com a brasagem, tem um grande destaque industrial, uma vez que é o processo mais importante de união de materiais, principalmente metálicos, utilizado desde a indústria de componentes microeletrônicos até em estruturas de grande porte. O

processo de soldagem é empregado tanto para a produção de peças e estruturas comuns e de baixa complexidade quanto em componentes que exigem grande responsabilidade em sua aplicação (MARQUES *et al.*, 2005).

3.2 Aspectos relacionados à segurança na soldagem

A soldagem, assim como várias outras operações industriais, possui diversos riscos relacionados à saúde e à segurança dos operadores e envolvidos no processo. Por isso, é de grande importância fazer considerações sobre esse aspecto, uma vez que os riscos envolvidos podem acarretar em danos sérios às pessoas, bem como aos equipamentos utilizados e também às instalações. Assim, é preciso avaliar quais são as principais causas de cada risco a fim de tentar preveni-los (MARQUES *et al.*, 2005).

Os processos de soldagem, em sua maioria, implicam no aquecimento dos materiais, além de envolverem radiação eletromagnética, projeção de partículas metálicas incandescentes, exposição a um elevado nível de luz (no caso da soldagem a arco elétrico) e a geração de fumos. Para tanto, faz-se necessário a utilização de vestimentas e equipamentos específicos para a segurança do corpo, cabeça e olhos, a fim de se evitar queimaduras, choques elétricos, irritações ou demais lesões. Recomenda-se o uso de roupas de raspa de couro para proteção contra a elevada temperatura, o uso de óculos de segurança para proteção dos olhos e o uso de capacetes com filtros no visor para a proteção contra a radiação emitida pelo arco elétrico. Além disso, em certas operações de soldagem, como soldagem a gás, há ainda o risco de incêndios e explosões, devendo-se, portanto, ter cuidados no armazenamento de cilindros de gases e também com a presença de produtos inflamáveis perto do local de soldagem. É recomendado também que as operações sejam realizadas em locais ventilados ou com a presença de exaustores para a proteção contra vapores e fumos gerados no processo e que em alguns casos podem ser fatais, caso inalados em grandes quantidades (MARQUES *et al.*, 2005).

Para processos de soldagem a arco elétrico deve-se ainda tomar cuidados especiais em relação às fontes de energia utilizadas. É importante que o projeto da fonte limite uma tensão em aberto a um valor mínimo praticável, além de que haja o correto isolamento elétrico da parte interna e previna o aquecimento excessivo nas condições normais de uso. Além disso, todos os cabos utilizados devem ter um dimensionamento correto para sua aplicação e estarem devidamente isolados eletricamente. Quanto ao operador do processo de soldagem, é de sua responsabilidade a verificação de que a fonte esteja aterrada apropriadamente em um único

terminal, para que não haja a energização acidental de outras partes expostas (WAINER *et al.*, 1992).

3.3 Fontes de energia

Várias podem ser as fontes de energia aplicadas nos processos de soldagem, sendo elas: mecânica, química, elétrica e radiante. Na fonte de energia mecânica, a geração de calor se dá por atrito, por ondas de choque ou por deformação plástica do material. Na fonte de energia química, a geração de calor se dá por reações químicas exotérmicas, como a combustão, geradora de uma chama, ou pela reação de oxidação do alumínio (soldagem por aluminotermia). Na fonte elétrica, o calor é gerado pela passagem de corrente elétrica, no qual o aquecimento se dá por efeito Joule, ou com a geração de um arco voltaico, sendo que o aquecimento se dá pelo potencial de ionização e outras variáveis do processo (WAINER *et al.*, 1992).

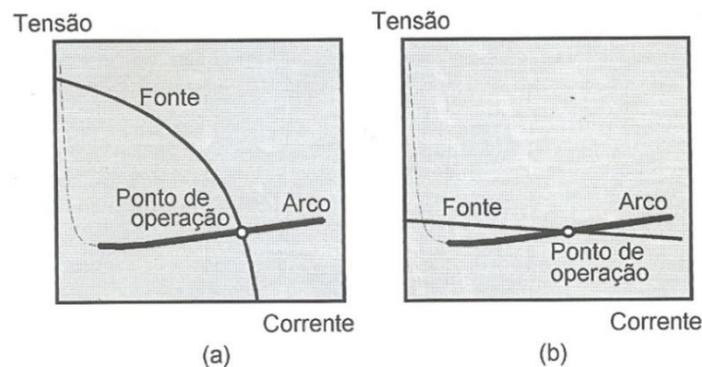
3.3.1 Fontes de energia para soldagem a arco elétrico

As fontes de energia para os processos de soldagem a arco elétrico são concebidas para fornecerem saídas de corrente, na faixa de 10 a 1200 A, e saídas de tensão, na faixa de 10 a 40 V, com características para um ou mais processos de soldagem. Além disso, é de grande interesse que elas permitam que os valores de corrente e tensão sejam ajustados para determinadas aplicações e que haja o controle da variação desses valores durante a soldagem, seguindo as condições de cada processo. (MARQUES *et al.*, 2005).

A estabilidade do arco elétrico na soldagem depende, dentre outros fatores, das características estáticas e dinâmicas relativas ao funcionamento de sua fonte de energia. As características estáticas estão relacionadas com os valores médios de tensão e corrente da saída da fonte, quando aplicada uma carga resistiva. Já as características dinâmicas compreendem variações transientes dos valores de tensão e corrente gerados pela fonte devido a variações durante a soldagem. Tais variações se dão em intervalos de tempo muito pequenos, em torno de 10^{-2} s ou menos. Desta forma, tem-se maior dificuldade no entendimento das características dinâmicas do que nas estáticas. As características dinâmicas ganham importância principalmente durante a transferência metálica, durante variações rápidas no comprimento de arco e na extinção e reabertura do arco, na soldagem com corrente alternada (MARQUES *et al.*, 2005).

Uma forma de indicar as características estáticas das fontes é por meio de curvas características, representadas na Figura 3.1, que são conseguidas com ensaios utilizando cargas resistivas. Elas podem ser classificadas como curva de corrente constante ou curva de tensão constante, de acordo com a forma que ela assume (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 3.1 – Representações de curvas características das fontes juntamente com uma curva característica do arco. (a) corrente constante e (b) tensão constante



Fonte: MARQUES *et al.*, 2005

As fontes que apresentam a corrente constante são caracterizadas por possuírem uma tensão em vazio (tensão sem a presença de qualquer carga) elevada (na faixa de 55 e 85 V) e reduzirem seu valor de tensão rapidamente, na presença de uma carga. Esse tipo de fonte permite que o valor de corrente não varie muito durante a soldagem caso o comprimento do arco varie ou caso ocorram eventuais curtos-circuitos do eletrodo com a peça. Essas fontes são empregadas em processos nos quais o operador controla o comprimento do arco, como SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*) (MARQUES *et al.*, 2005).

Já as fontes de tensão constante possuem como característica manter o valor de tensão praticamente constante, durante o processo. Isso faz com que seja permitida uma grande variação do valor de corrente, caso haja variação do comprimento do arco ou quando ocorre um curto-circuito. Isso tem como vantagem a facilidade de abertura do arco quando o eletrodo encosta no metal de base, pois ocorre um pico de corrente que possibilita também a transferência metálica do eletrodo para a peça por curto-circuito. Essas fontes são utilizadas em processos como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e SAW (*Submerged Arc Welding*), que permitem o controle do comprimento do arco, pela variação da corrente (que controla a velocidade em que o eletrodo se funde), nos quais o eletrodo é alimentado com uma velocidade constante (MARQUES *et al.*, 2005).

3.4 Soldagem a arco elétrico

Nos processos de soldagem por fusão, o arco elétrico é a fonte de calor mais empregada na indústria, devido a um conjunto de características que viabilizam sua utilização, tais como: concentração adequada de energia localizada para fundir o metal de base, facilidade de controle, equipamentos com baixo custo relativo, além de riscos e danos à saúde do operador dentro de um nível aceitável (MARQUES *et al.*, 2005).

O arco elétrico pode ser definido como “uma descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido”. O arco elétrico para soldagem tem a característica específica de possuir baixa tensão e alta intensidade de corrente (WAINER *et al.*, 1992).

O arco elétrico é uma fonte de calor que se move de maneira contínua de forma a manter de forma relativamente estável a distribuição de temperatura na soldagem (CARY, HELZER, 2004). O calor gerado pelo arco elétrico se deve aos choques que ocorrem entre as cargas elétricas no arco. No caso do arco de eletrodos consumíveis, além dos choques entre íons, ocorrem também choques entre íons e átomos gerados na fusão do eletrodo e entre íons e as gotas que percorrem o arco. A ionização do meio gasoso ocorre quando o elétron localizado em uma órbita é energizado, de forma a ser forçado a passar para órbita mais energética. Caso a energia recebida o faça sair da influência eletromagnética, ele torna-se um elétron livre. Essa energia necessária para tornar um elétron livre é chamada de potencial de ionização. No arco elétrico, ocorre a ionização térmica, na qual há a ionização pela colisão de partículas aquecidas, o que gera elétrons livres e íons positivos, possibilitando um meio condutor de eletricidade (WAINER *et al.*, 1992).

Na soldagem, a emissão de elétrons pode ocorrer de duas formas: (01) por emissão termoiônica, quando o material do catodo possui elevado ponto de fusão, como o tungstênio e o carbono, para que se possa atingir temperatura elevada o suficiente (aproximadamente 3500K) para que ocorra esse fenômeno; (02) por emissão “a frio” ou emissão catódica ou por campo, quando o material do catodo não é refratário (como aço, alumínio, cobre, etc.), e a temperatura na região catódica se mantém abaixo de 3500K. A possibilidade de ocorrência de mecanismos distintos de emissão de elétrons torna a polaridade dos eletrodos uma variável importante para a estabilidade do arco elétrico e para outras características de operação da soldagem. A boa estabilidade do arco influencia não somente na facilidade de operação pelo

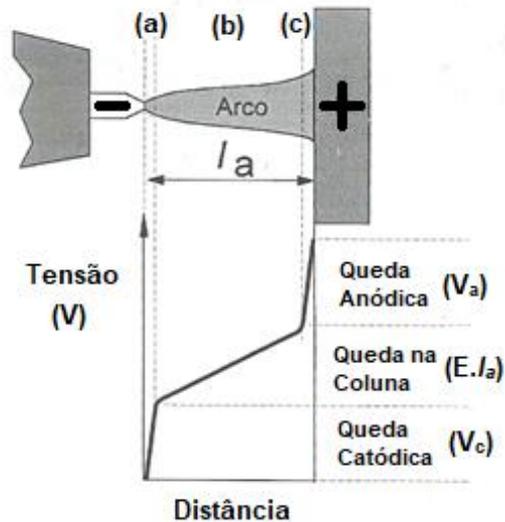
soldador, como também na qualidade final do cordão de solda, tornando-o mais regular, e com menor quantidade de porosidade (MARQUES *et al.*, 2005).

A emissão termoiônica, em soldagens com eletrodo não consumível, envolve o processo de liberação de elétrons de uma superfície aquecida. A taxa de emissão dos elétrons depende da temperatura e da energia térmica que deve ser absorvida pelo elétron para ser emitida como elétron livre, chamada de função trabalho termoiônico, que varia para cada elemento químico. Para a abertura do arco elétrico é necessário um aquecimento e que os elétrons provenientes do gás de proteção sejam bombardeados. A fonte de energia fornece uma tensão característica (tensão em vazio) que propicia que o arco seja aberto, de forma que ao encostar-se o eletrodo à peça, essa tensão rapidamente cai para um valor quase nulo. O eletrodo então se aquece por efeito Joule e favorece a emissão termoiônica de elétrons, que por sua vez irá fornecer mais energia térmica e possibilitar que o gás e o vapor metálico na região entre o metal de base e o eletrodo sejam ionizados termicamente. Dessa maneira, o arco elétrico irá se manter quando o eletrodo não estiver mais em contato direto com o metal de base (WAINER *et al.*, 1992).

No fenômeno de emissão catódica, em soldagens com eletrodo consumível, os elétrons são emitidos mais facilmente por camadas de óxidos que são formadas sobre a poça de fusão e regiões adjacentes, fazendo-as possuir carga positiva. O elevado gradiente de tensão localizado gerado entre essa camada e o metal de base cria condições necessárias para o agrupamento de elétrons e sua movimentação acelerada para o anodo pela coluna de plasma, sem precisar de um valor muito elevado de tensão entre eletrodo e metal de base. Essa aceleração dos elétrons promove a remoção localizada da camada de óxido, de forma a quebrá-la ou fundi-la (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

O arco voltaico pode ser dividido em três regiões longitudinalmente: coluna de plasma, região anódica e região catódica, Figura 3.2. A queda de tensão na região da coluna de plasma é muito menor em relação às regiões anódica e catódica. As regiões de queda catódica e anódica possuem um elevado gradiente elétrico, na ordem de 10^3 a 10^5 V/mm, e um elevado gradiente térmico, na ordem de 10^6 °C/mm, e as somas das quedas de potencial nessas regiões mantem-se aproximadamente constante, mesmo em diferentes condições de operação do arco. Já a coluna de plasma, que é a parte visível e brilhante do arco, apresenta gradientes elétricos e térmicos bem menores, da ordem de 1 V/mm e 10^3 °C/mm, respectivamente (SCOTTI, PONOMAREV, 2008; MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 3.2 – Representação esquemática das regiões do arco elétrico ao longo do eixo longitudinal



Fonte: Adaptado de MARQUES *et al.*, 2005

A tensão entre as extremidades do arco, que mantem a descarga elétrica, possui como variáveis a distância entre cátodo e ânodo (comprimento do arco), o tamanho e material dos eletrodos, a composição e pressão do gás na coluna de plasma, a corrente elétrica que passa pelo arco, entre outras. Para um dado valor de corrente de soldagem, a tensão entre eletrodo e metal de base é dada de uma forma aproximada pela Equação 1:

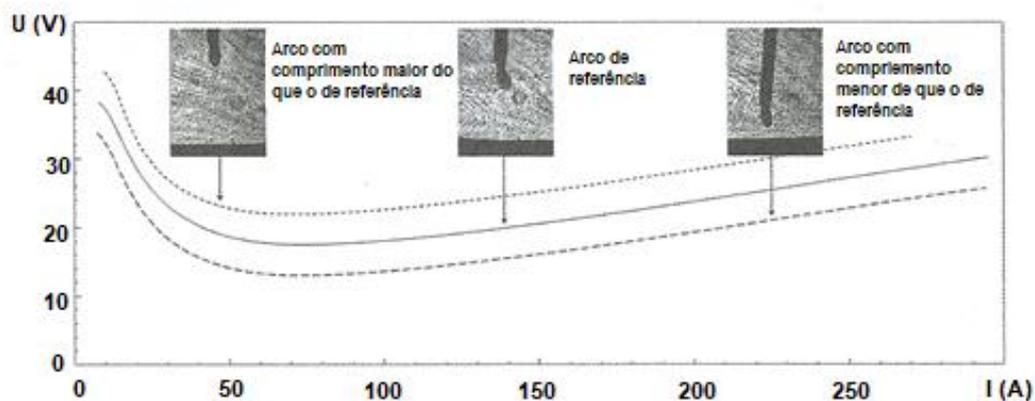
$$V = V_a + V_c + E \cdot l_a \quad (1)$$

Em que: V_a é a queda de tensão anódica, V_c é a queda de tensão catódica, e $E \cdot l_a$ é a queda de tensão na coluna de plasma (MARQUES *et al.*, 2005).

Tem-se como uma importante propriedade do arco elétrico a característica estática do arco (CEA), sendo ela a relação requerida de tensão em função da corrente, para uma dada condição de soldagem, representando assim o comportamento em regime para um dado arco elétrico. O arco possuirá uma CEA específica, de acordo com seu comprimento, material e dimensão do eletrodo, proteção utilizada, polaridade, entre outros fatores, independentemente, porém, da fonte de energia de soldagem. A CEA é apresentada graficamente por uma curva de tensão por corrente, a fim de se visualizar o efeito de alguma variável na tensão do arco, mantendo-se a corrente constante (varrendo vários valores). As curvas de CEA, na maioria das vezes, são descendentes até certos valores mais baixos de corrente, pois quando o valor de corrente é muito baixo poucos choques ocorrerão para manter equilibrado o fenômeno de ionização/desionização, de forma que a tensão deve ter um valor maior, a fim de que os

elétrons tenham maior energia cinética nos choques. A tensão necessária para manter o arco estável diminui à medida que a corrente aumenta, porém a partir de certo ponto, com valores maiores de corrente, a tensão passa a crescer novamente devido à atuação de outros fenômenos como o crescimento do diâmetro do arco, escalada do arco na superfície do eletrodo, entre outros. Um exemplo de curva de CEA é mostrado na Figura 3.3 (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Figura 3.3 – Representação esquemática de curvas de CEA para diferentes comprimentos de arco



Fonte: Adaptado de SCOTTI, PONOMAREV, 2008

Outro fenômeno importante que ocorre no arco elétrico é o chamado jato de plasma, de origem eletromagnética. Como condutor de corrente, o arco elétrico gera um campo magnético ao seu redor (regra da mão direita) que por sua vez geram forças perpendiculares ao sentido da corrente. Na soldagem empregando valores elevados de corrente elétrica, essas forças de origem magnética aumentam, o que intensifica seus efeitos. As forças magnéticas (Força de Lorentz) agem circunferencialmente em cada seção transversal do arco elétrico, que pode ser representado de forma aproximada por um tronco de cone, gerando pressões em cada elemento de área, de forma que quanto maior a intensidade de corrente ou quanto menor o diâmetro da seção da coluna do arco maior será a pressão exercida. Devido ao formato cônico da coluna de plasma, o valor do diâmetro da seção transversal do arco é menor próximo ao eletrodo e maior próximo à peça, estabelecendo assim uma diferença de pressão entre as extremidades do arco e induzindo um fluxo de gás do eletrodo para a peça. O jato de plasma atua na transferência metálica, arrastando as gotas do eletrodo para a poça de fusão, direciona os gases aquecidos do arco contra a peça, causando a penetração da solda e também influencia na distribuição da transferência de calor e geometria do cordão (largura), uma vez que empurra o metal líquido para os lados da poça de fusão. As forças magnéticas também podem

atuar na gota fundida formada na extremidade de eletrodos consumíveis, causando um estrangulamento (chamado de efeito *Pinch*) e conseqüentemente diminuindo o diâmetro da gota, ajudando em seu destacamento do eletrodo, tendo um efeito significativo na transferência metálica utilizando altos valores de corrente (SCOTTI, PONOMAREV, 2008; MARQUES *et al.*, 2005).

3.5 Brasagem

O processo de brasagem se diferencia do processo de soldagem pelo fato da energia empregada no processo ser menor, havendo fusão apenas do metal de adição, enquanto o metal de base não é fundido no processo. Como consequência dessa menor energia empregada, o aquecimento provocado na região adjacente à junta brasada também é menor, de forma que a estrutura do material sofre menor alteração, tendendo a conservar assim suas propriedades mecânicas originais (WAINER *et al.*, 1992).

Na brasagem, o metal de adição utilizado possui uma temperatura de fusão menor que a temperatura de fusão do metal de base. Portanto, o metal de adição deve possuir boas características de fluidez a fim de permitir a penetração na junta por capilaridade, além de possuir boa compatibilidade com o metal de base, dando condições de penetração em sua superfície por difusão, garantindo uma boa união da junta brasada. Os métodos de aquecimento mais comumente utilizados na brasagem são por chama, em forno, por indução, por resistência elétrica e por imersão (WAINER *et al.*, 1992).

Para a brasagem de ligas ferrosas, os metais de adição empregados são, na maioria das vezes, não ferrosos, sendo muito utilizadas as ligas de cobre, cobre-zinco e prata, criando assim uma condição favorável para a corrosão galvânica, devido à diferença eletroquímica dos metais, necessitando de alguma proteção contra esse tipo de corrosão, dependendo do ambiente de aplicação da junta brasada. Na união de metais não ferrosos, utilizam-se também metais de adição não ferrosos, de natureza semelhante, porém com menor ponto de fusão (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

O projeto das juntas a serem brasadas tem grande importância no processo, a fim de garantir a penetração do metal de adição. Assim, deve-se ter um controle do espaçamento entre as peças a serem unidas, uma vez que a resistência mecânica da junta tende a diminuir tanto para espaçamentos muito pequenos, devido a falhas do preenchimento pelo metal de adição, quanto para espaçamentos excessivamente grandes, o que aumenta a flexibilidade da junta. Além disso, as peças a serem unidas devem ter suas superfícies preparadas, para garantir melhor molhabilidade do metal de adição ao metal de base, melhorando sua

aderência. Assim, devem-se retirar óxidos e quaisquer sujeiras e gorduras das superfícies, por meios químicos ou mecânicos, sendo muito comum a utilização de atmosferas protetoras ou de fluxos (estes devendo ser retirados após a brasagem para evitar a corrosão) garantindo melhores resultados do processo (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

3.5.1 Solda-brasagem

O processo conhecido como solda-brasagem (*braze welding*), da mesma forma que na brasagem, ocorre com a fusão do metal de adição enquanto o metal de base permanece no estado sólido. Na solda-brasagem, o desenho das juntas e também o modo que o metal de adição é depositado são similares aos adotados nos processos convencionais de soldagem por fusão. As juntas podem apresentar chanfros, muitas vezes usinados, e a resistência da junta se deve à aderência obtida por processos difusionais entre o metal de adição fundido com o metal de base no estado sólido. Diferentemente do processo de brasagem, o metal de adição não penetra na junta por ação da capilaridade (WAINER *et al.*, 1992).

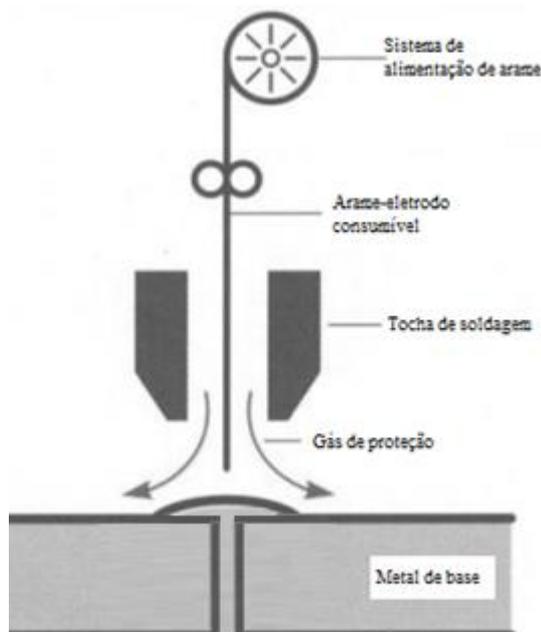
O processo de solda-brasagem pode ocorrer utilizando-se de chama, forno ou arco elétrico. Nos processos de solda-brasagem a arco destacam-se a utilização dos processos GTAW e GMAW. Nesse cenário, um processo muito utilizado recentemente é o “MIG-Brazing”, o qual apresenta particularidades da brasagem e da soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) (MARQUES *et al.*, 2005).

3.6 Processo MIG-Brazing

3.6.1 Visão geral, vantagens, desvantagens e aplicações

O processo “MIG-Brazing”, ou “Brasagem MIG” é uma concepção mais nova do processo de brasagem. Ele apresenta um equipamento de mesmas características do processo GMAW, conciliando dessa forma as vantagens da brasagem convencional, pois não há a fusão do metal de base e mantém as propriedades mecânicas, com os benefícios da soldagem MIG, que garante altas taxas de deposição e altas velocidades de soldagem. Devido a essas características, aliadas ao baixo aporte térmico, pela utilização de metal de adição com menor temperatura de fusão que os aços, as juntas brasadas apresentam excelentes propriedades, o que viabiliza a sua utilização para brasagem de chapas finas de aço carbono, apresentando revestimento a base de zinco ou não (chapas galvanizadas), se adequando à utilização na indústria automobilística. O processo é exemplificado na Figura 3.4 (GUIMARÃES *et al.*, 2006).

Figura 3.4 – Representação esquemática do processo “MIG-Brazing”



Fonte: Adaptado de CHOVET, GUIHEUX, 2006

Dentre as vantagens do processo “MIG-Brazing” pode-se citar: (01) a menor quantidade de calor requerida na união metálica, o que produz menos distorções; (02) os metais de adição utilizados possuem boa ductilidade, o que facilita no processo de trefilação do arame-eletrodo, e apresentam alta resistência à corrosão e baixas tensões residuais no processo; (03) não há a necessidade de se utilizar fluxos ou pastas, indicado para a união de metais dissimilares; (04) a junta brasada apresenta resistência mecânica adequada para diversas aplicações; (05) maior preservação de revestimento protetor (quando utilizado), garantindo proteção às áreas vizinhas à junta brasada; (06) aplicação em todas as posições de soldagem, dando assim uma grande versatilidade ao processo e as suas aplicações; (07) facilidade de automatização do processo, assim como o processo MIG (MENDES, 2005).

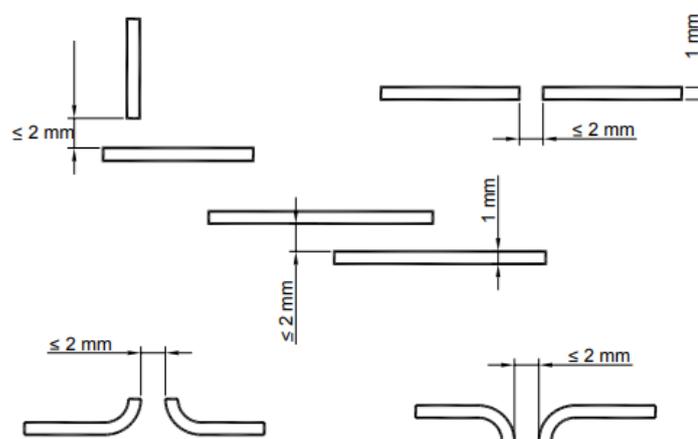
O processo apresenta limitações como: (01) a resistência da junta é limitada pela resistência do metal de adição; (02) os níveis de energia empregados no processo estão abaixo dos níveis de energia necessários para os processos de soldagem por fusão; (03) há divergência de coloração do material depositado com o metal de base; (04) como os metais unidos são dissimilares, pode ocorrer uma corrosão localizada por formação de uma pilha galvânica, devido aos diferentes potenciais de redução dos metais (MENDES, 2005).

Processos convencionais de soldagem de chapas com revestimento de zinco, alumínio, estanho e suas ligas têm impactos negativos, principalmente quanto à perda de resistência à corrosão que os revestimentos promovem, além das características do cordão de solda, devido

ao baixo ponto de fusão (420°C para o zinco) e evaporação (906°C para o zinco) desses metais. A soldagem de chapas galvanizadas em zinco causa instabilidade no arco elétrico, devido à evaporação do zinco da superfície da chapa, que faz com que o arco se desloque para uma área de menor resistência elétrica. Além disso, ocorre instabilidade do fluxo de gás de proteção e da transferência metálica do metal de adição para a poça de fusão (VINÁS *et al.*, 2010). O vapor de zinco e óxidos podem ainda causar porosidade, falta de fusão, trincas, respingos e outros problemas na junta soldada. O processo “MIG-Brazing” vem como uma alternativa nesse cenário, pela utilização de metais de adição, geralmente ligas de cobre, com menores pontos de fusão do que o aço (1538°C), o que resulta em menos queima do revestimento durante o processo, gerando menos vapores de zinco. Apesar de ainda haver a evaporação do revestimento de zinco, uma vez que a temperatura de fusão dos materiais utilizados como eletrodo (entre 910°C e 1025°C) ser maior que sua temperatura de evaporação, o processo “MIG-Brazing” garante uma maior preservação do revestimento, além de melhores características do cordão brasado e menores alterações microestruturais nas regiões adjacente ao cordão, mantendo ainda resistência mecânica suficiente para as aplicações (JOSEPH *et al.*, 2003).

Para configurações de juntas para o processo MIG-Brazing, são geralmente utilizadas juntas de topo, sobrepostas, juntas de ângulo, entre outras. A abertura de raiz das juntas, isto é, a distância dos membros da junta costuma ser maior do que nas utilizadas por processos convencionais de brasagem, devido ao metal de adição penetrar na abertura da junta, sem ter alguma ação do fenômeno de capilaridade significativa. A Figura 3.5 exibe alguns dos tipos de juntas comumente empregados no processo (MENDES, 2005).

Figura 3.5 – Representações de juntas adequadas à brasagem a arco



Fonte: MENDES, 2005

3.6.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados no processo “MIG-Brazing” possuem as mesmas características do processo GMAW, de forma que o metal de adição se apresenta como um arame que é continuamente alimentado e a proteção do arco elétrico gerado é dada por um gás inerte, idêntica ao processo MIG (GUIMARÃES *et al.*, 2006).

Portanto, os equipamentos básicos para o processo “MIG-Brazing”, assim como o processo GMAW, consistem de uma fonte de energia, um sistema de alimentação de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás de proteção (seja por um cilindro do gás ou por um fornecimento centralizado) que possua regulador de pressão e fluxômetro. A fonte de soldagem, como já explicada anteriormente, deve atender a requisitos básicos para conceder características adequadas para o processo de soldagem (baixos valores de tensão e altos valores de corrente) (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

O sistema de alimentação do arame-eletrodo deve impulsionar o arame em direção à tocha, sendo responsável então pela alimentação do metal consumível, trabalhando sempre interligado com o painel de controle, onde o operador pode regular a velocidade de alimentação de arame, tensão e outros parâmetros. O sistema alimentador consiste de uma armação que o abriga e um suporte para o arame-eletrodo que vem enrolado em um carretel. O sistema possui um motor acoplado a roletes, tracionando-os de forma que estes impulsionam o arame em direção ao bico de contato, dentro da tocha. A alimentação deve possuir uma regulagem de velocidade em pequenos incrementos (resolução de 0,1 m/min) em uma ampla faixa de velocidade. Portanto, os motores empregados são, geralmente, de corrente contínua e comandados por circuitos eletrônicos, pois oscilações da velocidade do motor levam a instabilidade do arco, podendo gerar porosidade e respingos, além de que uma regulagem em uma escala muito grosseira não permite um ajuste com maior exatidão de valores de corrente, comprimento de arco e modo de transferência metálica (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

É importante também ressaltar a importância dos roletes utilizados para impulsionar o arame. Essa impulsão é dada pelas pistas de roletes que, em rotação, pressionam o arame arrastando-o em direção a tocha. Como os materiais utilizados no arame de alimentação desse processo são considerados macios, deve haver um controle da tensão aplicada pelos roletes de forma que não haja deformação plástica do arame, o que prejudicaria sua passagem pelo bico de contato. Uma das formas de se reduzir essa tensão é a utilização de dois conjuntos de roletes (SCOTTI, PONOMAREV, 2008). Para o processo “MIG-Brazing” é recomendada a

utilização de quatro roletes dentados com rasgos semicirculares em “U” polidos com guias de Teflon a fim de evitar problemas de alimentação como o emaranhamento do arame (“*Birdnesting*”) e instabilidade do arco (JOSEPH *et al.*, 2003).

As tochas de soldagem consistem de: (01) um cabo, que envolve os tubos que levam o gás de proteção e água de refrigeração (quando a tocha apresenta esse sistema), o cabo de energia, do acionamento e o arame-eletrodo; (02) o punho, que apresenta o gatilho do acionamento de energia; (03) um bico de contato, feito geralmente de liga de cobre, que favorece o contato elétrico com o arame; e (04) um bocal, que direciona o fluxo do gás de proteção (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

3.6.3 Consumíveis

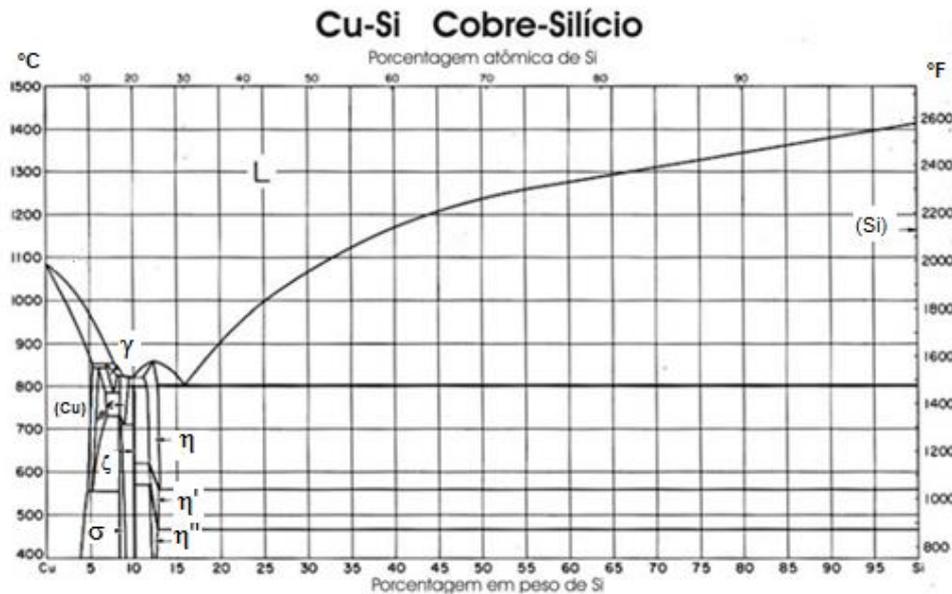
3.6.3.1 Metais de adição

O material do arame eletrodo a ser escolhido está diretamente ligado aos requisitos de resistência mecânica da junta brasada, assim como as especificações de sua composição química. De acordo com a especificação da *American Welding Society* (AWS) 5.18/93, o metal de adição empregado deve ser escolhido de acordo com o metal de base a ser unido, as condições de superfície, a espessura e detalhe da junta e com as especificações e condições de serviço da junta (MENDES, 2005).

Como o processo envolve a fusão de um metal de adição com temperatura de fusão menor que a do aço, são comumente utilizadas as ligas de cobre (bronze-silício). Normalmente, as ligas com 3% de silício (Si) são bastante empregadas (ROHDE, 2000). Os elementos de liga mais empregados no cobre são o zinco (Zn), Si, Estanho (Sn) e Prata (Ag). A temperatura de fusão dessas ligas de cobre costuma ser mais de 300 °C abaixo da temperatura de fusão de grande parte dos aços utilizados na indústria automobilística. Dentre os elementos citados, o Si possui uma propriedade de grande interesse na aplicação do processo “MIG-Brazing”, pois ele altera o ângulo de molhamento da liga fundida, de forma a auxiliar no desempenho do processo. Adições de 1 a 2% possuem efeitos significativos, aumentando bastante na molhabilidade das ligas de cobre. Além disso, o Si aumenta a resistência mecânica e dureza da liga, sendo interessante para a qualidade da junta brasada, porém oferecendo dificuldade na trefilação dos arames consumíveis. O aumento da resistência mecânica está ligado ao mecanismo de endurecimento por solução sólida substitucional de silício no cobre puro, resultando em uma estrutura de maior resistência, chamada de “ α ”, mostrada no diagrama de equilíbrio da liga Cu-Si (Figura 3.6). Porém, para teores acima de

4% de Si na liga, há um aumento significativo na região líquido + α , o que propicia a ocorrência de trincas de solidificação. Outro efeito da adição de Si na liga é a redução do ponto de fusão (para valores até 15%) devido ao comportamento eutético da liga Cu-Si (MENDES, 2005).

Figura 3.6 – Diagrama de equilíbrio Cu-Si



Fonte: Adaptado de MENDES, 2005

Além das ligas de cobre como metal de adição no processo de brasagem, muitos estudos têm trazido a possibilidade do processo “MIG-Brazing” com arames de ligas de alumínio para brasagem de chapas de aço apresentado, por exemplo, no estudo de Park *et al.* (2009) e também arames tubulares de liga de Al-Si, apresentado no estudo de Murakami *et al.* (2003).

3.6.3.2 Gases de proteção

Os gases de proteção nos processos GMAW têm a principal função de proteger a poça de fusão e as gotas durante a transferência metálica, além de manter a estabilidade do arco elétrico, controlar a operacionalidade e a transferência metálica, influir nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda e também em sua geometria. A eficiência do gás de proteção depende de tudo o que influi em suas funções. Para uma boa proteção da poça de fusão, não só o tipo de gás utilizado importa, mas também como o bocal da tocha é configurado e também a vazão de fluxo empregada. A densidade do gás também influencia na proteção da solda, levando em consideração a posição de soldagem, por exemplo. Para

soldagem sobrecabeça o gás hélio (He) é mais indicado, devido sua menor densidade que o ar atmosférico, o que mantém o gás na região soldada. Além disso, propriedades físico-químicas do gás como potencial de ionização e condutividade térmica afetam diretamente em sua eficiência. Gases com menor potencial de ionização, como o argônio (Ar), necessitam de uma menor energia para serem ionizados, melhorando a estabilidade do arco, assim como gases com maior capacidade de troca de calor, como o He, favorecem a eficiência de fusão do metal (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Nos processos de brasagem, as camadas óxidos na superfície das regiões a serem unidas apresentam um efeito significativo, prejudicando na molhabilidade do metal líquido. Em processos convencionais de brasagem, os fluxos são muito utilizados para fazer a remoção da camada de óxido e proteger o metal líquido da atmosfera circunjacente (MURAKAMI *et al.*, 2003). Para tanto, no processo “MIG-Brazing”, a proteção do metal líquido vem do gás inerte de proteção utilizado. O argônio puro é frequentemente utilizado como gás de proteção no processo “MIG-Brazing”, porém na utilização de arames de ligas de Cu-Si é também muito comum o emprego de misturas gasosas Ar + 1% O₂ (gás oxigênio), ou Ar + 2.5% CO₂ (dióxido de carbono), como gás de proteção, uma vez que a adição desses compostos ativos pode resultar em uma menor porosidade na junta, maior estabilidade do arco e diminuir a incidência de respingos. Adições de 1% O₂ no gás de proteção podem diminuir a tensão superficial da poça de fusão, melhorando a fluidez e molhabilidade do metal líquido. Porém, deve-se ater ao uso de gases ativos, pois caso a liga de cobre utilizada não tenha a presença de elementos desoxidantes, o oxigênio pode se combinar ao cobre, formando uma camada de óxido (Cu₂O) que pode causar uma fragilização à frio na junta (ROHDE, 2000; VINÁS *et al.*, 2010). Além disso, outros estudos apresentam a utilização de outras misturas gasosas como proteção. Chovet e Guiheux (2006) cita a vantagem de utilização da mistura gasosa de Ar e H₂ (gás hidrogênio) para o processo “TIG-Brazing”, devido ao melhor aspecto da junta brasada. Guimarães *et al.* (2006) descreve a utilização da proteção gasosa ternária de Ar + H₂ + O₂ como tendo um bom resultado no aspecto da junta unida por “MIG-Brazing” e também em relação à molhabilidade do metal líquido.

3.6.4 Transferência metálica

O processo “MIG-Brazing”, da mesma forma que processo GMAW, por utilizar um eletrodo consumível, apresenta a transferência do arame fundido para a peça através do arco elétrico, que é influenciada pelo material e diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, pela polaridade e intensidade da corrente, pelo comprimento do arco, pela pressão ambiente, dentre

outros fatores. Dependendo de qual modo de transferência metálica atuar no processo, a estabilidade do arco será fortemente influenciada, assim como a geração de respingos durante o processo, quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, possibilidade de soldagem em posições diferentes, qualidade e aparência do cordão de solda (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Várias forças atuam sobre a gota fundida formada na ponta do arame-eletrodo, de forma que a gota só é transferida quando o somatório das forças de retenção for superado pelo somatório das forças de destacamento. As principais forças que atuam sobre a gota fundida são a força de gravidade, força de arraste dos gases, gerada pelo jato de plasma, força eletromagnética, tensão superficial do metal fundido e força de reação de vaporização dos componentes do metal do eletrodo. No processo por GMAW, a transferência metálica ocorre basicamente por dois mecanismos. O primeiro mecanismo é caracterizado pelo contato da gota com a peça antes do seu destacamento da ponta do eletrodo, sendo chamada transferência por curto-circuito. No segundo mecanismo, ocorre o destacamento da gota antes do contato com a poça de fusão, chamada de transferência por voo livre, podendo ainda ser subdividida em outros modos, de acordo com suas características particulares, sendo eles o globular, globular repulsivo, goticular ou transferência por *spray*, goticular com alongamento, goticular rotacional e explosivo (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Quando se utiliza baixos valores de tensão e corrente de soldagem, o modo de transferência metálica se dá por curto-circuito, na qual uma gota de metal é formada na ponta do arame-eletrodo, aumentando seu diâmetro até atingir periodicamente a poça de fusão, sendo atraída por ela pela ação da tensão superficial. Devido a grande instabilidade do arco elétrico, dentre outros fatores, essa transferência pode acarretar na formação intensa de respingos, que pode ser regulada adequando-se os parâmetros de soldagem e ajustando o valor de indutância na fonte de energia da fonte, de forma a reduzir o valor máximo de corrente de pico, durante o curto-circuito. Como a energia desse modo é relativamente baixa, devido aos baixos valores de tensão e corrente, a transferência por curto-circuito é muito utilizada para soldagem de peças de menor espessura e também para soldagens fora de posição, uma vez que a força da tensão superficial supera a força da gravidade exercida na gota de metal (MARQUES *et al.*, 2005; SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

O modo de transferência globular ocorre quando se utiliza valores de tensão de moderados a altos, de forma a aumentar o comprimento de arco e evitar curto-circuito, e valores baixos de corrente, resultando em forças eletromagnéticas não significativas, e caracteriza-se pela formação de gotas na ponta do arame-eletrodo, onde elas permanecem

devido à ação das forças de tensão superficial e de vaporização, de forma que o seu diâmetro médio aumenta até um tamanho tal (em geral, maior que o diâmetro do eletrodo) que devido principalmente à força da gravidade e, de forma menos significativa, às forças eletromagnéticas e de arraste, as gotas formadas destacam-se e são transferidas de forma irregular para a poça de fusão. O diâmetro médio, a forma e a posição das gotas transferidas, bem como a frequência de transferência, variam, principalmente com a intensidade de corrente de soldagem, o diâmetro e composição do arame-eletrodo e do gás de proteção utilizado. A transferência globular apresenta um arco mais estável que a transferência por curto-circuito, porém caso os parâmetros de soldagem não sejam corretamente regulados, pode haver um nível elevado de respingos durante a soldagem. Como a principal força atuante nesse modo é a força gravitacional, ele é limitado pela posição plana (MARQUES *et al.*, 2005; SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

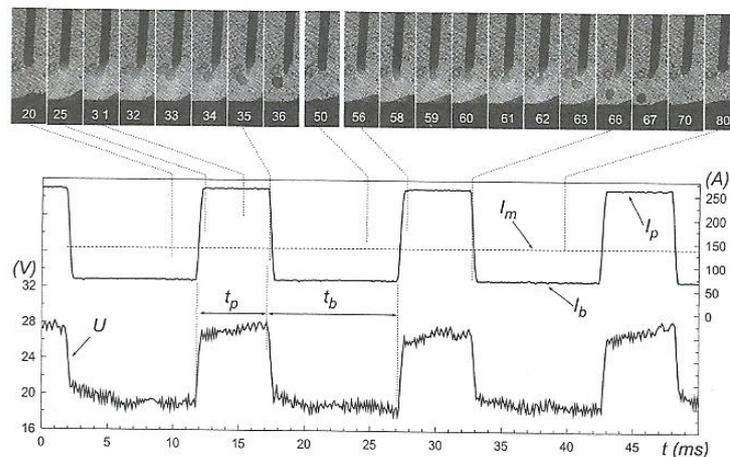
Quando se aumenta o valor da corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal transferidas diminui pelo aumento das forças eletromagnéticas e efeito *Pinch*. A partir de certa faixa estreita de valores de corrente, chamada de corrente de transição, ocorre uma mudança brusca no comportamento da transferência metálica, passando de transferência globular para transferência goticular projetada ou por *spray*, caracterizada pela transferência sequenciada de pequenas gotas (de diâmetro menor ou próximo ao diâmetro do eletrodo) em alta frequência de destacamento (maior que 200 gotas por segundo), resultando em um arco com elevada estabilidade e um cordão regular e suave praticamente sem a ocorrência de respingos. Os valores de tensão também são elevados nesse modo para garantir que o comprimento de arco seja suficientemente longo. A transferência por *spray* acontece apenas para determinados tipos de gases de proteção ou misturas, sendo que a corrente de transição depende além destes, do material e diâmetro do eletrodo. Nesse modo de transferência, as forças eletromagnéticas superam a força da gravidade, o que poderia ser aplicável para soldagens fora de posição, porém como energia gerada é muito elevada, devido aos altos valores de corrente, a poça de fusão formada é muito grande e de difícil controle, limitando-se a soldagens planas e de peças de maiores espessuras (MARQUES *et al.*, 2005; SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Para o processo “MIG-Brazing”, o modo de transferência comumente utilizado é a transferência pulsada, por conseguir reduzir ainda mais o aporte térmico e dando maior estabilidade na deposição do metal, sendo de muito interesse em brasagem de chapas galvanizadas, uma vez que quanto menor o calor aplicado no processo, mais será preservada a camada de zinco. O uso de corrente pulsada possibilita a transferência de valores médios de

corrente abaixo da corrente de transição globular para *spray*. Nesse método de transferência, os parâmetros são críticos para um arco estável e para um processo livre de respingos, sendo que os principais parâmetros de interesse são os valores de corrente de base e corrente de pico, o tempo de pico e a frequência do pulso (JOSEPH *et al.*, 2003).

O modo de transferência pulsada, também chamado de processo MIG-Pulsado (MIG-P) foi desenvolvido a fim de se aproveitar as melhores características da transferência por curto-circuito e goticular em um só processo, proporcionando uma transferência estável e regular, com pouca ou nenhuma presença de respingos e um bom acabamento de cordão. Esse processo é conseguido pela modulação do sinal de corrente, permitindo o controle da transferência metálica. A corrente varia entre dois estágios: a corrente de base, que mantém o arco aberto com baixa energia, e a corrente de pulso ou de pico, sendo ela maior que a corrente de transição (globular-*spray*), que trabalha para formar a gota na ponta do eletrodo e fazê-la destacar-se pela ação do surto da força magnética. No processo MIG-P, as características do arco estão altamente relacionadas com os parâmetros de corrente (I_b), período de base (t_b), corrente (I_p) e período de pulso (t_p), ilustrados na Figura 3.7. A tensão de soldagem segue a modulação imposta pela corrente e sua amplitude, e varia com o tipo de gás de proteção empregado e com o comprimento de arco. O valor de tensão no MIG pulsado é cerca de 20% maior do que na transferência por curto circuito, devido ao maior comprimento de arco. Podem ser formadas e transferidas uma ou mais gotas, durante a fase de pulso, porém a condição que garante maior estabilidade ao processo é a transferência de uma gota por pulso, com diâmetro próximo ao diâmetro do arame (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Figura 3.7 – Ilustração da transferência no processo MIG-P



Fonte: Adaptado de SCOTTI, PONOMAREV, 2008

Regulagem de parâmetros referente à saída de “uma gota por pulso” através de seu respectivo oscilograma (eletrodo aço-carbono; $\varnothing_e = 1,2$ mm; Ar + 5% O₂; $I_p = 270$ A; $t_p = 5,5$ ms; $I_b = 70$ A; $t_b = 10$ ms; $V_{alim} = 3,5$ m/min; $V_s = 28$ cm/min)

Para a realização do processo “MIG-Brazing” é necessário que a fonte de energia tenha um controle eletrônico que permita a utilização de métodos de controle, em especial para a utilização o processo MIG-P, em que a seleção de parâmetros é mais complexa. Os controles do processo utilizados podem ser: sinérgico, por tensão ou comprimento de arco, controle tensão constante/corrente constante e controle adaptativo (MARQUES *et al.*, 2005).

3.7 Metalurgia da soldagem

3.7.1 Transferência de calor

O estudo da união de metais pela soldagem abrange uma área específica da metalurgia. A metalurgia engloba a produção de metais a partir de seus minérios, produção de ligas metálicas e diversas reações entre metais em várias situações. A metalurgia da soldagem pode ser considerada uma área particular de estudo, uma vez que enquanto outras áreas da metalurgia o tempo das reações presentes são na ordem de minutos a horas, na soldagem esse tempo passa a ser na ordem de minutos, segundos e frações de segundos (CARY, HELZER, 2004).

Os processos de soldagem, em sua maioria, utilizam o calor como principal fonte de energia, que deve ter quantidade e intensidade suficientes a fim de manter a poça de fusão, garantindo uma boa qualidade à junta soldada. A soldagem a arco elétrico trabalha com elevadas temperaturas (2.000 a 20.000 °C) e uma energia muito concentrada (cerca de 8×10^8 W/m²), gerando altos gradientes térmicos (10^2 a 10^3 °C/mm) e variações bruscas de temperatura (de até 10^3 °C/s). Desta forma, o calor empregado no processo pode gerar, muitas vezes, alterações nas propriedades do material e ocasionar problemas, influenciando de forma direta em fenômenos mecânicos e transformações metalúrgicas na região da solda. A maioria desses efeitos depende dos ciclos térmicos ocorridos durante o processo de soldagem, das reações que ocorrem durante a solidificação do metal líquido, além da microestrutura resultante (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

A transferência de calor em juntas soldadas acarreta em vários fatores, que devem ser avaliados nos processos de soldagem, sendo os principais: o aporte de energia à junta soldada, o rendimento térmico do arco elétrico, o ciclo térmico durante a soldagem (distribuição e picos de temperatura), o tempo de permanência nessas temperaturas e a velocidade de resfriamento da região soldada. É importante ressaltar que no processo de soldagem nem toda energia fornecida pelo arco elétrico é realmente aproveitada para a fusão do metal de base e eletrodo (quando este for consumível), sendo verificada a perda de uma parte dessa energia

para a atmosfera, na forma de irradiação, e outra pequena perda por convecção no meio gasoso que protege a poça de fusão. Computando-se essas perdas de energia, tem-se a eficiência do arco elétrico (e_a), que é dada pela relação da quantidade de energia que é absorvida de forma efetiva durante o processo e a energia total fornecida ao arco. A partir desse parâmetro chega-se à Equação 2 para a quantidade de energia líquida disponível (Q_l), expressa em watts:

$$Q_l = e_a V I \quad (2)$$

Em que V é a tensão do arco, dada em volts, e I é a corrente de soldagem, dada em ampères (WAINER *et al.*, 1992).

Na soldagem, o fluxo de calor pode ser simplifadamente separado em dois momentos básicos: o fornecimento de calor à junta e a dissipação deste calor pela peça soldada. No primeiro momento, uma correlação importante que pode ser feita é quantidade de energia disponível para soldagem pela velocidade de avanço (v), dada em mm/s, chamada de aporte de energia ou de calor (H_l), dada pela Equação 3, expressa em J/mm:

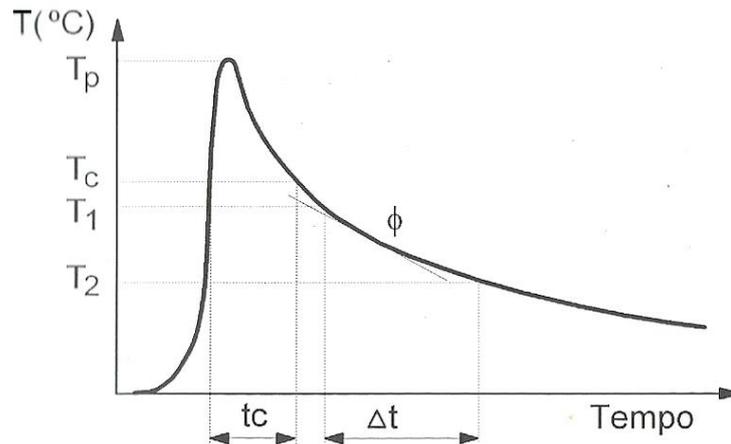
$$H_l = \frac{e_a V I}{v} \quad (3)$$

No segundo momento, o calor é dissipado principalmente por condução, das regiões aquecidas para o restante da peça. Cada região da peça, próximo à junta soldada, irá sofrer uma variação de temperatura, em consequência da transferência de calor. Essa variação, chamada de ciclo térmico, é apresenta três etapas, sendo elas: a etapa de aquecimento elevado no início da soldagem, a etapa em que a temperatura atinge o ponto máximo e a etapa em que ocorre o resfriamento de forma gradual, até que a temperatura atinja seu valor inicial. O ciclo térmico de soldagem pode ser representado esquematicamente através de uma curva (Figura 3.8) (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

É importante destacar alguns pontos no ciclo térmico de soldagem: a temperatura de pico (T_p) é a temperatura máxima atingida em determinado ponto, revelando a possibilidade de haver mudanças microestruturais, o que indica a dimensão afetada pelo calor. A temperatura de pico diminui com o afastamento do centro do cordão; o tempo de permanência (t_p) em temperaturas acima de uma temperatura crítica (T_c), em que possam ocorrer mudanças microestruturais e consequentes alterações de propriedades relevantes ao material; a velocidade de resfriamento (ϕ) que representa a inclinação em certa temperatura da curva de resfriamento. O acompanhamento da velocidade de resfriamento é de grande importância, em

particular na soldagem de aços carbono, pois ocorre a austenitização dessas ligas em temperaturas muito elevadas, de forma a nova estrutura formada (fases e constituintes) a partir da austenita depende diretamente das circunstâncias que se deu o resfriamento (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 3.8 – Representação esquemática do ciclo térmico de soldagem



Fonte: MARQUES *et al.*, 2005

O ciclo térmico depende de diversas variáveis como: o aporte de energia, que indiretamente pode ser ligado à velocidade de soldagem; a temperatura inicial da junta; o tipo de material de base a ser soldado, uma vez que a condutividade térmica do material irá influenciar se ele dissipará o calor da região de forma rápida ou não (materiais com menor condutividade térmica tendem a apresentar menor velocidade de resfriamento); geometria da junta, uma vez que uma junta de topo apresenta apenas duas direções para dissipação de calor, diferente de uma junta em T, que possui três direções, o que aumenta a sua velocidade de resfriamento; espessura da peça, considerando que dada uma mesma condição de operação, quanto maior a espessura da peça maior é a velocidade de resfriamento, até atingir uma espessura limite, a partir da qual o aumento desta variável não influi mais na velocidade de resfriamento. Uma forma de se controlar a velocidade de resfriamento durante a soldagem, sem alterar o projeto da junta, é realizando um preaquecimento na peça que, se aliado a uma diminuição do aporte térmico na soldagem, resulta em uma diminuição significativa da velocidade de resfriamento da junta, o que pode ser interessante para as propriedades finais do material (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

Outros fenômenos podem desencadear impactos negativos na peça soldada, além dos problemas metalúrgicos, associados ao ciclo térmico do processo. Um desses impactos, presente a praticamente todos os processos de soldagem, é o surgimento de deformações

residuais, que podem incutir no aparecimento de tensões residuais na região soldada e regiões vizinhas a ela. Essas deformações residuais vêm de origem térmica e plástica, devido às temperaturas distribuídas não uniformemente na peça, gerando expansões e contrações que podem causar deformações plásticas que, por sua vez, levam a ocorrência de tensões residuais a fim de manter o equilíbrio de forças na região. As tensões residuais podem trazer diversos problemas, dando origem a efeitos indesejados nas regiões soldadas como a propagação de trincas, corrosão sob tensão, fadiga, entre outros (WAINER *et al.*, 1992).

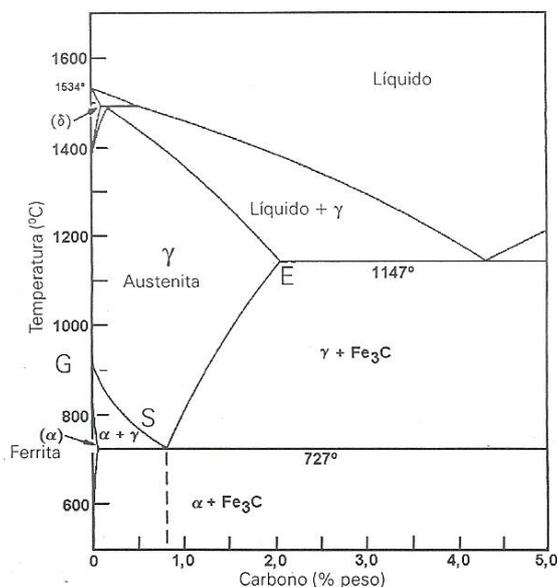
3.7.2 Microestrutura das ligas de aço

Os aços são as ligas metálicas mais utilizadas nos processos de soldagem e por isso é de grande importância o entendimento de sua microestrutura e como ela pode ser alterada durante esses processos (MARQUES *et al.*, 2005).

O aço pode ser definido com uma liga ferro-carbono, possuindo, geralmente, de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, em peso (sendo que 0,008% representa a solubilidade máxima de carbono no ferro α à temperatura ambiente e 2,11% representa a solubilidade máxima de carbono no ferro γ à temperatura de 1148 °C), contendo ainda alguns elementos residuais, derivados dos processos de fabricação, podendo conter também elementos de liga. Quando o aço contém elementos de liga ou teores de elementos residuais acima dos valores considerados normais, ele é chamado de aço-liga, caso contrário, ele é chamado de aço-carbono (CHIAVERINI, 2008).

O diagrama de equilíbrio Fe-C, apresentado na Figura 3.9, representa as fases que podem existir e reações entre elas, em função do teor de carbono e da temperatura, nas condições de equilíbrio nas ligas Fe-C. O diagrama de equilíbrio Fe-C corresponde na verdade a um diagrama Fe-Fe₃C, uma vez que a extremidade do diagrama corresponde ao carboneto de ferro Fe₃C. As principais fases de estudo representadas nesse diagrama são: a ferrita (α), sendo ela o ferro com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), com solubilidade máxima de 0,02% de carbono, possuindo baixa dureza e resistência à tração, mas elevada resistência ao choque e alongamento; a austenita (γ), sendo ela o ferro com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), com solubilidade máxima de 2,11% de carbono, possuindo boa resistência mecânica e boa tenacidade; e a cementita (Fe₃C), possuindo 6,7% de carbono, com estrutura cristalina ortorrômbica, sendo muito dura, frágil e com baixa ductilidade. A austenita é termodinamicamente estável a temperaturas acima de 727 °C (temperatura eutetóide) enquanto abaixo dessa temperatura as fases existentes são a ferrita e a cementita (CHIAVERINI, 2008; MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 3.9 – Diagrama Fe-Fe₃C, mostrando as fases em equilíbrio nos aços



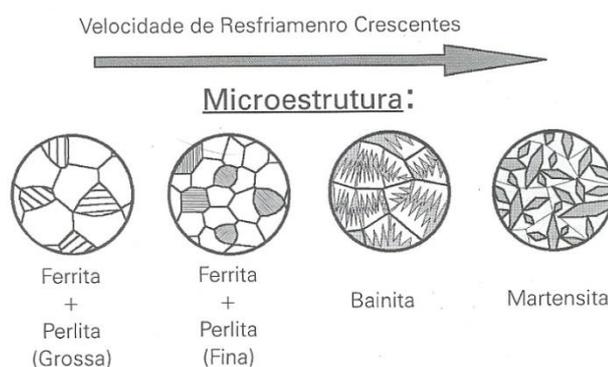
Fonte: MARQUES *et al.*, 2005

No resfriamento lento, a austenita não é mais estável abaixo da linha GSE (Figura 9) e decompõe-se em ferrita (para ligas com menos de 0,77% de carbono) e em cementita (ligas com teor de carbono maior que 0,77%). Quando o resfriamento ocorre de forma suficientemente lenta, abaixo de 727 °C ocorre uma transformação de austenita em um constituinte lamelar, chamado de perlita, na qual se revezam camadas de ferrita e cementita, possuindo uma dureza relativamente alta (que aumenta com o acréscimo do teor de carbono na liga, devido à maior formação de cementita) e baixa tenacidade. Assim, no resfriamento lento, para ligas de aço com teor de carbono inferior a 0,77% (aço hipoeutetóide), a microestrutura formada é ferrita e perlita, para ligas de aço com teor de carbono superior a 0,77% (aço hipereutetóide), microestrutura formada é cementita e perlita, e, para o aço com teor de carbono igual a 0,77% (aço eutetóide), a microestrutura resultante é apenas a perlita (CHIAVERINI, 2008; MARQUES *et al.*, 2005).

A transformação de fase austenítica em ferrita e cementita se dá por difusão em solução sólida, que requer um tempo suficiente para que ocorra, além de temperaturas elevadas, garantindo maior mobilidade atômica. Portanto, quando a velocidade de resfriamento aumenta, menores são as temperaturas em que a austenita começa a se transformar e menor o tempo em que os átomos têm para se difundir na estrutura. Além disso, elementos de liga presentes no aço tendem também a dificultar a formação de perlita, pois a demanda de difusão de átomos será maior. Assim, quando a velocidade de resfriamento

aumenta e a temperatura de transformação diminui para cerca de 550 °C há a formação de uma estrutura de perlita fina (menor espaçamento entre as lamelas da perlita), sendo ela a forma mais dura da perlita. Quando a temperatura de transformação cai para valores entre 550°C e 200°C, a transformação difusional é ainda mais dificultada e um novo constituinte é formado, chamado de bainita. Ela pode apresentar variações em sua morfologia ao longo da temperatura que é formada, podendo ter o formato de grãos alongados de ferrita em forma de pena com carbonetos de ferro finalmente dispersos, ou podendo ter a forma de agulhas com coloração escura. A bainita apresenta uma elevada resistência mecânica, podendo ainda apresentar uma boa tenacidade, de acordo com a sua morfologia. Por fim, para velocidades de resfriamento suficientemente elevadas, em baixas temperaturas de transformação (cerca de 200 °C), a transformação difusional da austenita é impedida, formando-se então, por um processo adifusional, uma nova fase não prevista no diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C, chamada de martensita. A sua morfologia pode variar na forma de agulhas, chamada de acicular, em forma de ripas, placas ou lâminas. A martensita apresenta a estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC) supersaturada de átomos de carbono (sendo, portanto uma fase metaestável), possuindo uma elevada dureza e sendo extremamente frágil, de forma que quanto menor a temperatura de transformação e maior o teor de carbono presente na austenita anterior, maior será a dureza e fragilidade da martensita formada. Portanto, é de grande importância ter um bom controle da velocidade de resfriamento durante a soldagem, uma vez que a formação de certas fases e constituintes na estrutura podem alterar significativamente as propriedades na região da junta soldada. A Figura 3.10 mostra de uma forma esquemática e simplificada a evolução da microestrutura de um aço de acordo com a velocidade de resfriamento partindo da fase austenítica. (CHIAVERINI, 2008; MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 3.10 – Microestrutura esquemática de um aço em função da velocidade de resfriamento a partir da fase austenita

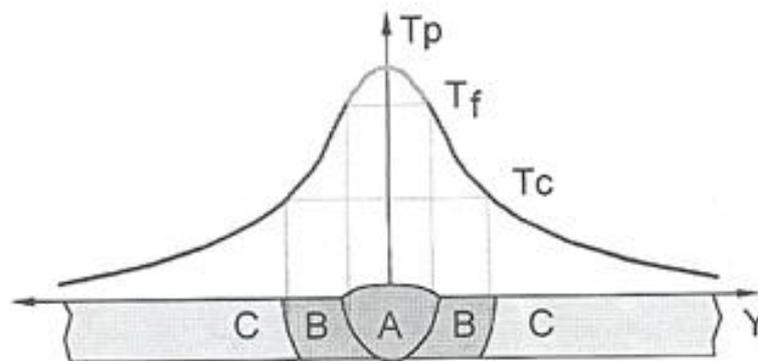


Fonte: MARQUES *et al.*, 2005

3.7.3 Macroestrutura de juntas soldadas

A partir da curva de repartição térmica, mostrada na Figura 3.11, podem-se observar três regiões bem definidas em uma junta soldada por fusão: A zona fundida (ZF), a zona termicamente afetada (ZTA), também chamada de zona afetada pelo calor (ZAC), e o metal de base (MB). A zona fundida indica a região do material onde houve fusão e solidificação no processo de soldagem. Nessa região, a temperatura de pico atingida são superiores que a temperatura de fusão (T_f) do metal de base. A zona termicamente afetada corresponde à região adjacente à zona fundida, de forma em que não houve a fusão do metal, mas onde ocorreram mudanças na microestrutura e/ou nas propriedades do material, conseqüente do ciclo térmico de soldagem. Nessa região, a temperatura de pico atingida é inferior à temperatura de fusão do metal, porém maior que a temperatura crítica. Por fim, o metal de base corresponde à região do material adjacente à ZTA, mais afastada do cordão de solda, em que não teve sua microestrutura alterada pelo calor, de forma que a temperatura de pico atingida nessa região é menor que a temperatura crítica do material (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 3.11 – Representação esquemática das regiões de uma junta soldada



Fonte: MARQUES *et al.*, 2005

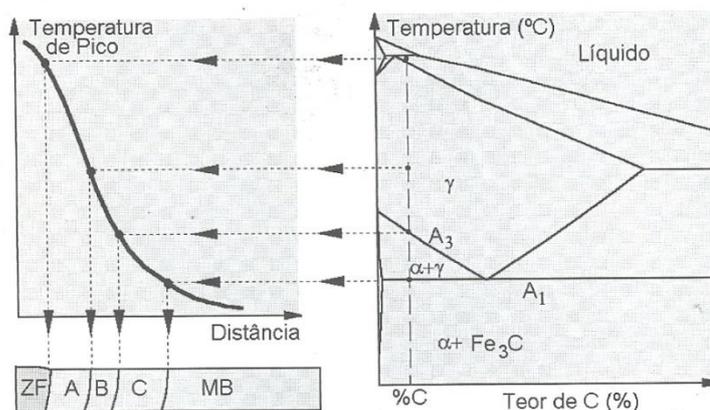
A- ZF, B- ZTA, C- MB

Durante o resfriamento da peça soldada, podem ocorrer vários fenômenos microestruturais na região da zona fundida até que ela alcance a temperatura ambiente. Entre esses fenômenos pode-se destacar o crescimento de grãos, a formação de fases intermetálicas como carbonetos e nitretos, além de transformações de fases e constituintes, que irão depender de condições como a composição química do metal de base e do metal de adição depositado à poça de fusão, o tamanho de grão austenítico anterior (no caso de aços carbono e aços baixa liga), o ciclo térmico de soldagem, concentração, composição química e

distribuição de tamanho de inclusões não metálicas presentes e microestrutura de solidificação (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

Diferente da zona fundida, a ZTA não pode ter sua composição química alterada. As mudanças ocorridas na ZTA irão depender, portanto, do tipo de metal de base soldado e dos ciclos e repartições térmicas sofridos, derivado do procedimento de soldagem. Metais que não possuem transformações de fases no estado não recozido, como o cobre e o alumínio, o principal efeito da soldagem na ZTA será o crescimento de grão. Os metais transformáveis apresentam uma ZTA mais complexa e para os aços carbono e aços baixa liga, ela pode ser dividida em regiões características, representadas na Figura 3.12 (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 3.12 – Representação esquemática da estrutura da ZTA de um aço baixo carbono



Fonte: MARQUES *et al.*, 2005

A- Região de crescimento de grão, B- Região de refino de grão, C- Região intercrítica

A região de crescimento de grão, que ocorre na faixa de temperatura de 1.100 °C a 1.500 °C, corresponde à região do metal de base mais próxima à zona fundida, na qual ocorre um grande crescimento de grão austenítico, que depende do teor de carbono e de elementos de liga do aço e da quantidade de energia empregada na soldagem. Esse crescimento pode ser inibido pela distribuição de precipitados (caso não se dissolvam) que ancoram os contornos de grão austeníticos. As propriedades mecânicas finais dessa região irão depender, além do crescimento de grãos, do produto da decomposição da austenita no resfriamento. A granulação grosseira da austenita aumenta a temperabilidade do aço nessa região, ou seja, dificulta a transformação difusional da austenita, podendo ter esse efeito acentuado com maiores teores de carbono na liga. Em geral, a austenita irá se decompor em ferrita com morfologia em placas e/ou bainita, podendo até mesmo gerar uma estrutura completamente martensítica, caso a velocidade de resfriamento seja elevada e o aço possua um alto teor de

carbono ou elementos de liga. Desta forma, devido à probabilidade de formação de uma estrutura de baixa tenacidade, é nessa região onde há a maior tendência de formação de trincas. Esses problemas podem ser evitados com a seleção adequada das condições de soldagem, como a energia de soldagem e temperatura de pré-aquecimento (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

A região de refino de grãos, compreendida em temperaturas de 1.100 °C a 900 °C, referentes a temperaturas comumente empregadas em tratamentos de normalização em aços, é geralmente caracterizada por uma estrutura com pequenos grãos de ferrita ou perlita, possuindo resistência e ductilidade elevadas, o que não apresenta grandes problemas, na maioria das vezes (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

A região intercrítica, também chamada de região parcialmente transformada, que ocorre na faixa de temperatura de 900 °C a 727 °C, caracteriza-se pela transformação parcial do metal de base, onde uma parte da perlita é austenitizada. Os elementos de liga presentes nessa austenita possuem concentrações maiores que os valores nominais dos aços. A austenita pode se decompor formando perlita, bainita ou martensita maclada (martensita possuindo alto teor de carbono), dependendo da velocidade de resfriamento, podendo resultar assim em uma elevada dureza e baixa tenacidade na região (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

Há ainda a possibilidade da formação de uma pequena região na ZTA chamada de região de esferoidização, compreendida em temperaturas de 750 °C a 700 °C, caracterizada pela esferoidização das lamelas de cementita da perlita, podendo diminuir a resistência mecânica nessa região. As mudanças microestruturais ficam cada vez menos perceptíveis em regiões mais afastadas da zona fundida, onde as temperaturas de pico são menores (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES *et al.*, 2005).

3.8 O estado da arte

Foram analisados cerca de nove artigos, com anos de publicação de 2000 a 2019, os quais foram utilizados para contextualização do panorama geral do processo “MIG-Brazing”.

Nos trabalhos de Vinás *et al.* (2010), Chovet e Ghuiheux (2006) e Rangel *et al.* (2005) os autores destacam uma crescente utilização nas últimas décadas de novos tipos de ligas metálicas, incluindo chapas revestidas (galvanizadas), na indústria automobilística para o aumento de resistência à corrosão e redução de massa na produção das carrocerias dos automóveis, devido ao bom custo benefício promovido por elas. Porém, de acordo com Guimarães *et al.* (2006), o processo de união de chapas galvanizadas por processos convencionais de soldagem é dificultado pela evaporação da fina camada de revestimento de

zinco que se evapora a temperaturas bem mais baixas da que a temperatura de fusão dos aços, o que prejudica não só na resistência à corrosão do material soldado, mas também na estabilidade do processo de soldagem a arco, decorrente do vapor de zinco gerado no processo. Neste contexto, o processo “MIG-Brazing” se mostra como uma interessante alternativa para a união desses aços, pois permite a redução do aporte de calor do processo em cerca de 50%, tendendo a diminuir tais problemas apresentados, segundo Chovet e Guiheux (2006).

No trabalho realizado por Rangel *et al.* (2005) os autores realizaram o processo “MIG-Brazing” em chapas de aço baixo carbono galvanizadas de pequena espessura e observaram os resultados dos cordões depositados por meio de técnicas de metalografia, utilizando microscopia ótica e eletrônica de varredura e fizeram ainda ensaios de microdureza nas juntas brasadas. As brasagens realizadas em seus experimentos utilizando como arame-eletrodo uma liga de cobre-silício apresentaram uma boa molhabilidade e aderência ao metal de base, havendo a fusão localizada em uma das bordas do metal de base onde o arco elétrico provavelmente se manteve na soldagem. Também foi observado que nas regiões adjacentes ao cordão e no metal base na periferia do cordão de solda não houve alterações significativas na microestrutura do aço da chapa, porém nas regiões central e da borda da chapa foi observado a formação de ferrita de *Widmanstätten*. Os resultados mostraram ainda que nas regiões laterais ao cordão depositado ocorre a evaporação do zinco e oxidação parcial da chapa, apresentando ainda uma zona termicamente afetada bem menor quando comparada à soldagem a arco convencional. Os resultados de microdureza apontaram uma variação nos valores de dureza devido à formação de compostos intermetálicos de cobre-zinco (CuZn) decorrente do processo.

Chovet e Guiheux (2006) fizeram um estudo do processo “MIG-Brazing” na união de chapas de aço de ultra alta resistência (UHSS) DP 600 e TRIP 700 utilizando arames-eletrodo de quatro ligas de cobre diferente, sendo três maciças e um arame tubular, sendo também estudado o processo “TIG-Brazing”, utilizando os mesmos três eletrodos maciços de ligas de cobre utilizados no processo “MIG-Brazing”. Quanto aos dois processos foi observada que no processo “MIG-Brazing” ocorre muito pouca incidência de respingos enquanto no “TIG-Brazing” praticamente nenhum respingo foi observado. Após as brasagens, os autores realizaram análises metalográficas nas juntas brasadas que mostraram uma baixa diluição das ligas de cobre no aço, além de uma formação de estrutura dendrítica da matriz de cobre depositado. Foi detectada por meio de análises por microscopia eletrônica de varredura que a evaporação da camada de zinco de juntas brasadas causada pelos dois processos é inferior à

evaporação causada pelo processo de soldagem MAG convencional. Foram feitas ainda caracterizações mecânicas de tração, que indicaram uma boa eficiência da junta brasada, uma vez que a resistência do cordão depositado equiparou-se à resistência da chapa de aço unida, e também ensaios de microdureza, no qual foi observada uma elevação do valor de dureza na ZTA da junta, devido ao baixo aporte térmico associado ao processo que resulta em uma maior taxa de resfriamento da junta que por sua vez acarreta na formação de fases microestruturais de elevada dureza.

O trabalho conduzido por Vinás *et al.* (2010) se baseou na análise metalográfica e na análise de corrosão de chapas de aço baixo carbono unidas por “MIG-Brazing” com um arame-eletrodo de liga de CuSi_3 . Em seus experimentos, os autores observaram por análises de macrografia que o processo resultou em cordões possuindo boa molhabilidade e fluidez, portanto apresentando um pouco de porosidade no metal depositado, decorrente do vapor de zinco gerado no processo. Por análises de micrografia foi observada na ZTA da junta brasada uma região significativa de crescimento de grãos. Além disso, foi realizado um ensaio de corrosão em uma câmara fechada contendo uma atmosfera úmida, que demonstrou o efeito negativo da evaporação do zinco na resistência à corrosão da chapa, evidenciado pelas chamadas corrosões brancas nas superfícies galvanizadas das chapas.

Basak *et al.* (2013) conduziram seu estudo na união de chapas de aço *Interstitial Free* (IF) galvanizadas de pequena espessura pelo processo “MIG-Brazing” utilizando uma liga de cobre-silício (CuSi) como arame-eletrodo. Os autores fizeram uma análise metalográfica por microscopia ótica, uma análise por difração de raios-x (DRX) e também análises por MEV nas juntas revelando a formação de um composto de grande estabilidade na interface do metal base com o metal de adição a base de ferro-silício (Fe_5Si_3), que resulta em uma junta de elevada resistência e elevada dureza. Também foi realizado um ensaio de microdureza, que revelou um aumento elevado no valor de dureza na região do composto de Fe_5Si_3 , e um ensaio de tração que revelou uma elevada eficiência da junta, uma vez que todos os corpos de prova ensaiados se romperam fora da região do cordão de solda.

Em seu trabalho, Joseph *et al.* (2003) investigaram a aplicabilidade do processo “MIG-Brazing” utilizando os modos de GMAW pulsado (GMAW-P) e GMAW com polaridade variável (VP-GMAW). Na parte experimental, os autores utilizaram duas ligas de cobre como arame-eletrodo (bronze silício e bronze alumínio) na união de chapas galvanizadas. Os dados de forma de onda dos sinais elétricos durante o processo foram captados e analisados pelo *Waveform Designer Pro software* e foi utilizada uma câmera de alta velocidade para a captação de imagens da transferência metálica. Foi verificado que no modo GMAW-P quase

não houve ocorrência de respingos. Também se verificou que a transferência de duas gotas por pulso tem resultados aceitáveis para baixos valores de velocidade de alimentação e que a transferência de uma gota por pulso apresenta uma boa estabilidade de processo. Quanto ao modo VP-GMAW, foi observado que a gota metálica aumentava seu tamanho durante a polaridade negativa e que na polaridade positiva ela mantinha o seu tamanho e era depositada na poça de fusão. O cordão depositado por este modo obteve um bom aspecto visual, porém não foi possível eliminar completamente o respingo, devido a limitações da fonte de energia utilizada. Este modo, porém resultou em um menor aporte térmico do processo o que gerou uma menor destruição do revestimento de zinco da chapa, deixando-a menos desprotegida contra corrosão quando comparado ao modo GMAW-P. Foram realizados também ensaios mecânicos de tração e observado que em todos os casos as fraturas ocorreram fora da região em que o cordão foi depositado.

Os trabalhos Murakami *et al.* (2003) e Park *et al.* (2009) contemplam o estudo da união dissimilar de chapas de aço utilizando o processo “MIG-Brazing” com arames-eletrodos a base de alumínio. Em seus experimentos Murakami *et al.* (2003) utilizaram um arame tubular de alumínio para união de chapas de aço carbono e por meio de análises metalográficas observaram que essa união é possível, havendo aderência da junta brasada, além de observarem a formação de um composto intermetálico (Al_74Fe_2Si) na junta que se tiver uma espessura menor que 2,5 μm não prejudica na resistência mecânica da mesma, verificada por meio de ensaios mecânicos de tração que demonstrou que a resistência à tração da junta diminui com o aumento da espessura do composto intermetálico formado. Já Park *et al.* (2009) utilizaram em seus experimentos um arame maciço de alumínio 4043 na união de chapas de aço. Foi utilizada no processo a corrente alternada (CA) pulsada, na qual se varia a polaridade positiva com a polaridade negativa. Uma câmera de alta velocidade foi utilizada para análise das características do arco e da transferência metálica durante o processo, sendo observada a ocorrência da transferência de uma gota por pulso de corrente. Os autores fizeram a análise da influência da variação do espaçamento de juntas sobrepostas juntamente com a variação da relação de polaridade negativa de corrente, sendo observado que o aumento da relação de polaridade negativa contribui para o preenchimento da junta e o aumento do espaçamento isoladamente acarreta em uma diminuição da resistência à tração da junta, revelado pelo ensaio de tração realizado. Também foram feitas análises de MEV e identificado a presença de um composto intermetálico de caráter frágil na junta brasada, que não acarreta grandes problemas na resistência da junta se tiver uma espessura menor que 10 μm , compensada pela ductilidade do metal de base.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para preparação dos corpos de prova foram: (01) chapa de aço baixo carbono de 1,2 mm de espessura e (02) chapa de aço baixo carbono de 1,5 mm de espessura revestida com zinco (galvanizada).

Os arames utilizados/avaliados como material de deposição nos processos de brasagem foram os arames BT 531 e BT 513 da marca Brastak, ambos possuindo o diâmetro de 0,8 mm. A composição química e o intervalo da temperatura de fusão de cada liga são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química e faixa de temperatura dos arames utilizados

Arames	Norma	Composição Química (% em peso)						Intervalo de Fusão (°C)
		Cu	Sn	Fe	Mn	Si	Al	
BT 513	AWS A5.7 ERCuSi-A	95,0	0,6	0,3	0,8	3,3	-	970 - 1060
BT 531	AWS A5.7 ERCuAl-A1	92,8	-	-	0,2	-	7,0	1040 - 1060

Fonte: Adaptado de BRASTAK, 2006

Foi utilizado como gás de proteção argônio puro, tanto nos processos de “MIG-Brazing” como no processo de soldagem GTAW.

4.2 Equipamentos

Para a realização dos procedimentos experimentais os principais equipamentos utilizados foram:

- (01) Um equipamento EDX-720, da empresa Shimadzu, para a realização do ensaio de espectroscopia de raio-x por dispersão em energia (FRX), para a caracterização do revestimento de zinco da chapa galvanizada.
- (02) Uma guilhotina modelo U-136-D da Peck, Stow & Wilcox CO., para o corte das chapas de aço na preparação dos corpos de prova.
- (03) Um equipamento de soldagem da marca Lincoln Electric do modelo Power Wave® S350 com o sistema de alimentação possuindo dois roletes com rasgos semicirculares em “U” de 0,8 mm de diâmetro, para a realização do processo “MIG-Brazing”.
- (04) Um equipamento de soldagem da marca Miller Electric do modelo Syncrowave 250 DX, para o processo de soldagem GTAW.

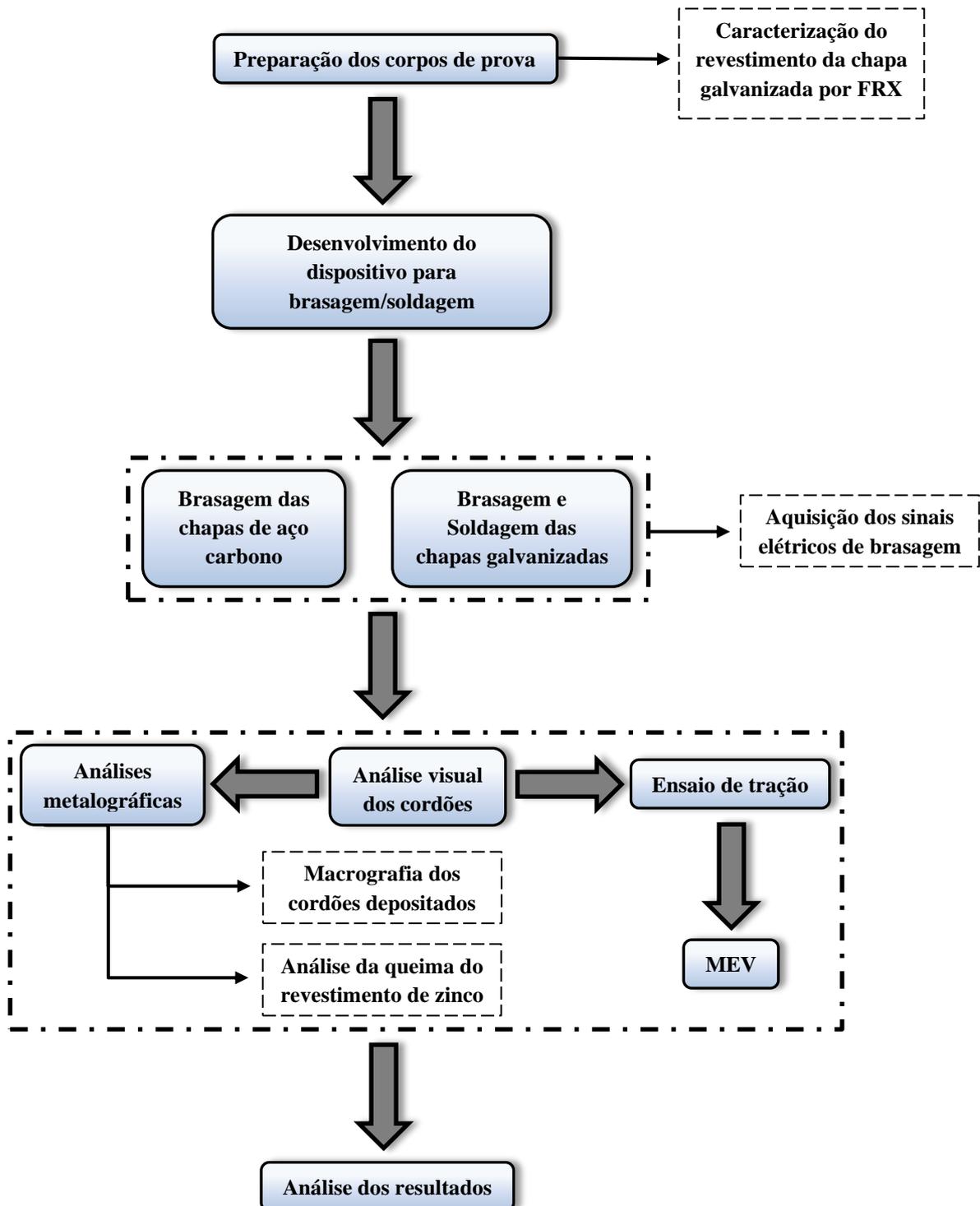
- (05) Um tartilope da empresa S.A. White Martins, de modelo MC-46, para a mecanização dos processos de brasagem e soldagem.
- (06) Uma máquina cortadora metalográfica da marca Arotec modelo COR80, para os cortes dos corpos de prova a serem analisados nos ensaios metalográficos. Também foi utilizado um microscópio lupa fabricado pelas empresas Metrimpex Hungary e PZO-Labimex, para a realização das imagens de macrografia.
- (07) Uma máquina fresadora de comando numérico computadorizado (CNC) de modelo Discovery 560 da marca ROMI[®], para a confecção dos corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de tração.
- (08) Uma máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 5982 com célula de carga de 100 kN, para a realização dos ensaios de tração.
- (09) Um equipamento SSX-50 Superscan, da empresa Shimadzu, para as análises feitas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.3 Métodos

A primeira etapa consistiu na preparação dos corpos de prova que foram brasados e soldados. Os corpos de prova partiram de uma chapa de aço carbono e uma chapa de aço galvanizada, sendo realizado um ensaio de caracterização por FRX para análise de composição química do revestimento da chapa galvanizada. Depois foi projetado e desenvolvido um dispositivo para fixação dos corpos de prova a serem brasados e soldados. Após a preparação dos corpos de prova, eles foram submetidos aos processos de “MIG-Brazing” e soldagem GTAW. Os sinais elétricos do processo “MIG-Brazing” foram coletados durante sua execução com o auxílio do *software WeldView* em um computador conectado ao equipamento de soldagem. Depois de realizados os processos de brasagem e soldagem, foram feitas análises dos aspectos visuais dos cordões obtidos nos corpos de prova. As chapas brasadas e soldadas foram separadas em (01) amostras para análises metalográficas das juntas (macrografia e observação da queima do revestimento de zinco) e (02) corpos de prova para realização de ensaios de tração. Depois de ensaiados, quatro amostras dos corpos de prova do ensaio de tração foram levadas para serem analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para visualização da superfície de fratura. Após todos os procedimentos práticos, os resultados foram analisados e discutidos.

As etapas do trabalho podem ser observadas de forma esquemática no fluxograma apresentado na Figura 4.1

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: Próprio autor

4.3.1 Caracterização do revestimento da chapa galvanizada

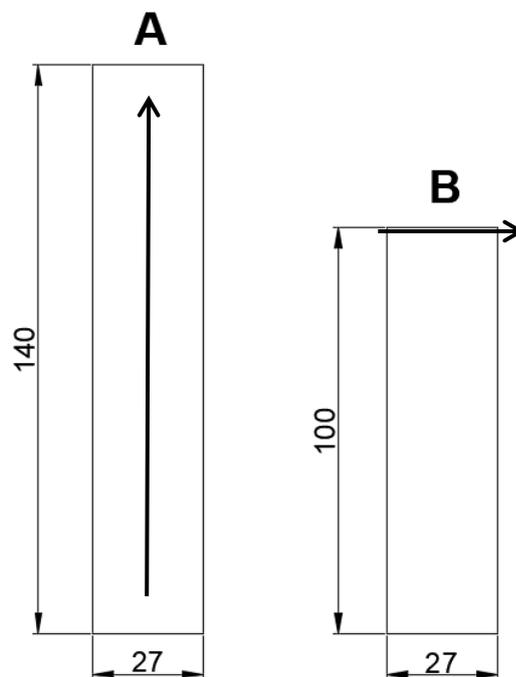
Foi realizado um ensaio de FRX para determinar a composição química do revestimento da chapa galvanizada.

Para a realização do ensaio foi cortada uma amostra de chapa galvanizada de aproximadamente 15 x 15 mm. A análise realizada foi do tipo elementar e o valor de tensão de emissão de raios-x utilizado foi de 15 kV.

4.3.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados por uma guilhotina e posteriormente rebarbados com uma lima e desempenados por martelamento. As dimensões dos corpos de prova são mostradas na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Dimensões dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor

A- Corpos de prova para brasagem e soldagem por GTAW

B- Corpos de prova para união de topo e para posterior ensaio de tração

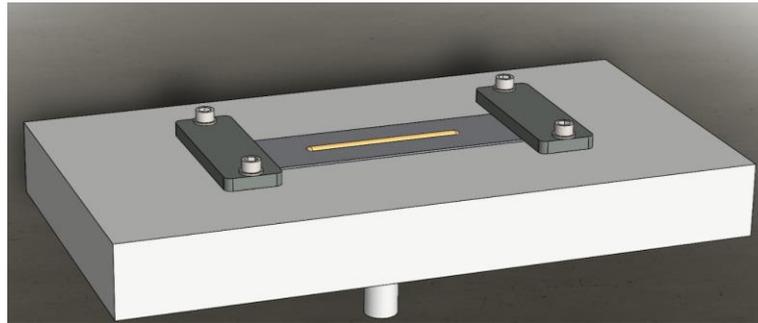
As setas na Figura 4.2A e 4.2B indicam onde os cordões foram realizados nos corpos de prova.

4.3.3 Desenvolvimento do dispositivo de fixação dos corpos de prova

Foi desenvolvido um dispositivo para a fixação dos corpos de prova de forma que eles pudessem ficar completamente estáticos durante a brasagem, não correndo o risco de empenarem e atrapalhar o processo. O dispositivo foi construído com um ponto de aterramento para que houvesse uma menor distância entre a garra de aterramento e o corpo de

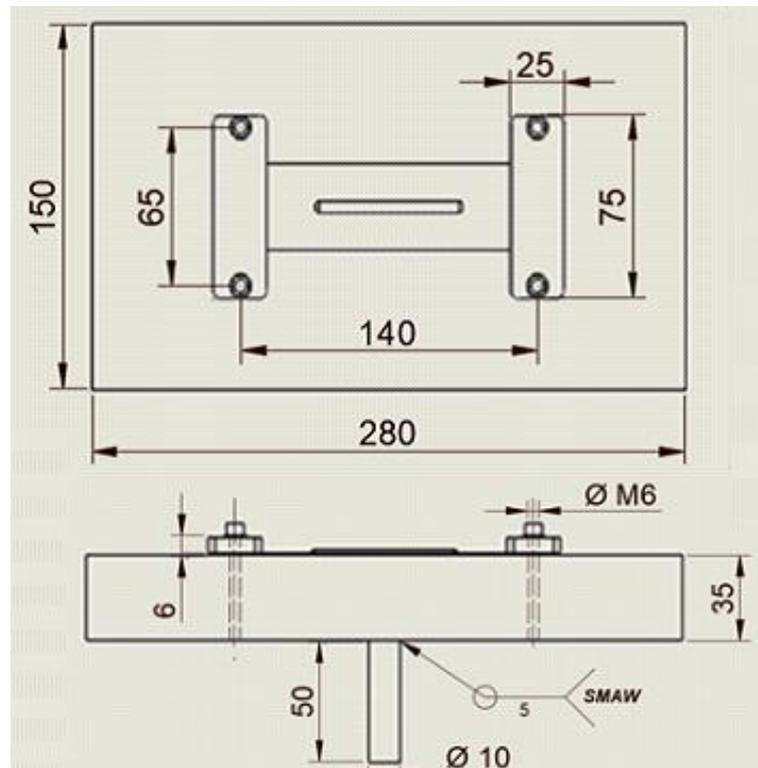
prova, além de ter a superfície da base metálica plana para garantir que haja uma maior área de contato dos corpos de prova com a superfície das chapas de apoio, a fim de promover um melhor contato elétrico e maior estabilidade do arco. O projeto do dispositivo (realizado no *software SolidWorks®*) e suas dimensões são mostrados na Figura 4.3 e Figura 4.4, respectivamente.

Figura 4.3 – Projeto do dispositivo de fixação



Fonte: Próprio autor

Figura 4.4 – Dimensões do dispositivo de fixação



Fonte: Próprio autor

4.3.4 Procedimento de brasagem e soldagem

Antes dos procedimentos de brasagem nos corpos de prova foram realizados pré-testes para determinação dos melhores parâmetros a serem utilizados. Os testes foram realizados manualmente variando-se diversos parâmetros como *set up* de soldagem fornecido pela máquina, vazão do gás, distância entre bocal e a peça, dois diferentes bicos de contato e os valores de tensão e corrente de brasagem. A determinação dos parâmetros foi feita com base nos parâmetros que proporcionaram uma melhor continuidade e homogeneidade do cordão depositado e maior estabilidade do arco, gerando a menor quantidade de respingos. O *set-up* de soldagem escolhido da máquina foi o modo 192 (GMAW-P; arame de bronze; gás argônio). Todas as brasagens foram realizadas utilizando corrente contínua (CC) com polaridade inversa do eletrodo (CC⁺). Os parâmetros de brasagem utilizados são mostrados na Tabela 4.2.

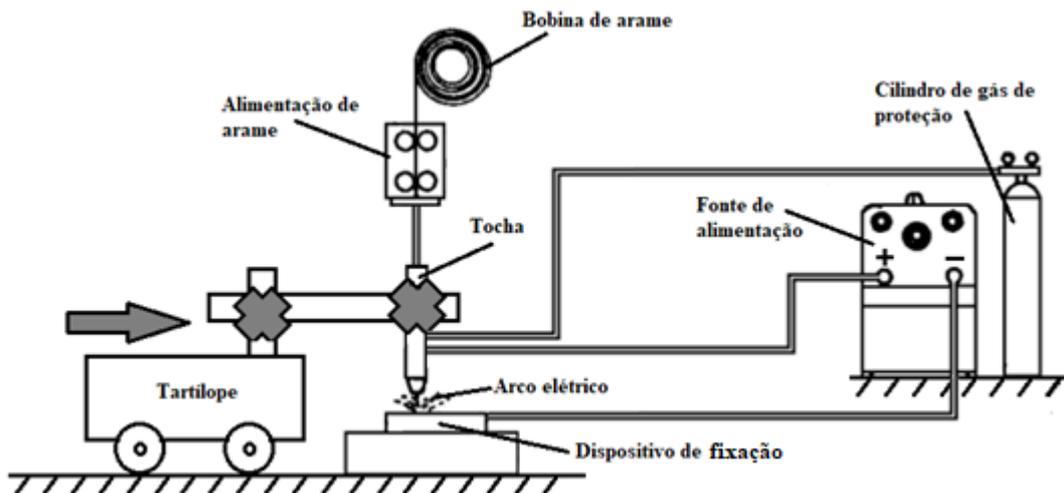
Tabela 4.2 – Parâmetros de brasagem utilizados

Tensão de soldagem (V)	Corrente de soldagem (A)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Distância entre bocal e peça (mm)	Vazão de gás (L/min)
15,0	45,0	250,0	10,0	15,0

Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova foram brasados de forma mecanizada utilizando uma velocidade constante de 250,0 mm/min. O bocal da tocha foi posicionado de forma perpendicular e com distância constante em relação às peças durante todo o processo. A montagem dos procedimentos pode ser observada por um desenho esquemático mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Representação esquemática do processo de brasagem mecanizado



Fonte: Adaptado de GUERRA (2015)

Inicialmente, seguindo a metodologia de Joseph *et al.* (2003), todos os corpos de prova foram limpos com acetona logo antes de serem soldados para a remoção de quaisquer impurezas e gorduras presentes, promovendo um melhor contato elétrico de forma a facilitar a abertura e manutenção do arco elétrico, durante o processo.

Os procedimentos foram divididos de duas formas: primeiramente foram feitas deposições com os dois arames utilizados (BT 513 e BT 531) sobre os corpos de prova A (Figura 4.2) das duas chapas utilizadas (com e sem revestimento) para análises visuais dos cordões e análises metalográficas; posteriormente foram feitas uniões de topo, sem espaçamento, com os corpos de prova B (Figura 4.2) utilizando o arame BT 513 na chapa de aço sem revestimento e feitas uniões de topo com os mesmos corpos de prova, utilizando o arame BT 531 nas duas chapas utilizadas (com e sem revestimento), variando-se o espaçamento da junta com 0,0 mm, 0,5 mm, 1,0 mm e 1,5 mm, para serem realizados ensaios de tração. Os espaçamentos das juntas foram fixados com o auxílio de um espessímetro. Para cada condição distinta foram utilizados três corpos de prova, a fim de se tentar garantir a repetibilidade do processo e também para se obter uma média dos resultados dos ensaios realizados posteriormente. A Figura 4.6 mostra os corpos de prova que foram unidos com espaçamento de 1,0 mm, durante o processo.

Figura 4.6 – Utilização do espessímetro para junta de 1,0 mm de espaçamento



Fonte: Próprio autor

A Figura 4.7 mostra que os corpos de prova foram fixados de forma a não ficarem completamente apoiados na base do dispositivo, utilizando-se para isso chapas de apoio, a fim de se evitar que houvesse uma possível união dos corpos de prova com a superfície do dispositivo, o que atrapalharia em sua retirada depois da brasagem.

Figura 4.7 – Corpos de prova a serem unidos com espaçamento de 1,0 mm



Fonte: Próprio autor

A soldagem dos corpos de prova com o processo GTAW foi realizada também de forma mecanizada utilizando uma velocidade constante de 250,0 mm/min no tartilope. Da mesma forma que na brasagem, o bocal da tocha foi posicionado de forma perpendicular e com distância constante em relação às peças durante todo o processo. Foi empregada a polaridade direta (CC⁻) no processo e o eletrodo utilizado foi o de tungstênio com 2% de óxido de tório de 1,6 mm de diâmetro. Os parâmetros de soldagem utilizados são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros de soldagem utilizados

Tensão de soldagem (V)	Corrente de soldagem (A)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Distância entre bocal e peça (mm)	Vazão de gás (L/min)
13,7	60,0	130,0	10,0	15,0

Fonte: Próprio autor

Para a soldagem GTAW foram utilizados os corpos de prova A (Figura 4.2) da chapa de aço galvanizada fazendo-se uma soldagem autógena promovendo apenas a fusão do metal no centro corpo de prova em sentido longitudinal.

4.3.5 Aquisição dos sinais elétricos de brasagem

As aquisições dos sinais elétricos do processo “MIG-Brazing” foram realizadas pelo *software WeldView* com o auxílio de um computador conectado ao equipamento de soldagem. Foram feitas aquisições de quatro condições: (01) brasagem com arame BT 531 em chapa sem revestimento; (02) brasagem com arame BT 513 em chapa sem revestimento; (03)

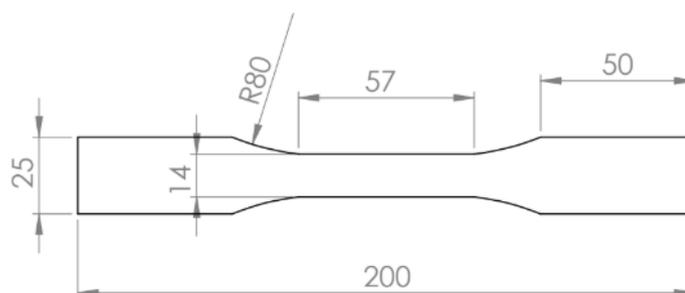
brasagem com arame BT 531 em chapa galvanizada e (04) brasagem com arame BT 513 em chapa galvanizada.

Foram feitas aquisições dos valores médios de corrente e tensão em função do tempo de brasagem, com a frequência de aquisição de 60.000 Hz. Após as aquisições, foram plotados os oscilogramas dos processos, realizados no *software OriginPro*.

4.3.6 Confeção dos corpos de prova para ensaio de tração

As dimensões dos corpos de prova do ensaio de tração foram retiradas da norma ASTM E8/E8M – 13a (2013) e são mostradas na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Próprio autor

A usinagem dos corpos de prova foi realizada sob refrigeração constante com fluido refrigerante para não ocorrer nenhum aquecimento excessivo que pudesse alterar a microestrutura do aço. Foi utilizado ainda um dispositivo de fixação dos corpos de prova em uma base polimérica de *Nylon*, para mantê-los estáticos durante a usinagem, evitando possíveis erros de medida.

4.3.7 Procedimentos do ensaio de tração

Depois de usinados, os corpos de prova “B” brasados foram submetidos ao ensaio de tração. Os procedimentos do ensaio foram realizados de acordo com a norma ASTM E8/E8M – 13a (2013). Os corpos de prova foram colocados individualmente na máquina universal de ensaios de forma alinhada, prendendo-se as extremidades de maior largura nas garras da máquina. A velocidade de ensaio empregada foi de 3,42 mm/min resultando em uma taxa de deformação inicial de $0,001 \text{ s}^{-1}$. O ensaio foi realizado até a ruptura dos corpos de prova. Posteriormente os dados obtidos pelo ensaio foram transferidos para o *software OriginPro* e a partir deles foram elaborados os gráficos de força em função do alongamento de cada corpo de prova para serem analisados.

4.3.8 Procedimentos das análises metalográficas

Depois de realizados os procedimentos de brasagem, as juntas dos corpos de prova “A” foram cortadas transversalmente sob refrigeração constante com fluido de corte na máquina cortadora metalográfica. Foram cortados corpos com 10 mm de comprimento, retirados da metade do comprimento dos cordões depositados. Os corpos foram então embutidos a frio com resina de poliéster e lixados com lixas de granulometrias #120, #240, #320, #400 e #600.

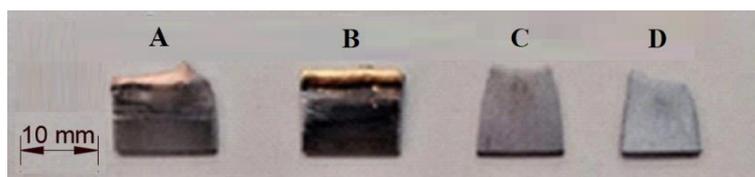
O ataque químico do metal de base foi realizado com o reativo Nital (ácido nítrico em solução de álcool etílico) na proporção de 5%, seguindo a metodologia de Basak *et al.* (2013) e Vinás *et al.* (2010). As macrografias das juntas brasadas e a avaliação da queima de revestimento pela soldagem GTAW foram realizadas pelo microscópio lupa.

As imagens obtidas pelo microscópio lupa foram então passadas para o *software* AutoCAD, onde foram realizadas: (01) medições do comprimento da ZTA gerada pelo processo “MIG-Brazing” e pelo processo GTAW; (02) medições da área transversal dos cordões brasados para cálculo da diluição ocorrida e (03) medições das larguras de revestimento queimado nas chapas de aço galvanizadas em volta dos cordões brasados por “MIG-Brazing” e soldados por GTAW.

4.3.9 Procedimentos do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Depois de realizados os ensaios de tração nos corpos de prova, foram separadas quatro amostras já ensaiadas para análise por MEV, a fim de se observar as características das superfícies de fratura dos materiais. As amostras foram cortadas pela máquina cortadora metalográfica no comprimento aproximado de 12 mm para serem colocadas no porta-amostras da máquina. As amostras são mostradas na Figura 4.9. As imagens foram capturadas na superfície superior da amostra, utilizando-se uma tensão de aceleração de feixe de 15 kV.

Figura 4.9 – Amostras analisadas por MEV



Fonte: próprio autor

- A- Chapa de aço carbono sem revestimento; arame BT 513; sem espaçamento
- B- Chapa de aço carbono sem revestimento; arame BT 531; sem espaçamento
- C- Chapa de aço carbono sem revestimento; arame BT 531; espaçamento de 0,5 mm
- D- Chapa de aço carbono galvanizada; arame BT 531; espaçamento de 0,5 mm

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio de FRX

O resultado revelado pelo ensaio de FRX é mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Composição química do revestimento da chapa galvanizada

Elemento químico	Percentual em massa (%)
Zn	79
Fe	21
Mn	traços

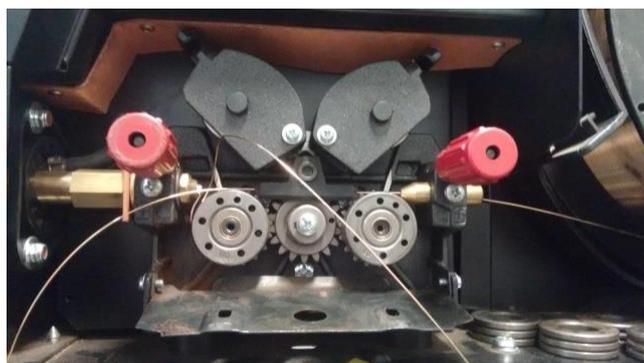
Fonte: Próprio autor

O resultado do ensaio indica que a composição do revestimento da chapa de aço galvanizada é, de fato, à base de zinco, como esperada. A concentração de ferro identificada pode ter ocorrido devido à maior penetração do raio-x na superfície da amostra. De acordo com Jenkins (1999), a profundidade de penetração de raios-x para matriz de aço pode variar entre 0,5 a 35 μm , podendo ter ultrapassado a camada de zinco e identificando assim a matriz de aço.

5.2 Metodologia de brasagem

Conforme descrito na metodologia, durante os testes iniciais para a escolha dos parâmetros de brasagem, foram avaliados dois bicos de contato diferentes (um de 0,9 mm e um 0,8 mm) a fim de se observar a relevância do contato elétrico para o processo “MIG-Brazing”. Com a utilização do bico de contato de 0,9 mm para a brasagem de chapas em superfícies muito oxidadas e com elevada rugosidade, ocorria o emaranhamento do arame-eletrodo na entrada do conduíte que o leva à tocha, mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Emaranhamento do arame-eletrodo no alimentador

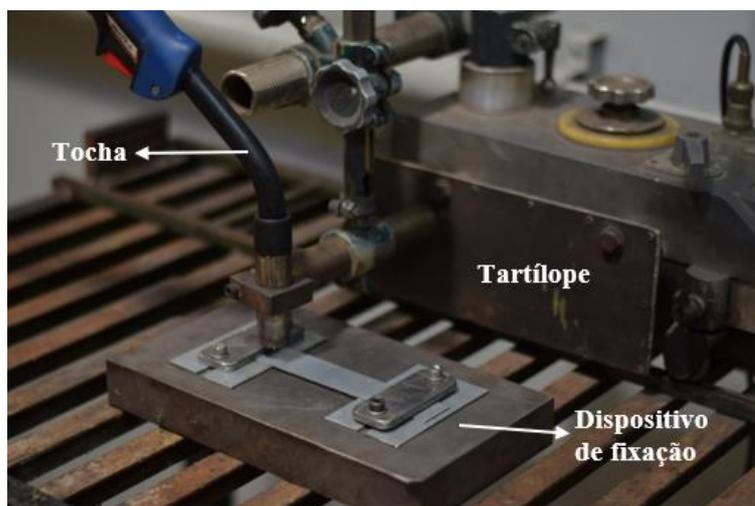


Fonte: Próprio autor

Ao se utilizar o bico de contato de 0,8 mm, juntamente com o dispositivo de fixação desenvolvido, foi observado que o problema de emaranhamento parou de ocorrer. Esse resultado sugere uma alta sensibilidade de contato elétrico dos arames-eletrodos utilizados, mostrando a importância de se ter um bom contato elétrico das peças a serem brasadas, que foi possibilitado pela utilização do dispositivo de fixação, e também a importância do acompanhamento do nível de desgaste dos bicos de contato utilizados, que podem influenciar na estabilidade do processo.

O dispositivo desenvolvido promoveu não só o aumento do contato elétrico, mas também permitiu que os corpos de prova permanecessem estáticos durante os processos de “MIG-Brazing” e também soldagem GTAW, uma vez que sem fixá-los, os corpos de prova sofriam deformação plástica, devido ao ciclo térmico ocorrido, chegando a encostar-se ao bocal da tocha, o que atrapalhava no processo. A Figura 5.2 apresenta o resultado da metodologia empregada em uma visão geral do processo “MIG-Brazing”.

Figura 5.2 – Visão geral do processo “MIG-Brazing”



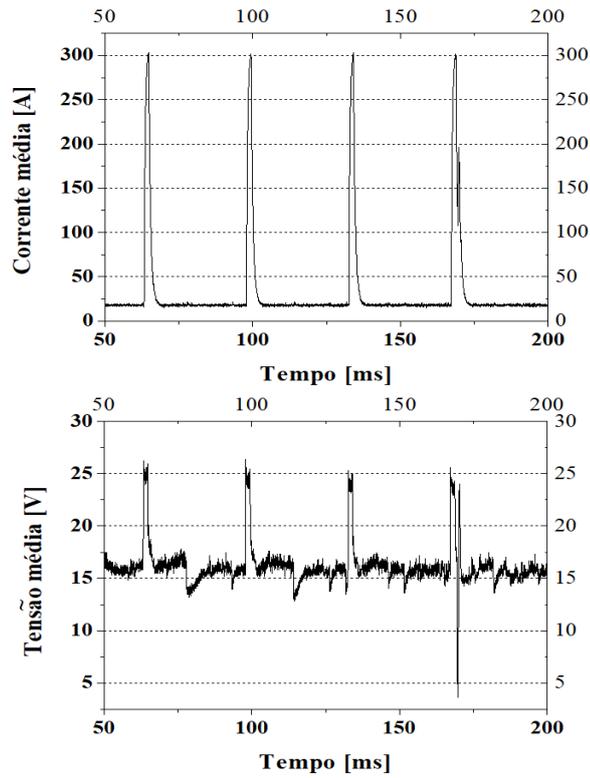
Fonte: Próprio autor

É ainda importante destacar que a realização do processo “MIG-Brazing” de forma satisfatória só foi possível com a utilização de uma fonte de energia que possibilitasse o modo de transferência GMAW-P, no modo de *set-up* de número 192, para soldagem de arames de bronze.

5.3 Avaliação dos sinais elétricos de brasagem

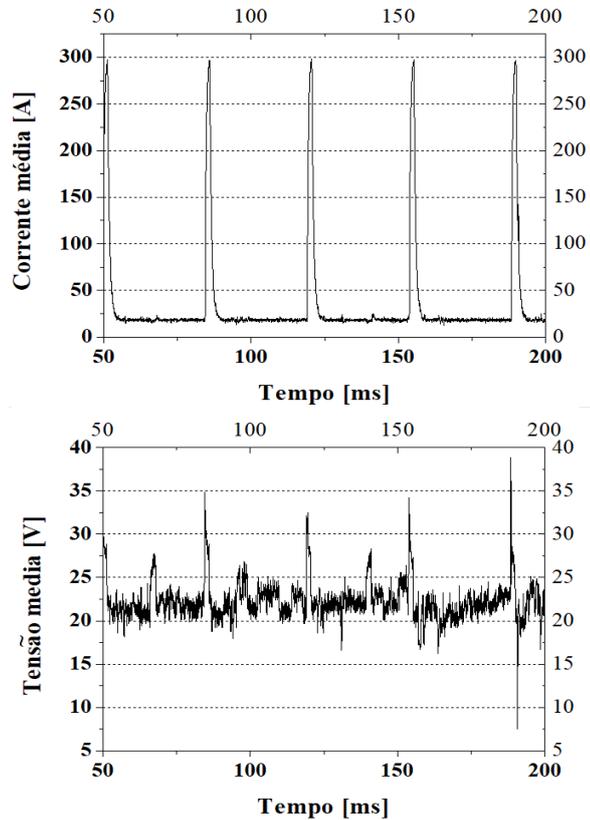
Os oscilogramas dos processos de brasagem são mostrados na Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6.

Figura 5.3 – Oscilograma da brasagem com arame BT 531 em chapa sem revestimento



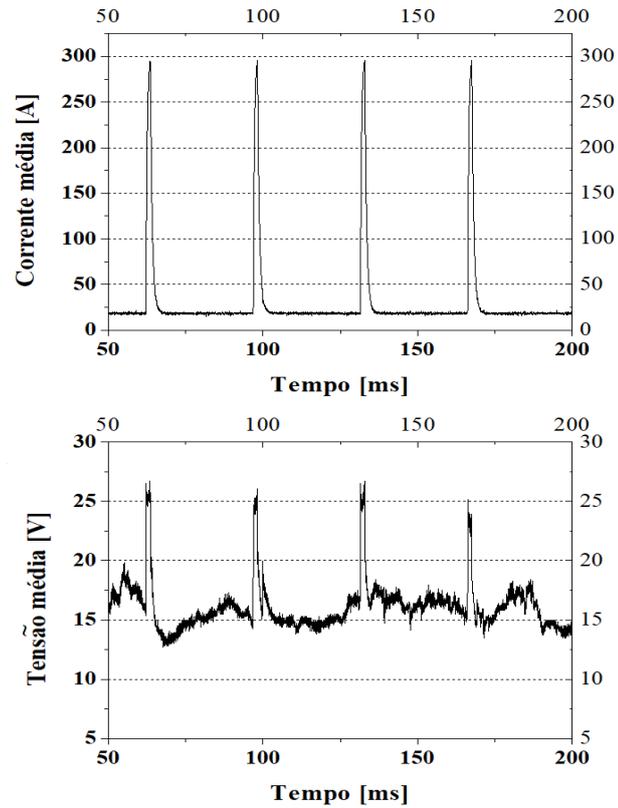
Fonte: Próprio autor

Figura 5.4 – Oscilograma da brasagem com arame BT 513 em chapa sem revestimento



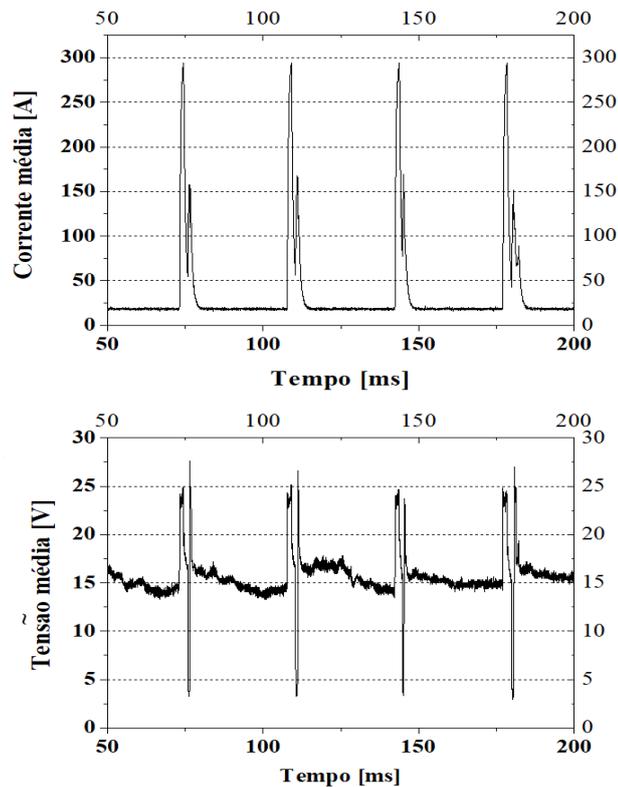
Fonte: Próprio autor

Figura 5.5 – Oscilograma da brasagem com arame BT 531 em chapa galvanizada



Fonte: Próprio autor

Figura 5.6 – Oscilograma da brasagem com arame BT 513 em chapa galvanizada



Fonte: Próprio autor

Os oscilogramas traçados indicam que de fato o processo se deu por MIG Pulsado, comparando com os resultados de Joseph *et al.* (2003), de forma que os valores de corrente oscilam entre um valor mais baixo, chamado de corrente de base e um valor mais elevado, chamado de corrente de pico. No processo, a corrente de base tem como principal função fazer com que o arco elétrico permaneça aberto com um baixo valor de energia, enquanto a corrente de pico tem como função atuar na formação da gota metálica na ponta de eletrodo para que ela seja posteriormente destacada e adicionada à peça (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Pode-se avaliar que o modo de MIG Pulsado permitiu que o processo de brasagem se desse não apenas com um nível de calor reduzido, quando comparado aos processos convencionais de soldagem, como também contribuiu para uma transferência metálica mais estável, transferindo pequenas gotas de metal à poça de fusão, evidenciado por um cordão contínuo e homogêneo, como será mostrado posteriormente nas análises visuais dos cordões.

Na Figura 5.6 pode-se perceber diversos picos menores de corrente que fogem do padrão e resultam em curto-circuitos de baixa duração. De acordo com Scotti, Ponomarev (2008), esses curto-circuitos estão associados às forças que atuam normalmente na transferência metálica, juntamente com o movimento caótico da superfície da poça de fusão e da gota formada na ponta do eletrodo, de modo que a gota metálica pode sofrer uma repulsão e não ser transferida durante o curto-circuito, caso o balanço das forças seja desfavorável, podendo gerar respingos durante o processo. Observa-se que na brasagem da chapa galvanizada houve maior incidência desses curto-circuitos incidentais, o que pode sugerir que o vapor de zinco gerado no processo tenha atuado de modo a dificultar uma transferência estável da gota de metal, como sugerido por Vinás *et al.* (2010). Esse fenômeno pode ter contribuído para que o aspecto visual da brasagem realizada nas chapas de aço galvanizadas não fosse tão homogêneo como nas chapas sem revestimento, como também será mostrado posteriormente nas análises visuais dos cordões.

Deve-se ressaltar também que para um melhor controle do modo MIG Pulsado seria necessário a possibilidade do ajuste fino dos parâmetros de corrente e tempo de base e corrente e tempo de pico, de modo a se controlar o destacamento de gotas da ponta do eletrodo por pulso de corrente (sendo que o mais aceito é que a transferência de uma gota por pulso é modo mais estável) e, dessa forma, fazer com que o processo se dê com maior estabilidade e livre de respingos, de acordo com Scotti, Ponomarev (2008). Tais ajustes são possíveis utilizando uma fonte de energia e um *software* que permitam regular esses parâmetros.

5.4 Avaliação visual dos cordões depositados

Os corpos de prova brasados são mostrados na Figura 5.7 e na Figura 5.8.

Figura 5.7 – Corpos de prova de chapa sem revestimento brasados

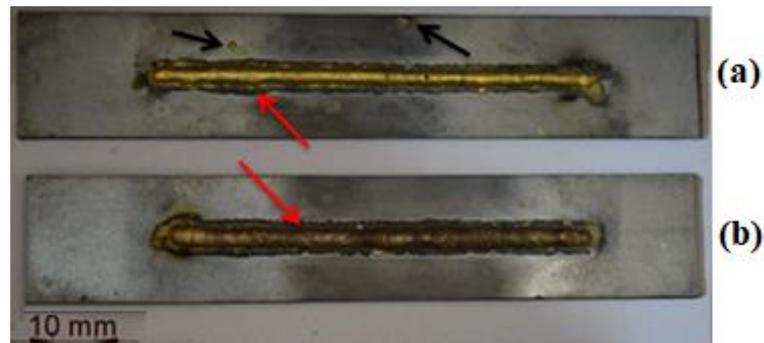


Fonte: Próprio autor

(a) Arame BT 513; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v= 250$ mm/s

(b) Arame BT 531; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v= 250$ mm/s

Figura 5.8 – Corpos de prova de chapa galvanizada brasados



Fonte: Próprio autor

(a) Arame BT 531; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v= 250$ mm/s

(b) Arame BT 513; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v= 250$ mm/s

Pela Figura 5.7 pode-se perceber que as brasagens realizadas com os dois tipos de arame nas chapas sem revestimento proporcionaram cordões com bons aspectos visuais, homogêneos, mantendo uma boa continuidade e apresentando ainda uma boa fluidez e molhabilidade. Observa-se que os cordões apresentaram poucos respingos, que poderiam ser ainda reduzidos com ajustes nos parâmetros de pulso de corrente, de acordo com Scotti, Ponomarev (2008).

A Figura 5.8 mostra a influência do revestimento de zinco no aspecto visual do cordão depositado. Primeiramente, pode-se observar que de fato houve a queima do revestimento de zinco, como esperado, nas regiões escuras adjacentes aos cordões, indicadas pelas setas vermelhas. Percebe-se também que para os mesmos parâmetros de brasagem utilizados, os

cordões depositados com os dois arames apresentaram menor fluidez e molhabilidade nos corpos de prova, apresentando também uma maior incidência de respingos durante o processo, indicado pelas setas pretas. Os cordões apresentaram uma menor continuidade do que os cordões depositados nas chapas de aço sem revestimento, mas ainda assim mantiveram uma continuidade e homogeneidade satisfatória, sugerindo a viabilidade do processo “MIG-Brazing” na união de chapas galvanizadas.

Segundo Vinás *et al.* (2010), a principal causa da menor homogeneidade dos cordões brasados nas chapas galvanizadas pode ter sido a evaporação do revestimento de zinco que causa instabilidade no arco elétrico, fazendo com que ele se desloque para regiões de menor resistência elétrica, gerando assim certa descontinuidade no cordão depositado além de possíveis respingos.

5.5 Análises metalográficas

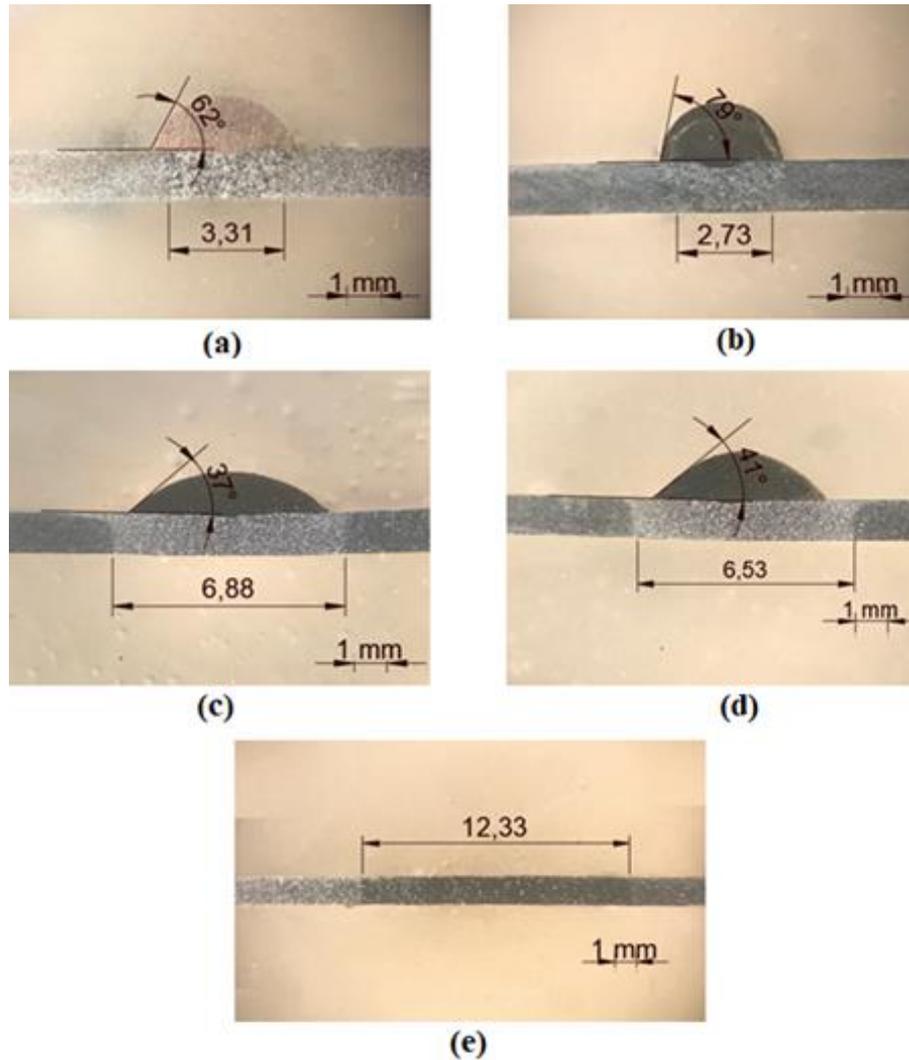
5.5.1 Análise da ZTA e molhabilidade dos cordões depositados

A Figura 5.9 mostra as imagens macroscópicas das seções transversais dos cordões depositados pelo processo “MIG-Brazing” e também no cordão soldado pelo processo GTAW.

As imagens revelaram que em todos os casos o processo “MIG-Brazing” gerou uma pequena fusão localizada no centro do cordão, gerando também uma ZTA que se estendeu por toda a espessura das chapas brasadas, evidenciada pela região atacada por Nital. Pode-se notar que as ZTAs geradas nos cordões brasados nas chapas de aço galvanizadas tiveram um menor comprimento transversal (2,73 mm e 3,31 mm) quando comparadas aos cordões brasados nas chapas de aço sem revestimento (6,88 mm e 6,53 mm), devido à menor largura dos cordões depositados nas chapas de aço galvanizadas.

Nas imagens macrográficas são mostrados também os ângulos de molhabilidade dos cordões depositados. É possível perceber que os cordões depositados nas chapas de aço galvanizadas apresentaram uma baixa molhabilidade (79° e 62°), estando os valores dos ângulos de molhabilidade bem acima do valor ideal de molhabilidade (aproximadamente 45°) recomendado pela ASM (1987), enquanto que os cordões depositados nas chapas de aço sem revestimento apresentaram uma boa molhabilidade (41° e 37°), com os valores dos ângulos de molhabilidade mais próximos do considerado ideal.

Figura 5.9 – Macrografia dos corpos de prova brasados e soldados por GTAW



Fonte: Próprio autor

- (a) Chapa galvanizada; Arame BT 513; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s
- (b) Chapa galvanizada; Arame BT 531; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s
- (c) Chapa sem revestimento; Arame BT 513; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s
- (d) Chapa sem revestimento; Arame BT 531; Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s
- (e) Chapa galvanizada; Soldagem GTAW; Corrente: 60 A; Tensão: 13,7 V; $v = 130$ mm/s

Destaca-se também que o comprimento transversal médio das ZTAs geradas no processo “MIG-Brazing” das chapas de aço galvanizadas foi significativamente menor que no processo convencional de soldagem GTAW nas chapas de aço galvanizadas (cerca de quatro vezes menor), sugerindo uma possível vantagem do processo “MIG-Brazing” em relação ao processo GTAW na união de chapas de aço galvanizadas, tendo em vista os possíveis problemas decorrentes da ZTA gerada, nas propriedades das juntas. Esse resultado pode ser atribuído ao menor aporte térmico gerado no processo “MIG-Brazing” quando comparado ao processo GTAW, conforme as conclusões de Rangel *et al.* (2005). Os valores de aporte térmico de cada processo são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Aporte térmico dos processos de brasagem e soldagem

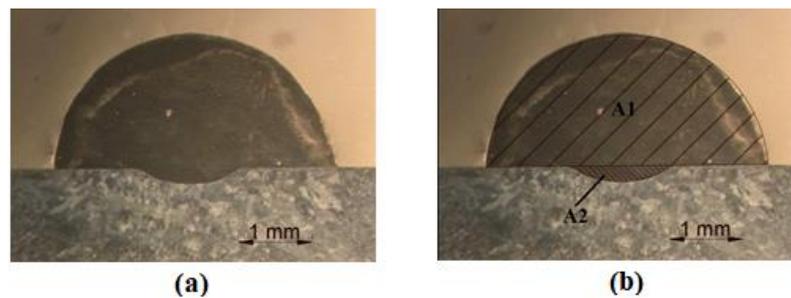
Processo	Aporte térmico
“MIG-Brazing”	$H_{MIG-Brazing} = \frac{0,8 \cdot 15V \cdot 45A}{4,16mm/s} = 129,8 J/mm$
GTAW	$H_{GTAW} = \frac{0,6 \cdot 13,7V \cdot 60A}{2,16mm/s} = 228,2 J/mm$

Fonte: Próprio autor

*Valores de eficiência térmica retirados da norma SS EN 1011-1 (2009)

5.5.2 Análise de diluição

As imagens das seções transversais dos cordões depositados pelo processo “MIG-Brazing” são mostradas na Figura 5.10 (a), Figura 5.11 (a), Figura 5.12 (a) e Figura 5.13 (a).

Figura 5.10 – Macrografia do arame BT 531 em chapa galvanizada

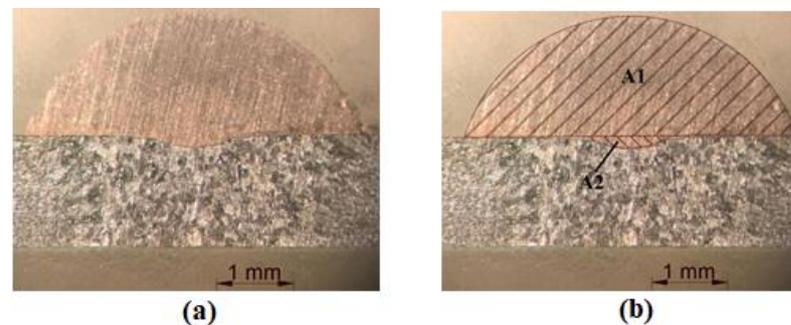
Fonte: Próprio autor

(a) Imagem original

(b) Imagem com áreas traçadas

Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; v= 250 mm/s

$$\delta = \left(\frac{A2}{A1 + A2} \right) 100\% = 4,22\%$$

Figura 5.11 – Macrografia do arame BT 513 em chapa galvanizada

Fonte: Próprio autor

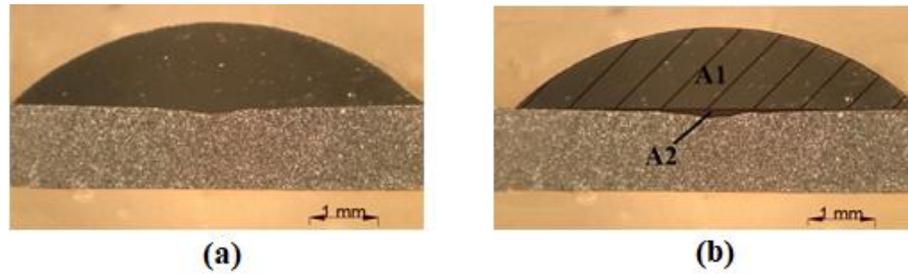
(a) Imagem original

(b) Imagem com áreas traçadas

Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; v= 250 mm/s

$$\delta = \left(\frac{A2}{A1 + A2} \right) 100\% = 2,73\%$$

Figura 5.12 – Macrografia do arame BT 513 em chapa sem revestimento



Fonte: Próprio autor

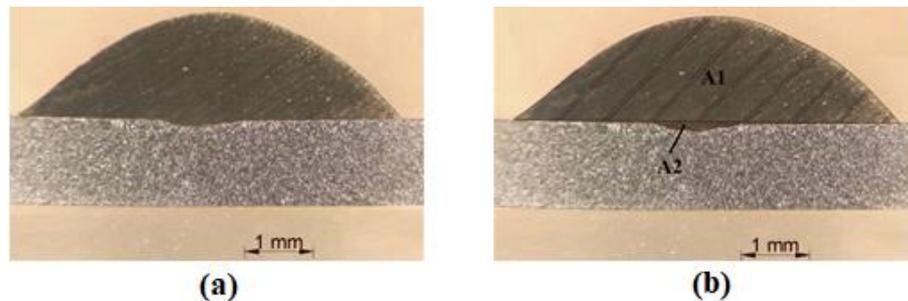
(a) Imagem original

(b) Imagem com áreas traçadas

Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s

$$\delta = \left(\frac{A2}{A1+A2} \right) 100\% = 2,64\%$$

Figura 5.13 – Macrografia do arame BT 531 em chapa sem revestimento



Fonte: Próprio autor

(a) Imagem original

(b) Imagem com áreas traçadas

Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s

$$\delta = \left(\frac{A2}{A1+A2} \right) 100\% = 2,02\%$$

As imagens mostram que em todos os casos de brasagem realizados houve uma pequena fusão localizada, próximo ao centro do cordão depositado, onde provavelmente houve a concentração do arco elétrico durante o processo, segundo Rangel *et al.* (2005) e Andrade (2003). Essa fusão localizada implica na diluição (δ) do metal de adição com o metal de base calculada pela Equação 4, pela relação das áreas A1 e A2 mostradas nas imagens.

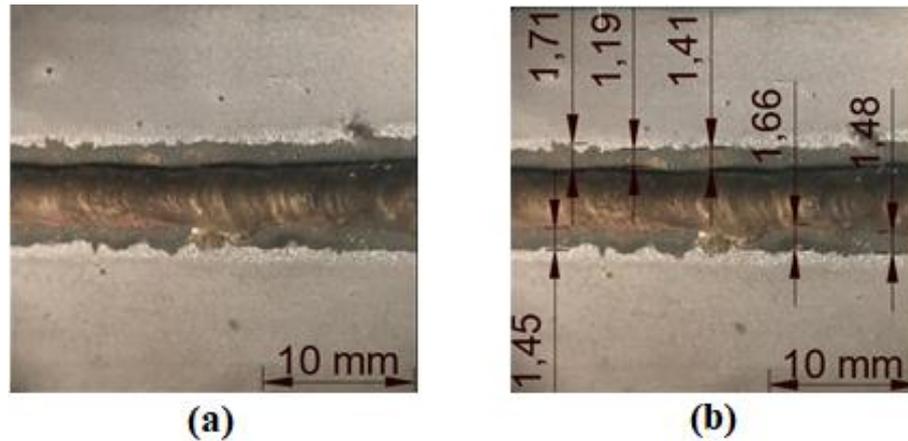
$$\delta = \left(\frac{A2}{A1 + A2} \right) 100\% \quad (4)$$

As diluições variaram entre 2,02% e 4,22%, estando bem próximos do valor teórico ideal para brasagem de 0% e novamente se mostrando como uma possível vantagem do processo “MIG-Brazing” em relação ao processo GTAW, uma vez que nos corpos de prova soldados por GTAW houve penetração completa da chapa (diluição de 100%), mostrando que houve maior concentração de calor do que nas chapas brasadas por “MIG-Brazing”.

5.5.3 Análise de queima de revestimento

As imagens macroscópicas dos cordões brasados nas chapas de aço galvanizadas e soldado pelo processo GTAW são mostradas na Figura 5.14 (a), Figura 5.15 (a) e Figura 5.16 (a).

Figura 5.14 – Chapa galvanizada com arame BT 513



Fonte: Próprio autor

(a) Imagem original

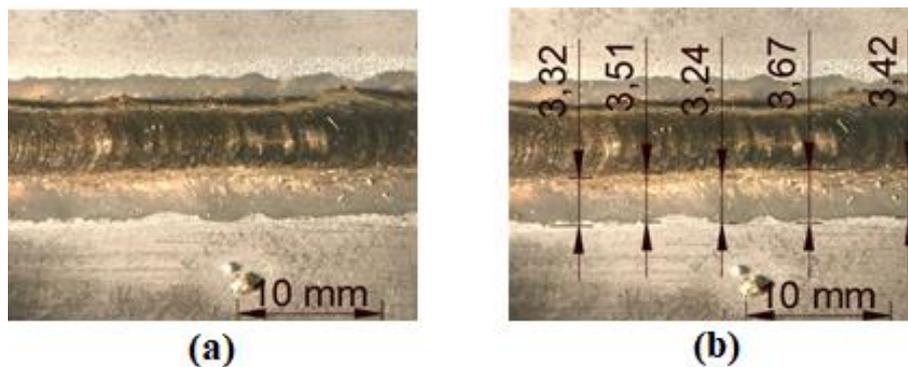
(b) Imagem com comprimentos traçados

Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s

$I_{\text{médio}} = 1,48$ mm

Desvio padrão = 0,19

Figura 5.15 – Chapa galvanizada com arame BT 531



Fonte: Próprio autor

(a) Imagem original

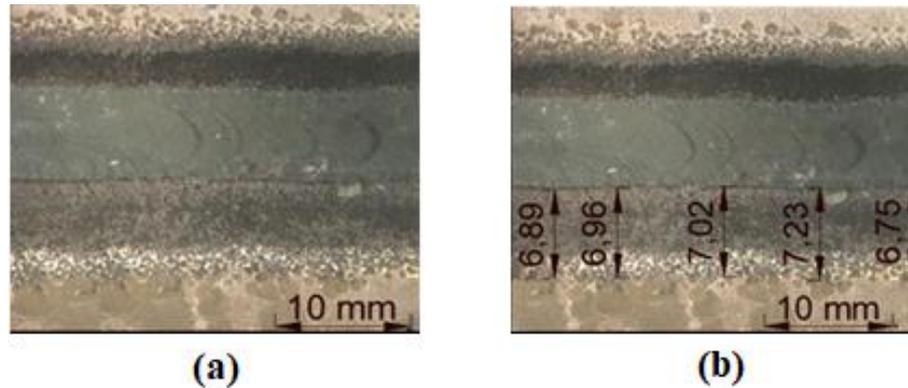
(b) Imagem com comprimentos traçados

Corrente: 45 A; Tensão: 15 V; $v = 250$ mm/s

$I_{\text{médio}} = 3,43$ mm

Desvio padrão = 0,15

Figura 5.16 – Chapa galvanizada com cordão soldado por GTAW



Fonte: Próprio autor

(a) Imagem original

(b) Imagem com comprimentos traçados

Corrente: 60 A; Tensão: 13,7 V; $v = 130$ mm/s

$l_{\text{médio}} = 6,97$ mm

Desvio padrão = 0,18

As imagens mostram a região do revestimento de zinco que evaporou durante os processos de brasagem e soldagem das chapas de aço galvanizadas. As regiões escuras adjacentes aos cordões foram atribuídas onde há apenas metal de base, sem o revestimento de zinco, portanto as medidas foram realizadas a partir do final do cordão, tentando abranger apenas essas regiões mais escuras. A Figura 5.14 indica a região de revestimento queimada pela deposição do arame BT 513, revelando uma largura média de revestimento queimado de 1,48 mm. A Figura 5.15 mostra que a largura média de revestimento queimado pela deposição do arame BT 531 foi de 3,43 mm, cerca de duas vezes maior que a região queimada pelo arame BT 513, enquanto que a Figura 5.16 indica a largura média de revestimento queimado pela soldagem GTAW de 6,97 mm, sendo quase cinco vezes maior a largura média de revestimento queimado pelo arame BT 513 e duas vezes maior que o arame BT 531.

Esse resultado pode novamente ser explicado pelo maior aporte térmico gerado no processo de soldagem GTAW do que no processo “MIG-Brazing” (Tabela 5.2) e revela a viabilidade do processo “MIG-Brazing” na união de chapas de aço galvanizadas, fomentada por Guimarães *et al.* (2006), uma vez que a perda de revestimento é bastante inferior (chegando a quase 80% menor) do que o processo de soldagem convencional GTAW.

5.6 Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração foram mostrados em função da carga resistida e do deslocamento dos corpos de prova, uma vez que alguns corpos de prova se romperam no cordão brasado, inviabilizando o cálculo de sua área transversal para a determinação da tensão

de tração. Desta forma, os resultados obtidos tiveram o objetivo apenas comparativo e não de determinar as propriedades mecânicas das juntas.

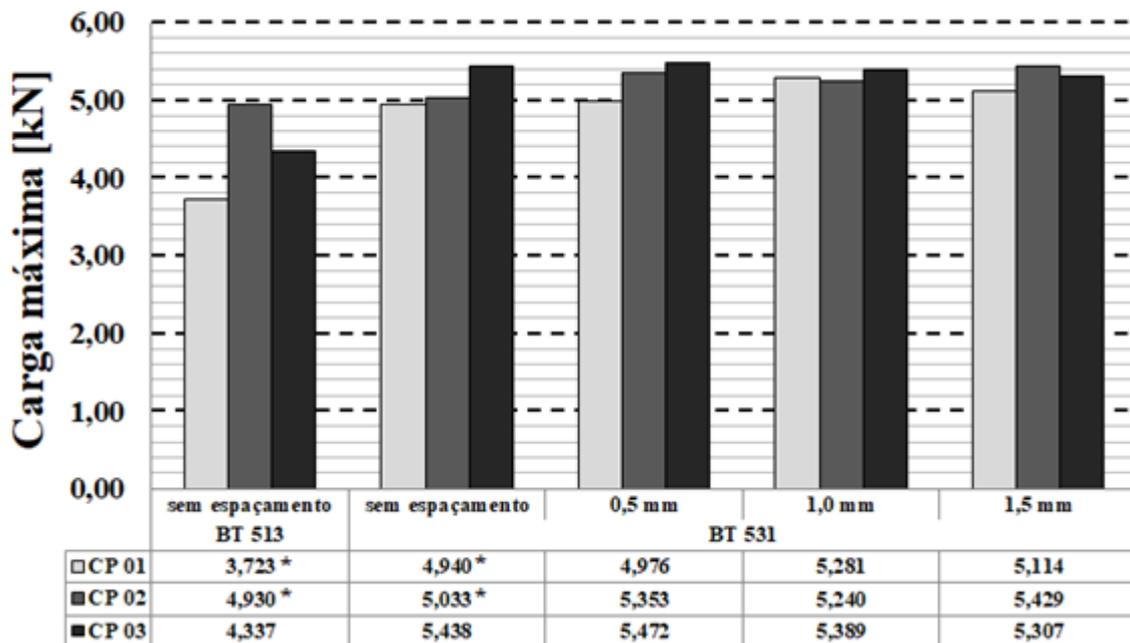
Os resultados dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de chapas sem revestimento são mostrados na Tabela 5.3 e na Figura 5.17.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração em chapas sem revestimento

Arame	Espaçamento (mm)	Média da carga máxima (kN)	Desvio padrão
BT 513	sem espaçamento	4,33	0,60
	sem espaçamento	5,14	0,26
BT 531	0,5	5,27	0,26
	1,0	5,30	0,08
	1,5	5,28	0,16

Fonte: Próprio autor

Figura 5.17 – Resultados do ensaio de tração em chapas sem revestimento



Fonte: Próprio autor

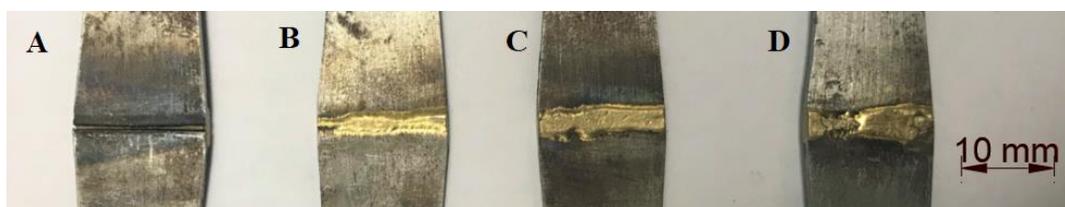
*Fratura ocorreu no cordão brasado

Os resultados indicam que a média dos valores de carga máxima resistida pelos corpos de prova brasados com o arame BT 531, sem espaçamento na junta, foi superior (cerca de 19%) à média dos valores de carga máxima resistida pelos corpos de prova brasados com o arame BT 513, sem espaçamento na junta, sugerindo que a liga de cobre do arame BT 531 possui maior resistência mecânica à tração do que a liga de cobre do arame BT 513, apesar da maior variabilidade dos resultados obtidos para o arame BT 513, uma vez que o menor valor

de carga máxima obtida do arame BT 531 rompida no cordão (4,94 kN) foi maior que o maior valor de carga máxima obtida para do arame BT 513 também rompida no cordão (4,34 kN). Esse resultado ainda está de acordo com as fichas de especificação da empresa Weldwire (2013) que indicam um valor de limite de resistência à tração de 344 MPa para o arame BT 513 e um valor de limite de resistência à tração de 468 MPa para o arame BT 531.

Os resultados também mostram uma tendência do aumento da carga resistida de juntas com espaçamentos de 0,5 até 1,5 mm em relação a juntas sem espaçamento, evidenciado pelo aumento da média dos valores de carga máxima e também pelo fato de que dois dos três corpos de prova ensaiados de juntas sem espaçamento romperam no cordão e todos os corpos de prova ensaiados de juntas com espaçamento de 0,5 mm a 1,5 mm romperam fora da região do cordão. De acordo com Marques *et al.* (2005) a resistência mecânica de juntas brasadas tende a diminuir para espaçamentos muito pequenos, ou juntas sem espaçamento, pois pode não haver um bom preenchimento da junta com o metal de adição. Essa explicação pode ser observada na Figura 5.18, que mostra o lado oposto dos corpos de prova brasados com e sem espaçamento.

Figura 5.18 – Preenchimento do metal de adição nas juntas



Fonte: Próprio autor

- A- Junta sem espaçamento
- B- Espaçamento de 0,5 mm
- C- Espaçamento de 1,0 mm
- D- Espaçamento de 1,5 mm

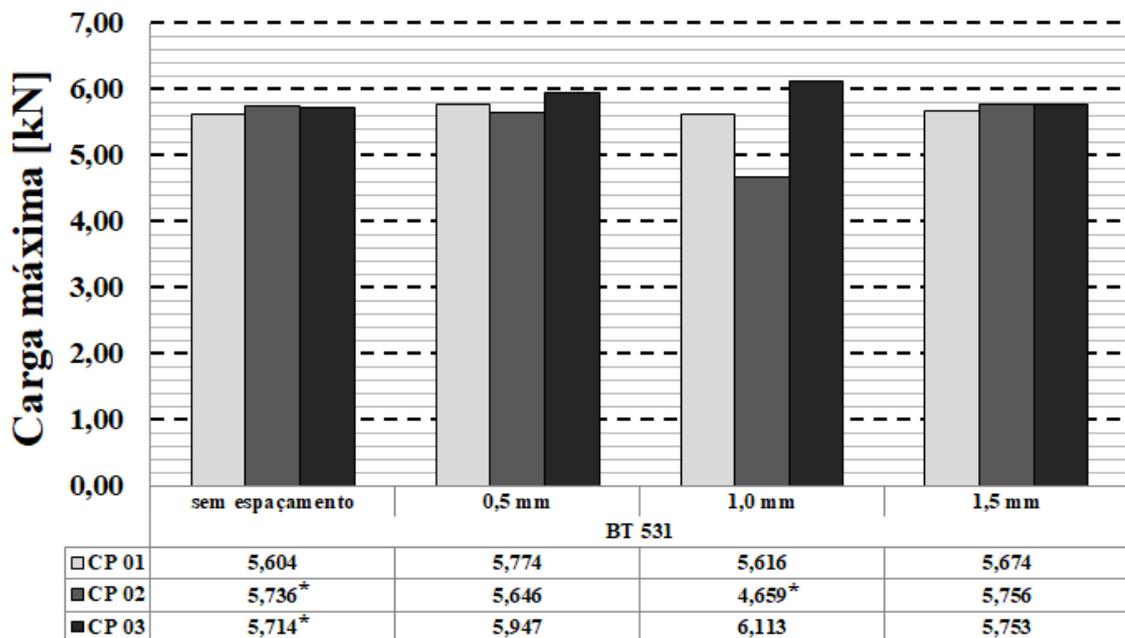
Pode-se perceber que no corpo de prova sem espaçamento houve pouco preenchimento do metal de adição, já com o aumento do espaçamento o preenchimento da junta foi maior, o que provavelmente aumentou a sua resistência.

Os resultados dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de chapas galvanizadas são mostrados na Tabela 5.4 e na Figura 5.19.

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de tração em chapas galvanizadas

Arame	Espaçamento (mm)	Média da carga máxima (kN)	Desvio padrão
BT 531	sem espaçamento	5,68	0,06
	0,5	5,79	0,12
	1,0	5,46	0,60
	1,5	5,73	0,04

Fonte: Próprio autor

Figura 5.19 – Resultados do ensaio de tração em chapas galvanizadas

Fonte: Próprio autor

*Fratura ocorreu no cordão brasado

Os resultados obtidos para os corpos de prova com chapas galvanizadas também indicam a influência do espaçamento da junta na carga máxima obtida resistida. Da mesma forma que nas chapas de aço sem revestimento, em dois dos três corpos de prova ensaiados de juntas sem espaçamento a fratura ocorreu no cordão brasado, sendo que das juntas com espaçamento, em apenas um corpo de prova a fratura não ocorreu fora da região do cordão. As médias dos valores de carga máxima também indicam, de forma menos perceptível que os corpos de prova de aço sem revestimento, um aumento da carga máxima resistida (cerca de 2%) pelos corpos de prova com espaçamento em relação aos corpos de prova sem espaçamento, com exceção da média obtida com espaçamento de 1,0 mm, que apresentou um elevado desvio padrão devido ao corpo de prova 2 ter se rompido no cordão depositado.

Pelos resultados pode-se ainda dizer que a união de juntas de topo de chapas de aço galvanizadas com espaçamento de 0,5 mm até 1,5 mm pelo processo “MIG-Brazing”

mostrou-se bastante viável, revelado pela integridade da junta brasada na maior parte dos corpos de prova ensaiados, corroborado também pelos experimentos de Basak *et al.* (2013), mostrando que o metal depositado resistiu mais que o metal de base.

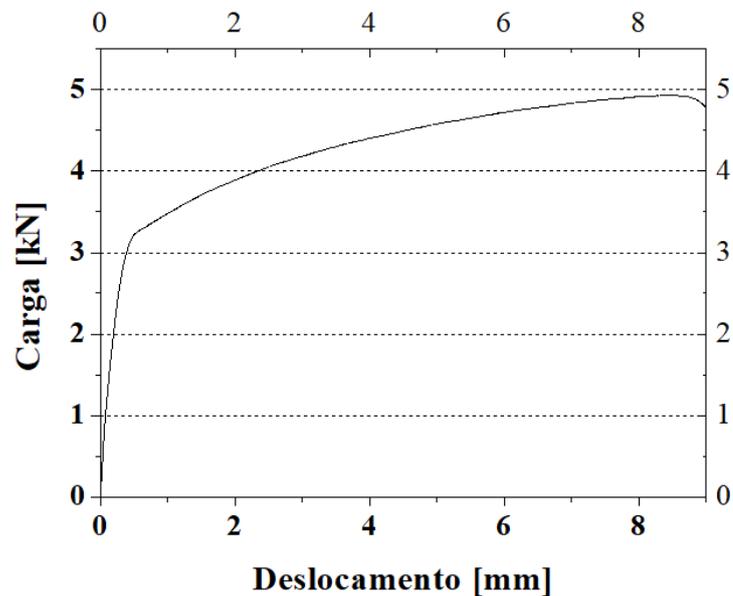
Os corpos de prova ensaiados são mostrados na Figura 5.20 e Figura 5.22 e as curvas traçadas de carga por deslocamento são mostradas na Figura 5.21 e Figura 5.23

Figura 5.20 – Corpos de prova ensaiados (chapa sem revestimento; arame BT 531; sem espaçamento)



Fonte: Próprio autor

Figura 5.21 – Curva carga x deslocamento (chapa sem revestimento; arame BT 531; sem espaçamento)



Fonte: Próprio autor

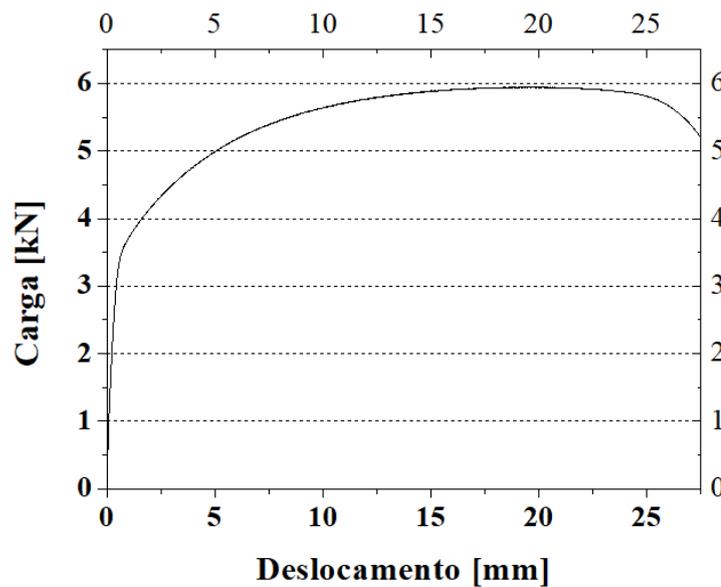
Curva traçada com dados do ensaio do corpo de prova 1 (CP 01)

Figura 5.22 – Corpos de prova ensaiados (chapa galvanizada; arame BT 531; espaçamento de 0,5 mm)



Fonte: Próprio autor

Figura 5.23 – Curva carga x deslocamento (chapa galvanizada; arame BT 531; espaçamento de 0,5 mm)



Fonte: Próprio autor

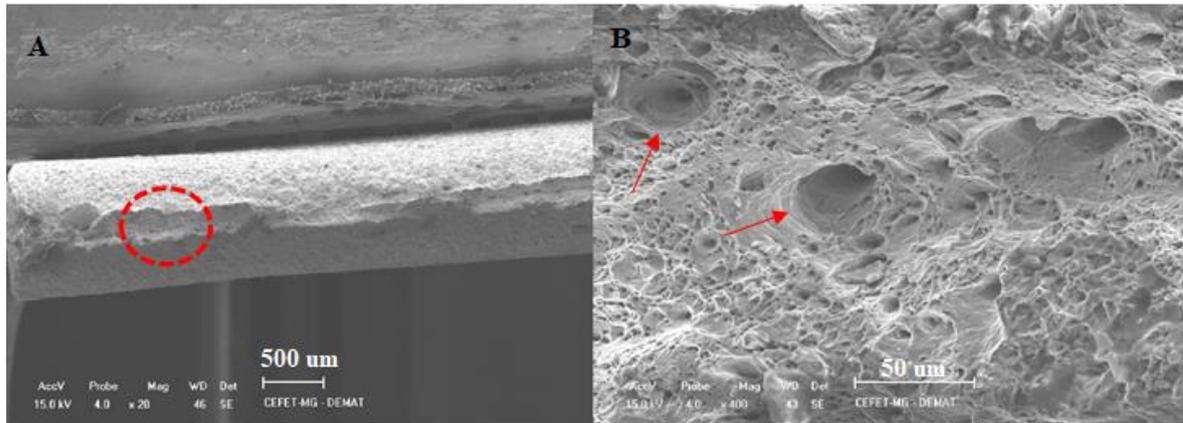
Curva traçada com dados do ensaio do corpo de prova 3 (CP 03)

A Figura 5.20 mostra que os corpos de prova que se romperam no cordão brasado (CP 01 e CP 02) não sofreram uma deformação plástica evidente (região de estrição) quanto os que se romperam fora do cordão (CP 03). Pela Figura 5.22 e Figura 5.23 pode-se perceber que os corpos de prova que romperam fora do cordão brasado, tiveram uma deformação plástica aparente, sofrendo estrição logo antes do rompimento, sendo esta uma evidência macroscópica de fratura dúctil, de acordo com Askeland e Phulé (2010).

5.7 Análise da fratura do material tracionado

As imagens realizadas por MEV são mostradas na Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26 e Figura 5.27.

Figura 5.24 – Imagem da fratura da chapa de aço galvanizada com arame BT 531 e espaçamento de 0,5 mm

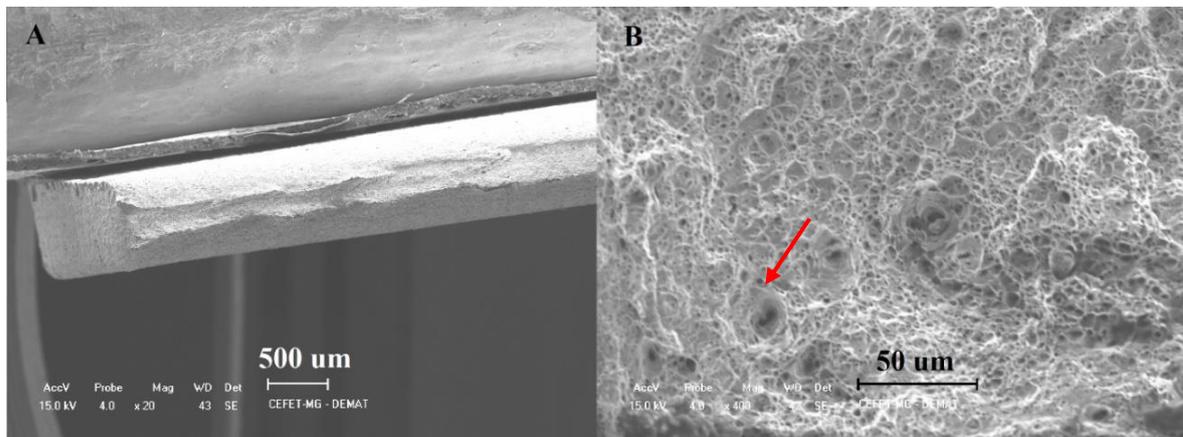


Fonte: Próprio autor

A- Vista da amostra presa ao porta-amostras

B- Vista da região de fratura dúctil da amostra

Figura 5.25 – Imagem da fratura da chapa de aço sem revestimento com arame BT 531 e espaçamento de 0,5 mm

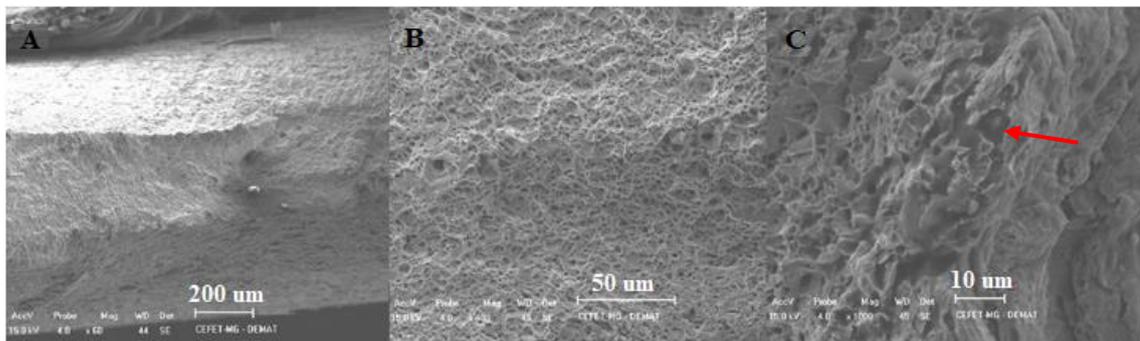


Fonte: Próprio autor

A- Vista da amostra presa ao porta-amostras

B- Vista da região de fratura dúctil da amostra

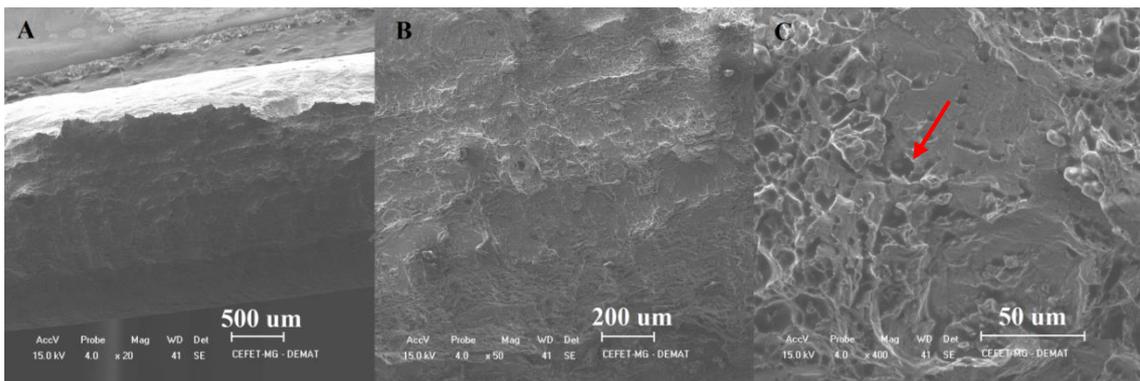
Figura 5.26 – Imagem da fratura da chapa de aço sem revestimento com liga arame 513, sem espaçamento



Fonte: Próprio autor

- A- Vista da amostra presa ao porta-amostras
- B- Vista da região de fratura dúctil da amostra
- C- Vista da região de fratura dúctil da amostra

Figura 5.27 – Imagem da fratura da chapa de aço sem revestimento com arame BT 531, sem espaçamento



Fonte: Próprio autor

- A- Vista da amostra presa ao porta-amostras
- B- Vista da região de fratura dúctil da amostra
- C- Vista da região de fratura dúctil da amostra

As imagens obtidas indicam, para todas as amostras, uma superfície própria de fratura dúctil. Após a estrição do corpo de prova, ocorre a nucleação de pequenas cavidades ou “microvazios” na região estriccionada. Esses microvazios nascem e se propagam nos contornos de grãos da estrutura cristalina dos metais, ou até mesmo nas interfaces entre o metal e pequenas inclusões, quando submetidos a uma tensão elevada. Os microvazios aumentam de tamanho, à medida que a tensão local aumenta e a deformação prossegue, formando cavidades maiores que se unem e coalescem, de modo a criar uma trinca elíptica que cresce na direção perpendicular à direção da tensão aplicada, podendo ser também observada na Figura 5.22, na região de estrição dos corpos de prova CP 01 e CP 02. A fratura então ocorre quando a seção resistente já não mais suporta a carga aplicada. Como

evidência microscópica, a superfície de fratura, revela a presença de pequenas cavidades, decorrentes dos microvazios que se formaram e se separaram após a fratura. Essas “microcavidades” são chamadas de *dimples*, do inglês, e geralmente possuem o formato circular ou equiaxial, quando a falha ocorre por uma força uniaxial de tração (ASKELAND, PHULÉ, 2010; CALLISTER, 2007; GARCIA *et al.*, 2012).

Na região de fratura da Figura 5.24B, Figura 5.25B, Figura 5.26C e Figura 5.27C são indicadas exemplos de *dimples*, que se formaram decorrentes dos microvazios que se formaram durante a deformação do corpo de prova. Pode ser observado que os *dimples* formados na região de fratura, em sua maioria, apresentam formatos equiaxiais, sugerindo que a fratura ocorreu decorrente de uma força uniaxial de tração, indo de acordo com Askeland e Phulé (2010), como era esperado do ensaio de tração realizado, considerando o tipo de junta do corpo de prova (junta de topo) e o alinhamento das garras da máquina universal de ensaios.

6 CONCLUSÕES

Com a realização do presente trabalho, especialmente com os resultados obtidos nos procedimentos experimentais e na análise destes, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- Foi possível desenvolver uma metodologia satisfatória para a aplicação do processo mecanizado “MIG-Brazing” em chapas finas, possibilitado pela utilização do dispositivo desenvolvido para fixação das chapas, pela utilização de uma fonte de energia que possibilitasse o modo GMAW-P e também pela escolha correta dos parâmetros utilizados no processo.
- Pôde-se concluir que o processo “MIG-Brazing” possui uma boa aplicabilidade para a brasagem de chapas finas, resultando em cordões contínuos e apresentando bons aspectos visuais, além das juntas com espaçamento terem se rompido fora do cordão brasado. Destacam-se ainda os benefícios na união de chapas de aço galvanizadas pelo processo “MIG-Brazing”, resultando em menores perdas do revestimento de zinco quando comparada ao processo convencional de soldagem GTAW.
- Foi verificado experimentalmente com os oscilogramas traçados, que o processo “MIG-Brazing” ocorreu pelo modo de corrente pulsada, tal como esperado do *set-up* pré-selecionado para as brasagens realizadas. Foi possível perceber também as variações nos sinais elétricos de corrente e tensão quando ocorriam instabilidades durante o processo, percebidas principalmente na brasagem de chapas de aço galvanizadas.
- O revestimento de zinco nas chapas de aço galvanizadas tem forte influência na estabilidade do processo “MIG-Brazing” e no resultado final das juntas brasadas. O vapor de zinco gerado no processo desestabiliza o arco elétrico durante a brasagem, podendo causar descontinuidades no cordão e a ocorrência de respingos. Ainda assim, o processo “MIG-Brazing” se mostrou viável para a brasagem de chapas de aço galvanizadas, uma vez que os cordões depositados se mostraram homogêneos e com elevada resistência das juntas brasadas.
- Na brasagem de chapas de aço sem revestimento, pôde-se perceber que os dois arames utilizados apresentaram uma boa molhabilidade, com ângulos de molhabilidade bem próximos (37° para o arame BT 513 e 41° para o arame BT 531), enquanto na brasagem de chapas de aço galvanizadas houve uma diferença

significativa nos ângulos de molhabilidade (62° para o arame BT 513 e 79° para o arame BT 531). Também foi possível perceber que o arame BT 531 gerou uma maior queima de revestimento na brasagem de chapas de aço galvanizadas (cerca de duas vezes maior) do que o arame BT 513. Por fim, foi possível concluir que o arame BT 531 apresentou maior resistência mecânica à tração (cerca de 24%) que o arame BT 513, como esperado pela especificação técnica dos dois arames utilizados.

- Foi observado que o processo “MIG-Brazing” gerou uma ZTA em todas as condições realizadas, tendo seu comprimento transversal variando entre 2,73 mm (para brasagem em chapa de aço galvanizada) a 6,88 mm (para brasagem em chapa de aço sem revestimento). Foi possível concluir também que a ZTA formada pela brasagem em chapas de aço galvanizadas teve uma extensão cerca de quatro vezes menor que a soldagem convencional GTAW no mesmo tipo de chapa.
- O processo “MIG-Brazing” gerou uma pequena fusão localizada na região central dos cordões depositados, provavelmente decorrente da concentração do arco elétrico durante o processo. A fusão acarretou em uma diluição do metal de adição com o metal de base, variando entre 2,02% a 4,22%.
- A queima do revestimento de zinco da chapa de aço galvanizada gerada pelo processo “MIG-Brazing” com o arame BT 513 apresentou uma extensão quase cinco vezes menor que a extensão de revestimento queimado gerado pelo processo GTAW, enquanto que com o arame BT 531 essa extensão foi cerca de duas vezes menor.
- Por meio do ensaio de tração realizado pôde-se perceber uma tendência do aumento da carga resistida pelas juntas apresentando espaçamentos de 0,5 mm até 1,5 mm em relação às juntas sem espaçamento, que em sua maioria romperam no cordão depositado, devido a um maior preenchimento do metal de adição na junta com o aumento do espaçamento.
- Pôde-se observar pelas imagens realizadas por MEV que as regiões de fratura dos corpos de prova do ensaio de tração apresentaram morfologias características de fratura dúctil de materiais metálicos rompidos por tração, onde se é possível observar a presença de *dimples* equiaxiais em toda a região de fratura.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook: Welding and brazing**. 8. ed. [s.l.]: ASM, 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M-13a**: standard test methods for tension testing of metallic materials. Conshohocken: ASTM, 2013.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook: welding processes**. 9 ed. Miami: AWS, 1991.

ANDRADE, A.S. **Estudo da união do aço inoxidável austenítico 304 pelo processo de solda MIG-brasagem**. 2003. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

ASKELAND, D. R., PHULÉ, P. P. **The science and engineering of materials**. 6. ed. Mason: Cengage Learning, 2010.

BASAK, Sushovan; PAL, Tapan; SHOME, Mahadev; MAITY, J. GMA Brazing of galvanized interstitial-free steel. **Welding Journal**, [s.l.], v. 92, p. 29-35, fev. 2013.

BRASTAK. **Soldas e fluxos**. São Paulo: Brastak, 2006.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CARY, H. B.; HELZER, S. C. **Modern welding technology**. 6. ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2008.

CHOVET, Corinne; GUIHEUX, S. Possibilities offered by MIG and TIG brazing of galvanized ultra high strength steels for automotive applications. **International Conference Super High Strength Steels**, Roma, v. 98, ago. 2006.

GARCIA, Amauri; SPIN, Jaime Alvares; DOS SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaaios dos materiais**. 2 ed. São Paulo: LTC, 2012.

GUERRA, Lamb Frank. **Automação industrial na pratica**. 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

GUIMARÃES, Ari Sauer; MENDES, M. T.; COSTA, H. R. M.; MACHADO, J. S.; KUROMOTO, N. K. Uma avaliação do comportamento da camada de zinco em chapas galvanizadas brasada por arco elétrico. **Soldagem & Inspeção**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, abr. 2006.

JENKINS, Ron. **X-ray fluorescence spectrometry**. 2. ed. New York: Wiley, 1999.

JOSEPH, Andy; WEBB, Chris; HERAMIA, Mike; YAPP, David. Variable polarity (AC) arc weld brazing of galvanized sheet. **56th IIW International Conference**, Bucharest, v. 6, n. 11, jul. 2003.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MENDES, Marcelo Tavares. **União de chapas galvanizadas através de brasagem por processo "MIG-Brasing"**. 2003. Tese (Doutorado). Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

MURAKAMI, Taichi; NAKATA, Kazuhiro; TONG, Hongjun; USHIO, Masao. Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux cored wire. **ISIJ International**. [s.l.], v. 43, n. 10, p. 1596-1602, jan. 2003.

PARK, Hyoung Jin; RHEE, Sehun; KANG, Mun Jin; KIM, Dong Cheol. Joining of steel to aluminum alloy by AC pulse MIG welding. In: **Materials Transactions**, [s.l.], v. 50, n. 9, p. 2314-2317, set. 2009.

RANGEL, Alessandro Fontão; MATLAKHOVA, L. A.; PARANHOS, R. P. R.; MATLAKHOV, N. Avaliação de junta soldada pelo processo MIG-Brasing por meio de técnicas metalográficas. **Soldagem & Inspeção**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 48-53, abr. 2005.

ROHDE, Hendrik; KATIC, J.; PASCHOLD, R. Esab pulsed gas-shielded metal arc brazing of surface-coated sheets. **Svetsaren ESAB AB**, Sweden, v. 54, n. 3, p. 20-23, 2000.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento melhor desempenho**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

SWEDISH STANDARDS INTITUTE. **SS EN 1011-1: Welding – recommedations for welding of metallic materials – part 1: general guidance for arc welding**. Stockholm: SS EM, 2009.

VINÁS, J.; KASCAK, L.; ABEL, M.; DRAGANOVSKA, D.; GATIAL, M. Mig brazed hot-dip galvanized sheets. **Lebanese Science Journal**, [s.l.], v. 11, n. 2, p. 75-85, mar. 2010.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1992.

WELDWIRE COMPANY, INC. **Copper and copper alloy bare wire**. WeldWire. Pensilvânia: Weldwire Company INC, 2013. Disponível em: http://www.weldwire.net/product_categories/copper-copper-alloys-mig-wire/. Acesso em: 11 nov. 2019.