

UNIÃO DE CHAPAS GALVANIZADAS ATRAVÉS DE BRASAGEM POR PROCESSO  
“MIG-BRAZING”

Marcelo Tavares Mendes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

---

Prof. Ari Sauer Guimarães, D. Sc.

---

Prof. Hector Reynaldo Menezes Costa, D. Sc.

---

Prof. Lúcio Sathler, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ. - BRASIL

MARÇO DE 2005

MENDES, MARCELO TAVARES

União de chapas galvanizadas através de brasagem por processo “MIG-Brazing” [Rio de Janeiro, 2005].

XIII, 137 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2005)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. “MIG-Brazing”. 2. Chapa Galvanizada.

1. COPPE/UFRJ II. Título ( série ).

Resumo da Tese apresentada a COPPE/UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências ( M.Sc. ).

UNIÃO DE CHAPAS GALVANIZADAS ATRAVÉS DE BRASAGEM POR PROCESSO  
“MIG-BRAZING”

Marcelo Tavares Mendes

Março/2005

Orientador: Ari Sauer Guimarães

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O estudo da brasagem por arco elétrico ( “MIG-Brazing” ), utilizando as misturas StarGold, 100% Argônio e ( Ar + 2%CO<sub>2</sub> ); combinadas com o uso de dois arames eletrodos distintos ( BT 511 e BT 513 ), permitiu obter parâmetros de brasagem considerados satisfatórios para união de juntas sobrepostas de chapas finas de aço zincado com 0,8 mm de espessura. A obtenção destes parâmetros possibilitou, ainda, a caracterização do metal de solda e de sua microestrutura.

Através de microscopia eletrônica de varredura verificou-se a presença do Si na interface metal de solda e metal de base, a fim de relacioná-lo com o ângulo de molhagem; e concluiu-se que a presença deste elemento foi mais acentuada sob a proteção gasosa das misturas StarGold e ( Ar + 2%CO<sub>2</sub> ), enquanto no argônio puro não ocorreu tão facilmente.

A mistura StarGold resumidamente mostrou-se melhor, comparando-se as demais misturas, quando se trata das características geométricas do metal de solda e da degradação da camada de revestimento da chapa zincada; e este fato também foi verificado através de microscopia eletrônica de varredura, assim como, ensaio de corrosão acelerada em câmara de névoa salina, embora este último não tenha apresentado resultados significativos em função do mesmo ter sido muito severo.

Quanto aos arames eletrodos e os gases de proteção utilizados, ficou evidenciado que não houve reação significativa no arco elétrico e na poça de fusão, que pudesse promover mudanças microestruturais capazes de comprometer a integridade da junta brasada.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science ( M.Sc. )

PLATES UNION GALVANIZED THROUGH BRAZING FOR PROCESS  
"MIG-BRAZING"

Marcelo Tavares Mendes

March/2005

Advisors: Ari Sauer Guimarães

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The study of the brasagem for electric arc ( "MIG-Brazing" ) using the StarGold mixtures, 100% Argon and ( Ar + 2%CO<sub>2</sub> ), combined with the use of two wires distinct electrodes ( BT 511 and BT 513 ), made possible to get parameters of brazing satisfactory considered for union of joint overlapping fine steel plate zinced with 0,8 mm of thickness. These parameters made possible still, the characterization of the metal of weld and its microstructure.

Through electronic microscopy was verified presence of silicon in the interface metal of weld and metal of base to compare it with the wetting angle; therefore it was concluded that the presence this element more was accented using the gaseous protection of the mixtures StarGold e ( Ar + 2%CO<sub>2</sub> ), while in the pure argon it did not occur so easily.

The StarGold mixture of general form was the better comparing it with the other mixtures when it said about the geometric characteristics of the weld metal and the degradation of the covering layer of the zinced plate and this fact was also verified through electronic microscopy and test of corrosion sped up in salt spray, although this analysis last has not presented resulted significant because this assay was very severe.

About the wires electrodes and the used gases of protection was evidenced that did not have significant reaction in the electric arc and the puddle of fusing that could to contribute with microstructural changes capable to compromise the joint brazing integrity.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus ilustres pais, Francisco de Assis Mendes e Vânia Lúcia Tavares Mendes, responsáveis por minha educação e pelo incentivo necessário para que eu pudesse alcançar este momento de vitória; a minha amada e maravilhosa esposa, Claudia Salles do Nascimento Mendes, que soube me dar tranquilidade cuidando do nosso lar; e especialmente, a minha adorável e querida filha NATÁLIA SALLES DO NASCIMENTO MENDES, que chegou recentemente para aumentar, ainda mais, a cumplicidade de nossas famílias.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, em primeiro lugar e acima de tudo, por ter-me proporcionado condição de ingressar nesta conceituada instituição e de concluir com êxito este trabalho.

Ao Professor Ari Sauer Guimarães pela sua orientação e principalmente sua amizade que facilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Hector Reynaldo Menezes Costa do CEFET, que colaborou com a orientação e a parte experimental deste trabalho.

Aos Engenheiros Jeferson Frederico M. Costa da White Martins e Marcio Luiz A. Cunha da CSN, que disponibilizaram recursos e insumos necessários para que este trabalho fosse concluído.

A Jéssica, aluna de iniciação científica do CEFET, que dispensou tempo e dedicação sempre que solicitada.

Aos Professores, Técnicos e Funcionários da COPPE, pela orientação, amizade e apoio, prestados durante os 3 anos de convívio.

Ao Técnico Alecyr do laboratório de corrosão, pela disponibilidade, empenho e boa vontade nos serviços prestados neste trabalho.

## ÍNDICE

	Página
<b>CAPÍTULO I</b>	
INTRODUÇÃO .....	1
<b>CAPÍTULO II</b>	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
II.1 – INTRODUÇÃO.....	3
II.2 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO SOB PROTEÇÃO GASOSA – GMAW .....	4
II.3 – O ARCO ELÉTRICO.....	6
II.3.1 – TRANSFERÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO ATRAVÉS DO ARCO ELÉTRICO.....	8
II.4 – EQUIPAMENTO BÁSICO DE SOLDAGEM MIG/MAG .....	15
II.5 – PROTEÇÃO GASOSA .....	18
II.5.1 – PROPRIEDADE DOS GASES DE PROTEÇÃO.....	20
II.5.1.1 – Potencial de Ionização .....	20
II.5.1.2 – Condutividade Térmica .....	20
II.5.1.3 – Potencial de Oxidação .....	21
II.5.2 – CARACTERÍSTICAS DOS GASES DE PROTEÇÃO.....	21
II.5.2.1 – Argônio .....	22

II.5.2.2 – Oxigênio .....	22
II.5.2.3 – Dióxido de Carbono .....	23
II.5.3 – ESCOLHA DA MELHOR MISTURA GASOSA PARA UMA APLICAÇÃO ESPECÍFICA .....	24
II.5.4 – EFEITO DO GÁS DE PROTEÇÃO NA MICROESTRUTURA DO CORDÃO DE SOLDA .....	25
II.6 – MICROESTRUTURA DA ZONA FUNDIDA.....	26
II.7 – CHAPA DE AÇO ZINCADA .....	29
II.8 – MEIOS DE PROTEÇÃO PROMOVIDOS PELA CAMADA DE ZINCO ( Zn ).....	31
II.8.1 – Vida Útil da Camada de Zinco ( Zn ) .....	32
II.9 – ESTRUTURA CRISTALINA DA CAMADA DE REVESTIMENTO DA CHAPA ZINCADA .....	34
II.10 – PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO .....	37
II.10.1 – Galvanização Eletrolítica .....	38
II.10.2 – Zincagem Contínua por Imersão à Quente .....	39
II.10.3 – ASPECTO SUPERFICIAL, TIPOS DE REVESTIMENTO E APLICAÇÕES .....	49
II.11 – SOLDAGEM DE CHAPA ZINCADA PELO PROCESSO GMAW .....	51
II.11.1 – Técnicas de Soldagem.....	54
II.12 – BRASAGEM .....	54
II.12.1 – Definição .....	54

II.12.2 – Fundamentos da Brasagem .....	55
II.12.3 – Classificação dos Processos de Brasagem .....	57
II.12.4 – Temperatura de Trabalho na Brasagem .....	62
II.12.5 – Material de Adição empregado na Brasagem .....	62
II.13 – CONFIGURAÇÃO DE JUNTAS.....	63
II.14 – BRASAGEM POR ARCO ELÉTRICO .....	64
II.14.1 – Material de Adição .....	68
II.14.2 – Técnicas de Brasagem MIG .....	71
II.15 – CORROSÃO .....	71
II.15.1 – Definição .....	71
II.15.2 – Considerações Gerais Sobre o Processo de Corrosão .....	72
II.15.3 – Pilhas de Corrosão Eletroquímica.....	73
II.15.4 – Corrosão Galvânica .....	75
II.15.5 – Corrosão em Chapa Zincada Brasada por Arco Elétrico .....	77
 <b>CAPÍTULO III</b>	
MATERIAIS E MÉTODOS .....	78
III.1 – MATERIAIS .....	78
III.1.1 – Material de Base .....	78

III.1.1.1 – Substrato .....	78
III.1.1.2 – Revestimento .....	79
III.1.2 – Material de Adição .....	79
III.1.3 – Gás de Proteção .....	80
III.2 – EQUIPAMENTOS .....	81
III.2.1 – Equipamento de Soldagem .....	81
III.2.2 – Microscópio Ótico .....	82
III.2.3 – Projetor de Perfil .....	82
III.2.4 – Ensaio de Tração .....	82
III.2.5 – Microscopia Eletrônica de Varredura .....	83
III.2.6 – Ensaio de Corrosão Acelerada em Câmara de Névoa Salina...	83
III.3 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	84
III.3.1 – Retirada das Peças de Teste Utilizadas na Brasagem por Arco Elétrico.....	84
III.3.2 – Corpo de Prova para Ensaio de Tração .....	85
III.3.3 – Corpo de Prova para Ensaio de Corrosão Acelerada em Névoa Salina.....	85
III.3.4 – Amostra para Ensaio Metalográfico .....	86
III.4 – MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....	86
III.4.1 – Tipo de Junta e Posição de Soldagem .....	86

III.4.2 – Determinação dos Parâmetros de Brasagem .....	87
III.4.3 – Técnica de Brasagem .....	88
III.4.4 – Velocidade de Brasagem .....	89
III.4.5 – Procedimento de Brasagem .....	89
III.4.6 – Ensaio de Corrosão Acelerada em Câmara de Névoa Salina...	90
 <b>CAPÍTULO IV</b>	
RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	91
IV.1 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE BASE .....	91
IV.1.1 – Análise do Substrato .....	91
IV.1.2 – Espessura de Revestimento da Camada de Liga Fe-Zn .....	93
IV.2 – ENSAIO DE TRAÇÃO DA JUNTA SOBREPOSTA BRASADA.....	94
IV.3 – PARÂMETROS DE BRASAGEM .....	95
IV.3.1 – Oscilogramas Tensão X Tempo e Corrente X Tempo .....	96
IV.3.2 – Estabilidade do Arco Elétrico .....	96
IV.4 – APORTE DE CALOR .....	101
IV.5 – ASPECTOS GEOMÉTRICOS DO CORDÃO DE SOLDA .....	102
IV.6 – ASPECTO MICROESTRUTURAL DA JUNTA SOBREPOSTA BRASADA.....	104
IV.6.1 – Zona Termicamente Afetada ( ZTA ) .....	104
IV.6.2 – Metal de Solda ( MS ) .....	106

IV.7 – MOLHABILIDADE .....	107
IV.8 – VARREDURA DE LINHA DOS ELEMENTOS Fe e Zn FEITA POR MEV-EDS.....	109
IV.9 – ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA .....	113
<b>CAPÍTULO V</b>	
DISCUSSÃO .....	120
V.1 – SUBSTRATO .....	120
V.2 – REVESTIMENTO .....	120
V.3 – ENSAIO DE TRAÇÃO .....	121
V.4 – PARÂMETROS DE BRASAGEM .....	121
V.5 – SOLDAGEM MIG/MAG DE CHAPA ZINCADA .....	122
V.6 – ASPECTO GEOMÉTRICO DO CORDÃO DE SOLDA .....	123
V.7 – MOLHABILIDADE .....	124
V.8 – VARREDURA DE LINHA DOS ELEMENTOS Fe e Zn FEITA POR MEV - EDS....	124
V.9 – ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA .....	126
<b>CAPÍTULO VI</b>	
CONCLUSÕES .....	127
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	130

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A crescente utilização de aços com revestimento protetor, contra a corrosão, tem motivado exaustivas pesquisas pelas indústrias mundiais, onde as mesmas buscam condições de soldagem que proporcionem qualidade satisfatória do produto [ 1 ]. No Brasil a produção anual de apenas um destes produtos, chapas galvanizadas, triplicou nos últimos quinze anos para atender aos segmentos consumidores, que são principalmente as indústrias automobilísticas, de construção civil, e de fabricação de eletrodomésticos. O crescimento da competitividade do aço frente a outros materiais aumentou significativamente em diversos segmentos industriais com a utilização do aço zincado, e esta tendência se justifica pelo fato dos aços zincados reunirem num só produto a resistência mecânica do substrato ( aço ), assim como a elevada resistência à corrosão conferida pela camada de revestimento de Zinco ( Zn ).

A tentativa de reduzir danos causados pela corrosão tem levado muitas empresas a fazerem uso mais extensivo de chapas e peças, em geral, com a superfície tratada. Por sua vez, os fabricantes de produtos galvanizados buscam materiais que possam oferecer maior resistência mecânica, com menor peso, e maior garantia contra a corrosão.

Portanto, a excelente proteção promovida pela camada de Zn ao substrato, por um considerável período de tempo, direcionou a utilização deste material em segmentos diversos, tais como [ 1 ]: pontes, torres de transmissão, silos de armazenagem, dutos de refrigeração, artefatos elétricos, carrocerias de veículos automotivos, e outros.

Em princípio, todos os aços revestidos a base de Zn podem ser soldados satisfatoriamente, utilizando-se os processos comumente encontrados nas indústrias. No entanto [ 1 ], alguns problemas são reportados durante a soldagem desses aços: geração excessiva de fumos metálicos, porosidade, respingos, trincas e danos causados a camada de revestimento. Portanto, os aços zincados necessitam de um controle mais rigoroso das condições operacionais comparando-se com a soldagem dos aços comuns de baixo carbono não zincados. Este controle mais rígido deve-se aos efeitos relacionados com as propriedades da camada de Zn depositada, tais como sua condutibilidade elétrica, temperatura de vaporização e possibilidade de oxidação a altas temperaturas, que direta ou indiretamente irão influenciar a qualidade da junta soldada.

A tendência natural da busca mundial pela qualidade, aumento de produtividade e redução de custos; assim como, a crescente preocupação com as condições de saúde e higiene no ambiente de trabalho, em particular nas operações de soldagem, fizeram com que fosse necessário a seleção de processos de soldagem mais flexíveis e que gerassem menores quantidades de fumos metálicos e gases durante sua execução. E neste mesmo sentido, surgiu mais recentemente, e será o alvo principal deste trabalho, o processo de brasagem por arco elétrico denominado "MIG-Brazing". Este método alternativo de brasagem utiliza a partir de uma fonte de soldagem MIG/MAG, um material de adição [ 1 ] de bronze-silício ou bronze-alumínio,

em forma de arame, que é alimentado continuamente através de uma bobina. O arco elétrico formado no processo é protegido por uma atmosfera gasosa semelhante ao processo de soldagem MIG. E nos últimos anos tem havido uma demanda crescente na utilização do processo “MIG-Brazing”, tanto manual quanto automático, devido às vantagens que são oferecidas pelo processo, tais como [ 1 ]: alta taxa de deposição, baixo aporte térmico e, conseqüentemente, pouca ou nenhuma distorção na junta, o que resulta em uma junta brasada de excelente qualidade.

Com o objetivo de contribuir com este segmento, união de materiais, especificamente chapas galvanizadas de uso automobilístico, através da brasagem por arco elétrico, será visto a seguir uma pesquisa bibliográfica enfocando os principais assuntos que dizem respeito à proposta de trabalho.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **II. 1 – INTRODUÇÃO**

As informações deste capítulo são consideradas relevantes para o desenvolvimento do trabalho proposto, e discorre acerca dos assuntos que seguem: características da soldagem MIG/MAG de chapa de aço carbono zincada e os problemas inerentes ao processo; chapa de aço zincada e o processo de galvanização; brasagem convencional; brasagem por arco elétrico ( “MIG-Brazing” ) e aspectos de corrosão.

Apesar do grande esforço realizado na busca de informações relativas à revisão da literatura, é importante ressaltar que os dados disponíveis não são suficientemente abrangentes quando discorrem sobre o comportamento à corrosão de juntas brasadas por arco elétrico; muito menos esclarecem o comportamento das misturas gasosas utilizadas no processo “MIG-Brazing”, quando se realiza união de chapas finas de aço zincado com transferência por curto-circuito; o que justifica uma limitada quantidade de dados sobre os assuntos neste capítulo. Todavia, algumas referências foram assinaladas com a finalidade de mostrar a complexidade e os diferentes aspectos na geometria do cordão de solda que podem ser influenciados pelo gás de proteção.

## **II. 2 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO SOB PROTEÇÃO GASOSA – GMAW**

A soldagem a arco sob proteção gasosa designada segundo a American Welding Society – AWS [ 2 ] como “Gás Metal Arc Welding - GMAW”, é definida como um processo de soldagem que produz coalescência dos metais pelo aquecimento destes através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. O material de adição ou eletrodo nu é alimentado continuamente em direção à poça de fusão, de maneira automatizada, usualmente de uma bobina ou carretel, estando sob a proteção constante de um fluxo de gás. Já o deslocamento da soldagem é conduzido através de uma pistola ou tocha que pode ser manual ou mecanizado, Figura 1. O metal fundido do arame é transferido através da coluna do arco elétrico até a poça de fusão, onde após solidificar-se origina o metal de solda depositado [ 3 ]. Segundo MARQUES, P. [ 4 ], a proteção do arco e da região da solda, contra contaminação pela atmosfera, é feita por um gás ou misturas de gases, que podem ser inertes ou ativos.

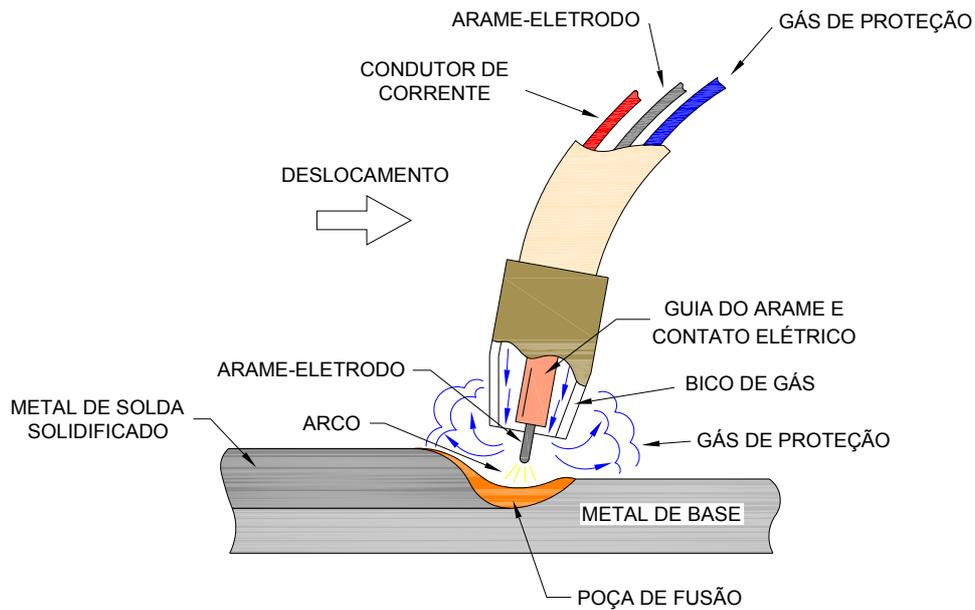


Figura 1 – Detalhe da tocha na operação de soldagem MIG/MAG [ 2 ].

O processo foi desenvolvido na década de 40, inicialmente para a soldagem de alumínio, mas hoje com algumas variações ele se aplica também a soldagem de aços carbono, aços inoxidáveis e até em materiais não ferrosos [ 5 ]. As variações do processo estão relacionadas basicamente com o gás de proteção utilizado, com a transferência metálica e com o tipo de material de base a ser soldado. Em função destas variantes a soldagem GMAW é conhecida também por soldagem MIG ( “Metal Inert Gas” ), que é caracterizada quando a proteção gasosa for constituída de um gás inerte como o Argônio ( Ar ) ou Hélio ( He ), ou misturas ricas nestes gases, que não possuem nenhuma atividade física com a poça de fusão, ou ainda, soldagem MAG ( “Metal Active Gas” ) quando a proteção gasosa for constituída de um gás ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão: Dióxido de Carbono (  $\text{CO}_2$  ) puro ou mistura com o Oxigênio (  $\text{O}_2$  ) [ 4 ].

Portanto, os dois processos de soldagem diferem exclusivamente entre si pela utilização dos gases de proteção, uma vez que os componentes utilizados durante a operação de soldagem são exatamente os mesmos.

### **II. 3 – O ARCO ELÉTRICO**

Apesar de muito estudado, o arco elétrico de soldagem é bastante complexo e os conhecimentos obtidos até agora ainda não permitiram um entendimento global dos fenômenos envolvidos no arco, muito menos de fazer um modelamento matemático e físico deste. Entretanto, as informações já obtidas e algumas simplificações permitem que o arco elétrico seja usado eficientemente em soldagem e ele é hoje a fonte de calor mais usada na soldagem por fusão [ 4 ].

O arco elétrico de soldagem consiste de uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, em alta temperatura, chamado PLASMA, e que produz energia térmica suficiente para ser usado em soldagem, através da fusão localizada das peças a serem unidas [ 4 ]. A principal função do arco elétrico é produzir calor, porém, produz simultaneamente, luminosidade, barulho e um bombardeamento iônico que remove a camada de óxidos da superfície do material de base. O arco elétrico é conhecido também como “arco metálico”, onde os elétrons emitidos do eletrodo negativo ( cátodo ) são aquecidos e mantidos pela ionização térmica do gás. O arco elétrico na soldagem apresenta uma descarga elétrica com alta corrente e baixa tensão, que ocorre através do plasma altamente condutivo, produzindo suficiente energia térmica capaz de unir metais por fusão [ 6 ].

A coluna do arco é constituída de elétrons livres, íons positivos, íons negativos e uma pequena quantidade de átomos neutros. São estas cargas que formam o plasma, que por sua vez conduz corrente na faixa de centenas de ampéres

de corrente alternada ( C.A ) ou corrente contínua ( C.C ), e nesta região a temperatura pode chegar aproximadamente a 6000°C [ 6 ]. Esta temperatura é alcançada quando os elétrons ( cargas negativas ) são transportados através do arco elétrico do cátodo ( pólo negativo ) para o ânodo ( pólo positivo ). Durante o processo os elétrons são acelerados a altas velocidades, desenvolvendo, portanto uma energia cinética considerável que é convertida em calor no momento do impacto com o ânodo [ 7 ]. Ao mesmo tempo, íons positivos se movimentam na direção oposta, ou seja, do ânodo para o cátodo. Como eles são pesados, não atingem a alta velocidade obtida pelos elétrons e, conseqüentemente, não liberam tanto calor [ 8 ]. Logo, em uma soldagem a arco elétrico de corrente contínua com polaridade inversa ( C.C<sup>+</sup> ), também chamado de polaridade reversa, os elétrons se movem do material de base para o eletrodo, e os íons positivos se movem do eletrodo para o material de base.

Portanto, o termo polaridade é usado para descrever a conexão elétrica da tocha de soldagem, em relação aos terminais da fonte de potência de corrente contínua. De acordo com CARY, H. [ 6 ], o termo polaridade, na utilização de corrente contínua, pode ser descrito sob duas formas: quando a tocha está conectada ao terminal positivo, a polaridade é designada como corrente contínua com eletrodo positivo “direct current electrode positive”, arbitrariamente chamada de polaridade reversa ( CC<sup>+</sup> ) ou corrente contínua com eletrodo negativo “direct current electrode negative”, quando a tocha está conectada no terminal negativo, e é originalmente chamado de polaridade direta ( CC<sup>-</sup> ).

O arco elétrico, em um processo de soldagem, apresenta uma queda de tensão que pode ser dividida em três partes, Figura 2: queda de tensão anódica, queda de tensão na coluna do arco ou queda de tensão do plasma, e a queda de tensão catódica. As regiões referentes à queda de tensão catódica e anódica são

extremamente curtas, mas representa o maior gradiente de tensão. Portanto, a energia térmica do arco é governada pela corrente de soldagem e as quedas de tensão destas três regiões. Na região total do arco existe uma outra queda de tensão devido à resistência a passagem do fluxo de corrente através do comprimento disponível do eletrodo a partir do bico do tubo de contato da tocha até a poça de fusão ( "Stick Out" ). Trata se de uma queda de tensão considerável que está relacionada, portanto, com a corrente de soldagem, o diâmetro e a composição química do eletrodo [ 6 ].

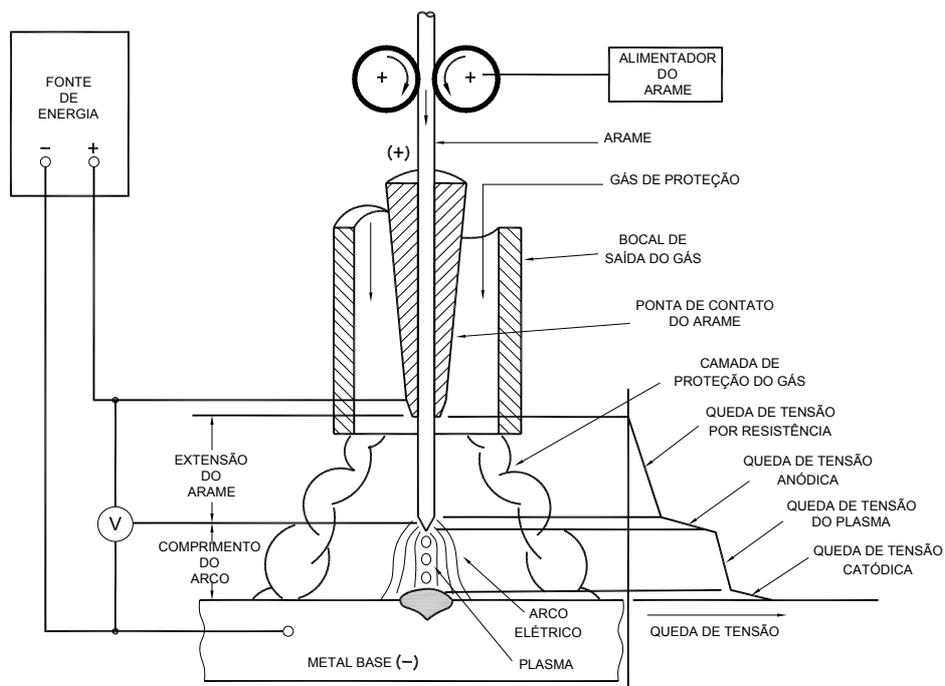


Figura 2 – Detalhe da queda de tensão na coluna do arco elétrico [ 6 ].

### II. 3.1 – TRANSFERÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO ATRAVÉS DO ARCO

As forças que atuam na transferência do metal, através do arco, são praticamente as mesmas em todos os processos de soldagem a arco elétrico que usam arame consumível. O metal que está sendo transferido varia de pequenas gotas,

menores que o diâmetro do arame, a gotas com diâmetro muito maior que o diâmetro do arame. O mecanismo de transferência do metal líquido através do comprimento do arco, no modo curto circuito, é controlado por forças de tensão superficial, que atuam no sentido de sugar a gota, no momento de contato com a poça de fusão [ 3 ]. Além das forças de tensão superficial, o jato de plasma, a gravidade e forças eletromagnéticas, provocam o efeito de pinçamento [ 4 ] “pinch effect”, que atua no sentido de destacar a gota fundida do arame consumível em direção a poça de fusão. A combinação destas forças agindo sobre a gota fundida, associada ao processo de soldagem; material de base; gás de proteção; diâmetro, composição química e comprimento de arco do eletrodo, “stick out”, tensão e polaridade no arco; características da fonte de energia; posição de soldagem; corrente de soldagem e densidade de corrente, determinam o modo de transferência metálica do material de adição, através da coluna do arco, em direção a poça de fusão [ 3 ].

A classificação mais comum da transferência do metal de adição tem sido feita de acordo com a dimensão, a frequência e características das gotas do metal a ser transferido. De uma forma simplificada, pode-se considerar que existem quatro formas básicas de transferência metálica, são elas: curto-circuito, globular, “spray” ou aerosol e controlada [ 2, 4 ].

O modo de transferência por curto circuito ocorre para baixos valores de tensão e moderada corrente de soldagem e é normalmente usado na soldagem fora de posição ou na soldagem de chapas finas, quando estes baixos valores são necessários [ 2, 4 ]. Uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e vai aumentando de diâmetro, até tocar na poça de fusão, sendo rapidamente atraída para esta, como consequência da ação da tensão superficial [ 2, 4 ]. O contato periódico da gota, com a poça de fusão, causa flutuações relevantes na tensão e na corrente de soldagem causando uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar uma

formação intensa de respingos. Entretanto, a quantidade de respingos pode ser limitada pela seleção adequada de parâmetros de soldagem e ajuste da fonte de energia, de forma que os curtos-circuitos ocorram de forma suave, com um surto limitado de corrente, onde a ponta do eletrodo fica parcialmente mergulhada na cratera da poça de fusão [ 2, 4 ], Figura 3.

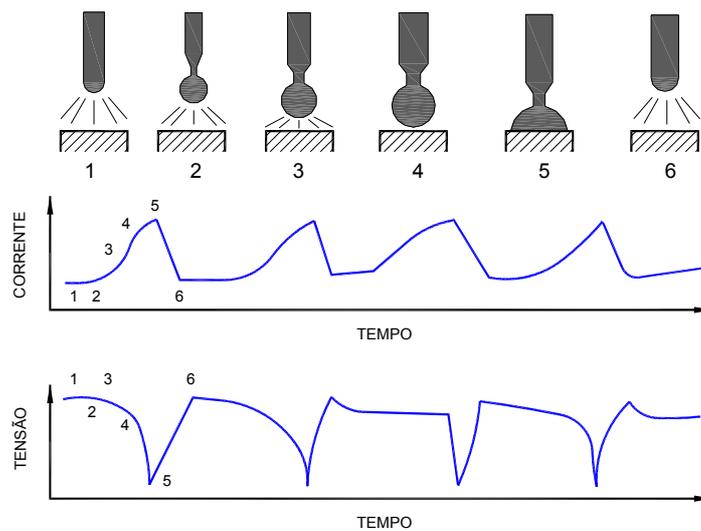


FIGURA 3 – Variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito [ 6 ].

FIGUEIREDO e FERRARESI [ 9 ] mapearam os modos de transferências metálicas na soldagem MIG, utilizando um sistema de “Shadowgrafia” por laser e uma câmera de vídeo de alta velocidade ( 2000 quadros/segundos ). A Figura 4 apresenta uma seqüência de quadros de um filme de uma transferência por curto-circuito.

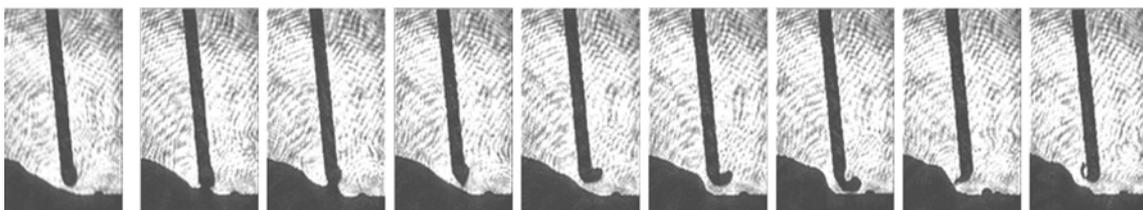


Figura 4 - Seqüência de fotos de uma transferência por curto-circuito [ 9 ].

Este regime de transferência garante uma poça de fusão pequena, de resfriamento rápido e adequado para a soldagem de chapas finas de metais ferrosos, e à deposição de raiz em juntas com grande abertura, por proporcionar baixa energia térmica e ou para todas as espessuras fora da posição [ 6 ]. De um modo geral a estabilidade do arco e do processo aumenta numa certa faixa de freqüências de curtos-circuitos [ 4 ].

Já a transferência globular ocorre para valores intermediários de corrente e elevada tensão de soldagem e resulta em arco mais estável que no caso anterior. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta, e também pode ser maior ou menor que o diâmetro do eletrodo [ 4 ]. A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado e, como as gotas de metal fundido, na ponta do eletrodo, aumentando de tamanho com o tempo, até se separar principalmente sob o efeito da ação da gravidade. Sua utilização é limitada à posição plana [ 4 ], Figura 5.

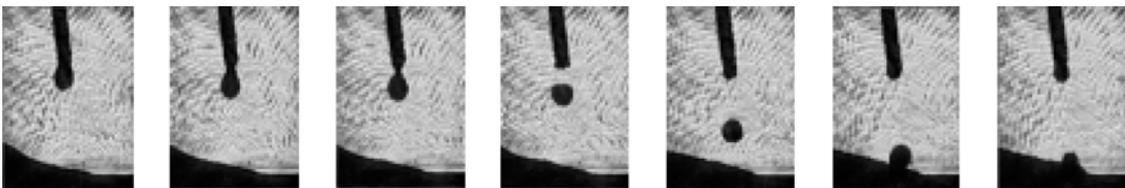


Figura 5 - Seqüência de fotos de uma transferência globular [ 9 ].

No modo de transferência por “spray” ou aerosol, à medida que aumenta a corrente de soldagem o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a poça de fusão diminui, até que, acima de determinada faixa, há uma mudança brusca no modo de transferência, que passa de globular para “spray”, e esta mudança

ocorre somente para determinados gases ou misturas de gases de proteção [ 4 ],

Tabela II. 1.

Tabela II. 1 – Corrente de transição globular – “spray” para diferentes materiais e diâmetros de arame [ 4 ].

Material de Base	Diâmetro do Arame ( mm )	Gás de Proteção	Corrente de Transição ( A )
Aço Carbono	0,76	Argônio + 2%O <sub>2</sub>	150
	0,90	Argônio + 2%O <sub>2</sub>	165
	1,14	Argônio + 2%O <sub>2</sub>	220
	1,59	Argônio + 2%O <sub>2</sub>	275
Aço Inoxidável	0,90	Argônio + 2%O <sub>2</sub>	170
	1,14	Argônio + 2%O <sub>2</sub>	225
	1,59	Argônio + 2%O <sub>2</sub>	285
Alumínio	0,76	Argônio	95
	1,14	Argônio	135
	1,59	Argônio	180
Bronze-Silício	0,90	Argônio	165
	1,14	Argônio	205
	1,59	Argônio	270

A Figura 6 detalha esquematicamente este fato e ilustra a corrente ( faixa ) na qual ocorre esta mudança no modo de transferência, e que é conhecida como “Corrente de Transição”.

De acordo com a literatura, no modo de transferência metálica por “spray”, as gotas são destacadas antes que o seu diâmetro alcance o diâmetro do eletrodo nu e em seguida são lançadas em alta frequência em direção à poça de fusão [ 2, 3 ].

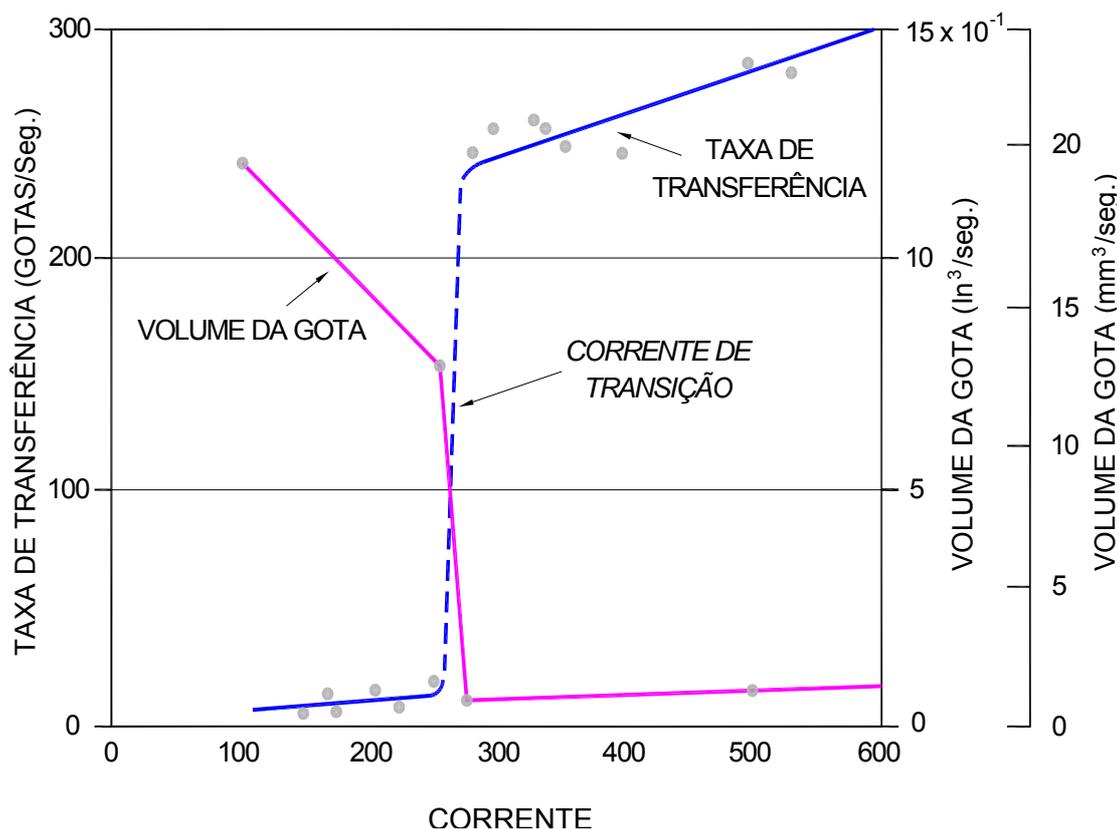


FIGURA 6 – Curva de transição mostrando a variação de volume e taxa de transferência das gotas com a corrente de soldagem [ 2 ].

Durante a transferência por “spray”, as gotas metálicas sofrem a ação de elevadas forças de origem eletromagnética, que se sobrepõem à ação das forças gravitacionais e assim, em princípio, este método seria aplicável a qualquer posição de soldagem. Entretanto, como esta transferência só é possível em correntes elevadas, ela não pode ser usada na soldagem de chapas finas e sua utilização fora da posição plana pode ser problemática, devido ao elevado tamanho da poça de fusão que se torna de difícil controle, Figura 7.

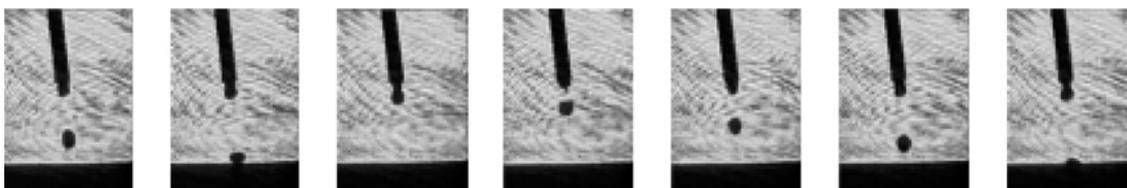


Figura 7 - Sequência de fotos de uma transferência por “spray” [ 9 ].

Sob a denominação de transferência controlada, estão agrupadas outras formas de transferência que podem ser obtidas pela introdução de perturbações controladas na corrente de soldagem ( pulsação da corrente ) e/ou na alimentação de arame [ 9 ]. Estas perturbações têm por objetivo obter uma transferência de metal de adição com as características desejáveis da transferência por “spray” mas com níveis de corrente média abaixo da corrente de transição, de forma a permitir sua utilização na soldagem de chapas finas ou fora da posição plana [ 3, 9 ]. A Figura 8 mostra uma seqüência de quadros de um filme com o modo de transferência globular/curto-circuito, obtido através deste controle, onde observa-se que a gota tem formação globular, concluindo a sua transferência com curto-circuito.

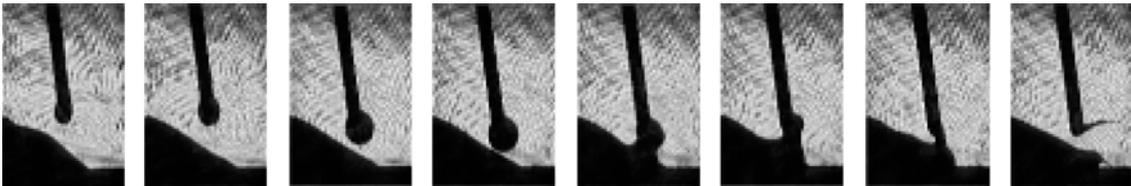


Figura 8 - Seqüência de fotos de uma transferência globular/curto-circuito [ 9 ].

De acordo com MARQUES, P. [ 4 ] a transferência controlada mais usada é a pulsada que é um tipo de transferência globular mais estável e uniforme, conseguido pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares, um inferior à corrente de transição e outro superior a esta, de modo que durante o período de tempo em que a corrente possui um valor baixo, uma gota se forma e cresce na ponta do arame e é transferida quando o valor da corrente está elevado [ 4 ]. Para se obter este modo de transferência, deve se usar fontes especiais de energia com parâmetros de pulso controláveis, e capazes de fornecer corrente pulsada. Uma limitação deste modo de transferência é a introdução de novas variáveis ( de pulsação ) no processo GMAW, dificultando ainda mais a seleção e otimização de parâmetros para soldagem.

Recentemente têm sido desenvolvidas fontes de energia controladas por microprocessadores, nas quais as condições de soldagem otimizadas para uma certa aplicação já vêm pré-programadas no equipamento. Este processo de controle é conhecido como “sinérgico” [ 4 ].

## II. 4 – EQUIPAMENTO BÁSICO PARA SOLDAGEM MIG/MAG

O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG é composto de fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem e fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras como mostra a Figura 9. Dispositivos auxiliares como posicionadores e sistemas de movimento da tocha podem ser usados na soldagem mecanizada.

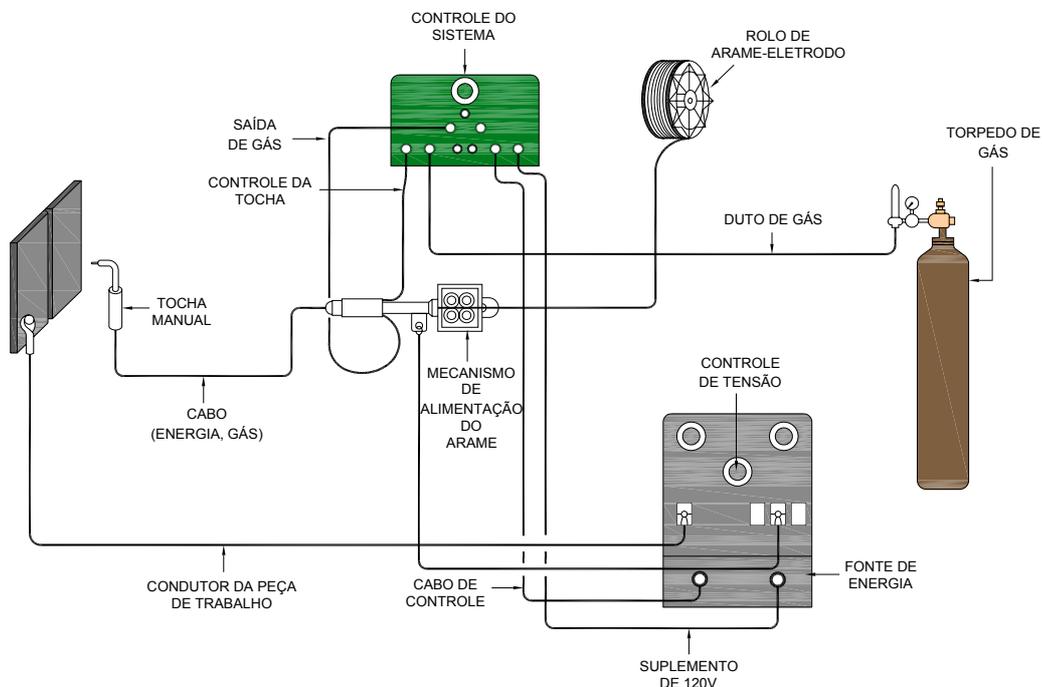


Figura 9 – Equipamento básico para soldagem MIG/MAG [ 6 ].

Para que um processo de soldagem seja estável, com eletrodo consumível, é necessário que a velocidade de consumo ( de fusão ) do eletrodo seja, em média, igual à velocidade de alimentação deste, de modo que o comprimento do arco permaneça relativamente constante [ 4 ]. Segundo MARQUES, P. [ 4 ], na soldagem GMAW, existem duas alternativas básicas de se conseguir este objetivo: permitir que o equipamento controle a velocidade de alimentação, de modo a igualá-la à velocidade de fusão, ou manter a velocidade de alimentação constante e permitir variações nos parâmetros de soldagem, de modo a manter a velocidade de consumo aproximadamente constante e, em média, igual à velocidade de alimentação.

No primeiro caso, trabalha-se com uma fonte do tipo corrente constante, que resulta em uma velocidade de fusão aproximadamente constante, com um alimentador de arame com velocidade de alimentação variável, controlada pelo equipamento, de forma a manter o comprimento do arco estável. Este controle é feito pela comparação da tensão do arco, a cada instante, com um valor de referência, e pela alteração da velocidade de alimentação de forma a compensar diferenças observadas entre a tensão real no arco e a tensão de referência. Por exemplo, se em um dado instante, por um movimento involuntário, o soldador afasta a tocha de soldagem da peça, provocando um aumento indesejável no comprimento do arco de soldagem, este aumento provocará uma elevação na tensão do arco, que ficará maior que a tensão de referência, resultando em um aumento momentâneo da velocidade de alimentação de arame e o restabelecimento da condição inicial.

No segundo caso, utiliza-se uma fonte do tipo tensão constante, com característica estática, como a ilustrada na Figura 10a, e um alimentador de arame com velocidade de alimentação constante. Com essas características, este tipo de equipamento tende a manter o comprimento do arco estável, como pode ser visto na Figura 10b.

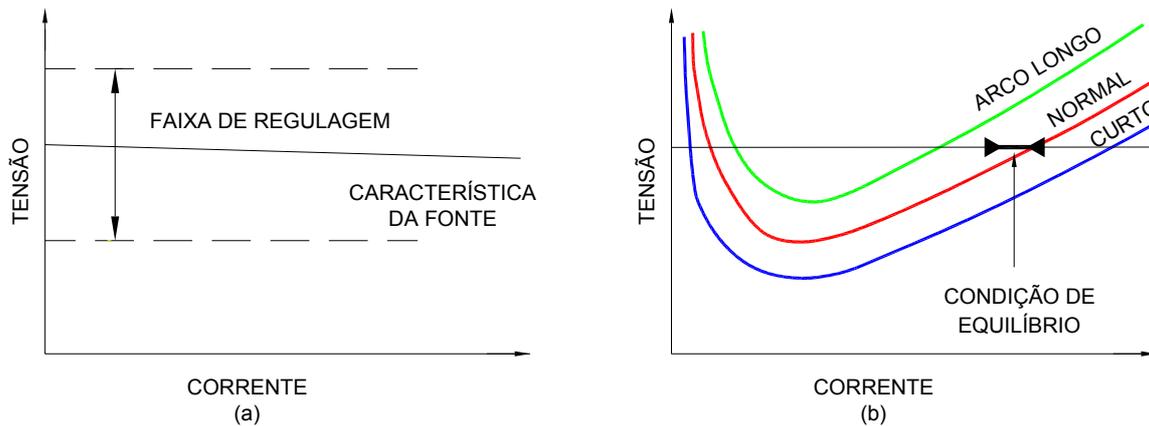


Figura 10 – (a) Curva característica de saída de uma fonte do tipo tensão constante;  
(b) Controle intrínseco do comprimento do arco [ 4 ].

Pode-se observar que variações no comprimento do arco, sempre acompanhadas de variações na tensão deste, tendem a causar grandes variações na corrente de soldagem, isto é, se em um dado instante o arco se tornar maior que o valor de equilíbrio, a corrente de soldagem será reduzida, de modo que a velocidade de consumo cairá e o comprimento do arco tenderá a voltar ao valor original. Um raciocínio similar é usado quando o arco diminui momentaneamente de comprimento.

Segundo WAINER et al [ 10 ], essa característica é extremamente importante, pois o arame é alimentado continuamente pela tocha e a fonte deve fornecer a energia necessária para fundi-lo a uma dada velocidade. Essa energia tem dois componentes: a que está contida no arco, dada pelo produto  $V \times I$ , e a energia de aquecimento do arame, por efeito Joule, dada por  $R \times I^2$ , onde  $R$  é a resistência elétrica do arame. Conforme WAINER et al [ 10 ], são três os fatores que podem alterar o valor dessa energia: mudança no comprimento do arco ( "stick out" ); mudança na velocidade de alimentação do arame; e mudança da faixa de tensão de soldagem na fonte de energia.

Este tipo de sistema é mais barato, mais simples e apresenta bons resultados com arames mais finos ( até 3,2 mm de diâmetro ). No mercado nacional existem diferentes fontes e alimentadores de arames disponíveis, que atendem a uma faixa de necessidades bastante ampla. Quanto à constituição interna, estas fontes são, geralmente, do tipo transformador-retificador, uma vez que este processo utiliza corrente contínua, ou geradores ( pouco usados ), e é possível ajustar a tensão de saída numa faixa de aproximadamente 18 a 50 Volts.

## **II. 5 – PROTEÇÃO GASOSA**

Devido à crescente utilização do processo de soldagem MIG/MAG, nos últimos anos, uma grande variedade de misturas foi introduzida no mercado, desde as altamente oxidantes até as inertes, ou mistura de ambas, de forma a atender as necessidades dos diversos segmentos industriais.

Uma das razões na utilização de um gás de proteção durante um processo de soldagem a arco é que o mesmo além de proteger o metal de adição fundido, durante sua transferência, protege também, a poça de fusão e o cordão de solda, até certo ponto, da contaminação atmosférica [ 11 ]. Elementos como o oxigênio (  $O_2$  ), o nitrogênio (  $N_2$  ) e o hidrogênio (  $H_2$  ) contidos no ar causam grandes dificuldades na soldagem de materiais ferrosos. O  $O_2$  seria o mais reativo dos três, por se combinar facilmente com outros elementos do metal de solda, formando óxidos indesejáveis e gases. O  $N_2$ , porém, causa os problemas mais sérios na soldagem dos aços. Devido a sua solubilidade no ferro à temperatura de fusão, o nitrogênio permanece inofensivo até a temperatura onde ocorre a sua precipitação, formando nitretos metálicos prejudiciais. Esses nitretos causam uma grande elevação do limite de escoamento, aumentam a dureza e a resistência à tração. Tais propriedades mecânicas são indesejáveis no cordão de solda porque reduz a sua resistência ao impacto e

ductilidade, o que facilita a ocorrência de trincas no cordão de solda e na Zona Termicamente Afetada ( ZTA ). Em quantidades excessivas, o  $N_2$  pode igualmente produzir muita porosidade no cordão de solda. Já o  $H_2$  atua de forma similar ao  $N_2$ , devido a sua solubilidade em altas temperaturas. Enquanto o metal resfria, o gás na forma atômica é rejeitado e em seguida se combina formando hidrogênio molecular criando altas pressões. Essas pressões associadas a outros fatores, levam eventualmente ao trincamento do material [ 12 ].

Entre outros fatores, uma simples mudança do gás de proteção promoverá uma série de alterações no comportamento da soldagem [ 2 ]. Estes gases, segundo sua natureza e composição, poderão influenciar as características do arco elétrico, tipo de transferência do material de adição, velocidade máxima de soldagem, perdas por projeção, penetração, forma externa do cordão de solda e custo de soldagem [ 4, 10 ].

A Figura 11 mostra o perfil do cordão de solda característico para diversos gases e misturas. Entretanto, deve-se lembrar que o perfil do cordão de solda pode ser substancialmente modificado pela alteração do conjunto de parâmetros operacionais de soldagem [ 4 ].

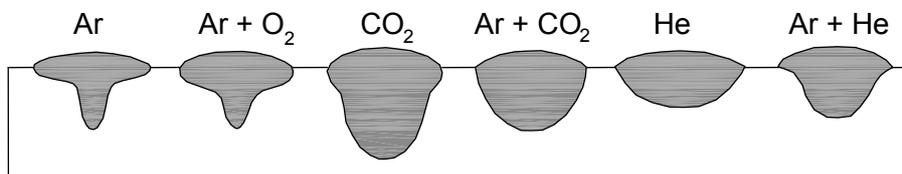


Figura 11 – Perfil de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas [ 4 ].

Por fim, no processo de soldagem GMAW a proteção gasosa pode ser constituída de um gás inerte ( Argônio puro – Ar ou Hélio – He, ou mistura de ambos ), usados na soldagem MIG; e também de um gás ativo ( Dióxido de Carbono puro –

CO<sub>2</sub> ou mistura com Oxigênio – O<sub>2</sub> ), que são usados na soldagem MAG. Entre outras razões, a utilização de um gás ou uma mistura gasosa em um processo de soldagem a arco, ocorre também em função da necessidade de se obter uma eficiência maior do arco elétrico, modo específico de transferência do metal de adição e uma ignição mais fácil do arco elétrico [ 11 ], o que pode resultar em melhores características do cordão de solda.

## **II. 5.1 – PROPRIEDADES DOS GASES DE PROTEÇÃO**

### **II. 5.1.1 – Potencial de Ionização**

A ignição e a estabilidade do arco elétrico são fortemente influenciadas pelos potenciais de ionização dos componentes dos gases de proteção utilizados no processo de soldagem. Um gás com baixo potencial de ionização, como o Ar, por exemplo, cedem elétrons de forma livre, transformando facilmente átomos em íons positivos. Isso ajuda a sustentar um arco elétrico com característica suave e estável. O aprimoramento da abertura do arco elétrico e de sua estabilidade resulta em uma solda de melhor qualidade e na redução dos custos de limpeza devido à redução de respingos. Já o CO<sub>2</sub> com alto potencial de ionização produz um arco elétrico com maior dificuldade de abertura e estabilidade [ 13 ].

### **II. 5.1.2 – Condutividade Térmica**

Gases que possuem alta condutividade térmica transferem uma quantidade maior de calor à peça, influenciando, portanto, na geometria e na penetração da solda. Logo, o aumento da transferência de calor ao metal de base promove maior penetração e fluidez da poça de fusão, como é o caso do CO<sub>2</sub> [ 14 ]. Acredita-se também, que adicionando CO<sub>2</sub> ou He a uma mistura gasosa baseada em

argônio, pode-se obter uma transferência de calor ótima para uma determinada aplicação [ 13 ].

### **II. 5.1.3 – Potencial de Oxidação**

A natureza oxidante do gás de proteção afeta tanto o rendimento da soldagem como também as propriedades da junta soldada. Obviamente, uma mistura gasosa mais oxidante ( maior teor de  $\text{CO}_2$  ou  $\text{O}_2$  ) permite a transferência de menos elementos de liga do eletrodo à poça de fusão. A perda de elementos de liga como o Manganês ( Mn ), Silício ( Si ) e outros elementos reativos como o Titânio ( Ti ), pode afetar as propriedades da solda.

Quando se substitui a utilização de 100%  $\text{CO}_2$  para uma mistura de Ar +  $\text{CO}_2$  e/ou  $\text{O}_2$ , pode-se esperar um aumento de 5% a 10% na resistência à tração, e de 15% a 25% na energia de Impacto Charpy. E por outro lado, a redução do potencial de oxidação da mistura gasosa permite o uso de arames menos ligados ( menor custo ) para atingir as mesmas características [ 13 ].

### **II. 5.2 – CARACTERÍSTICAS DOS GASES DE PROTEÇÃO**

Para se obter proteção gasosa adequada para uma aplicação específica, geralmente é necessária o uso de uma mistura gasosa, visto que cada gás possui propriedades, que juntas contribuem no rendimento da mistura em geral. A compreensão destas contribuições torna mais fácil o processo de seleção de uma mistura gasosa [ 13 ].

### **II. 5.2.1 – Argônio ( Ar )**

O Ar é um gás inerte, o que significa que sua utilização em um processo de soldagem possibilita uma boa transferência de elementos de liga do material de adição para o cordão de solda. Geralmente, soldas com propriedades mecânicas excelentes ( tração e impacto ) resultam da alta qualidade do metal de solda, sem inclusões, obtido em soldagem sob proteção de Ar [ 13, 15 ]. Com baixo potencial de ionização, o argônio permite fácil ignição e boa estabilidade do arco elétrico, como também uma transferência metálica por pulverização axial. Altas taxas de deposição com melhor eficiência de deposição do arame ( pouco respingo ), são conseguidas quando a proteção é baseada em argônio [ 13 ].

Algumas desvantagens têm sido observadas na soldagem de certos aços, quando se utiliza 100% Ar no gás de proteção. A propriedade de baixo potencial de ionização do Ar reduz a tensão do arco elétrico e cria baixa potência, o que faz gerar um cordão de solda com baixa penetração, mordeduras e inadequado contorno do cordão. A combinação de baixa penetração com pouco respingo e a aparência da superfície do cordão de solda são considerações principais que fazem do argônio puro um gás útil na soldagem de chapas finas de aço [ 12 ].

### **II. 5.2.2 – Oxigênio ( O<sub>2</sub> )**

O O<sub>2</sub> melhora a estabilidade do arco elétrico e aumenta a fluidez do depósito de solda. Em quantidades de 1% a 5% diminui o tamanho da gota transferida da ponta do eletrodo à poça de fusão e aumenta a quantidade de metal transferido por unidade de tempo, permitindo ao metal fluir nas bordas do cordão de solda. O O<sub>2</sub> melhora o contato entre a peça e o arco elétrico ao intensificar a mancha catódica, aumentando a estabilidade do mesmo. Ele também reduz a tensão superficial do metal

de solda, diminuindo a convexidade e o reforço, e permite o aumento da velocidade de soldagem. O  $O_2$  tem uma influencia substancial na intensidade de corrente de transição que pode ser atingida numa faixa maior de parâmetros. Por exemplo, quando se aumenta a porcentagem de oxigênio na mistura, a corrente de transição exigida diminui. Porém níveis excessivos de  $O_2$  podem ser prejudiciais por causarem grandes perdas de elementos de liga, redução das propriedades mecânicas do cordão de solda e aumento da quantidade de escória na superfície, assim como a dificuldade de removê-la [ 13 ].

Acredita-se que o teor de  $O_2$  no metal de solda é afetado também pelo teor de oxigênio do material de adição e do material de base, e por outros parâmetros do processo. O teor de oxigênio no metal de solda parece, porém, ser aproximadamente proporcional à porcentagem do volume de oxigênio na mistura gasosa e à raiz quadrada da porcentagem do volume de dióxido de carbono [ 14 ].

### **II. 5.2.3 – Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )**

O  $CO_2$  é um gás constituído por dois elementos químicos diferentes: o Carbono ( C ) e o Oxigênio (  $O_2$  ). Este gás exhibe características de gás inerte, mostrando estabilidade ao não reagir com outros elementos na temperatura ambiente, porém é um gás reativo às temperaturas de soldagem [ 12 ]. Usado puro como gás de proteção, quando o custo é uma preocupação primária, pode freqüentemente acarretar uma falsa economia, visto que os resultados atingidos com o  $CO_2$  podem exigir limpezas mais intensas após a soldagem [ 13 ]. A baixa condutividade elétrica do  $CO_2$  produz um arco elétrico violento e instável, transferindo o material de adição de maneira dispersa e produzindo muito respingo [ 12 ]. Portanto é necessário manter um controle maior das variáveis de soldagem para diminuir a quantidade de respingos, porosidades e oxidação dos elementos de liga [ 7 ]. O uso de altas intensidades de

correntes e arcos elétricos mais curtos pode melhorar a transferência e minimizar a quantidade de respingos [ 13 ]. O fato do  $\text{CO}_2$  ser um gás ativo faz com que, durante a soldagem, ocorra maior oxidação dos elementos de liga. Em vista disso, há necessidade de se empregar arames com um teor maior de elementos de liga. Essa medida visa minimizar a ocorrência de porosidades no cordão de solda, bem como manter a resistência mecânica da junta soldada a nível adequado. Esta combinação gás/arama geralmente produz um cordão de solda fortemente coberto por uma película de óxido de manganês e silício com característica vítria, que se localiza sob o cordão de solda ( escória superficial ) e que deve ser removida se for requerido posteriormente outro processo de manufatura, como a pintura [ 13 ].

O  $\text{CO}_2$  tem alta condutividade térmica devido à dissociação e recombinação de seus componentes. Sua maior densidade concentra e transfere mais calor ao metal de base [ 13 ], e quando utilizado puro permite a obtenção de cordões de solda mais largos e profundos, com um contorno bastante uniforme e sem evidências de mordeduras [ 12 ]; porém os maiores problemas em soldagens de chapas finas são distorção e perfuração.

### **II. 5.3 – ESCOLHA DA MELHOR MISTURA GASOSA PARA UMA APLICAÇÃO ESPECÍFICA**

Tradicionalmente, misturas dos gases  $\text{CO}_2$  e / ou  $\text{O}_2$  com o Ar ou o  $\text{CO}_2$  puro, são utilizadas em uma ampla variedade de aplicação. O teor de cada gás da mistura tem sido freqüentemente baseado no que se tem de disponível e não nas necessidades específicas do trabalho. Pesquisas recentes, tanto relativas à soldagem de metais finos como espessos, tem mostrado que inúmeras misturas gasosas ternárias ( Ar, He,  $\text{CO}_2$  ou  $\text{O}_2$  ) podem otimizar o rendimento da soldagem e baixar os custos através do aumento de produtividade.

Misturas de três ou mais gases são geralmente selecionadas pela versatilidade que podem oferecer, desde o ponto de vista da transferência do metal de adição até a alta qualidade do metal de solda. Algumas misturas ternárias são consideradas universais porque exibem boa operacionalidade em todos os modos de transferência de metal. O fato destas misturas, permitirem, também, velocidades de soldagens mais altas, facilita a obtenção de uma junta soldada com um nível de distorção reduzido [ 13 ].

Um nível alto de contaminação da superfície do metal de base determina que o nível de desoxidantes no arame deve aumentar. A proteção gasosa escolhida deve ser a menos oxidante possível e ainda compatível com a espessura do metal e com o tipo de transferência utilizada. A chapa com a superfície bem limpa permite o uso de arames mais barato, isto é, com menor teor de elementos desoxidantes, e o uso de uma mistura gasosa menos específica [ 13 ].

#### **II. 5.4 – EFEITO DO GÁS DE PROTEÇÃO NA MICROESTRUTURA DO CORDÃO DE SOLDA**

Um parâmetro importante que influencia as propriedades mecânicas na soldagem MIG/MAG é a composição do gás de proteção. A complexa interação entre os elementos químicos dos gases de proteção e as perdas dos elementos de liga, implica, em particular, na dificuldade de um único arame oferecer ótimos resultados para todos os gases de proteção com composição química diferenciada [ 14 ]. Uma combinação inadequada de arame e gás de proteção promove perdas de elementos de liga durante a soldagem, devido às reações químicas com o gás de proteção, perdas mecânicas como respingo ou simples volatilização dos elementos no arco elétrico [ 16 ].

O equilíbrio criterioso dos componentes da mistura gasosa pode aumentar significativamente as propriedades mecânicas da junta soldada. Isto se consegue equilibrando os componentes ativos da mistura, para dar a transferência máxima recomendável de Mn e Si através do arco elétrico, mantendo-se o teor do carbono no metal de solda [ 15 ].

As reações gás-metal acontecem tanto na gota, durante sua transferência, como na poça de fusão. Um aumento do aporte de calor, devido a uma menor velocidade soldagem, representa maior tempo para a solidificação e, portanto, maior tempo de exposição da poça de fusão na atmosfera, provocando um aumento do conteúdo de  $O_2$  no depósito de solda. O  $O_2$  é pouco solúvel no Ferro ( Fe ) e, conseqüentemente, a maior parte de  $O_2$  no metal de solda se encontra combinada na forma de óxidos [ 16 ]. Portanto, uma quantidade de  $O_2$  reduzida no metal de solda é certamente favorável, uma vez que aumenta a resistência à fratura, já que se formarão menos e menores inclusões de óxidos. Todavia, o teor de  $O_2$  não pode ser muito baixo porque alguns tipos de inclusões de óxido ( com composição química e tamanho apropriados ) podem nuclear ferrita acicular [ 14 ].

## II. 6 – MICROESTRUTURA DA ZONA FUNDIDA

Segundo HONEYCOMBRE e BHADESHIA [ 17 ], a microestrutura obtida do resfriamento do cordão de solda, da fase líquida até a temperatura ambiente, é chamada de microestrutura primária ou como soldado. Na condição como soldado sua microestrutura pode ser considerada como uma conseqüência de reações químicas que ocorrem na poça de fusão, seguida do processo de solidificação e transformações no estado sólido. A microestrutura do cordão de solda no aço C-Mn pode ser classificada em quatro categorias [ 16 ]. A ferrita primária, acompanhada freqüentemente de ferrita Widmanstätten, origina-se a uma velocidade de resfriamento

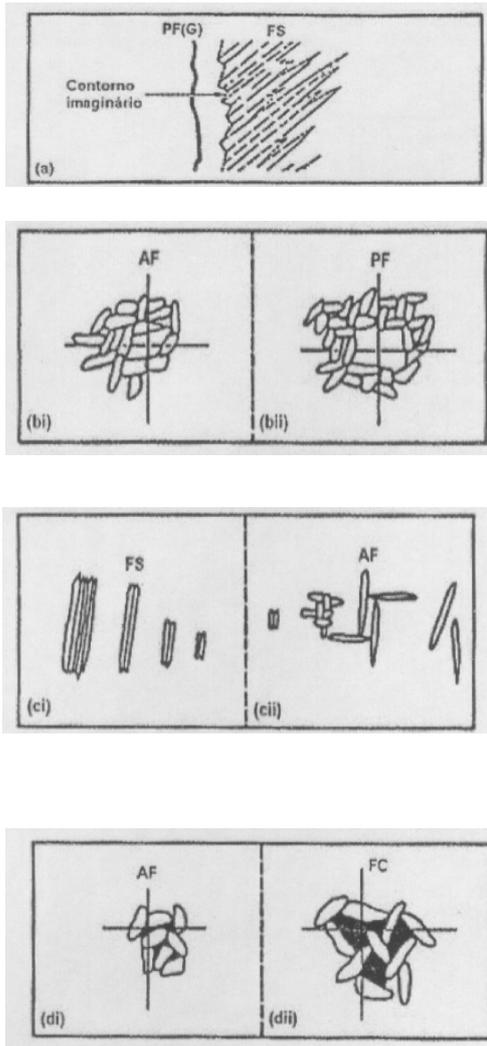
suficientemente lenta. Para uma velocidade de resfriamento um pouco mais rápida, na presença de nucleadores favoráveis e suficientemente bem distribuídos, pode-se formar uma estrutura fina conhecida como ferrita acicular. Esta é a microestrutura mais favorável no que diz respeito às propriedades mecânicas. Uma velocidade de resfriamento mais rápida resulta em estrutura bainítica. Com uma velocidade de resfriamento muito rápida, é possível que a austenita se transforme em martensita.

Para melhor compreensão será apresentado a seguir um esquema de padronização desenvolvido pelo Instituto Internacional de Soldagem - IIW [ 18 ], e que dispõe de um conjunto de definições baseadas na análise morfológica realizada por microscopia ótica e que permite classificar os principais constituintes microestruturais de metais de solda ferríticos, na condição como soldado, com a seguinte terminologia: ferrita primária, ferrita acicular, ferrita com segunda fase, agregado ferrita-carbeto e martensita. Com exceção da martensita, a distinção entre os outros constituintes microestruturais pode ser visualizada através das ilustrações contidas na Figura 12, e as correspondentes características morfológicas são descritas a seguir:

- Ferrita primária ( PF ): engloba as morfologias de contorno de grão e a intragranular. A primeira, PF ( G ), é caracterizada como veios, ou grãos equiaxiais, associados aos contornos dos grãos colunares da austenita anterior, enquanto que a segunda, PF ( I ), compreende os grãos poligonais de ferrita contidos no interior dos referidos grãos colunares;
- Ferrita acicular ( AF ): a morfologia desse constituinte é tipicamente caracterizada como pequenos grãos de ferrita, não alinhados, isolados ou não, e encerrados dentro dos grãos colunares da austenita anterior. Os grãos isolados normalmente apresentam elevada relação de aspecto;

- Ferrita com segunda fase: em função do posicionamento da fase secundária em relação a ferrita, as morfologias alinhadas e não alinhadas são possíveis de identificação. A morfologia alinhada, FS ( A ), é caracterizada pela incidência da fase secundária entre ripas paralelas de ferrita. Também são previstas particularizações em termos de ferrita de placas laterais, bainitas superior e inferior. Já a morfologia não alinhada, FS ( N ), caracteriza-se pela presença de grãos de ferrita circundados tanto por microfases, quanto por ripas isoladas de ferrita acicular de elevada relação de aspecto;
- Agregado ferrita-carbeto ( FC ): este constituinte pode ser interpretado como uma mistura de ferrita e carbeto, incluindo a perlita e a ferrita com carboneto interfásico, de tamanho bastante refinado, cuja resolução freqüentemente fica abaixo da obtida por microscopia ótica. A especificação única com respeito a perlita, FC ( P ), também é prevista.
- Martensita ( M ): devido à dificuldade de resolução com microscopia ótica, a morfologia desse constituinte é interpretada sob a forma de colônias, que devem ser maiores que as ripas adjacentes de ferrita. Em ocorrendo o contrário, as mesmams podem ser consideradas como microfases. A diferenciação da martensita em ripas, M ( L ), e martensita maclada, M ( T ), também são previstas.

Em relação à terminologia clássica, as equivalências das ferritas alotriomórfica e poligonal, com as duas morfologias de ferrita primária na terminologia proposta pelo IIW, são bem aceitas, além é claro, da ferrita acicular que é comum em ambas terminologias. Dificuldades maiores de equivalências são observadas entre os outros constituintes.



(a) contorno imaginário (linha tracejada) unindo as extremidades da segunda fase;

(bi) grão considerado como sendo de ferrita acicular (relação de aspecto menor que 3:1);

(bii) grão considerado como sendo de ferrita primária (relação de aspecto maior que 3:1)

(ci) duas ou mais ripas paralelas consideradas como sendo de ferrita com segunda fase alinhada (relação de aspecto maior que 4:1);

(cii) duas ripas paralelas e alinhadas

Figura 12 – Representação esquemática de constituintes microestruturais [ 18 ].

## II. 7 – CHAPA DE AÇO ZINCADA

Chapas de aço zincadas ou galvanizadas são aquelas que apresentam revestimentos protetores metálicos, à base de Zn ou ligas de Zn, que conferem ao substrato maior resistência à corrosão. Estas chapas são produzidas com uma ampla faixa de espessuras de revestimento, sendo esta variação, dependente sobre tudo, do tipo de aplicação que se deseja utilizar o aço revestido [ 19, 20 ].

O Zn é um metal muito utilizado como revestimento anticorrosivo, pois apresenta um bom desempenho na maioria das condições atmosféricas, oferece

proteção galvânica ao aço nas discontinuidades do revestimento, protege o material de base e é barato se comparado a outros tipos de revestimentos [ 19, 21 ]. Estes fatores favoreceram a utilização dos aços revestidos a base de Zn nos diversos segmentos industriais onde tem apresentado excelentes resultados há várias décadas. A principal razão para este desempenho é sua reconhecida resistência à corrosão atmosférica, e esta propriedade tem gerado um crescimento competitivo do aço revestido frente a outros materiais, aumentando significativamente a utilização do aço zincado nos diferentes segmentos. Esta tendência se justifica pelo fato das chapas zincadas reunirem num só produto a resistência mecânica do substrato e a elevada resistência à corrosão, conferida pela camada de revestimento de Zn. Pois o revestimento de Zn atua como barreira e como anodo de sacrifício, protegendo o aço das intempéries [ 19, 22 ].

Aliada a esta tendência, a utilização de modernas tecnologias para a deposição do Zn sobre o substrato, têm tornado o aço zincado ainda mais competitivo, principalmente para aplicações onde não somente a resistência à corrosão oferecida pela camada de revestimento é fundamental, mas também onde se exige um produto zincado com uniformidade de espessura, boa performance em processos de fabricação posteriores ( conformação e soldagem ) e facilidade de pintura. A incorporação dessas características ao aço zincado têm possibilitado à indústria automobilística, por exemplo, a se adequar às exigências internacionais referente à resistência a corrosão, inicialmente implementada nos Estados Unidos e que teve grande repercussão no mercado automobilístico da Europa e Japão [ 23 ]. Através da utilização crescente em suas carrocerias, de aços pré-revestidos com zinco ou ligas de zinco, esse segmento tem oferecido garantias aos carros classes mundiais que são de 10 anos contra corrosão perfurante e de 5 anos contra corrosão cosmética [ 20 ].

## II. 8 – MEIOS DE PROTEÇÃO PROMOVIDOS PELA CAMADA DE ZINCO ( Zn )

O principal fator que motiva a utilização do Zn como revestimento protetor do aço, é o mecanismo pelo qual o Zn protege o substrato; e estes são basicamente dois [19, 22 ]: por barreira e por proteção galvânica. No mecanismo por barreira, o importante é a espessura do revestimento, enquanto para o mecanismo por proteção galvânica os potenciais eletroquímicos são as propriedades chaves.

**Inibição por Barreira Mecânica** – Ao ser exposta à atmosfera, o aço recém galvanizado forma uma camada de óxido de Zn ( ZnO ), que na presença de umidade evolui para hidróxido de Zn ( ZnOH<sub>2</sub> ). Este por sua vez, em contato com o CO<sub>2</sub> presente no ar atmosférico, reage formando o carbonato de Zn ( ZnCO<sub>3</sub> ). Este composto possui baixíssima solubilidade na água e forma uma patina acinzentada, que impede a continuidade das reações e inibe a corrosão. Estes filmes não proporcionam proteção efetiva do substrato e as considerações são feitas quando as chapas zincadas estão submetidas a condições atmosféricas normais.

**Proteção Galvânica** – No caso de haver alguma falha ou imperfeição ( arranhão ) no revestimento de Zn, o mecanismo de proteção galvânica entra em operação devido à natureza eletroquímica do par Ferro ( Fe ) e Zinco, e neste caso o Zn funciona como anodo e é consumido enquanto a integridade do substrato é preservada. Esta proteção é denominada “Proteção de Sacrifício”, porque o metal que atua como anodo, nesse caso o Zn, se sacrifica para proteger o metal catódico ( aço ). Observando a série eletroquímica dos metais, nota-se que o Zn tem um potencial menor quando comparado ao aço ( Tabela II. 2 ). Assim, quando aqueles metais estão em contato em um eletrólito, o Zn passa a ser o anodo e o aço o catodo, o que é conhecido como “Efeito Pilha”. Desta forma o Zn protege catódicamente o aço contra a corrosão, inclusive nas falhas e imperfeições que possam ter o recobrimento.

Tabela II. 2 – Potencial de eletrodo dos metais [ 22 ].

	Metal	Potencial de Eletrodo
Menos nobres (anódicos)	Magnésio	- 2,340
	Alumínio	- 1,670
	Zinco	- 0,762
	Cromo	- 0,710
	Ferro	- 0,440
	Cádmio	- 0,402
Mais nobres (catódicos)	Níquel	- 0,250
	Estanho	- 0,136
	Chumbo	- 0,126
	Cobre	+ 0,345
	Prata	+ 0,800
	Ouro	+ 1,680

### II. 8.1 – VIDA ÚTIL DA CAMADA DE ZINCO ( Zn )

A resistência à corrosão do Zn puro não é satisfatória em diversas circunstâncias corrosivas, particularmente em uma atmosfera muito úmida [ 24, 25 ] e a temperaturas superiores a 110°C [ 26 ]. Conseqüentemente, nos últimos 20 anos, muitas indústrias, especialmente a automobilística e de construção, começaram a procurar um processo alternativo. O resultado foi um desenvolvimento de sistemas de ligas de Zn com metais do oitavo grupo, tais como: ZnNi, ZnCo, ZnFe e ultimamente se incluem combinações de ligas Zn-Co-Cr e Zn-Fe-Mn [ 27 ]. Estes sistemas de ligas apresentam propriedades superiores no que diz respeito à resistência à corrosão, resistência mecânica e propriedades elétricas, além de custo adequado [ 28 ].

Diversas experiências também concluíram que a vida útil de uma camada de Zn é diretamente proporcional à sua espessura [ 19 ]. Portanto, é importante que

esta camada seja uniforme em toda a sua extensão, caso contrário, a corrosão destruiria a parte mais fina em um tempo menor, e certamente inviabilizaria a parte mais grossa [ 29 ]. Dependendo da atmosfera em que o aço galvanizado esteja submetido, sua vida útil poderá variar de 15 anos para zonas industriais intensas e 50 anos para zonas rurais [ 29 ]. Logo, a vida útil dos aços zincados está diretamente relacionada com a espessura do revestimento da camada de Zn e inversamente proporcional ao meio em que o aço zincado estiver exposto. De acordo com as literaturas [ 19, 22, 29 ], para determinação da durabilidade do revestimento de Zn consideram-se fatores como temperatura, umidade relativa do ar, tempo e intensidade de insolação, duração e velocidade dos ventos e contaminação do ar com óxidos de enxofre, cloretos gases nitrosos, partículas lançadas pelas indústrias e outras condições atmosféricas. Esses fatores ambientais determinam a taxa de corrosão do material nos principais meios, Figura 13.

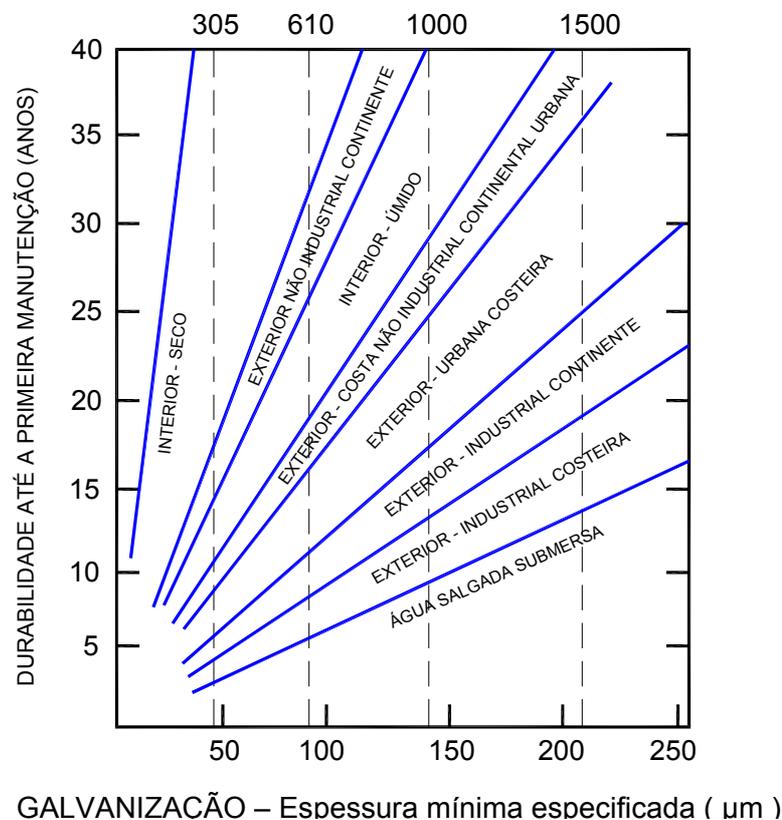


Figura 13 – Vida útil da chapa zincada em função da condição de atmosfera [ 22 ].

## II. 9 – ESTRUTURA CRISTALINA DA CAMADA DE REVESTIMENTO DA CHAPA ZINCADA

As reações metalúrgicas entre o Fe e o Zn determinam a estrutura e a composição dos revestimentos e constituem a base para todos os processos associados à deposição do Zn sobre o aço, pelo método de imersão à quente [ 30 ]. O Zn líquido a temperatura de 450°C reage com o Fe do substrato, de modo que as reações entre os dois metais seguem o caminho do equilíbrio termodinâmico [ 31 ], Figura 14.

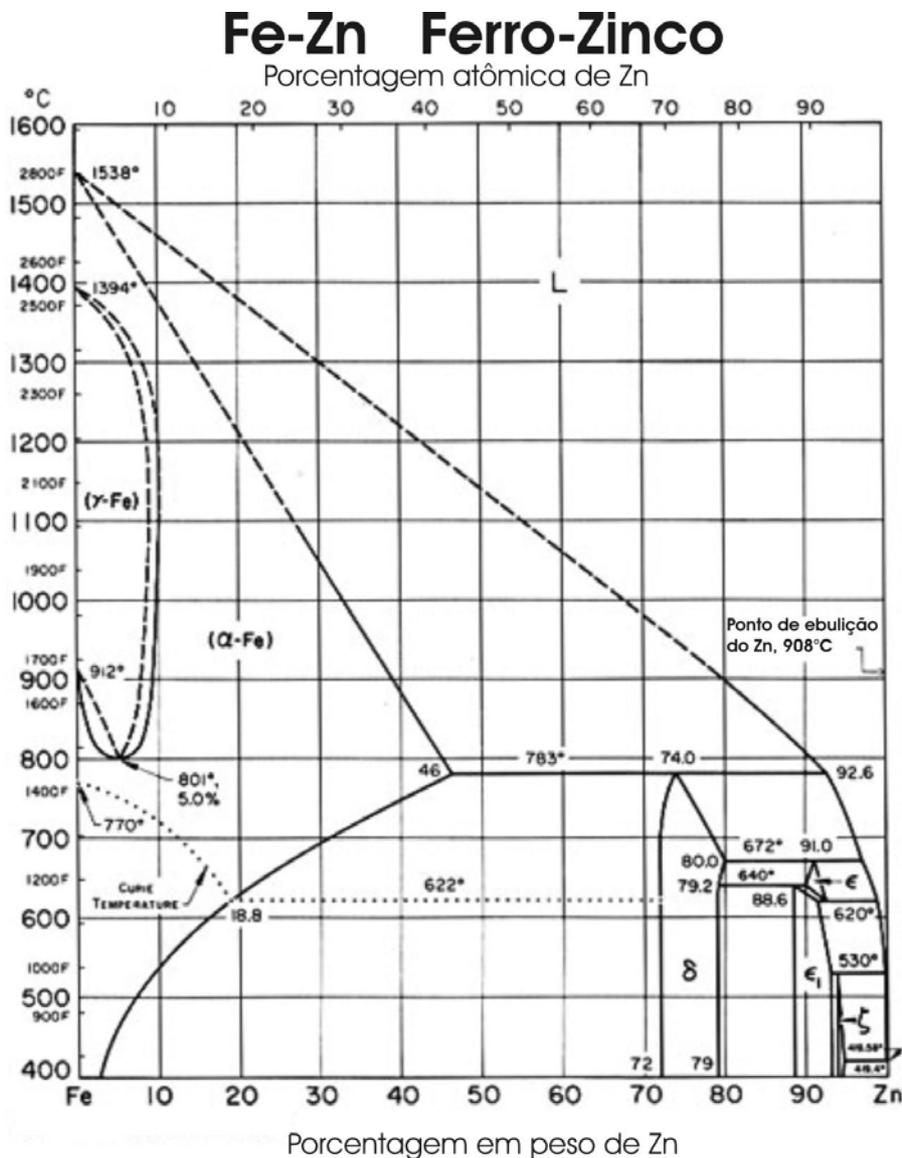
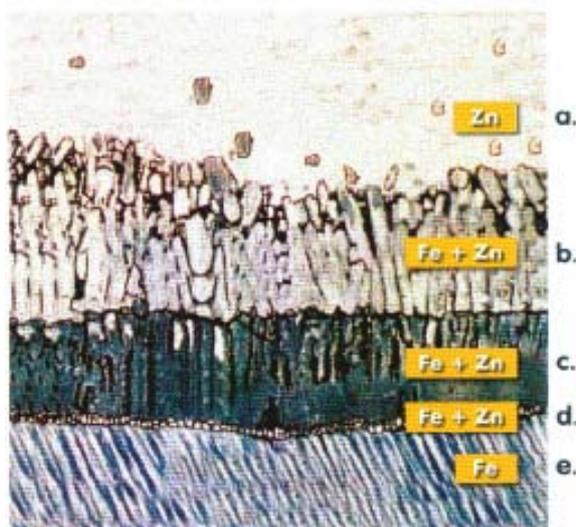


Figura 14 - Diagrama de equilíbrio do sistema Fe-Zn [ 35 ].

De acordo com o Welding Handbook [ 32 ] as fases da liga Fe-Zn varia em função da faixa de composição e temperatura e apresentam a formação de quatro compostos intermetálicos, que são: fase gama -  $\Gamma$  (  $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$  ); fase delta -  $\delta$  (  $\text{FeZn}_7$  ); fase zeta -  $\zeta$  (  $\text{FeZn}_{13}$  ); e fase eta -  $\eta$  (  $\text{Zn}$  ). As fases gama, delta e zeta resultam da difusão do ferro na camada de zinco, e a camada eta se forma a partir do zinco fundido que se adere nas camadas intermetálicas quando o material é retirado do banho. De acordo com FREIRE e BRESCIANI FILHO [ 33 ], com relação às estruturas destas camadas pode-se dizer que: A fase gama possui uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado ( CCC ), contendo 23,2 a 31,3% Fe, na qual predomina o composto  $\text{FeZn}_3$ . Sobre a fase gama encontram-se as camadas delta-1 e delta que possuem estrutura cristalina hexagonal, apresentando uma composição de 8,1 a 13,2% Fe para delta-1 e 8,1 a 11,5% Fe para delta, em ambas predominando o composto  $\text{FeZn}_7$ . Sobre as camadas delta encontra-se a camada zeta, que contém aproximadamente 7,2 a 7,4% Fe, predominando o composto  $\text{FeZn}_{13}$  de estrutura cristalina monoclinica. Na camada mais externa do revestimento encontra-se a fase eta, formada de Zn relativamente puro, que é arrastado do banho pela chapa. Esta camada apresenta um teor de Fe da ordem de 0,02% e tem estrutura cristalina hexagonal, Figura 15.



- a - Camada externa Eta, Zn relativamente puro
- b - Camada Zeta (Zn-Fe) com 7,2 a 7,4% Fe
- c - Camada Delta (Zn-Fe) com 8,1 a 13,2% Fe
- d - Camada Gama (Zn-Fe) fina e com 23,2 a 31,3% Fe
- e - Aço (material de base)

Figura 15 - Micrografia do aço galvanizado, aumento de 250 X [ 22 ].

A espessura da primeira camada de liga, camada gama, é bastante constante, sendo que as demais podem variar fortemente em função das condições do processo de zincagem. Em casos extremos o revestimento poderá ser constituído quase que inteiramente de camadas de liga ou quase inteiramente de Zn puro. Deste modo, a espessura do revestimento total, assim como da camada de liga dependem de diversos parâmetros: temperatura do banho, composição do aço, teor de alumínio no banho, aplicação do produto, etc..

O controle da redução na formação de camadas intermediárias permite a obtenção de um revestimento dúctil, resultando em um material zincado que pode ser conformado sem causar trincas e sem soltar o revestimento de Zn [ 20 ], que são situações desejadas nos processos de zincagem à quente. Para se obter estas características o Alumínio ( Al ) é adicionado ao banho de Zn fundido para exercer influência sobre as reações que ocorrem entre o Fe e o Zn, e controlar as características físicas, entre elas a espessura e a aparência superficial dos produtos zincados, permitindo também, a obtenção de revestimentos zincados com elevada aderência [ 19, 32 ]. Já as camadas intermediárias, delta e zeta são pouco espessas ou praticamente inexistentes.

Dentre os produtos zincados a quente, os convencionais, sem tratamento posterior, são principalmente utilizados pelo setor de construção civil onde os principais requisitos são de resistência à corrosão, conformabilidade e aparência estética. Os que recebem tratamento de recozimento da camada são consumidos preferencialmente pelos setores automobilísticos e de eletrodomésticos, onde, além dos requisitos anteriores, ainda é necessário possuir característica de boa soldabilidade e adequação como substrato para pintura [ 20 ].

## II. 10 – PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO

A tecnologia de galvanização é reconhecidamente um dos processos mais efetivos e econômico, empregado para proteger o aço contra a corrosão [ 22 ], e tem alcançado ótima aceitação na proteção do aço [ 29 ]. A excelente resistência à corrosão em diferentes ambientes e sua facilidade de ligação metalúrgica ao aço, tornam Zn um dos mais importantes revestimentos usados para proteger o substrato contra a corrosão atmosférica [ 22 ]. A capacidade mundial de produção de chapa galvanizada por imersão à quente, que é um dos métodos de aplicação do revestimento mais usado, é de aproximadamente 22 milhões de toneladas, e para atender o crescente consumo desse produto no Brasil, foram instaladas recentemente duas linhas de galvanização à quente, que aumentaram a oferta em 750 mil toneladas de produtos galvanizados por ano [ 34 ].

A Galvanização por Imersão à Quente ( “HOT DIP GALVANIZING” ), também conhecida por galvanização a fogo, é o principal método de aplicação de revestimento protetor de Zn para os aços e ferros. Porém, existem outros quatro métodos tão importantes quanto àquele; e cada qual possui sua própria particularidade de aplicação [ 19, 22 ]; Eletrodeposição ( “PLATING” ), Metalização ( “SPRAYING” ), Sheradização ( “SHERARDIZING” ) e Pintura Rica em Zn ( “ZINC RICH PAINT” ). Independente do processo utilizado para a realização do revestimento, ele é genericamente chamado de Galvanização. De acordo com SLUNDER e BOYD [ 35 ], cada um desses processos tem suas particularidades e devem ser utilizados, de modo a atender objetivos específicos. Atualmente o mercado mundial consumidor de galvanizados se concentra mais largamente em produtos revestidos de Zn por deposição contínua por imersão à quente, do qual se obtém uma ampla faixa de espessuras de revestimentos, e em seguida, na Galvanização Eletrolítica que também pode se obter espessuras de revestimentos variados [ 19 ].

## II. 10.1 – Galvanização Eletrolítica

Até a década de 70, a maioria das eletrodeposições de Zn era obtida através de banhos à base de cianetos. Atualmente, está ocorrendo uma substituição desses banhos, por banhos de Zn à base de cloretos e sulfatos, devido ao seu maior desempenho e menor toxicidade [ 36 ]. Na zincagem eletrolítica, o Zn é eletroliticamente depositado no metal de base, formando camadas bem homogênea, fina e muito aderente, adequada a um produto que precisa sofrer conformação posterior [ 19, 22 ]. Este tipo de revestimento com espessura geralmente entre 2,5 a 25 micrometros é usado onde a rugosidade ou acabamento irregular não podem ser tolerados. Atualmente se encontram no mercado chapas com espessuras que variam desde 0,4 até 1,6 mm com esse tipo de revestimento [ 29 ]. O custo deste produto em relação ao aço zincado por imersão à quente é menor, porém sua resistência à corrosão também é inferior, Figura 16.

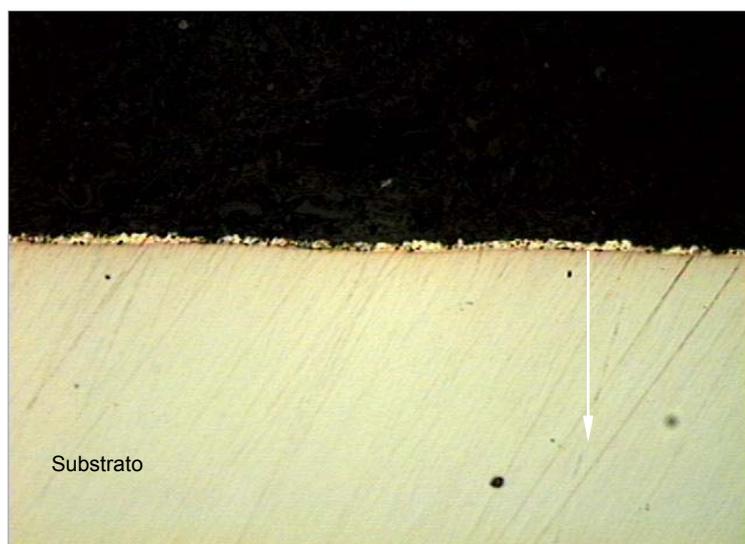


Figura 16 – Revestimento eletrolítico com aumento de 200X.

## II. 10.2 – Galvanização Contínua por Imersão à Quente

O processo, como o próprio nome indica, consiste na imersão de peças de aço previamente preparadas, em banho de Zn fundido para formar o revestimento. Portanto, na zincagem por imersão à quente a peça é submersa em um banho de zinco fundido a 450°C e este adere e se difunde no metal de base que normalmente é o ferro ( aço ). A difusão do Fe em direção a camada de Zn promove transformações metalúrgicas, gerando camadas intermetálicas com teor crescente de zinco até a superfície, onde permanece uma camada de zinco puro [ 19, 32 ]. O resultado é um revestimento bastante aderente, entre 2,5 a 254 micrometros, permitindo conformação e estampagem profunda, com utilização na indústria automobilística [ 29 ], Figura 17.

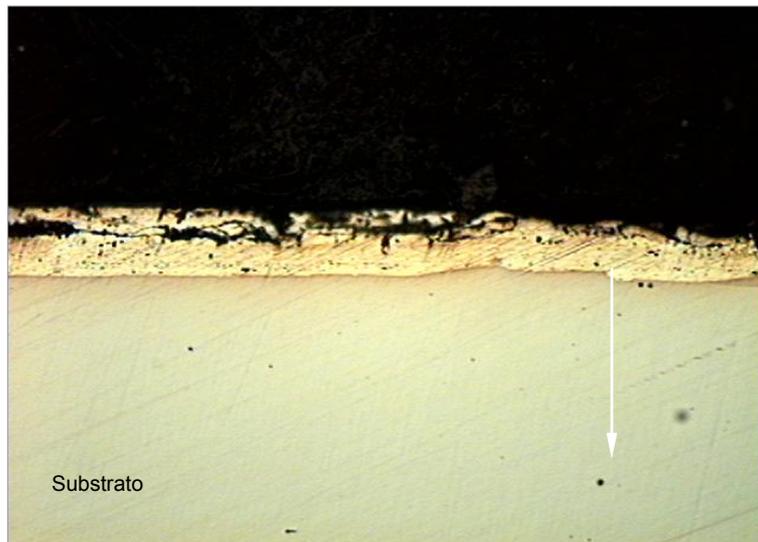


Figura 17 – Revestimento por imersão a quente com aumento de 200X.

Na prática o processo não é tão simples e muitos fatores influenciam na formação de um revestimento satisfatório. A Figura 18 mostra de forma simplificada as principais etapas de processamento numa linha de zincagem contínua por imersão à quente [ 37 ].

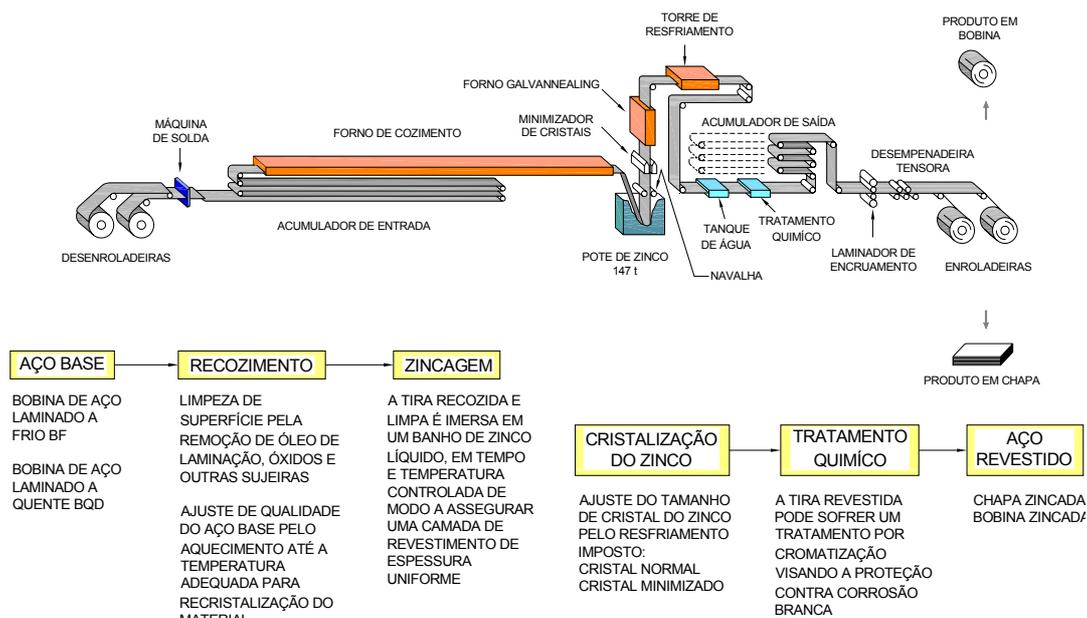


Figura 18 – Diagrama esquemático do processo de zincagem por imersão à quente extraída do Manual do Aço zincado da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, 1996.

As principais considerações técnicas sobre os equipamentos e processos de uma linha de galvanização, por imersão à quente, são divididas em três partes principais [ 20, 37 ]: a - Seção de Entrada; b - Seção de Processo; e c - Seção de Saída; sendo importante destacar a Seção de Processo onde deve ser respeitada uma seqüência de etapas para se obter as chapas zincadas com uma camada de Zn contínua, aderente ao substrato e mais uniforme possível.

a - Seção de entrada: nesta seção podemos destacar a máquina de solda, onde são realizadas as sucessivas uniões de ponta e cauda das bobinas, o que garante a contínua passagem da tira através da linha de galvanização, como se fosse uma bobina de comprimento infinito. A seguir, são removidos das superfícies da tira todos os resíduos de óleo e sujeira, oriundos do processo de laminação, através da atuação subsequente dos seguintes agentes de limpeza:

- Limpeza Química: A ação de limpeza ocorre pela reação química de um desengraxante alcalino ( geralmente soda cáustica – NaOH ) com os óleos ( vegetal ou animal ) presentes na superfícies da tira.
  
- Limpeza Eletrolítica: A ação de limpeza se desenvolve basicamente através da utilização de dois eletrodos de aço que são dispostos em lados distintos da tira de aço ( face superior e face inferior ). O processo consiste em fazer passar uma corrente elétrica em uma solução aquosa contendo uma base forte ( NaOH ) que se dissocia em Na<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup>, como consequência de reações eletroquímicas nestes eletrodos, ocorre intensa geração de gases em ambas as faces da tira. Os gases gerados ( H<sub>2</sub> no catodo e O<sub>2</sub> no anodo ) promovem por ação mecânica a remoção de partículas residuais de óleo e sujeira, presos à superfície da tira.
  
- Limpeza por Ação Mecânica: Antes e após a limpeza eletrolítica, a tira passa através de um conjunto de rolos escovadores, que auxiliam a limpeza da superfície da tira.

b - Seção de Processo: os principais equipamentos desta seção são: 1 - Forno de Recozimento; 2 - Torre de Resfriamento; 3 - Pote de Zinco; 4 - Sistema de Controle de Revestimento de Zn ( navalhas de ar ); 5 - Forno de “Galvannealing”; 6 - Laminador de Encruamento; 7 - Tratamento Químico – Cromatização.

1 - Forno de Recozimento: os propósitos do forno de recozimento em uma linha de Galvanização, em geral, são: redução de eventuais filmes de oxidação na superfície da tira, por meio de reações com o Hidrogênio e; efetuar tratamento térmico de recozimento da tira laminada a frio, a fim de se obter propriedades mecânicas pré-estabelecidas. E para atender os objetivos anteriormente descritos e de maneira eficiente, os fornos de recozimento são em geral subdivididos em Zona de Aquecimento

( “Pré-beating and beating” ), Zona de Redução ( “reduction or soaking zone” ) e Zona de Resfriamento ( “jet cooling zone and control cooling zone” ). Já o ciclo térmico, neste tratamento, é definido em função do tipo de material, visando obter as propriedades mecânicas requeridas pelo produto. Elevadas temperaturas de recozimento ( 820°C – 880°C ), são necessárias para o caso dos aços com carbono ultrabaixo ( aço IF ). A Figura 19 ilustra os diferentes ciclos térmicos, que a tira de aço pode ser submetida numa linha de Galvanização Contínua por imersão à Quente, os quais dependem das seguintes especificações: qualidade comercial ( QC ); estampagem média ( EM ); estampagem profunda ( EP ); estampagem extra profunda ( EEP ); full hard ( FH – material laminado a frio que não foi recozido, permanecendo com os grãos alongados ) e estampagem extra profunda de aços ultra baixo carbono, livre de intertícios ( EEP-IF ).

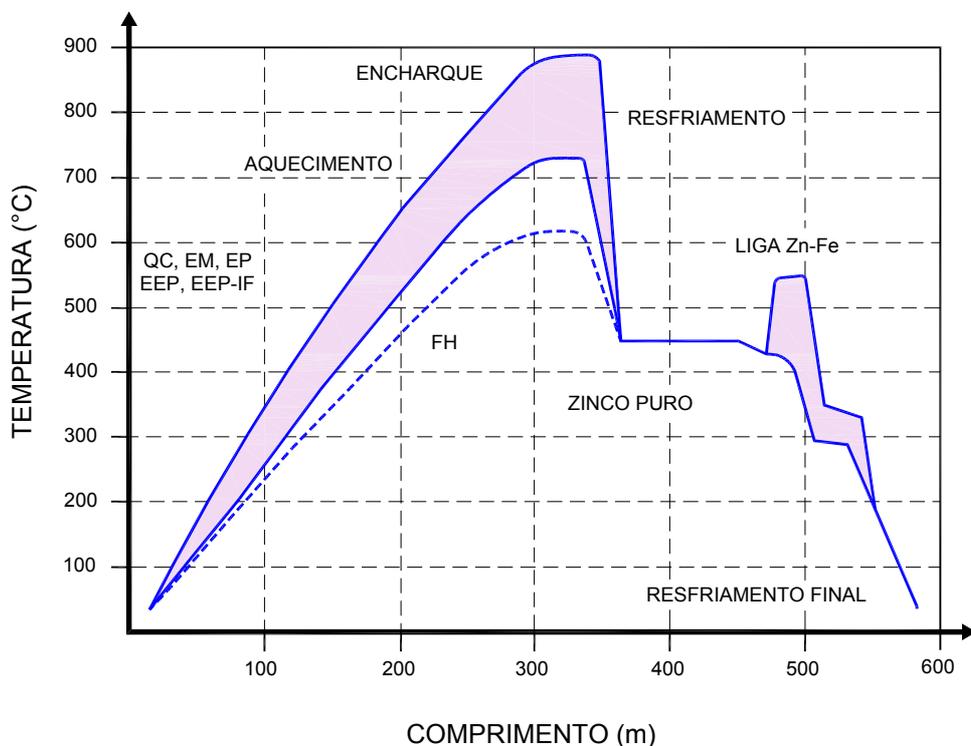


Figura 19 – Ciclos térmicos típicos de uma linha de galvanização contínua por imersão à quente [ 20 ].

2 - Torre de Resfriamento: Na zona de resfriamento, a tira é resfriada para temperatura apropriada para imersão da mesma no pote de Zn.

3 - Pote de Zinco: após o recozimento, a temperatura da tira é controlada para atingir um valor adequado para imersão no banho de Zn. Em seguida a tira é guiada através do “snout”, para dentro do pote de Zn fundido a 450°C, onde a camada de Zn é depositada e este adere e se difunde no metal de base que normalmente é o ferro ( aço ). A Figura 20 mostra esquematicamente um Pote de Zinco com seus componentes básicos.

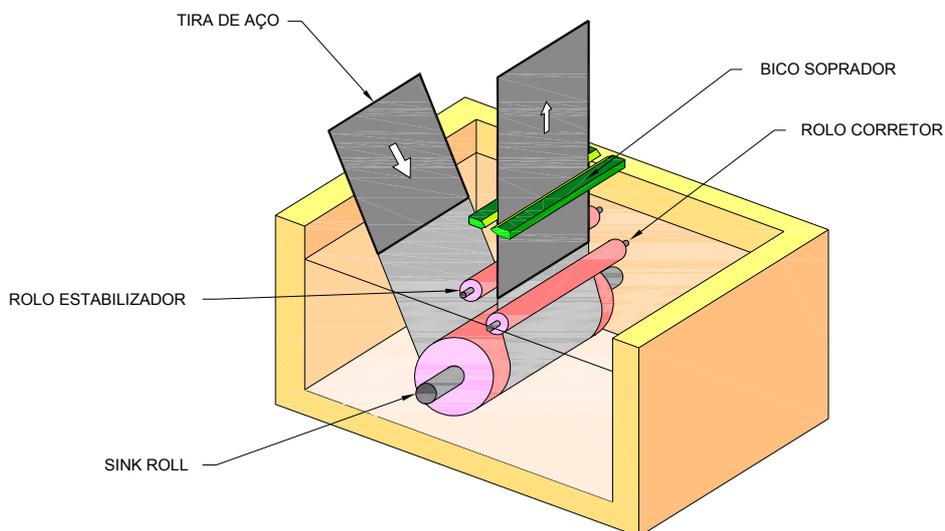


Figura 20 - Detalhe da passagem da tira de aço pelo pote de Zinco fundido [ 20 ].

Inicialmente o Zn adere à superfície do aço formando uma fina camada de Zn e à medida que o material permanece no banho de Zn, a difusão atômica do Fe intensifica, promovendo transformações metalúrgicas e gerando camadas intermetálicas ( Zn-Fe ), com teor crescente de Zn até a superfície, onde permanece uma camada de Zn puro [ 30, 32 ]. Nesse aspecto, a conformabilidade do revestimento fica limitada por causa da natureza frágil das camadas intermetálicas. Para inibir o crescimento dessas camadas é feita a adição de Alumínio ( Al ) ao Zn

fundido, com o objetivo de formar uma camada ternária ( Fe-Al-Zn ) de finos compostos intermetálicos, entre a interface do substrato e do revestimento de Zn. Este composto mantém boa aderência da camada de revestimento, e evita o crescimento das camadas de liga Zn-Fe durante a Galvanização [ 32 ]. Deste modo o procedimento promove um revestimento mais maleável e portando, facilita a conformação das chapas finas de aço zincadas com a mesma facilidade que as não zincadas [ 38 ].

4 - Sistema de Controle de Revestimento de Zn: logo após a passagem da tira de aço pelo pote de Zn fundido, procede-se uma operação de controle de revestimento de Zn da seguinte forma [ 20 ]: o peso ou a espessura de revestimento de Zn a ser depositado é controlado utilizando um sistema de sopro de ar comprimido - “gas wiping”, logo que a tira emerge o banho de Zn. Em seguida é soprado nitrogênio ao longo de toda a largura da tira, através de navalhas de ar “air knives”, Figuras 21a e 21b. O peso do revestimento Zn é determinado, principalmente, de acordo com a velocidade da linha, pressão e fluxo do gás, formato do bico soprador, distância entre os bicos sopradores e a tira, e distância das navalhas à superfície do banho.

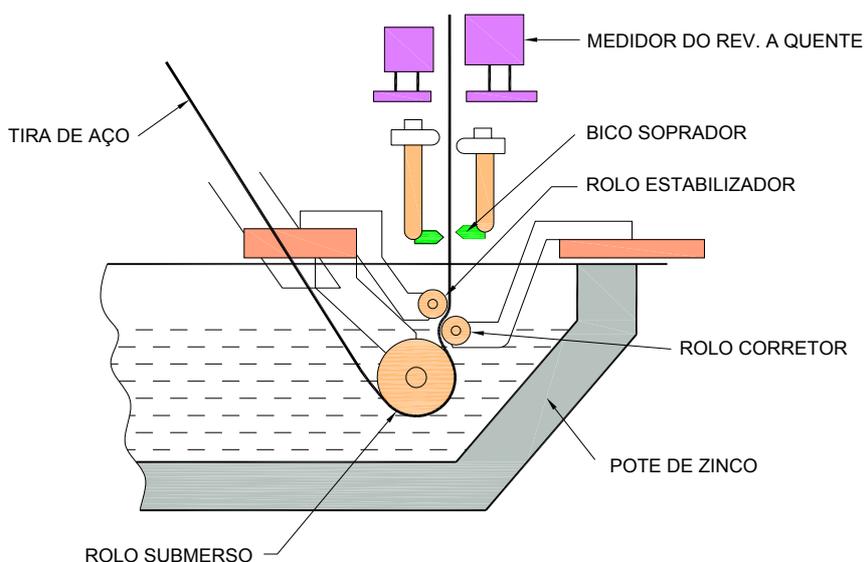


FIGURA 21a – Detalhe do sistema de controle de revestimento [ 20 ].

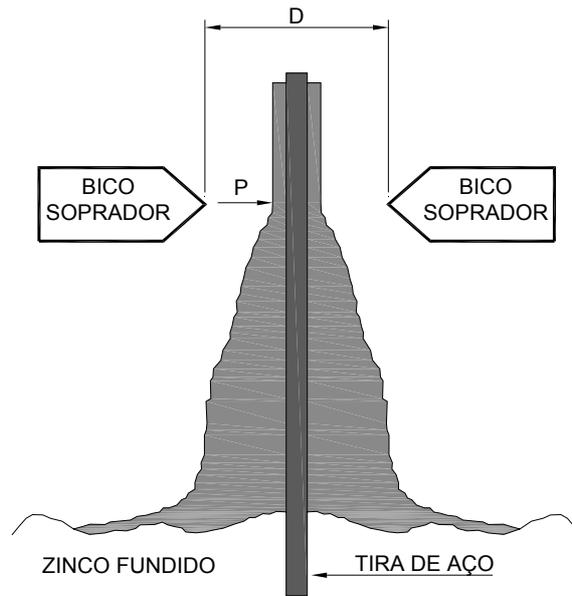


Figura 21b – Detalhe da passagem da tira de aço pelas navalhas de ar [ 20 ].

5 – Forno de Galvannealing: para melhorar suas características de pintabilidade, soldabilidade, e aumentar a aderência da camada no material de base, as tiras de aço após a zincagem à quente recebem um tratamento de recozimento da camada, denominado “Galvannealing” [ 20 ]: O tratamento consiste no reaquecimento do produto recém zincado, numa faixa de temperatura entre 460°C e 520°C, imediatamente após passar pelo controle de revestimento. Este tratamento, sob condições controladas, garante a intensificação da difusão do Fe e a produção de intermetálicos, enquanto todo o Zn livre é consumindo. A Figura 22 mostra esquematicamente o mecanismo de transformação da camada de revestimento de Zn para liga Zn-Fe.

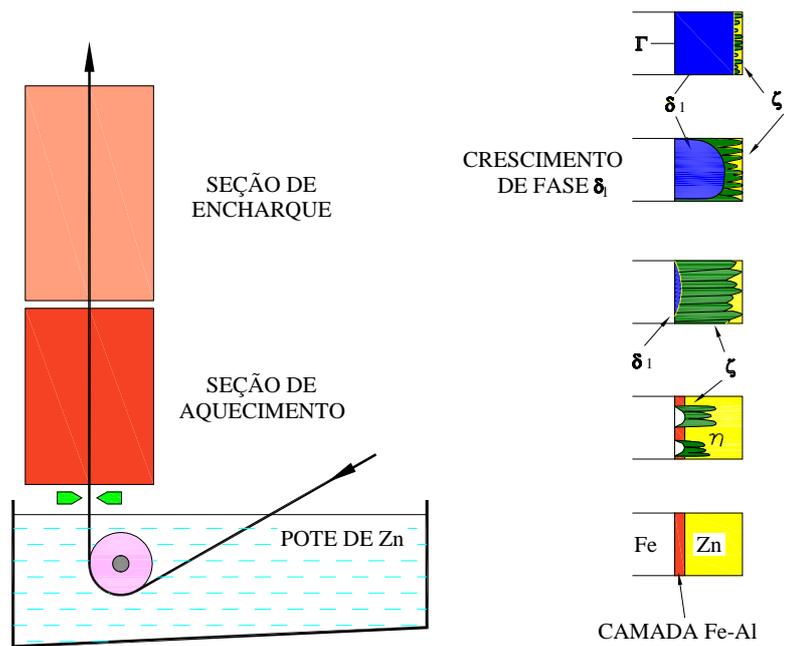


Figura 22 – Transformação do Zn em ligas de Zn-Fe, durante o processo de galvannealing [ 20 ].

Pelo mecanismo acima, a transformação do Zn puro em liga Zn-Fe ocorre devido à difusão do ferro do aço base para dentro do revestimento. Inicialmente a tira de aço apresenta um revestimento de Zn, ligado ao aço através de uma fina camada de liga ( Fe-Al ou Fe-Al-Zn ). Ao entrar na seção de aquecimento do forno de “galvannealing” o processo de difusão é intensificado e, desta forma, o ferro difunde-se para dentro do revestimento, rompendo a camada de liga Fe-Al. A primeira fase a se formar é denominada fase zeta ( $\zeta$ ) que constitui uma liga com teor mais baixo de ferro ( 6,7 a 7,2% ). Com o passar do tempo, mais ferro se difunde para a camada do revestimento criando condições propicias para formação da fase delta ( $\delta$ ) que possui teor de ferro aproximadamente na faixa de 8,5% a 13%. Prosseguindo o aquecimento, ocorre o crescimento da fase delta e, simultaneamente, a diminuição da quantidade da fase zeta ( $\zeta$ ). Ao final do ciclo de “galvannealing” a camada de revestimento se

encontra completamente transformada em ligas do sistema Zn-Fe, apresentando uma fina camada gama ( $\Gamma$ ) na interface entre o revestimento e o aço, camada ( $\delta$ ) que tem presença predominante no revestimento, e uma pequena quantidade de cristais zeta ( $\zeta$ ) que podem estar presentes na camada mais superficial do revestimento. Portanto as camadas de ligas Zn-Fe estão presentes no revestimento seguindo a ordem  $\Gamma$ ,  $\delta$  e  $\zeta$ , do metal de base para a superfície do revestimento; e de acordo com a diferença de velocidade de formação de cada fase, a camada  $\Gamma$  é mais fina e a maior parte das camadas de liga torna-se  $\delta$ . A Tabela II. 3 apresenta as propriedades físico-químicas de cada camada de liga, presentes no revestimento “galvannealing”.

Tabela II. 3 – Propriedades físico-químicas das camadas da liga Fe-Zn [ 20 ].

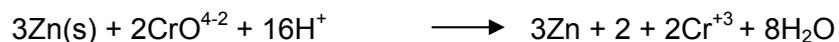
Fases	Fórmula Química	Conteúdo de Ferro ( % peso )	Sistema Cristalino	Densidade ( g/cm <sup>3</sup> )	Dureza ( Hv )
$\eta$ ( Eta )	Zn	Máximo 0,03	Hexagonal	7,14	52
$\zeta$ ( Zeta )	FeZn <sub>13</sub>	6,7 ~ 7,2	Ortorrômico	7,15	200
$\delta$ ( Delta-1 )	FeZn <sub>7</sub>	8,5 ~ 13,0	Hexagonal	7,24	284 ~ 300
$\Gamma$ ( Gama-1 )	Fe <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub>	18,5 ~ 23,5	CFC	---	505
$\Gamma$ ( Gama )	Fe <sub>3</sub> Zn <sub>10</sub>	24,0 ~ 31,0	CCC	7,36	326
Fe- $\alpha$ ( Fe-alfa )	Fe	---	CCC	7,86	104

O processo de “galvannealing” envolve as etapas de aquecimento, encharque e resfriamento. Diferentes ciclos térmicos podem ser utilizados, sendo estes caracterizados principalmente pela temperatura de saída da seção de aquecimento do forno. O controle destes ciclos, assim como a de outras variáveis importantes tais como o peso da camada de revestimento, tem efeito direto no teor de Fe da camada de revestimento, das chapas “galvannealed”. O teor de Fe e o peso de

revestimento na camada de Zn são os principais parâmetros de controle no processo “galvannealing”.

6 - Seção de Laminação de Encruamento: após o forno de “galvannealing”, a tira de aço já resfriada na torre de resfriamento é processada no laminador de encruamento e desempenadeira por tensão, com os seguintes propósitos: melhoria das propriedades mecânicas do material recozido, melhoria da rugosidade e brilho superficial, melhoria das características de forma do material ( planicidade ) e melhoria da aparência superficial através da redução de defeito ( dentes, marcas de rolo, etc. ).

7 - Seção de Tratamento Químico: o tratamento químico tem a finalidade de preservação temporária das chapas zincadas, mantendo o brilho da superfície recém-zincada durante a estocagem, aumentar a resistência à corrosão branca do revestimento de Zn, no caso de exposição em ambientes úmidos. O tratamento químico mais utilizado é a cromatização, que consiste da aplicação na tira de uma solução aquosa que contém tradicionalmente íons cromatos, como principal componente, conforme mostrado abaixo:



O resultado é a redução do  $\text{Cr}^{+6}$  para  $\text{Cr}^{+3}$ , o que ocorre simultaneamente com o aumento do pH da superfície. Este aumento de pH causa a precipitação de hidróxido de cromo (  $\text{Cr}^{+3}$  ) na superfície do Zn, que constitui o filme de cromato, conforme mostrado na Figura 23.

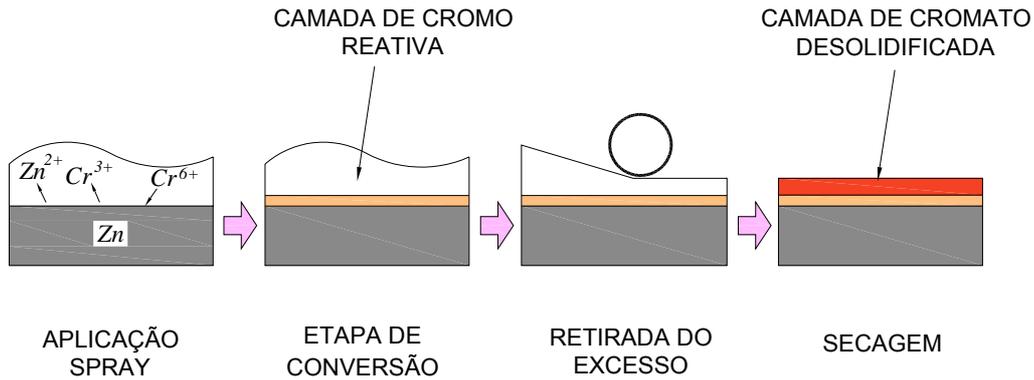


Figura 23 – Mecanismo de formação do filme de passivação crômica [ 20 ].

## II. 10.3 – ASPECTO SUPERFICIAL, TIPOS DE REVESTIMENTOS E APLICAÇÕES

Conforme NATAL [ 39 ], as chapas zincadas podem ser fabricadas com revestimentos iguais em ambas às faces ou revestimentos diferenciados entre as mesmas, e com espessuras diferentes. Quanto ao acabamento superficial, estes podem ser distintos e classificados como cristais normais, cristais minimizados e superfície extra-lisa. A Figura 24 apresenta os aspectos de superfícies e microestruturas dos diferentes revestimentos obtidos pelo processo de galvanização por imersão à quente [ 20 ]:

- **Cristais Normais:** revestimento de Zn puro obtido por uma solidificação normal da camada depositada, resultando uma superfície com aparência de flores. Este tipo de revestimento é mais indicado para uso geral, principalmente em aplicações do segmento da construção civil tais como: coberturas, tapamentos laterais, perfis estruturais leves, etc.

- **Cristais Minimizados:** revestimento de Zn puro, obtido por solidificação acelerada, proporcionada em geral, pela aplicação na superfície recém zincada de um fluido refrigerante. Este tipo de revestimento é recomendado para aplicações onde os requisitos de superfícies não são plenamente atendidos pelo revestimento com cristais normais, sendo, em geral, destinados principalmente á indústria automobilística e de utilidades domésticas ( linha branca ), que recebem tratamento de pintura.
  
- **Revestimento de Liga Zn-Fe ( Galvannealed ):** revestimento obtido pelo reaquecimento da chapa, imediatamente após a deposição do Zn, o que transforma completamente a camada de Zn recém depositada em ligas do sistema Zn-Fe. Esta camada possui em média 11% de Fe. A presença do Fe no revestimento melhora significativamente as características de soldabilidade e de aderência de pintura, sendo por tanto, especialmente indicada para utilização na indústria automobilística.

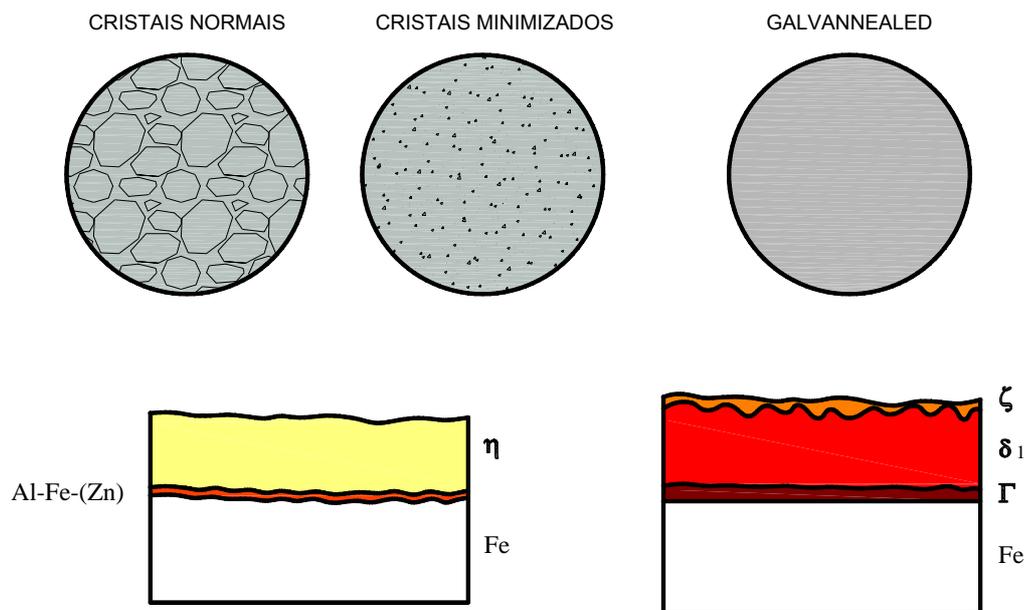


Figura 24 – Tipos de revestimentos em Zn puro e em forma de liga Zn-Fe [ 20 ].

## II. 11 – SOLDAGEM DE CHAPA DE AÇO ZINCADA PELO PROCESSO GMAW

Os problemas inerentes à soldagem a arco de aços zincados, são devidos às propriedades físicas do Zn. Este elemento possui baixa temperatura de vaporização ( aproximadamente  $906^{\circ}\text{C}$  ), em relação às temperaturas envolvidas na fusão do material de base e do consumível ( superior a  $1530^{\circ}\text{C}$  ). Esta propriedade [ 1 ] apresenta um efeito desfavorável nos processos de soldagem a arco, visto que o Zn começa a evaporar tão logo o arco elétrico é aberto. Além do mais, os vapores e óxidos de Zn também contribuem [ 1 ] na formação de poros, fusões inadequadas, trincas e um arco elétrico instável, sem falar nas altas temperaturas promovidas pelo processo de soldagem, que são responsáveis pela remoção da camada de revestimento que confere propriedades anticorrosivas ao aço. Um outro problema que também deve ser controlado é a concentração de fumos metálicos, pois durante a soldagem, o Zn do revestimento se volatiliza e forma óxido de Zn ( composto branco ) que se inalado em grande quantidade provoca desconforto ao soldador [ 40 ]: irritação das vias respiratórias, febre e vômito. No entanto o grande aumento, nos últimos anos, da utilização de produtos galvanizados tem conduzido às indústrias a intensificar pesquisas voltadas para a união desse material.

PERDIGÃO [ 41 ] destaca que a técnica de soldagem empregada tem grande influência na formação dos poros que se formam pela nucleação e crescimento de bolhas de gás ou vapor, enquanto o metal de solda está em processo de solidificação. Assim sendo, uma das variáveis significativas na ocorrência da porosidade é a quantidade de gás ou vapor presente no sistema. Outra variável crítica é a taxa de solidificação do metal como soldado. Para baixas taxas de solidificação, as bolhas têm maior possibilidade de escapar da poça fundida, enquanto que para altas taxas de solidificação, as bolhas ficam aprisionadas. Portanto, variações nas condições de soldagem como a corrente, tensão do arco ou velocidade de soldagem,

podem afetar a taxa de solidificação do metal de solda, que por sua vez influencia a quantidade de poros no metal de solda. Dentre as ações possíveis para minimizar o problema da porosidade, que é consenso de literatura [ 42 ], é a diminuição da velocidade de soldagem e o sentido de deslocamento da tocha, ambos permitem a volatilização e o escape do vapor de Zn à frente da poça fundida, antes de solidificar-se. Já a formação de respingos aumenta [ 42 ] com a espessura da camada de revestimento de Zn, e também está associada à instabilidade do arco elétrico, provocada também pelos vapores de Zn. Para minimizar o respingo, é necessário soldar com um arco elétrico curto [ 43 ].

Outro problema na soldagem de chapas zincadas é o surgimento de trincas causadas pela penetração intragranular do Zn no metal de solda. O mecanismo de formação dessas trincas em chapas zincadas é similar à corrosão sob tensão [ 44 ] e está associado ao zinco líquido sob esforços da magnitude do limite de escoamento do metal de solda. A Figura 25 mostra este tipo de trinca que é comum se formar ao longo da garganta de uma solda de filete em chapas de espessura superior a 6,4 mm, executada através do processo GMAW tendo como gás de proteção o dióxido de carbono ( CO<sub>2</sub> ) [ 45 ].

Segundo a American Welding Society – AWS [ 32 ], se uma quantidade excessiva de Silício ( Si ) ou Magnésio ( Mg ) estiver presente num consumível, esses elementos podem se concentrar entre as “dendritas” durante o processo de solidificação e produzir regiões críticas onde o Zn fundido pode penetrar facilmente, enfraquecendo aquela região e propiciando a formação de trinca. Nesse aspecto surgem divergências, pois SUGA [ 46 ] informa que aumentando o teor de Si e Mn no arame, promove um aumento na viscosidade da poça fundida, evitando assim o aparecimento das bolhas de gás e dos respingos provocados pelo vapor de Zn. BANG et al [ 47 ] também concluiu que arames com desoxidantes tais como Titânio ( Ti ), Si e

Mg favorecem a formação de um arco com menor gradiente de energia potencial do que os arames sem desoxidantes, resultando em um arco mais estável, reduzindo assim a geração de respingos. Outros inconvenientes na soldagem a arco do aço zincado são as perdas de revestimento nas áreas adjacentes ao cordão de solda e a formação de fumos que são prejudiciais à saúde do soldador [ 41 ]. Este problema pode ser resolvido de forma eficiente com o uso de extratores de fumos que são adaptados de forma a se movimentar ao longo da junta à medida que mesma vai sendo soldada [ 38 ], tendo-se o cuidado, é claro, de não prejudicar a proteção gasosa.

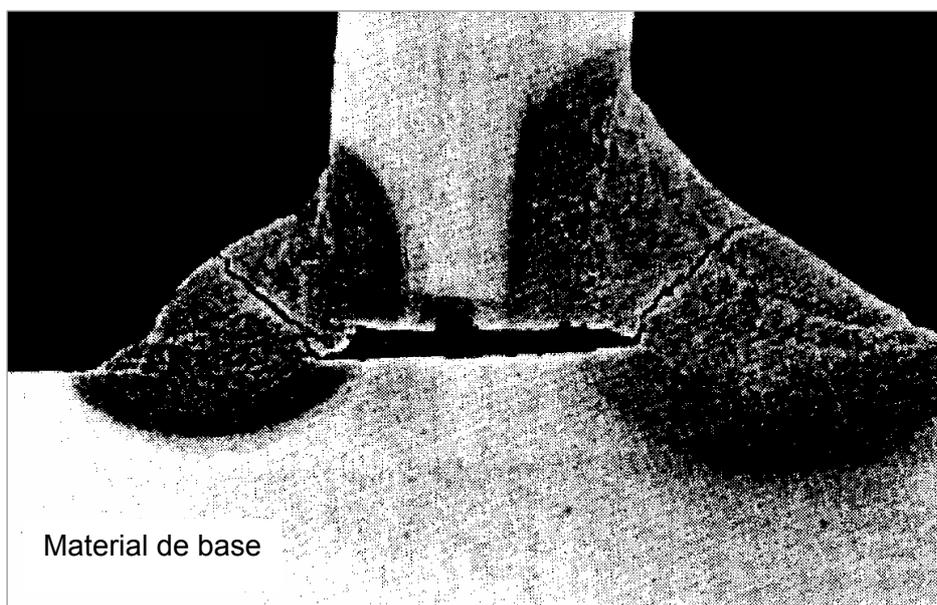


Figura 25 – Trinca por penetração de Zn em junta de ângulo em “T” de chapas zincadas de 6 mm, soldadas pelo processo GMAW, extraída da AWS – 1998.

## **II. 11.1 – Técnicas de Soldagem**

KJELD [ 48 ] afirma que a técnica de soldagem “puxando” ajuda a estabilizar o arco elétrico concentrando o calor, o qual reduz a quantidade de Zn volatilizado fora da poça de fusão. Já a técnica “empurrando”, devido à tendência a pré-aquecer a frente da poça, complica a soldagem da chapa zincada, volatilizando excessivamente o Zn.

No entanto, PERDIGÃO [ 41 ] assinala que a volatilização do Zn à frente da poça de fusão, na mesma técnica “empurrando”, minimiza possíveis problemas de porosidade em comparação com a técnica “puxando”, onde o Zn tenderia a ficar aprisionado pelo posicionamento do arco elétrico.

## **II. 12 – BRASAGEM**

### **II. 12.1 – Definição**

A American Welding Society – AWS [ 2 ], define brasagem como um grupo de processos de soldagem que produz a coalescência de materiais pelo aquecimento dos mesmos a uma temperatura conveniente, utilizando-se um material de adição, tendo a linha “LIQUIDUS” acima de 450°C e esta abaixo da linha “SOLIDUS” dos materiais de base. O material de adição fundido molha a superfície do material de base e é distribuído entre as juntas, precisamente ajustadas e espaçadas, através do efeito capilar. Este fenômeno está diretamente relacionado com sua molhabilidade diante da superfície dos sólidos [ 49 ].

Já a Norma DIN 8505 [ 49 ], define brasagem como um processo térmico para união de materiais, que é produzido por uma fase líquida de um metal de adição

fundido ( brasagem por fusão ) ou por difusão na interface líquido-sólido ( brasagem por difusão ), onde a temperatura “solidus” do material de base não é atingida.

## II. 12.2 – Fundamentos da Brasagem

DOLGOV e SIDOKHINE [ 50 ] informam que o fundamento da brasagem consiste em uma reação limitada entre a superfície de um material de adição fundido e a fase sólida de um material de base rígido. A reação superficial que ocorre entre sistemas sólido-líquido está compreendida entre a propagação do material de adição, por umectação ( molhagem ), através de um contato metálico, assim como a eficiência da energia de adesão ( força superficial atômica ) e difusão através de solução sólida.

RAMALHO, ADAMSON & GASTRO [ 51, 52 ] também informam que utilizando-se os processos de brasagem na união de materiais, os fenômenos de Molhamento, Espalhamento e Capilaridade aparecem e estes estão relacionados às propriedades e ao comportamento dos mesmos, em situações de interação em diferentes estados, e que são regido por leis da física. A molhagem da superfície [ 50 ] é o fenômeno pelo qual uma gota metálica fundida se propaga sob o substrato sólido em um sistema de três componentes: o substrato; o material de adição e o fluxo ou gás. Considerando, ainda, o sistema em equilíbrio de forças ( Figuras 26 e 27 ), observa-se que a molhabilidade é dependente das energias interfaciais do líquido e sólido em contato e pode ser descrita pela equação de Young-Dupré [ 50, 52 ] mostrada a seguir:

$$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_H$$

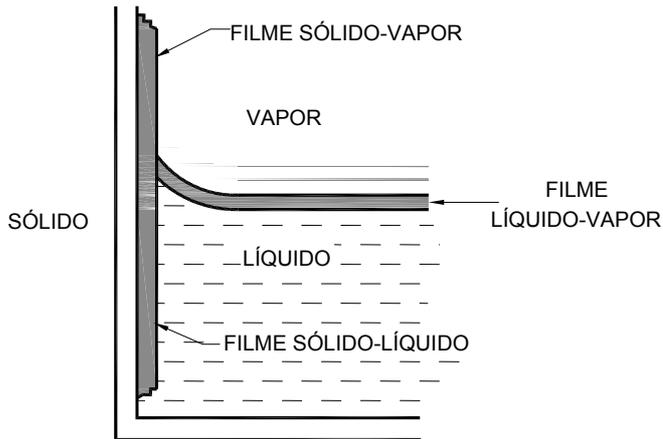


Figura 26 – Tensão superficial entre interfaces sólido, líquido e

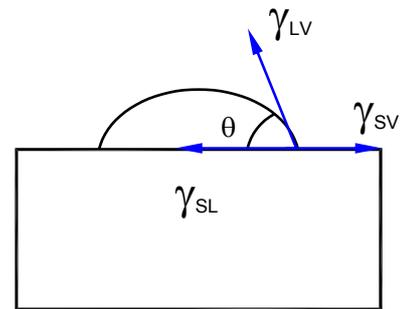


Figura 27 – Esquema do equilíbrio de forças geradas

Onde  $\gamma_{sv}$ ,  $\gamma_{sl}$  e  $\gamma_{lv}$  são as energias interfaciais sólido-vapor, sólido-líquido e líquido-vapor, e  $\gamma_H$  é a tensão de adesão que é igual ao ângulo de molhagem ( $\theta$ ).

A molhagem total do líquido fundido sob uma superfície sólida, pode ser identificada pela tensão superficial do material de adição a qual é menor ou igual à tensão de adesão ( $\cos \theta \approx 1$  e  $\theta \approx 0^\circ$ ). Da condição anterior têm-se que na molhagem parcial observa-se uma grande tensão superficial em relação à tensão de adesão ( $\cos \theta \approx 0$ ,  $\theta \approx 90^\circ$ ) e quando a tensão de adesão tiver valor negativo em relação à tensão superficial ( $\cos \theta \approx -1$ ,  $\theta \approx 180^\circ$ ) o material de adição não molha o material de base. RAMALHO [ 51 ] informa que o molhamento é um processo termodinâmico correlacionado ao ângulo de contato ( molhagem ) enquanto que o espalhamento é cinético. A abordagem do fenômeno do espalhamento do ponto de vista hidrodinâmico, leva em consideração, normalmente, fluidos de alta viscosidade sobre substratos não metálicos. Já o molhamento é um fenômeno que está

correlacionado com a tensão e energia nas interfaces do material, e o conhecimento de como determiná-lo é muito importante quando se deseja aumentá-lo nos casos de produção de materiais para brasagem ou reduzi-lo, como na elaboração de produtos impermeáveis.

### **II. 12.3 – Classificação dos Processos de Brasagem**

A classificação dos processos de brasagem pode ser em função da temperatura “liquidus” do material de base, como também em função do fator de processo e da fonte de calor [ 49 ].

De acordo com a temperatura “liquidus” do material de adição, os processos de brasagem são classificados em: brasagem branda, brasagem dura e brasagem em alta temperatura. A Figura 28 mostra os diferentes tipos de brasagem em função da temperatura “liquidus” do material de adição e pode melhor ser compreendido com as definições que seguem:

- Entende-se por brasagem branda aquela onde a temperatura “líquidus” do material de adição se situa abaixo de 450°C. Quando a temperatura “liquidus” é superior a 450°C, inicia-se a zona de brasagem dura.
  
- A brasagem em alta temperatura é produzida sem fluxo e na ausência de ar, isto é, em atmosfera de gás inerte ou vácuo, e a temperatura “liquidus” do material de adição é superior a 900°C.

SAUER [ 53 ] informa que os processos de brasagem, de uma forma geral, são agrupados conforme as fontes ou métodos de aquecimentos que são utilizados durante a brasagem e os tipos mais usuais são: brasagem por tocha; brasagem por

fornos; brasagem por indução; brasagem por resistência; brasagem por imersão e brasagem por infravermelho.

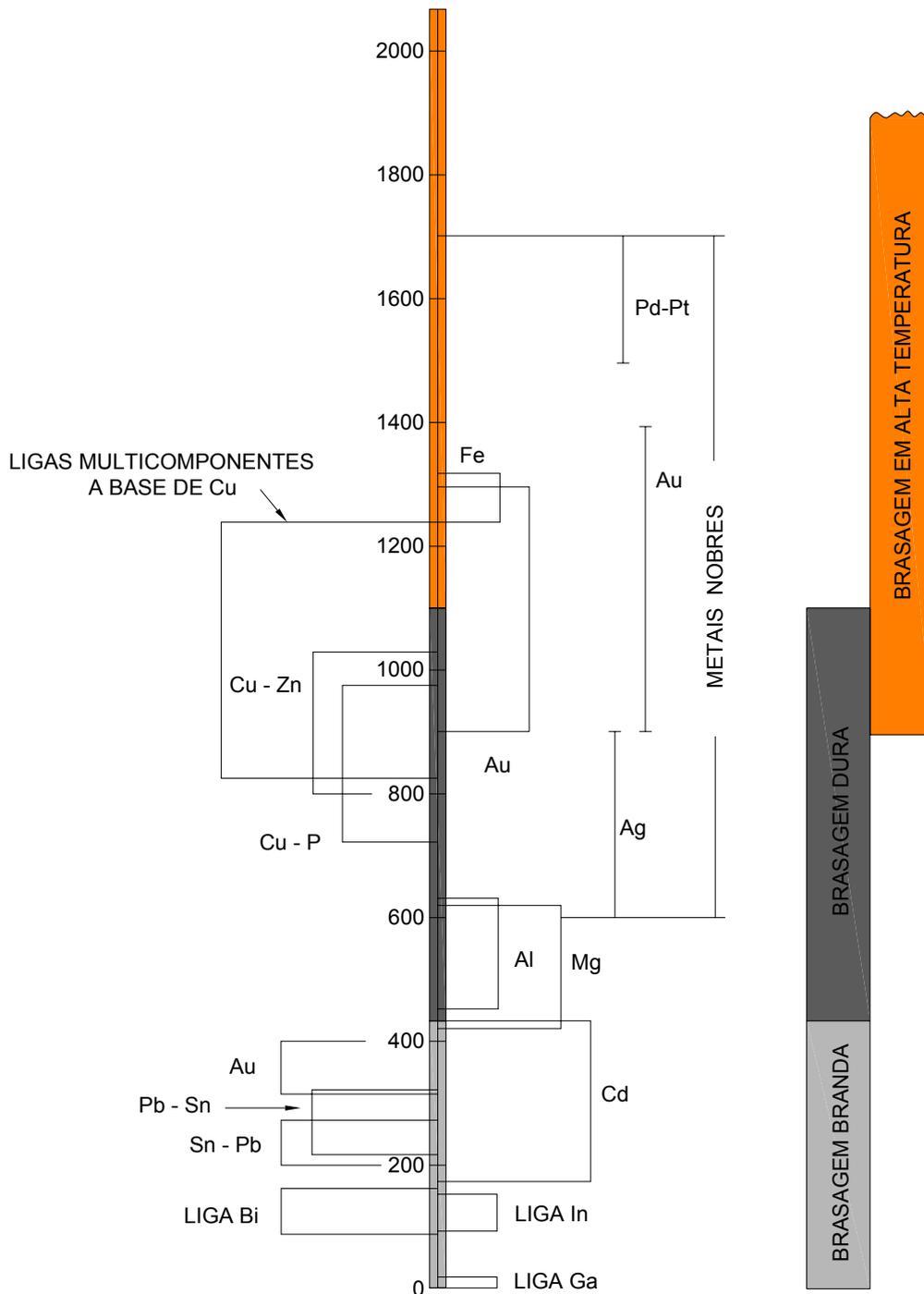


Figura 28 – Classificação da brasagem em função da temperatura “liquidus” do material de adição [ 49 ].

O fator de processo é um parâmetro importante nos três processos de brasagem, pois através dele são caracterizados os diferentes carregamentos térmicos que as partes a serem brasadas serão submetidas. Como fator de processo compreende-se a relação entre as temperaturas “liquidus” ( $T_L$ ) do material de adição e do material de base. Portanto, conhecendo-se a temperatura “liquidus” do material de adição, para um mesmo material de base, é possível se calcular o fator de processo para os três tipos característicos de brasagem, e a Tabela II. 4 mostra esta relação, onde pode ser observado que as brasagem branda, dura e em alta temperatura, possuem, respectivamente, os fatores de processo 0,3, 0,6 e 0,8. Um fator com valor maior para a brasagem a alta temperatura significa a necessidade de temperaturas mais elevadas para este processo. Portanto, os procedimentos de brasagem branda ( BB ), brasagem dura ( BD ) e brasagem a alta temperatura ( BAT ) podem ser classificados segundo a fonte de calor utilizada no processo [ 49 ].

Tabela II. 4 – Classificação dos processos de brasagem em função do fator de processo [ 49 ].

BRASAGEM	Material de Adição ( MA )	Temperatura de Fusão do Material de Adição	Fator de Processo = $T_L$ do MA / $T_L$ do MB
Branda	Sn 4Ag	221	0,29
Dura	56 Ag; 26 Cu e 4 Ni	620 a 730	0,58
Alta temperatura	BNi – 5	1080 a 1135	0,82

- **Brasagem por meio de um corpo rígido**

- ✓ Ferro de soldar – BB;
- ✓ Bloco de solda – BB.

- **Brasagem por meio de um fluxo**
  - ✓ Banho salino – BD;
  - ✓ Banho de metal de adição – BB, BD;
  - ✓ Brasagem por arraste – BB;
  - ✓ Brasagem por refusão – BB.
  
- **Brasagem por meio de um gás**
  - ✓ Chama – BB, BD;
  - ✓ Gás – BB;
  - ✓ Forno – BB.
  
- **Brasagem por meio de descarga elétrica**
  - ✓ Arco voltaico – BD.
  
- **Brasagem por meio de radiação**
  - ✓ Radiação luminosa – BB, BD;
  - ✓ Raios laser – BD, BAT;
  - ✓ Radiação elétrica – BD, BAT.
  
- **Brasagem por meio de energia elétrica**
  - ✓ Resistência – BD, BD;
  - ✓ Indução ao ar – BB, BD;
  - ✓ Indução em atmosfera redutora – BAT;
  - ✓ Indução sob gás inerte – BAT;
  - ✓ Indução sob vácuo – BAT;
  - ✓ Forno com fundente – BB, BD;
  - ✓ Forno sob gás inerte – BD, BAT;

A brasagem também pode ser classificada, segundo a maneira de se conduzir, em manual ou automática. As diversidades de técnicas de brasagem encontram seu emprego característico na indústria eletro-eletrônica, instalações técnicas, construção de máquinas em geral, fabricação de ferramentas finas e montagem de automóveis, como também em indústrias altamente especializadas como construção de turbinas e reatores.

O processo de brasagem é, algumas vezes, processado sob um gás ativo, como o hidrogênio, ou um gás inerte ou ainda sob vácuo. A brasagem sob atmosfera elimina a necessidade da limpeza posterior e assegura, na maioria dos casos, a ausência de resíduos de fluxos minerais corrosivos. No entanto, SAUER [ 53 ] informa que na maneira mais simples de aplicação do processo de brasagem, as etapas seguintes devem ser obedecidas:

- Limpeza prévia das superfícies a serem unidas para a remoção dos contaminantes e óxidos;
- Efetuar o revestimento das superfícies a serem brasadas com um fluxo adequado que é capaz de dissolver os óxidos metálicos sólidos ainda presentes, como também prevenir uma nova oxidação.
- A área a ser brasada deve ser aquecida até a fusão do fluxo, que em seguida limpa e protege o MB, atingindo também a temperatura necessária para a fusão do MA;

Para que uma molhagem perfeita da superfície metálica seja facilitada, pelo material de adição fluído, é necessário que toda a região a ser brasada esteja isenta de camadas de óxidos, impurezas, gases adsorvidos e umidade. Os gases

adsorvidos e a água evaporam pelo aquecimento do metal. Já os filmes de óxidos influenciam na decomposição do fundente tanto na brasagem branda quanto na brasagem dura [ 54, 55 ].

Os fundentes são, de um modo geral ácidos ou substâncias que por aquecimento liberam ácidos, melhorando a molhagem dos óxidos metálicos e reduzindo a formação de produtos de decomposição solúveis [ 56 ]. E para se ter boa molhagem ainda é necessário que a superfície metálica a ser brasada esteja protegida do ar e todo o sistema tenha atingido a temperatura de trabalho. Após atingir a temperatura de fusão do fluxo, faz-se então a deposição do material de adição e como a atração capilar do material de adição pelo material de base é muito maior que pelo fluxo, o material de adição ( líquido ), promoverá o deslocamento do fluxo substituindo-o na junta [ 56 ].

#### **II. 12.4 – Temperatura de Trabalho na Brasagem**

A temperatura mais baixa no local de brasagem onde o metal de adição molha ou onde ocorre uma difusão interfacial de uma fase líquida é definida como “temperatura de trabalho”. E esta deve estar na faixa de temperatura do fundente, isto é, a temperatura de molhagem do fundente deve situar-se cerca de 50°C acima da temperatura de trabalho, de modo a assegurar a total eliminação da película óxida ao se atingir a temperatura de trabalho [ 56 ].

#### **II. 12.5 – Material de Adição Empregado na Brasagem**

O material de adição utilizado pode ser um metal puro ou liga podendo ser encontrado na forma de fio, bastão, chapa, fita pó ou pasta. Em processos industriais, emprega-se, também, uma mistura de pó com um meio ligante fundido. A função do

meio ligante é facilitar o manuseio, ajustar a dosagem e melhorar a fixação do pó de brasagem. Já o material de adição pode ser depositado por “spray”, por revestimento ou por galvanoplastia. Os metais de adição típicos para brasagem branda são: Zinco, Estanho, Chumbo e Zinco-Chumbo. Em brasagem dura emprega-se Prata, Cobre e ligas de adição à base de Alumínio, e em brasagem em alta temperatura são utilizados ligas de adição à base de Níquel, Cobre e metais nobres.

## II. 13 – CONFIGURAÇÃO DE JUNTAS

Segundo ZIMMERMANN [ 57 ] é conhecido que uma boa parte dos custos de elementos de equipamentos ocorre na fase de projeto. Isto também é válido quando se concebe uma junta brasada. Durante a construção deve-se trabalhar com um espaço compreendido entre 0,01 a 0,2 mm de largura, entre os membros a serem brasados. A Tabela II. 5 mostra esta dependência, e relaciona o tipo de material de adição com o espaço compreendido entre as peças.

Tabela II. 5 – Largura do chanfro em função do tipo de material de adição [ 57 ].

TIPO DE MATERIAL DE ADIÇÃO	CHANFRO DE BRASAGEM ( mm )	OBSERVAÇÃO
B-AISI	0,05 a 0,25	para sobreposição < 6,0
	0,02 a 0,2	para sobreposição > 6,0
B-CuP	0,025 a 0,13	sem fluxo
B-Ag	0,05 a 0,13	com fluxo
	0,01 a 0,05	atmosfera redutora, vácuo
B-Au	0,05 a 0,02	com fluxo
	0,01 a 0,05	atmosfera redutora, vácuo
B-Ni	0,05 a 0,2	com fluxo
	0,01 a 0,05	atmosfera redutora, vácuo
B-ti	0,1 a 0,07	vácuo

As partes a serem unidas têm que ser projetadas de tal forma que facilite o aquecimento da região a ser brasada, garantindo ao processo as temperaturas necessárias e uma distribuição uniforme de calor. Deste modo, permitindo também, o efeito de atração capilar. As Figuras 29, 30 e 31 mostram alguns tipos de juntas que são utilizadas nos processos de brasagem [ 56 ]:

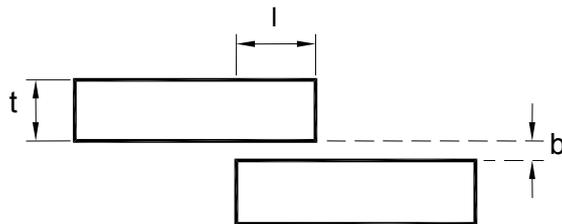
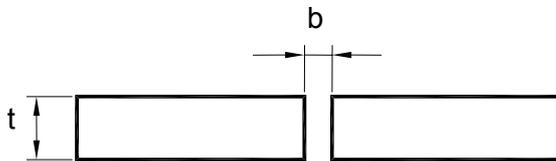


Figura 29: Junta sobreposta.

$l$  – comprimento da sobreposição e  
 $t$  – espessura da chapa.



Fi

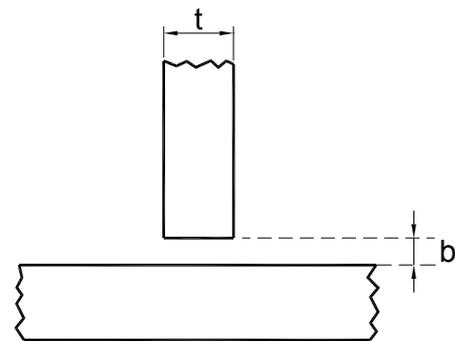


Figura 31: Junta de ângulo em “ T “.

## II. 14 – BRASAGEM POR ARCO ELÉTRICO

A brasagem por arco elétrico é uma nova concepção de união de materiais e atualmente pode ser executada através dos processos GMAW ( “MIG-Brazing” ) ou PAW ( “Plasma Brazing” ). De acordo com RIBEIRO [ 58 ], o “MIG-Brazing” estabelece diferença da brasagem convencional pelo fato do material de adição não ser distribuído ou depositado na junta por atração capilar. A operação promove fusão apenas do material de adição e não do metal de base, tal como na brasagem

convencional; em seguida observa-se uma difusão interatômica através da molhabilidade, em uma área bem estreita da junta. Por tanto, a capilaridade que é o fenômeno característico no processo de brasagem, não é determinante na união de metais quando se utiliza o processo “MIG-Brazing”.

A brasagem por arco elétrico utiliza um equipamento de soldagem com as mesmas características do processo GMAW, isto é, o material de adição também em forma de arame, é alimentado continuamente e o arco elétrico formado é protegido por uma atmosfera de gás inerte idêntica a do processo MIG ( “Metal Inerte Gás” ), uma das variações do GMAW.

Portanto, por possuir características do processo de brasagem e do processo MIG, esta nova concepção de brasagem, através de arco elétrico, foi denominada de “Brasagem MIG”, ou do inglês, como é mais conhecido “MIG-Brazing”. O processo consegue conciliar, ao mesmo tempo, os benefícios da brasagem convencional ( não promove fusão do material de base ), e mantêm as propriedades mecânicas; como também as vantagens do processo MIG ( elevadas taxas de deposição e altas velocidades de soldagens ).

Logo, as vantagens da ausência de fusão do material de base, a elevada velocidade de soldagem obtida, o baixo aporte térmico [ 59 ], devido à utilização de consumível com ponto de fusão inferior ao aço carbono, somados a uma operação sinérgica estável, garantem excelentes propriedades da junta soldada, mesmo quando esta apresentar revestimento protetor, tal como as chapas galvanizadas. Assim, o processo se tornou adequado para a união de chapas finas de aço carbono, sendo estas, revestidas a base de Zn ou não; e em conseqüência, extremamente adequado para a indústria automobilística.

No que diz respeito às configurações de juntas para a brasagem MIG, pode-se destacar as juntas de topo, ângulo, sobreposta dentre outras [ 59 ]. A Figura 32 mostra alguns exemplos de juntas que são adequadas à união por brasagem ao arco elétrico [ 60 ]. Nota-se que a distância entre os membros das juntas, abertura de raiz, é maior que aquelas encontradas nas juntas para a brasagem convencional [ 56 ]. Isto se deve ao fato do material de adição preencher a abertura da junta, sem nenhuma ação significativa do fenômeno da capilaridade.

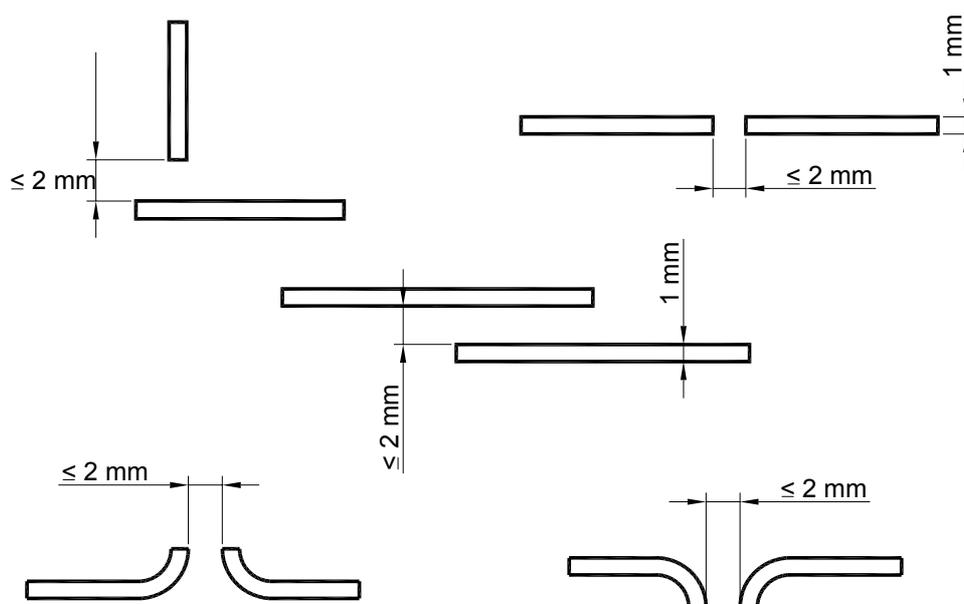


Figura 32: Exemplos de juntas adequadas a brasagem por arco [ 60 ].

De uma forma geral, o processo de brasagem MIG apresenta às seguintes vantagens e desvantagens sobre os processos convencionais de brasagem ou de soldagem por fusão em chapas revestidas [ 1, 59, 60 ]:

## VANTAGENS:

- Oferece uma quantidade menor de calor para efetuar a união, produzindo menor distorção;
- O metal de adição depositado é relativamente dúctil, portanto facilmente usinável e apresenta excelente resistência à corrosão e baixas tensões residuais;
- O processo não necessita de fluxos ou pastas, e é indicado para união de metais dissimilares: ligas de cobre com aço e ferro fundido, entre outros materiais;
- O resultado da brasagem por arco elétrico oferece resistência adequada para muitas aplicações;
- Preservação da camada de revestimento protetor, garantindo a proteção das áreas adjacentes à junta brasada.
- Versatilidade, pois permite aplicação em todas as posições de soldagem, o que garante uma larga faixa de aplicação;
- Assim como no processo MIG, o “MIG-Brazing” também é facilmente automatizável.

## DESVANTAGENS:

- A resistência da solda está limitada à resistência do material de adição;
- As temperaturas admissíveis para o trabalho estão abaixo daquelas que são admissíveis para os produtos soldados por fusão, devido à temperatura de fusão do metal de adição ser mais baixa que a temperatura de fusão do material de base e;
- A cor do metal de adição pode não ser compatível com a cor do material de base.

## II. 14.1 – Material de Adição

A escolha do material de adição utilizado em soldagem por fusão está relacionada com os requisitos de resistência do metal de solda depositado e do metal de base, como também com a composição química. As principais normas fornecem especificações de arames para o uso no processo GMAW. A Especificação AWS 5.18/93 [ 61 ], por exemplo, classifica o material de adição utilizado na soldagem MIG/MAG, e a escolha deste depende dos seguintes fatores:

- Material de base a ser soldado;
- Condições de superfície, espessura e detalhe da junta e;
- Especificações e condições de serviço da junta a ser soldada.

Como visto anteriormente a brasagem MIG possui as mesmas características da brasagem convencional. Portanto, o consumível a ser utilizado também deve possuir ponto de fusão inferior ao do material de base e permitir que a zona de ligação seja caracterizada pela formação de uma interface muito bem definida, entre o material de base e o metal de solda depositado, sem haver formação de liga. Estas características podem ser obtidas quando são utilizados no processo, ligas de cobre ( Cu ) como material de adição.

O Cobre ( Cu ) é extensamente utilizado em brasagem, pois apresenta facilidade de formar ligas com diversos elementos, sendo que estas ligas normalmente apresentam um ponto eutético, no caso de ligas binárias, ou uma calha eutética, no caso de ligas com três ou mais elementos. Os elementos mais utilizados nestas ligas são: Zinco ( Zn ), Silício ( Si ), Cádmiio ( Cd ), Estanho ( Sn ) e Prata ( Ag ). O ponto de fusão do Cu puro é de 1083°C, sendo que a temperatura líquidus das ligas mencionadas é menor que este valor, estando, portanto, mais de 300°C abaixo da

temperatura na qual ocorre a fusão da maioria dos aços utilizados na indústria automobilística.

O Si em particular apresenta um efeito bastante pronunciado na mudança do ângulo de molhamento e conseqüentemente na performance da liga de adição. Pequenas adições de Silício, na ordem de 1 a 2% já aumentam de maneira bastante intensa a molhabilidade das ligas de Cu, mesmo que haja outros elementos de liga presente na composição. Outro efeito do Si é aumentar a resistência mecânica e dureza da liga. Se por um lado este efeito é interessante para a junta soldada, por outro é ruim, pois dificulta a trefilação dos arames consumíveis que são utilizados em sistemas de alimentação automática, como é o caso do processo MIG.

A composição química e microestrutural das ligas bronze-silício pode melhor ser entendida através da análise do diagrama de fase binário cobre-silício feita a seguir ( Figura 33 ).

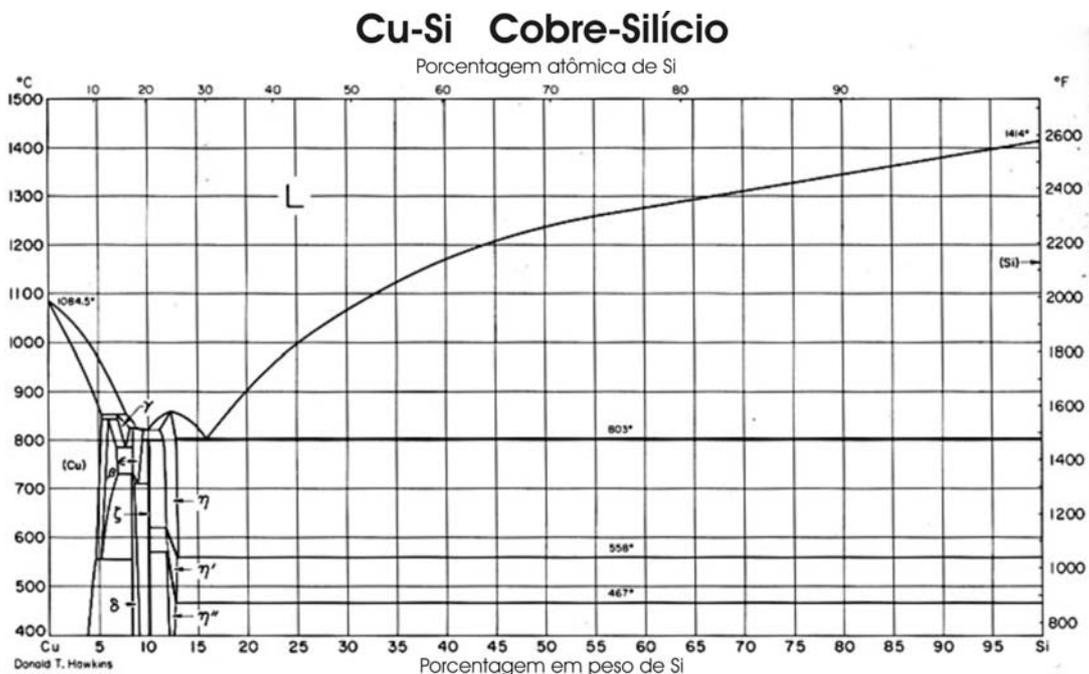


Figura 33 – Diagrama de equilíbrio da liga Cu-Si [ 33 ].

No caso de metais de adição de bronze-silício, a adição de Si no Cu puro apresenta dois objetivos principais:

- Obtêm-se um aumento de resistência mecânica devido ao mecanismo de endurecimento por solução sólida substitucional de silício no cobre puro, formando uma estrutura mais resistente, denominada “ $\alpha$ ”. No entanto, nota-se que adições acima de 4% de silício já provocam um crescimento exagerado da região líquido +  $\alpha$ , favorecendo a ocorrência de trincas de solidificação e;
- Redução do ponto de fusão devido ao comportamento eutético da liga cobre-silício.

Deste modo, as ligas BT 511 e 513 ( Tabela II. 6 ), como material de deposição, são consideradas satisfatórias para brasagem por arco elétrico, quando aplicadas em chapas galvanizadas, pois além de reunirem os requisitos necessários para este fim, oferecem excelente resistência a corrosão e fácil usinabilidade do cordão de solda [ 62 ].

Tabela II. 6 – Composição química do material de adição [ 62 ].

Liga	Composição ( % )						Intervalo de Fusão ( °C )	Temperatura de Trabalho ( °C )
	Cu	Zn	Sn	Fe	Mn	Si		
Prostar							---	---
511	97	0.0	0.2	0.2	0.8	1.3	950 – 1050	1050
513	94	0.6	0.6	0.3	0.8	3.3	970 – 1060	1060

## **II. 14.2 – Técnicas de Brasagem MIG**

Na operação do processo de Brasagem MIG, um importante parâmetro a ser observado é a inclinação da tocha em relação ao seu deslocamento, que é idêntico à técnica de soldagem no processo MIG/MAG de chapas galvanizadas. Portanto no processo “MIG-Brazing” adotou-se a técnica de brasagem “Empurrando”, onde a camada de Zn é pré-aquecida a uma temperatura suficiente para vaporizá-la parcialmente [ 41 ]. Logo em seguida, e imediatamente antes da transferência do material de adição, a pequena camada residual de Zn é vaporizada devido à energia térmica do material de adição fundido que é transferido em direção a poça de fusão. Como a quantidade de vapor de zinco se torna pequena no metal fundido, o tempo para que ocorra a desgaseificação até que este se solidifique é suficiente para se obter soldas com pouca ou nenhuma porosidade [ 41 ].

## **II. 15 – CORROSÃO**

### **II. 15.1 – Definição**

Segundo GENTIL, V. [ 63 ], num aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, ela está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que sua durabilidade e desempenho deixem de satisfazer os fins a que se destinam. Portanto, deterioração representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais.

Nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio, como o  $O_2$ , S,  $H_2O$ ,  $CO_2$  entre outros, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Concluí-se, portanto, que nestes casos a corrosão corresponde ao inverso dos processos metalúrgicos, Figura 34.

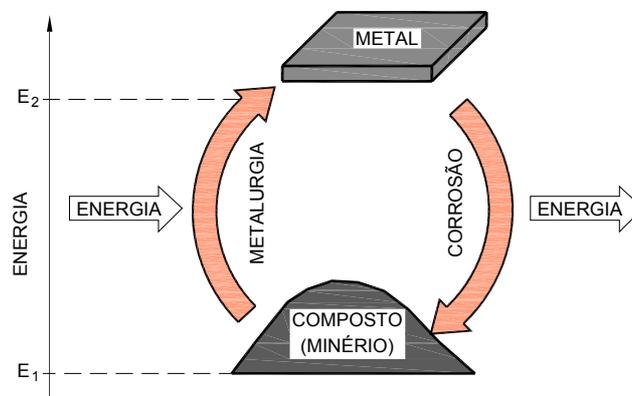


Figura 34 – Ciclo dos metais [ 63 ].

## II. 15.2 – Considerações Gerais sobre o Processo de Corrosão

Dependendo do tipo de ação do meio corrosivo sobre o material, os processos corrosivos podem ser classificados em dois grandes grupos, abrangendo todos os casos de deterioração por corrosão, são eles: Corrosão Eletroquímica e Corrosão Química [ 64 ]. Os processos de corrosão eletroquímica são mais freqüentes na natureza; e em face da necessidade do eletrólito conter água líquida, a corrosão eletroquímica é denominada corrosão em meio aquoso, e se caracteriza basicamente nas seguintes condições:

- Ocorre necessariamente na presença de água no estado líquido;

- Em temperaturas abaixo do ponto de orvalho da água, sendo a grande maioria na temperatura ambiente e;
- Com a formação de uma pilha ou célula de corrosão, promovendo a circulação de elétrons na superfície metálica.

Já os processos de corrosão química são, por vezes, denominados de corrosão ou oxidação em altas temperaturas. Estes processos são menos frequentes na natureza, pois envolvem operações onde as temperaturas são elevadas. A demais a corrosão química não necessita da presença de água líquida, portanto ela também é denominada de corrosão em meio não aquoso ou corrosão seca. Estes processos corrosivos se caracterizam basicamente nas seguintes condições:

- Ausência de água líquida;
- Temperatura, em geral, elevada, sempre acima do ponto de orvalho da água e;
- Interação direta entre o metal e o meio corrosivo.

## **II. 15.3 – Pilhas de Corrosão Eletroquímica**

A pilha de corrosão eletroquímica é constituída de quatro elementos fundamentais:

- Área anódica: superfície onde se verifica a corrosão ( reação de oxidação );
- Área catódica: superfície protegida onde não há corrosão ( reação de redução);
- Eletrólito: solução condutora ou condutor iônico que envolve simultaneamente as áreas anódicas e catódicas e;
- Ligação elétrica entre as áreas: anódicas e catódicas.

O aparecimento das pilhas de corrosão é consequência de potenciais de eletrodos diferentes, em dois pontos da superfície metálica, o que promove uma diferença de potencial entre eles. O funcionamento das pilhas eletroquímicas e das pilhas de corrosão envolve uma importante grandeza que se denomina “potencial de eletrodo” ou simplesmente “potencial” [ 35 ]. O seu aparecimento se baseia num princípio geral segundo o qual, sempre que se tem um metal em contato com um eletrólito, desenvolve-se entre eles uma diferença de potencial que pode ser positiva, negativa ou nula, dependendo do metal, das espécies presentes no eletrólito, além de outras variáveis. A Figura 35 mostra esquematicamente uma pilha de corrosão eletroquímica.

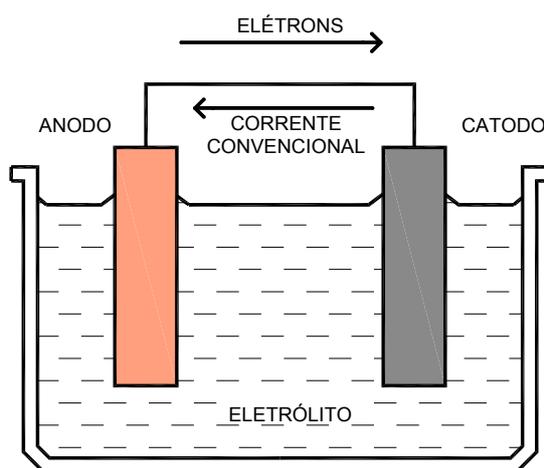


Figura 35 – Pilha de corrosão eletroquímica [ 63 ].

Um conceito importante aplicável às pilhas de corrosão é o da reação de oxidação e redução. As reações da corrosão eletroquímica envolvem sempre reações de oxi-redução. Na área anódica onde se processa a corrosão, ocorrem reações de oxidação, sendo a principal passagem do metal da forma reduzida para a forma iônica, Figura 36.

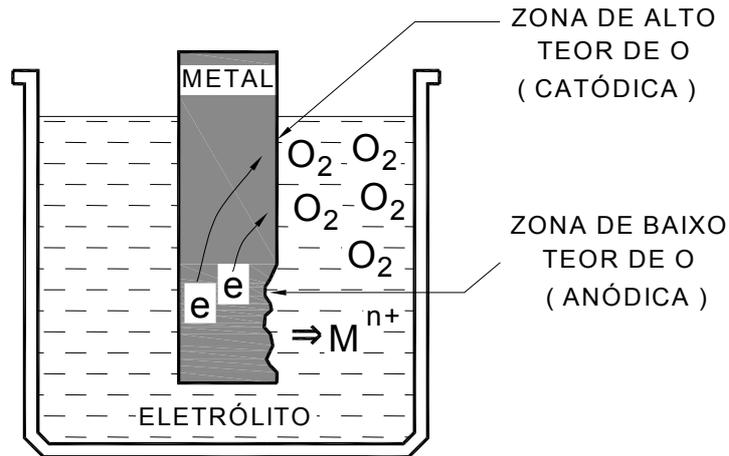
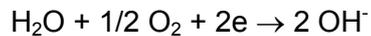


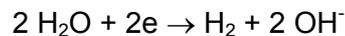
Figura 36 – Reação área anódica [ 63 ].

Já a área catódica que é uma área protegida ( não ocorre corrosão ), as reações são de redução de íons do meio corrosivo, onde as principais reações são:

- Em meios aerados: caso normal de água do mar e naturais e;



- Em meios desaerados: caso comum em águas doces industriais.



## II. 15.4 – Corrosão Galvânica

Segundo GENTIL, V. [ 63 ], “quando dois materiais metálicos, com diferentes potenciais, estão em contato em presença de um eletrólito, ocorre uma diferença de potencial, isto é, uma transferência de elétrons. Tem-se então o tipo de

corrosão chamado, corrosão galvânica [ 63 ], que resulta do acoplamento de materiais metálicos dissimilares imersos em um eletrólito, causando uma transferência de carga elétrica de um para o outro, por terem potenciais diferentes. Ela se caracteriza por apresentar corrosão localizada, próxima à região do acoplamento, ocasionando profundas perfurações no material metálico que funciona como anodo”.

Quando materiais metálicos de potenciais diversos estão em contato, a corrosão do metal que funciona como anodo é muito mais acentuada que a corrosão isolada deste metal, sob ação do mesmo meio corrosivo. Portanto, a corrosão do metal que funciona como catodo é muito baixa e acentuadamente menor que a que ocorre quando o metal sofre corrosão isolada. Esta afirmativa pode ser comprovada pelos dados apresentados na Tabela II. 7 [ 63 ], que mostram a corrosão do ferro ligado ao Zn e ao Cu, separadamente, quando imerso em uma solução de 1% de Cloreto de Sódio ( NaCl ).

Tabela II. 7 – Corrosão do Fe ligado ao Zn e ao Cu [ 63 ].

SEGUNDO METAL	CORROSÃO EM MILIGRAMAS	
	FERRO	SEGUNDO METAL
Zinco	0,4	688,0
Cobre	183,1	0,0

Outro fator de fundamental importância na corrosão galvânica é a relação entre área anódica / área catódica ( efeito das áreas relativas ). Quando esta relação é grande, muito maior que 1, a corrosão não é tão prejudicial; e esta é uniformemente distribuída por toda a extensão da área catódica. Por outro lado, quando a relação entre as áreas anódica / catódica for pequena, ou seja, muito menor que 1, a corrosão terá maior proporção, quanto menor for esta razão, visto haver neste caso, uma elevada corrente de dissolução, concentrada em uma pequena área do metal menos nobre.

## **II. 15.5 – Corrosão em Chapa Zincada Brasada por Arco Elétrico**

De acordo com os conceitos de corrosão visto anteriormente, o processo de corrosão de chapas zincadas, brasadas por arco elétrico, poderia se desenvolver segundo o mecanismo eletroquímico, pois envolve a utilização de materiais dissimilares ( material de adição composto de uma liga Cu-Si ) e um material de base revestido ( chapa de aço zincada ); restando somente o contato com um eletrólito; Portanto, os diferentes potenciais eletroquímicos dos elementos Cu e Si poderiam formar um par galvânico com a chapa zincada, promovendo, em seguida, reações entre o cordão de solda e o Zn do revestimento, que contribuiriam com o início da corrosão. KJELD [ 48 ] acrescenta que um outro fator também poderia contribuir com o início de um processo de corrosão prematuro, e este está associado as transformações metalúrgicas que podem ocorrer na margem do cordão de solda, assim como, a formação de uma grande ZTA, que podem aumentar o potencial de corrosão da junta soldada. Logo, em soldagens a arco elétrico de chapas galvanizadas, estas áreas que geralmente apresentam degradação da camada de revestimento de Zn, necessitam de um condicionamento para poder restabelecer a proteção contra a corrosão do material [ 65 ].

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição dos materiais e da metodologia de trabalho utilizada na etapa experimental, relativa à aplicação do processo de brasagem por arco elétrico ( “MIG-Brazing” ) em chapas galvanizadas, utilizando-se a combinação de dois tipos de arame consumível com três diferentes gases de proteção, e que serão vistos a seguir.

#### III. 1 – MATERIAIS

##### III. 1.1 – Material de Base

O material de base utilizado possui especificação CSN BGA IF – ultrabaixo carbono, espessura 0,80 mm, e está contemplado na Norma NBR 7008/03 [ 66 ] que corresponde às chapas e bobinas de aço revestidas com Zinco ou com liga Fe-Zn, pelo processo contínua de imersão à quente, com limite de escoamento variando entre 140 e 200 MPa.

##### III. 1.1.1 – Substrato

A chapa BGA IF-166 com acabamento superficial no revestimento na forma de liga Fe-Zn ( galvanized ), possui como material de base, aqui denominado de substrato, o aço do grau ZEE – 3, e este atende às especificações mostradas nas Tabelas III. 1 e III. 2.

Tabela III. 1 – Composição química ( % ) especificada para o substrato [ 66 ].

	C	Mn	P	S	Al	Si	Nb	Ti	N <sub>2</sub>
ESPECIFICADA	0,0010	0,120	0,010	0,0050	0,0370	0,070	0,022	0,032	0,0025
	a	a	a	a	a				
	0,01	0,30	0,02	0,02	0,01	max.	max.	máx.	máx.

Tabela III. 2 – Propriedades mecânicas especificadas para o substrato [ 66 ].

Limite de escoamento ( Mpa )	Limite de Resistência Máximo ( Mpa )	Alongamento Mínimo ( % )
140 / 200	350	40

### III. 1.1.2 – Revestimento

Foram utilizadas chapas zincadas com acabamento galvanized, revestimento em forma liga Fe-Zn e com massa especificada de 91g de Zn/m<sup>2</sup>, correspondendo a designação de revestimento Z 100 da Norma NBR 7008/03 [ 66 ].

### III. 1.2 – Material de Adição

Como material de adição foi utilizado dois tipos de arames sólidos da Brastak, BT 511 e BT 513, ambos de diâmetro nominal de 0,8 mm e classificados segundo a Norma AWS A5.7 ERCuSiA [ 67 ]. A Tabela III. 3 [ 62 ] mostra a diferença básica entre eles, que está na composição química, cujos teores podem ser vistos.

Tabela III. 3 – Composição química do material de adição [ 62 ].

Liga	Composição ( % )						Intervalo de Fusão ( °C )	Temperatura de Trabalho ( °C )
	Cu	Zn	Sn	Fe	Mn	Si		
BT							-	-
511	97	0.0	0.2	0.2	0.8	1.3	950 – 1050	1050
513	94	0.6	0.6	0.3	0.8	3.3	970 – 1060	1060

### III. 1.3 – Gás de Proteção

Em combinação com os materiais de adição ( BT 511 e BT 513 ), utilizou-se três tipos de proteção gasosa, sendo todas com vazão de 12 l / mim; são elas: Star Gold, Argônio ( Ar ) puro e uma mistura binária composta por ( Ar + 2% O<sub>2</sub> ). A Tabela III. 4 apresenta estas combinações e as respectivas Matrizes que foram estudadas e que resultaram das combinações dos materiais de adição com os gases de proteção, utilizados.

Tabela III. 4 – Determinação das Matrizes

MATRIZ	MATERIAL DE ADIÇÃO	GÁS DE PROTEÇÃO
A	BT 511	StarGold
B		Ar
C		Ar + 2%O <sub>2</sub>
D	BT 513	StarGold
E		Ar + 2%O <sub>2</sub>
F		Ar

**Matriz A:** BT 511 + Star Gold; **Matriz B:** BT 511 + 100 % Ar;

**Matriz C:** BT 511 + ( Ar + 2%O<sub>2</sub> ); **Matriz D:** BT 513 + Star Gold;

**Matriz E:** BT 513 + ( Ar + 2%O<sub>2</sub> ); **Matriz F:** BT 513 + 100% Ar.

### III. 2 – EQUIPAMENTOS

#### III. 2.1 – Equipamento de Soldagem

Uma fonte de energia dedicada a brasagem por arco elétrico de chapas de aço revestido deve otimizar a distribuição de calor de modo a minimizar o dano à camada de revestimento, como também, o nível de distorções na junta. Estas condições foram conseguidas utilizando-se o conjunto Solmig 200 Star da White Martins que foi desenvolvido especificamente para atender à dinâmica exigida pelo sistema, na união de chapas galvanizadas. O equipamento é constituído basicamente de um gabinete único com alimentador de arame e controle de alimentação, embutidos, assim como, incorporados à fonte, um voltímetro e um amperímetro digital. Permite o ajuste da intensidade de corrente em patamares que produzem um arco particularmente estável em uma faixa de baixos valores de tensão que são adequados a brasagem por arco elétrico, Figura III. 1.



FIGURA III. 1 – Equipamento de soldagem Solmig 220 Star.

### III. 2.2 – Microscópio Ótico

Para caracterizar as possíveis transformações ( microestrutura ) do material de base ( MB ) e do metal de solda ( MS ) foi utilizado um microscópio ótico Modelo U-LDB OLYMPUS BX60M.

### III. 2.3 – Projetor de Perfil

As características geométricas do cordão de solda, especificamente o ângulo de molhabilidade e convexidade das Matrizes, assim como a largura e altura dos metais de solda, foram observadas com o auxílio de um projetor de perfil marca Nikon Modelo 6C.

### III. 2.4 – Ensaio de Tração

Realizou-se ensaio de tração com o objetivo de se comparar a resistência mecânica à tração do material de base com a resistência mecânica da junta sobreposta brasada. Para tanto utilizou se uma máquina Modelo EMIC DL com capacidade de carga máxima de 10.000 Kgf, Figura III. 2.



Figura III. 2 – Detalhe do corpo de prova posicionado para o ensaio da tração.

### III. 2.5 – Microscopia Eletrônica de Varredura ( MEV – EDS )

O equipamento JEOL Modelo JSM – 6460 LV foi utilizado para a avaliação das amostras por MEV – EDS, com os objetivos que seguem: verificar o dimensionamento e a uniformidade da camada de revestimento de liga Fe-Zn, antes e após a brasagem, assim como para caracterizar a presença do elemento Silício ( Si ) na interface MB – MS.

### III. 2.6 – Ensaio de Corrosão Acelerada em Câmara de Névoa Salina

O ensaio de susceptibilidade a corrosão em câmara de névoa salina objetivou verificar a resistência à corrosão das Matrizes determinadas na Tabela III. 4, especificamente a margem do cordão de solda que é uma região crítica devido ao ciclo térmico intenso que esteve submetida, Figura III. 3.



Figura III. 3 – Câmara de névoa salina.

### III. 3 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

#### III. 3.1 – Retirada das Peças de Teste Utilizadas na Brasagem por Arco Elétrico

As peças de teste foram extraídas das chapas zincadas em regiões específicas, objetivando obter amostras de corpos de prova com a menor variação possível de peso de revestimento, variável esta de grande importância na operação de brasagem por arco elétrico. O procedimento adotado para a retirada dos corpos de prova está ilustrado na Figura III. 4.

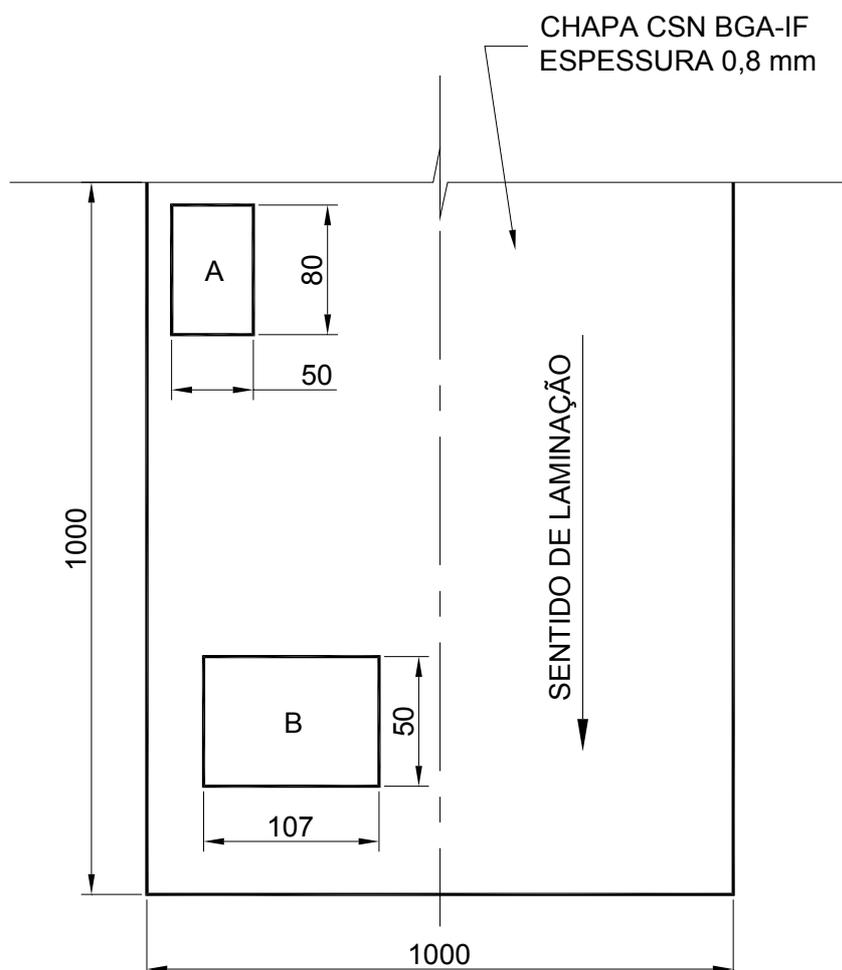


Figura III. 4 – Esquema de retirada dos corpos de prova utilizados na brasagem e ensaio mecânico de tração ( mm ).

### III. 3.2 – Corpos de Prova para Ensaios de Tração

As amostras retiradas e utilizadas na confecção dos corpos de prova, para os ensaios de tração, foram retangulares e de seção plana, com as dimensões de 210 mm X 50 mm. O cordão de solda foi depositado transversalmente a direção de laminação da chapa. E o CP com as dimensões finais pode ser visto na Figura III. 5.

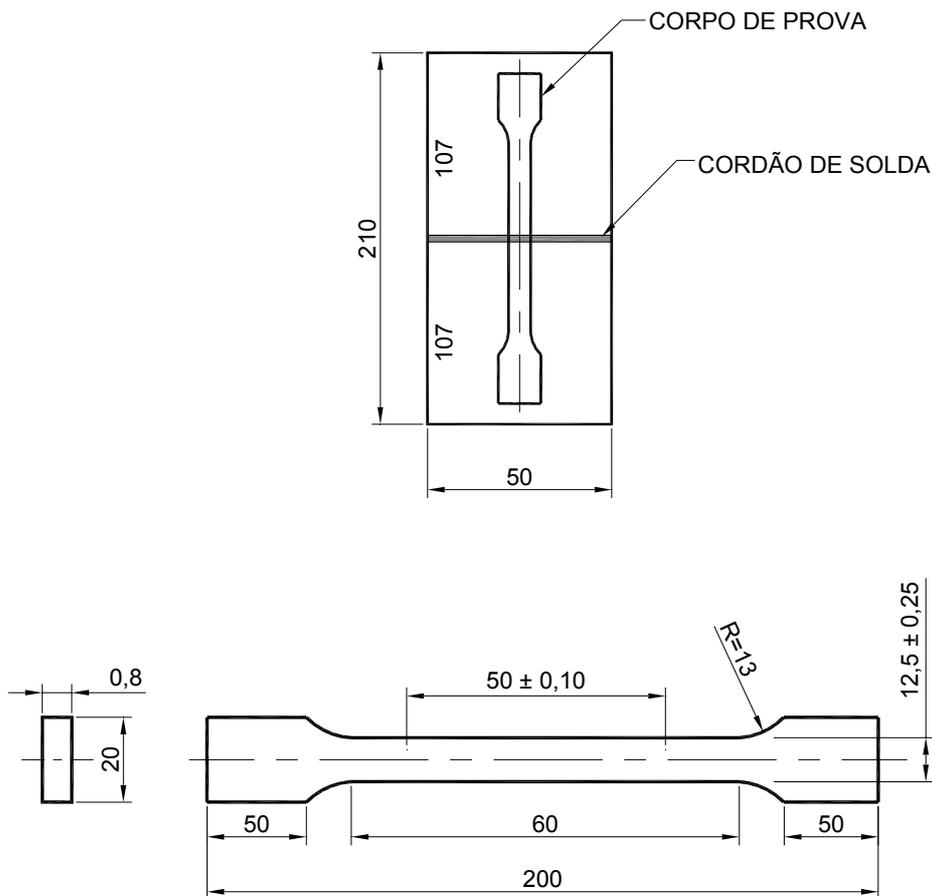


Figura III. 5 – Detalhe do corpo de prova utilizado no ensaio de tração ( mm ).

### III. 3.3 – Corpo de prova para ensaio de corrosão acelerada em névoa salina

Os corpos de prova mencionados no item III. 3.1 ( detalhe A ), deram origem a uma configuração de junta sobreposta e foram brasados. Em seguida as laterais destes mesmos corpos de prova, áreas desprovidas de revestimento de Zn,

foram pintadas com tinta rica em Zn e encaminhadas para o ensaio de corrosão acelerada em câmara de névoa salina, Figura III. 6.



Figura III. 6 – Corpo de prova para ensaio de corrosão em câmara de névoa salina.

### III. 3.4 – Amostra para Ensaio Metalográfico

Quanto às amostras para análise metalográfica, todas foram retiradas da parte central dos corpos de prova, posteriormente a brasagem, com o auxílio de um discotom. Em seguida as mesmas foram embutidas, lixadas, polidas com pasta de diamante e atacadas com reagente adequado. A preparação das amostras consistiu na caracterização do MB e do MS, assim como, na verificação do dimensionamento e uniformidade da camada de revestimento da liga Fe-Zn, e também, para verificar a presença do Si na interface MB – MS.

## III. 4 – MÉTODOS EXPERIMENTAIS

### III. 4.1 – Tipo de Junta e Posição de Soldagem

Ao contrário da brasagem convencional que necessita de uma abertura entre os membros da junta [ 54, 55, 60, 62 ], a brasagem por arco elétrico ( “MIG-

Brazing“ ) não precisa [ 60 ]. Portanto, foi escolhida a junta sobreposta sem abertura de raiz, que é freqüentemente utilizada no seguimento automobilístico e esta foi brasada na posição plana, Figura III. 7.

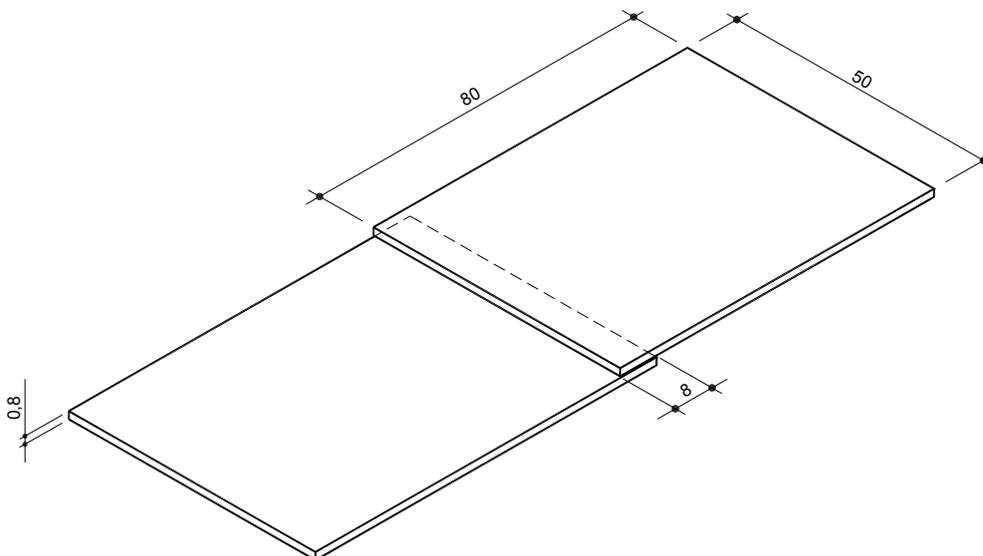


Figura III. 7 – Detalhe da junta sobreposta brasada ( mm ).

#### III. 4.2 – Determinação dos Parâmetros de Brasagem

O equipamento de soldagem utilizado, Solmig 200 Star, apresenta maior facilidade de controle dos parâmetros operacionais, produzindo, desta forma, juntas brasadas de alta qualidade. O melhor desempenho desta fonte, na brasagem por arco elétrico de chapas galvanizadas, se consegue devido ao projeto otimizado de suas características elétricas de saída opera de forma que o metal de adição seja transferido para o material de base de maneira controlada; portanto, esta fonte é capaz de adequar a corrente de curto-circuito e a corrente de soldagem, de acordo com as características físicas do arco elétrico, nas diversas condições de operação. Este tipo de fonte de energia é uma fonte convencional MIG/MAG de corrente contínua e esta, para manter o arco elétrico curto, deve ser capaz de fornecer uma baixa intensidade de corrente, de modo que possa ter uma rápida reação quando da variação no comprimento de arco elétrico. Portanto, esta fonte permite ao soldador pré

selecionar a tensão do arco elétrico, através de ajustes fino e grosso. Estes recursos possibilitaram selecionar os parâmetros de brasagem definitivos, e estes foram obtidos a partir de chapas de pré-testes que permitiram a escolha da melhor condição de brasagem para cada Matriz.

### III. 4.3 – Técnica de Brasagem

Por tratar-se de uma chapa galvanizada muito fina, utilizou-se à técnica de soldagem “Empurrando”, onde o Zn se volatiliza à frente da poça de fusão, minimizando possíveis problemas de porosidade em relação à técnica de soldar “Puxando”; que tende aprisionar os vapores de Zn, pelo posicionamento do arco elétrico [ 41 ]. Devido à operação de brasagem ter sido manual, não foi possível determinar com precisão o ângulo de inclinação do arame eletrodo. No entanto, acredita se que este ângulo tenha variado, aproximadamente, entre 20 e 25°C com a vertical, para todas as condições de brasagem, Figura III. 8.

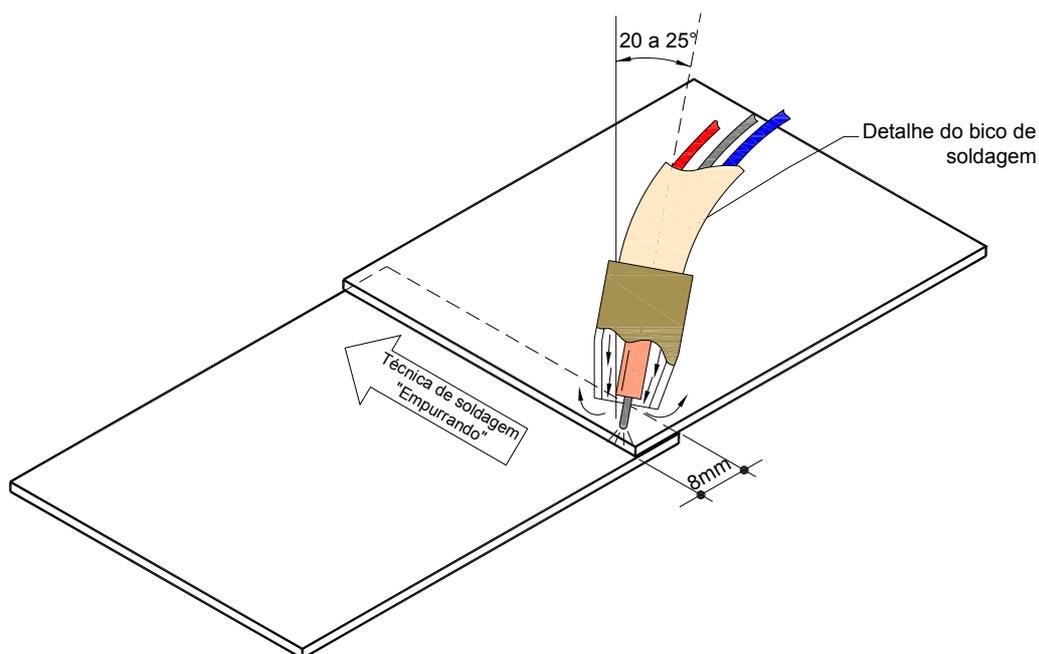


Figura III. 8 – Técnica de soldagem “Empurrando”.

### III. 4.4 – Velocidade de Brasagem

A velocidade de soldagem foi calculada posteriormente a determinação dos parâmetros definitivos de brasagem, item III. 4.3. Ao final de cada operação de brasagem, o soldador apertava o gatilho da pistola continuamente durante o intervalo de 15 segundos, e em seguida media-se o comprimento de arame eletrodo gasto neste intervalo. Portanto a velocidade de brasagem foi determinada, dividindo-se o comprimento ( cm ) do arame gasto no intervalo de tempo de 15 segundos. Segundo MARQUES, P. [ 4 ], a velocidade de soldagem é um parâmetro que está relacionado ao tipo de gás de proteção usado e que resulta nas características geométricas do cordão de solda.

### III. 4.5 – Procedimento de Brasagem

Conforme preconiza o catálogo técnico da White Martins [ 60 ], o processo de brasagem por arco elétrico, não necessita de limpeza prévia da superfície a ser brasada, conforme é recomendado na brasagem convencional [ 54, 55, 60, 62 ] . Quanto ao procedimento de brasagem, executou-se união de chapas galvanizadas à quente com dimensões de 0,8 X 50 X 80mm, na posição plana, com uma configuração de junta sobreposta com sobreposição de 8 mm de uma chapa sobre a outra, Figura III.12. Durante a brasagem o arame eletrodo foi conectado ao pólo positivo e os corpos de prova foram posicionados e fixos na mesa de trabalho com auxílio de dois suportes de aço carbono de 8 Kg cada um, com o intuito de fixar lateralmente os membros da junta, não permitindo abertura de raiz. Os membros da junta foram ponteados em uma extremidade, tendo iniciado a operação de brasagem no lado oposto, Figura III. 9.



Figura III. 9 – Suporte utilizado durante a brasagem dos corpos de prova.

#### III. 4.6 – Ensaio de corrosão acelerada em câmara de névoa salina

O ensaio de susceptibilidade a corrosão foi executado conforme preconiza a Norma ASTM B - 117 / 97 [ 68 ] com concentração de cloreto de sódio ( NaCl ) de 5%. Os corpos de prova foram enfileirados e suspensos no interior da câmara de névoa salina e o desempenho dos mesmos foi acompanhado por inspeção visual periódica e fotografados após 24, 72 e 120 horas. A Figura IV. 10 mostra a disposição das amostras no interior da câmara de névoa salina.



Figura IV. 10 – Disposição das amostras no interior da câmara de névoa salina.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### IV. 1 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE BASE

##### IV. 1.1 – Análise do Substrato

A Tabela IV. 1 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos de uma análise química do substrato das chapas CSN BGA – IF, utilizadas neste trabalho. Os valores obtidos na análise química mostraram que alguns elementos apresentaram teores ligeiramente fora do valor especificado pela norma NBR 7008/03 [ 66 ]. Contudo, os valores encontrados de propriedades mecânicas satisfizeram plenamente à norma em questão e as pequenas diferenças observadas na composição química não afetaram a qualidade da solda, porém observou-se uma redução significativa na propriedade de alongamento do material, Tabela IV. 2.

Tabela IV. 1 – Composição Química ( % ) do substrato.

	C	Mn	P	S	Al	Si	Nb	Ti	N <sub>2</sub>
ESPECIFICADA	0,0010 a 0,01	0,120 a 0,30	0,010 a 0,02	0,0050 a 0,02	0,0370 a 0,01	0,070 max.	0,022 max.	0,032 max.	0,0025 max.
COMPROBATÓRIA	0,0010	0,115	0,010	0,0050	0,0375	0,070	0,021	0,032	0,0025

Tabela IV. 2 – Propriedades mecânicas especificadas para o substrato.

ESPECIFICADA		Limite de Escoamento ( MPa )	Limite de Resistência Máximo ( MPa )	Alongamento Mínimo ( % )
		166	311	42
COMPROBATÓRIA	CP 1	164	309	28
	CP 2	160	310	25
	CP 3	158	312	23

Quanto às microestruturas, os exames metalográficos realizados nas amostras do substrato, permitiram observar uma microestrutura constituída de ferrita poligonal predominando todo o material de base, Figura IV. 1.

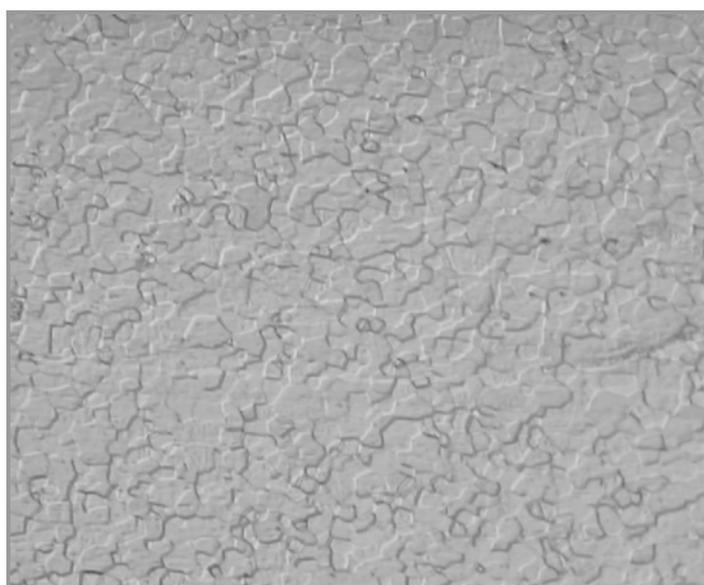


Figura IV. 1 – Ferrita poligonal, aumento de 400X e atacada com reagente Nital 2%.

#### IV. 1.2 – Espessura de Revestimento da Camada de liga Fe-Zn

A uniformidade do revestimento galvannealed foi verificada através de uma varredura de linha feita por MEV – EDS, no sentido vertical da camada de revestimento. Esta análise permitiu mapear a presença dos elementos Fe e Zn, podendo ser visto na Figura IV. 2. Em seguida foram feitas inúmeras medições ao longo da espessura de revestimento desta camada de liga, de onde se concluiu que a altura do revestimento compreendia 14 micrometros, Figura IV. 3.

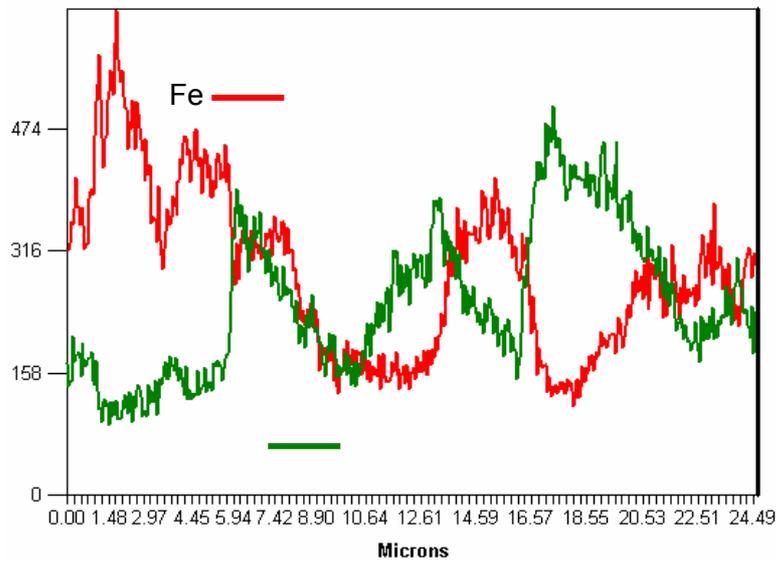


Figura IV. 2 – Espectro de Fe e Zn na camada de revestimento.

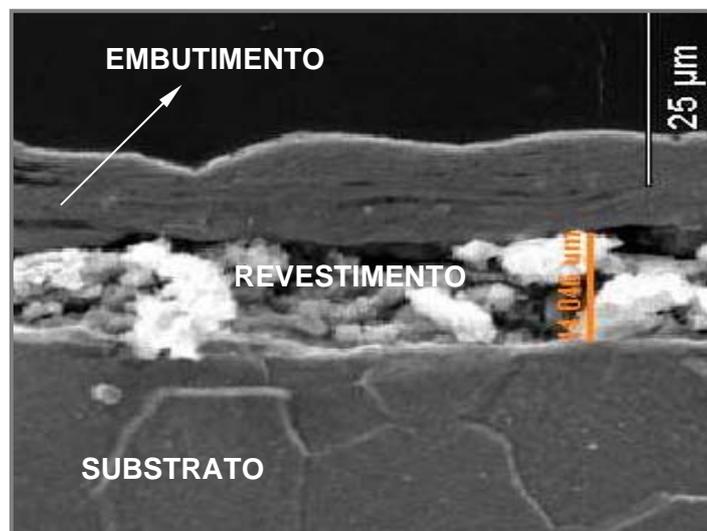


Figura IV. 3 – Espessura da camada de revestimento.

## IV. 2 – ENSAIO DE TRAÇÃO DA JUNTA SOBREPOSTA BRASADA

A Tabela IV. 3 apresenta os valores de propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tração. Embora estes valores tenham ficado abaixo do especificado pela norma [ 66 ], mesmo assim, todas as Matrizes proporcionaram juntas sobrepostas brasadas, sem comprometer a integridade das mesmas. A Figura IV. 4 mostra um dos corpos de prova ensaiados, e observa-se que a ruptura ocorreu no material de base e bem afastada do cordão de solda.

Tabela IV. 3 – Propriedades mecânicas das amostras brasadas.

TIPO DE JUNTA		Limite de Escoamento ( MPa )	Limite de Resistência Máximo ( MPa )	Alongamento Mínimo ( % )
SOBREPOSTA	Matriz A – CP 6	146	315	22
	Matriz B – CP 12	148	312	23
	Matriz C – CP 18	142	311	23
	Matriz D – CP 24	131	318	24
	Matriz E – CP 30	158	312	21
	Matriz F – CP 36	148	315	24



Figura IV. 4 – Detalhe do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.

## IV. 3 – PARÂMETROS DE BRASAGEM

Para melhor compreender os parâmetros de brasagem, foi conectado um sistema de aquisição de dados à interface do equipamento de soldagem que possibilitou analisar o comportamento das curvas de tensão e corrente de brasagem, assim como o aporte térmico de cada operação. Quanto à velocidade de brasagem, a mesma foi determinada de acordo com o item III. 4.5. Em seguida realizou-se a operação de brasagem em várias amostras de pré-testes, de onde foi possível estabelecer os parâmetros considerados ideais para brasagem por arco elétrico de juntas sobrepostas na posição plana. A Tabela IV. 3 mostra alguns destes parâmetros, e mais adiante podem ser vistos os oscilogramas correspondentes às operações de brasagem, Figuras IV. 5 a IV. 10.

Tabela IV. 3 – Parâmetros de brasagem obtidos com o auxílio do sistema de aquisição de dados.

Matriz	Material de Adição	Gás de Proteção	Corpo De Prova	Velocidade de Soldagem ( cm / min )	Corrente de Soldagem ( A )	Tensão de Soldagem ( V )
A	BT 511	StarGold	CP-01	496	68	13,8
			CP-02		68	13,8
			CP-03		67	13,8
B		Ar	CP-08	476	81	13,4
			CP-09		81	13,4
			CP-10		86	13,2
C		Ar + 2%O <sub>2</sub>	CP-15	472	73	13,9
			CP-16		73	13,9
			CP-17		68	14
D	BT 513	StarGold	CP-22	496	67	13,9
			CP-23		69	13,9
			CP-24		65	14,2
E		Ar + 2%O <sub>2</sub>	CP-29	512	63	14,2
			CP-30		64	14,1
			CP-31		64	14,1
F		Ar	CP-36	496	79	13,4
			CP-37		75	13,6
			CP-38		80	13,4

#### IV. 3.1 – Oscilogramas Tensão X Tempo e Corrente X Tempo

As Figuras IV. 5 a IV. 10 mostram respectivamente os oscilogramas das funções Tensão ( V ) X tempo ( mSeg ) e Corrente ( A ) X tempo (mSeg ), obtidos diretamente do sistema de aquisição de dados e que se referem as condições de brasagens estudadas. Nota-se que os oscilogramas referentes as Matrizes C e E, Figuras IV. 7 e IV. 9, apresentam um modo de transferência por curto circuito relativamente estável e com uma corrente de pico bem uniforme, no entanto ocorre uma certa defasagem de tempo entre picos. Já as Matrizes B e F, Figuras IV. 6 e IV. 10, apresentaram as correntes de pico com uma defasagem de tempo relativamente maior. Uma condição de arco mais estável pode ser vista nos oscilogramas das Matrizes A e D, Figuras IV. 5 e IV. 8, onde percebeu se que as variações de corrente de pico, assim como, o tempo de defasagem entre as mesmas são sensivelmente menores que as demais Matrizes.

#### IV. 3.2 – Estabilidade do Arco Elétrico

Percebeu-se que a instabilidade do arco elétrico ocorreu principalmente nas correntes de pico; portanto, optou-se por utilizar a corrente de pico média (  $I_{pm}$  ) e o seu respectivo desvio padrão (  $DI_{pm}$  ), para cada Matriz, afim de avaliar a estabilidade do arco elétrico durante as operações de brasagem. A Tabela IV. 4 mostra os valores registrados de  $I_{pm}$  e  $DI_{pm}$  e a Tabela IV. 5 relaciona estes dois valores, onde entende-se que quanto maior a relação  $DI_{pm} / I_{pm}$ , menor será a estabilidade do arco.

Portanto, os arcos mais instáveis ocorreram para as Matrizes B, C, e F, que apresentaram maior defasagem de tempo entre as correntes de pico. Já a Matriz E também apresentou uma certa defasagem de tempo entre as correntes de pico,

embora tenha obtido uma boa estabilidade de arco. Quanto as Matrizes A e D, as mesmas conseguiram minimizar concomitantemente a oscilação e o tempo de defasagem da corrente e pico, conseguindo, desta forma, uma estabilidade de arco melhor em relação às demais Matrizes.

Tabela IV. 4: Valores das  $I_{pm}$  ( A ) e  $D_{Ipm}$  ( A ) de todas as Matrizes.

Número de Amostras	Matriz A		Matriz B		Matriz C		Matriz D		Matriz E		Matriz F	
	$I_{pm}$	$D_{Ipm}$										
1	68	38	84	55	72	52	76	40	66	42	75	59
2	68	38	81	55	73	50	67	39	63	37	79	53
3	68	38	81	56	73	51	69	40	64	35	75	51
4	66	38	86	58	68	35	65	40	64	35	80	54
5	82	68	78	57	74	53	67	38	62	34	77	55
6	67	37	79	55	72	51	68	40	64	36	75	53
7	68	38	84	59	76	54	71	40	64	35	77	72

**Matriz A:** BT 511 + StarGold; **Matriz B:** BT 511 + Ar; **Matriz C:** BT 511 + (Ar + 2% O<sub>2</sub>);  
**Matriz D:** BT 513 + StarGold; **Matriz E:** BT 513 + (Ar + 2% O<sub>2</sub>); **Matriz F:** BT 513 + Ar.

Tabela IV. 5: Relação entre o desvio padrão e a respectiva corrente de pico média de brasagem (  $D_{Im} / I_{pm}$  ).

Número de Amostras	Matriz A	Matriz B	Matriz C	Matriz D	Matriz E	Matriz F
	$D_{Im} / I_{pm}$					
1	0,56	0,65	0,72	0,53	0,63	0,78
2	0,56	0,68	0,68	0,58	0,59	0,67
3	0,56	0,69	0,70	0,58	0,55	0,68
4	0,57	0,67	0,51	0,61	0,55	0,67
5	0,83	0,73	0,72	0,57	0,55	0,71
6	0,55	0,70	0,71	0,59	0,56	0,71
7	0,56	0,70	0,71	0,56	0,55	0,93

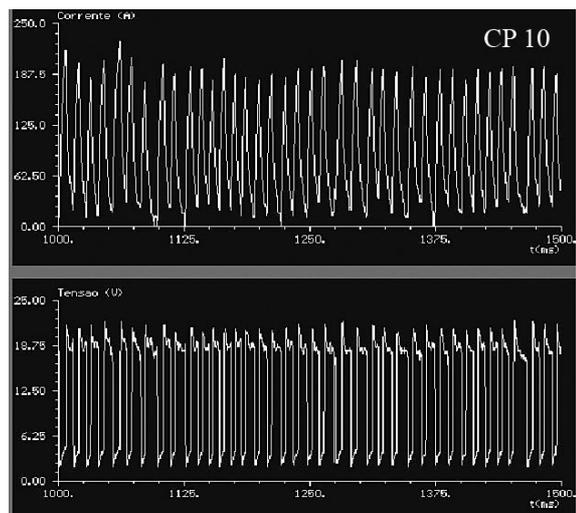
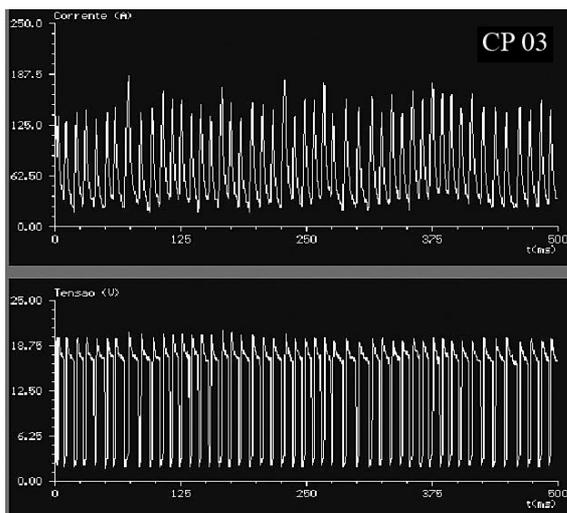
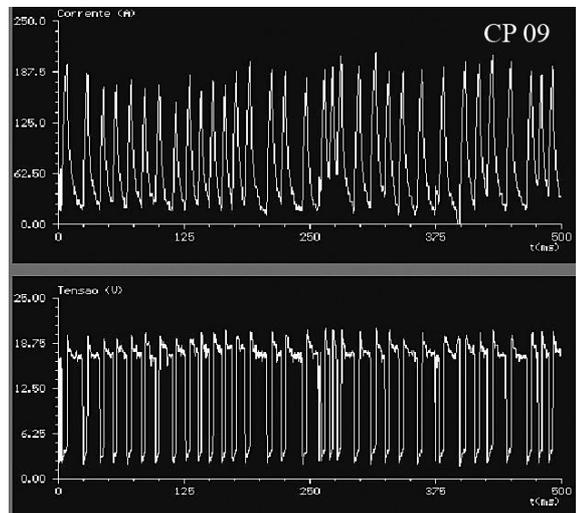
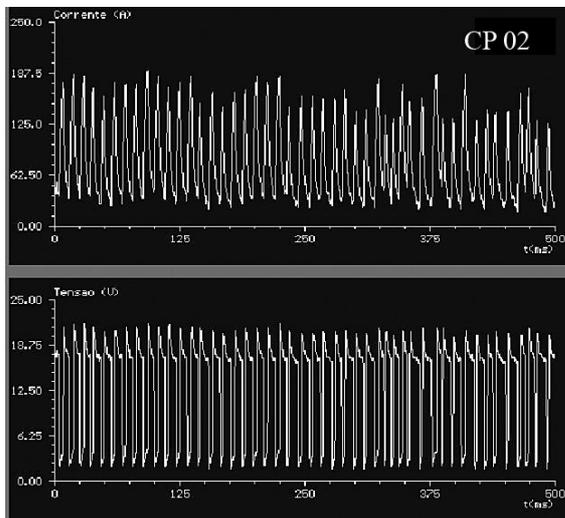
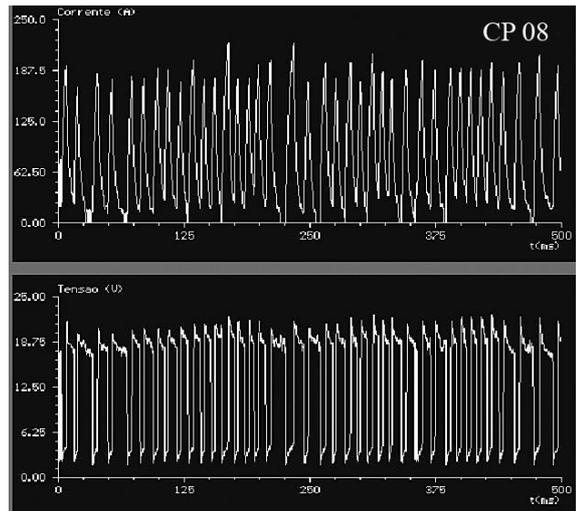
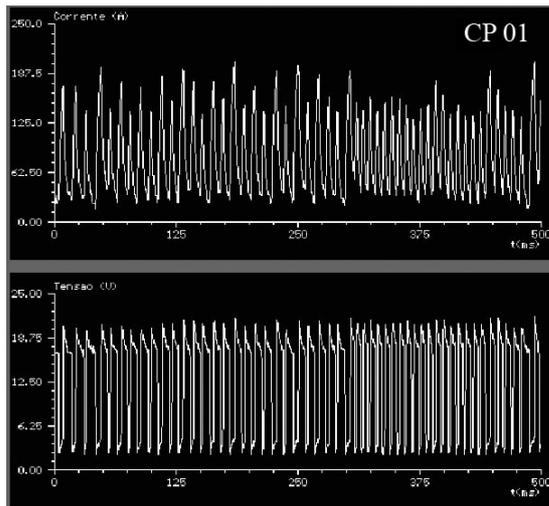


Figura IV. 5 – Gráfico de tensão e corrente da Matriz A ( 01, 02 e 03 ).

Figura IV. 6 – Gráfico de tensão e corrente da Matriz B ( 08, 09 e 10 ).

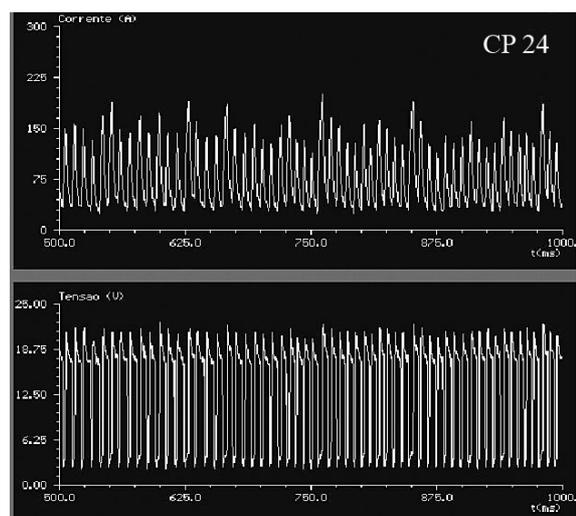
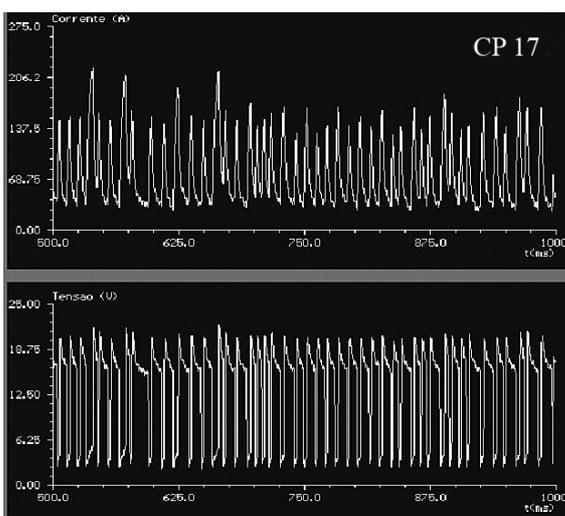
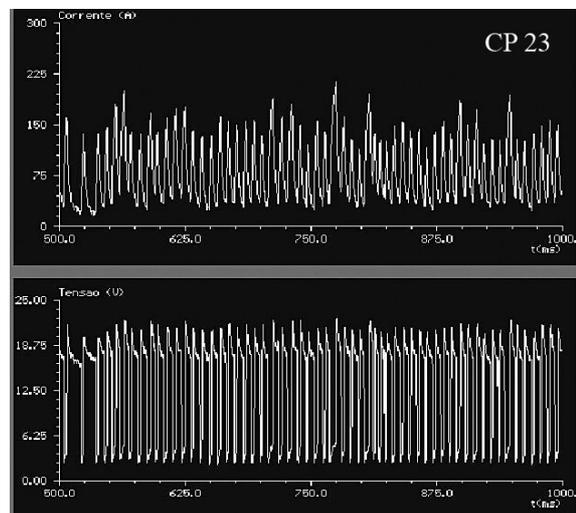
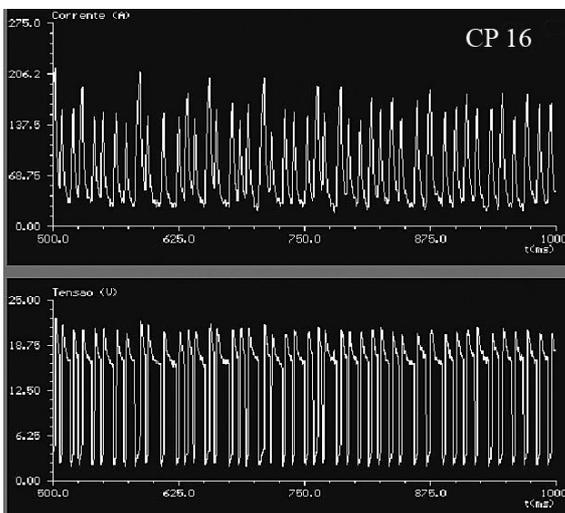
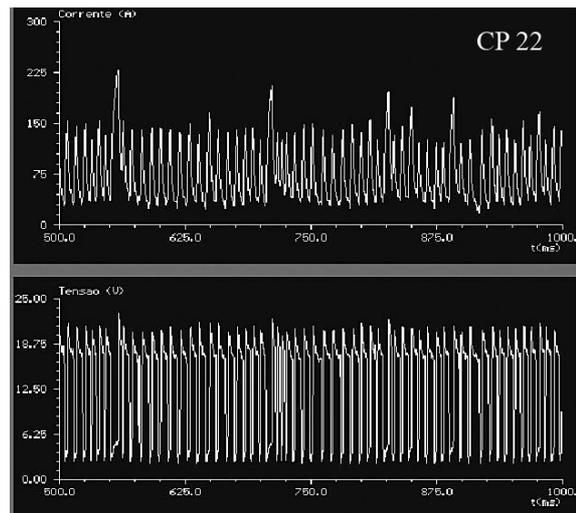
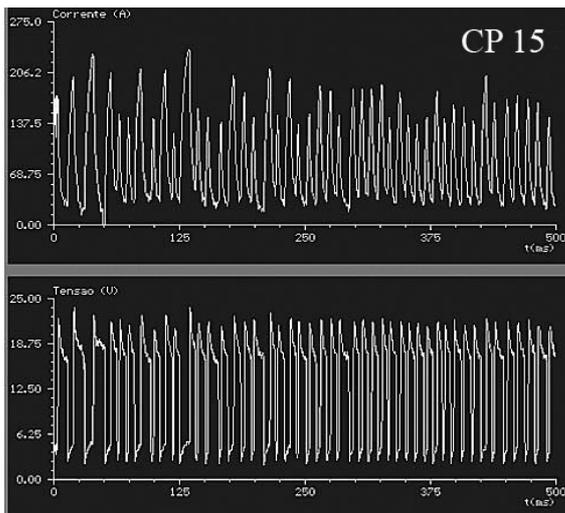


Figura IV. 7 – Gráfico de tensão e corrente da Matriz C ( 15, 16 e 17 ).

Figura IV. 8 – Gráfico de tensão e corrente da Matriz D ( 22, 23 e 24 ).

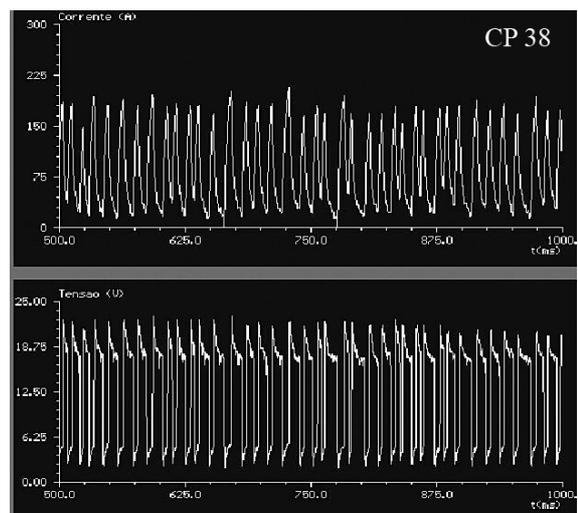
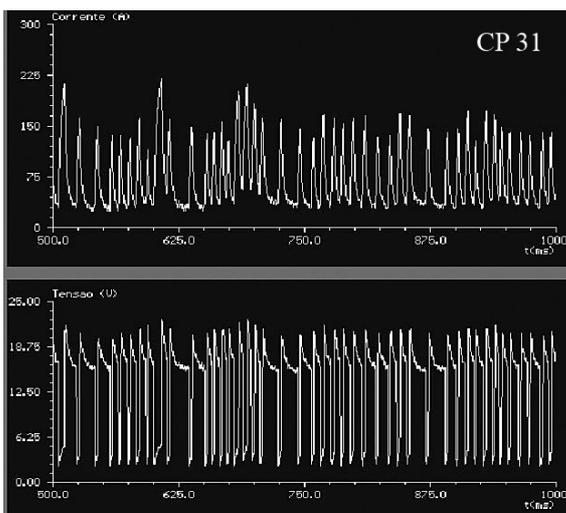
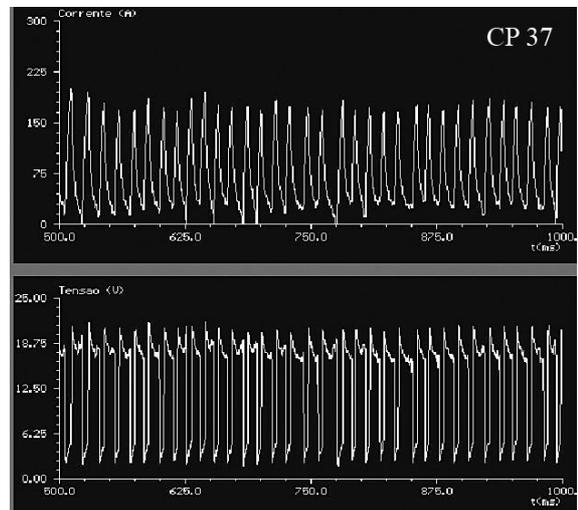
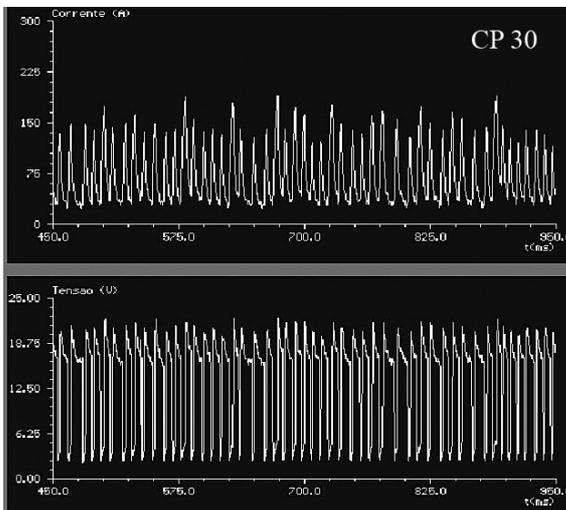
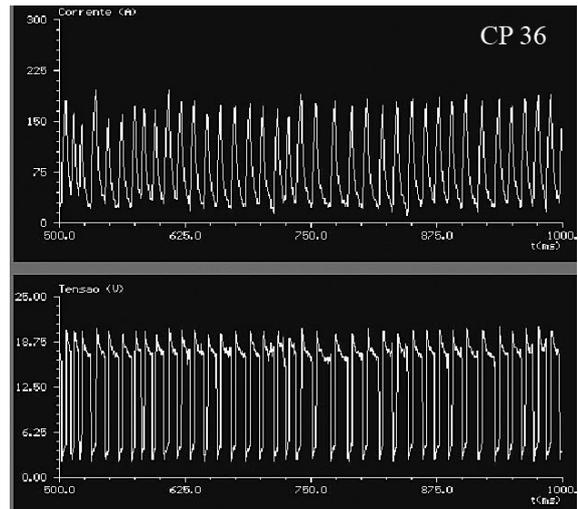
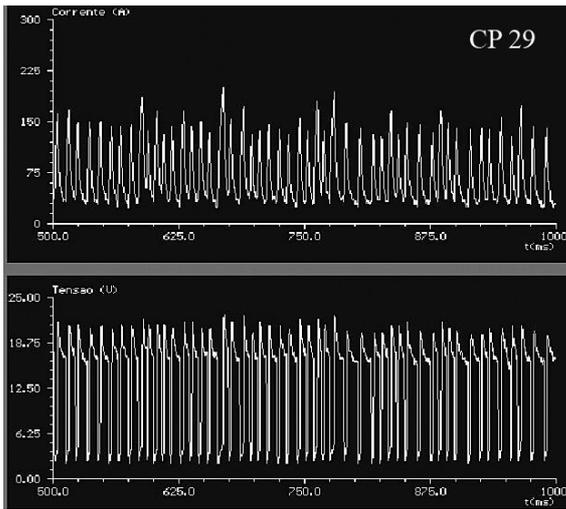


Figura IV. 9 – Gráfico de tensão e corrente da Matriz E ( 29, 30 e 31 ).

Figura IV. 10 – Gráfico de tensão e corrente da Matriz F ( 36, 37 e 38 ).

## IV. 4 – APORTE DE CALOR

O aporte de calor das Matrizes foi obtido através do sistema de aquisição de dados, conforme descrito no tem III. 2.1. A projeção deste ciclo térmico, no lado oposto da junta sobreposta com chapas de 0, 8 mm de espessura, foi inevitável para todas as condições de brasagem e isto pode ser visto na Figura IV. 11. Já os valores registrados dos aportes de calor estão na Tabela IV. 6.

Tabela IV. 6: Aporte térmico para as diversas condições de brasagem J ( KJ / cm ).

Nº de Experimentos	Matriz A	Matriz B	Matriz C	Matriz D	Matriz E	Matriz F
1	4109	4516	4109	4552	4010	4031
2	4109	4367	4202	4063	3926	4338
3	4109	4340	4162	4123	4016	4222
4	3979	4553	4236	3979	4025	4319
5	4195	4214	4130	4088	3945	4161
6	4074	4267	4094	4094	4000	4072
7	4109	4386	4203	4243	4031	4280

**Matriz A:** BT 511 + StarGold; **Matriz B:** BT 511 + Ar; **Matriz C:** BT 511 + (Ar + 2% O<sub>2</sub>); **Matriz D:** BT 513 + StarGold; **Matriz E:** BT 513 + (Ar + 2% O<sub>2</sub>); **Matriz F:** BT 513 + Ar.



Figura IV. 11 – Projeção do aporte de calor no lado oposto da junta sobreposta.

## IV. 5 – ASPECTOS GEOMÉTRICOS DO CORDÃO DE SOLDA

As Figuras IV. 12 a IV. 17 ilustram os aspectos superficiais e os perfis dos cordões de solda que resultaram das operações definitivas de brasagem. Observa-se que a composição química dos gases de proteção influencia a geometria do cordão de solda [ 4, 7 ]; assim como os ângulos dos cordões de solda apresentaram relação de molhabilidade [ 50 ], Tabela IV. 7. Em todas as Matrizes, mesmo utilizando amostras sem abertura de raiz, foi possível observar uma penetração razoável do metal de adição ( MA ) entre os membros das juntas, evidenciando, portanto, a existência do fenômeno da capilaridade no processo “MIG-Brazing”, Figuras IV. 12 a IV. 17.

Tabela IV. 7 – Variação do ângulo de molhagem.

Matriz	$\alpha$ – ângulo de Molhabilidade ( ° )	$\theta$ – ângulo de Convexidade ( ° )
Matriz A: BT 511 + StarGold	CP 03 – 48° 15'	131 ° 45'
Matriz B: BT 511 + 100% Ar	CP 10 – 58° 14'	121 ° 46'
Matriz C: BT 511 + ( Ar + 2% O <sub>2</sub> )	CP 17 – 34° 44'	145 ° 16'
Matriz D: BT 513 + StarGold	CP 24 – 51° 10'	128° 50'
Matriz E: BT 513 + ( Ar + 2%O <sub>2</sub> )	CP 31 – 61° 4'	118 ° 56'
Matriz F: BT 513 + 100% Ar	CP 38 – 92° 25'	87 ° 35'

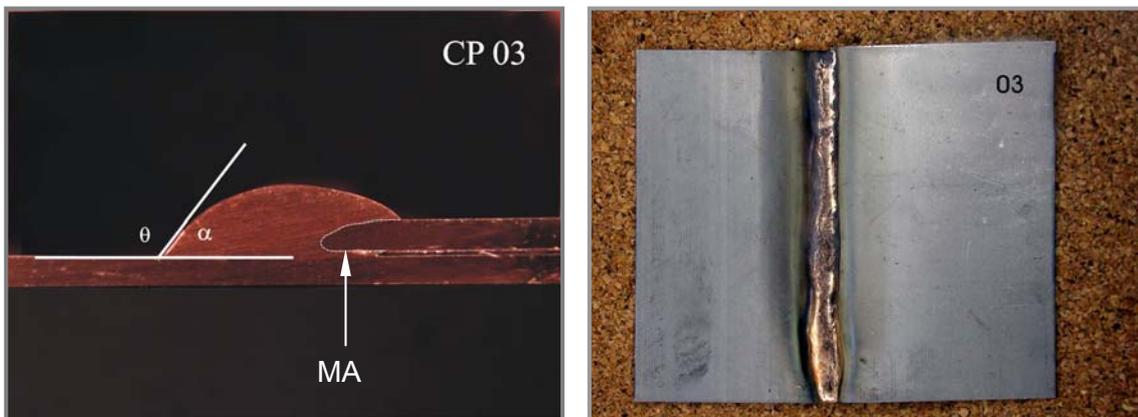


Figura IV. 12 – Aspecto frontal e superficial do cordão de solda da Matriz A.

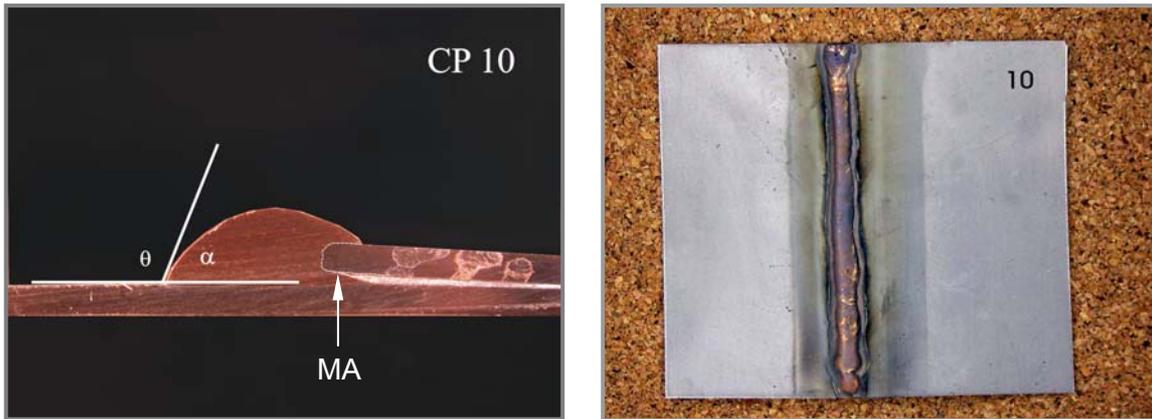


Figura IV. 13 – Aspecto frontal e superficial do cordão de solda da Matriz B.



Figura IV. 14 – Aspecto frontal e superficial do cordão de solda da Matriz C.



Figura IV. 15 – Aspecto frontal e superficial do cordão de solda da Matriz D.

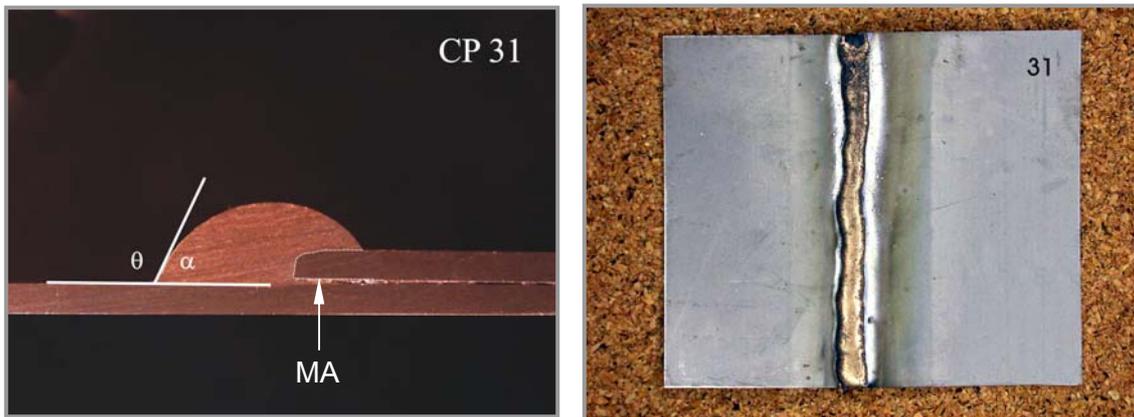


Figura IV. 16 – Aspecto frontal e superficial do cordão de solda da Matriz E.



Figura IV. 17– Aspecto frontal e superficial do cordão de solda da Matriz F.

## IV. 6 – ASPECTO MICROESTRUTURAL DA JUNTA SOBREPOSTA BRASADA

### IV. 6.1 – Zona Termicamente Afetada ( ZTA )

A fim de se determinar uma possível influência do gás de proteção e do arame eletrodo na morfologia microestrutural da ZTA, avaliou-se através de microscopia ótica as condições de brasagem com diferentes proteções gasosas e aportes térmicos similares. Ao observar as Figuras IV. 18 a IV. 23, identifica-se predominantemente, em todas as Matrizes, a presença de grãos equiaxiais de ferrita na interface entre o metal de solda ( MS ) e o metal de base ( MB ), seguidos de grãos de ferrita poligonal reauecidos ( maiores ).

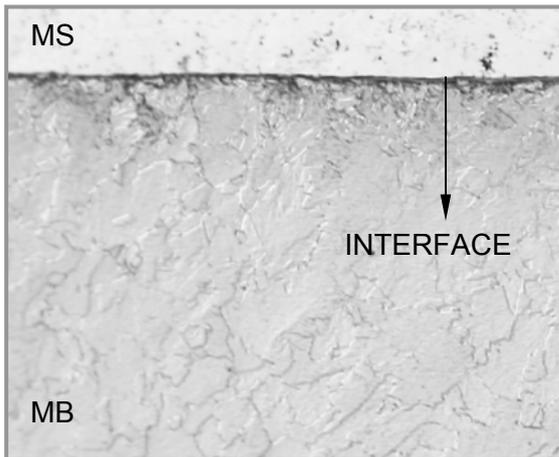


Figura IV. 18 – ZTA da Matriz A com aumento de 50 X e atacada com nital 2%.

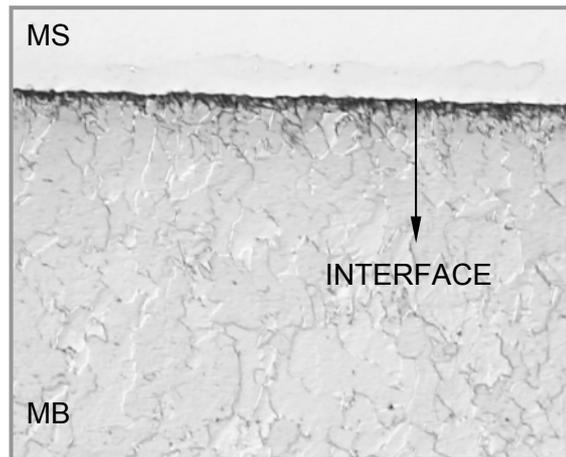


Figura IV. 19 – ZTA da Matriz B com aumento de 50 X e atacada com nital 2%.

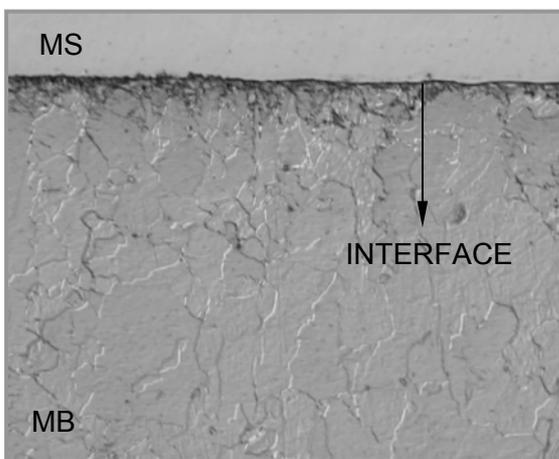


Figura IV. 20 – ZTA da Matriz C com aumento de 50 X e atacada com nital 2%.

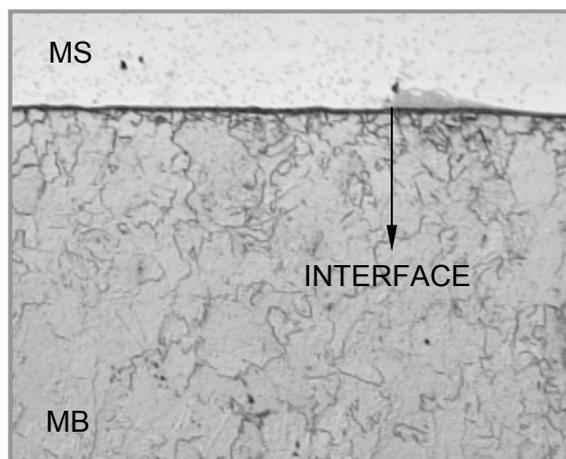


Figura IV. 21 – ZTA da Matriz D com aumento de 50 X e atacada com nital 2%.

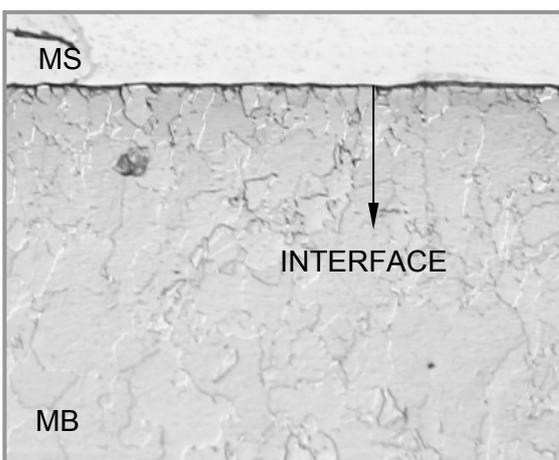


Figura IV. 22 – ZTA da Matriz E com aumento de 50 X e atacada com nital 2%.

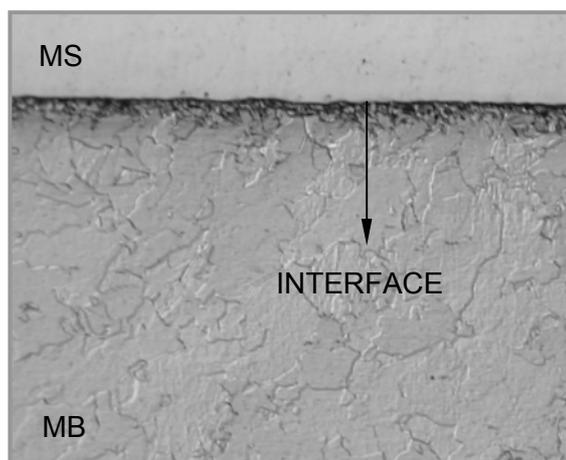


Figura IV. 23 – ZTA da Matriz F com aumento de 50 X e atacada com nital 2%.

## IV. 6.2 – Metal de solda ( MS )

As Figuras IV. 24 a IV. 29 mostram as características microestruturais do MS das Matrizes A, B, C, D, E, e F. Os resultados revelaram que não houve influência significativa exercida pelo gás de proteção, inclusive nos casos onde os aportes térmicos de calor foram diferentes. O MS de todas as Matrizes apresentou uma estrutura bruta de fusão, constituída de grãos dendríticos.

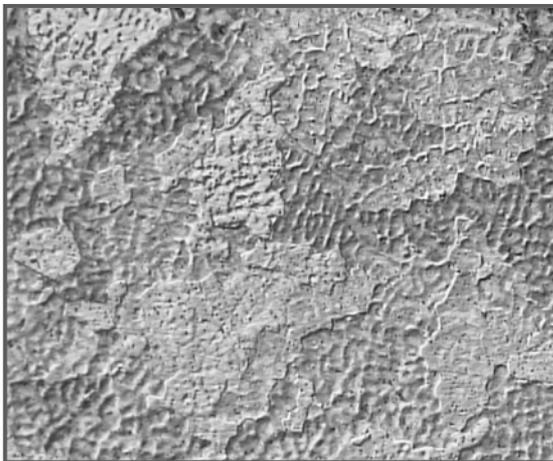


Figura IV. 24 – MS da Matriz A com aumento de 100 X e atacada com cloreto férrico 5%.

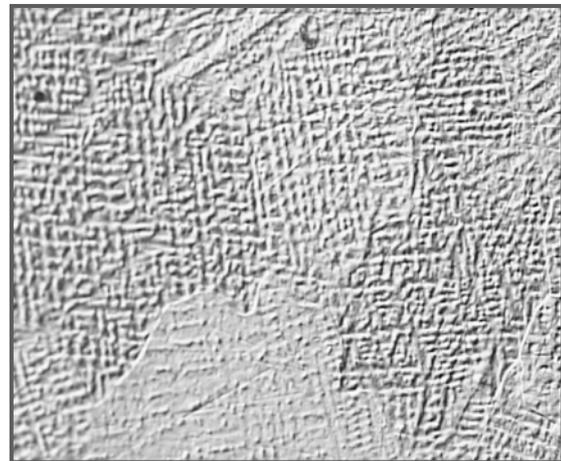


Figura IV. 25 – MS da Matriz B com aumento de 100 X e atacada com cloreto férrico 5%.

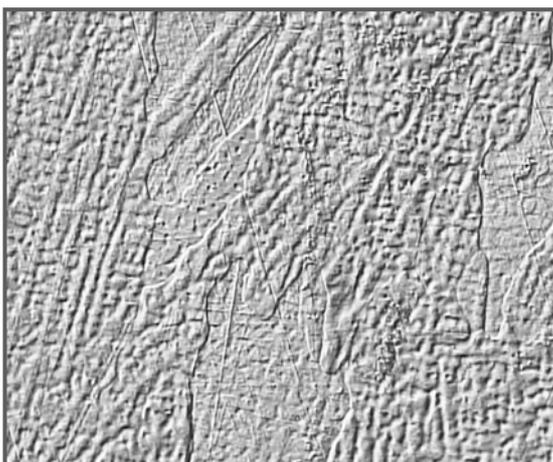


Figura IV. 26 – MS da Matriz C com aumento de 100 X e atacada com cloreto férrico 5%.

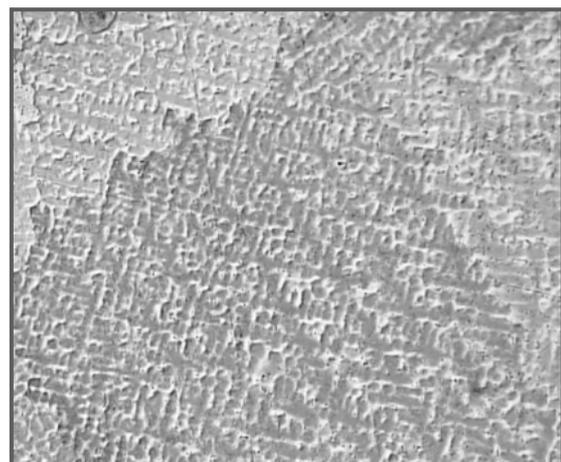


Figura IV. 27 – MS da Matriz D com aumento de 100 X e atacada com cloreto férrico 5%.

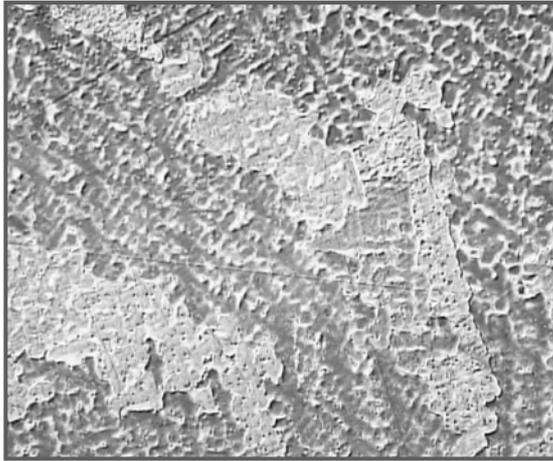


Figura IV. 28 – MS da Matriz E com aumento de 100 X e atacada com cloreto férrico 5%.

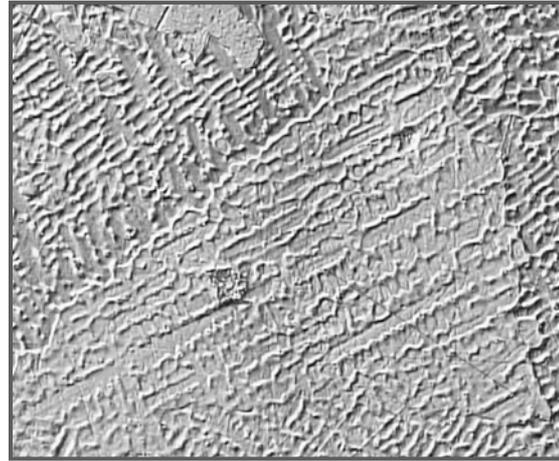


Figura IV. 29 – MS da Matriz F com aumento de 100 X e atacada com cloreto férrico 5%.

#### IV. 7 – MOLHABILIDADE

O Silício ( Si ) apresenta um efeito bastante pronunciado na mudança do ângulo de molhagem e promove, também, um aumento na resistência mecânica e dureza da liga. Portanto, fez-se mapeamento por pontos, através de MEV – EDS, na interface entre o MS e o MB para verificar a presença do Si; e em seguida associá-lo a molhabilidade das Matrizes. As Figuras IV. 30 a IV. 35 mostram a presença do Si, quando exposto às atmosferas gasosas diferenciadas de StarGold, Ar puro , e mistura ( Ar + 2%O<sub>2</sub> ).

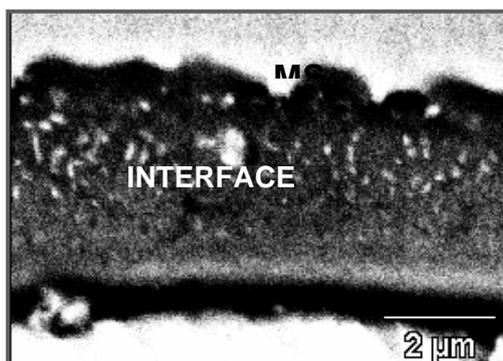


Figura IV. 30 – Interface MS X MB da Matriz A.

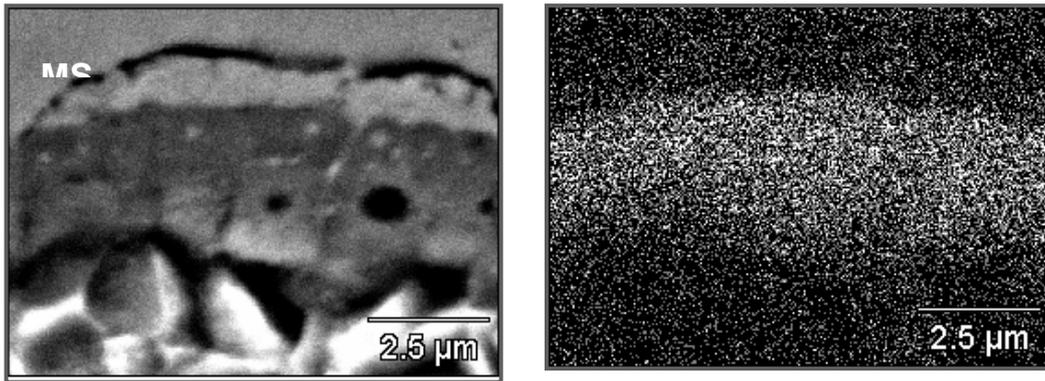


Figura IV. 31 – Interface MS X MB da Matriz B.

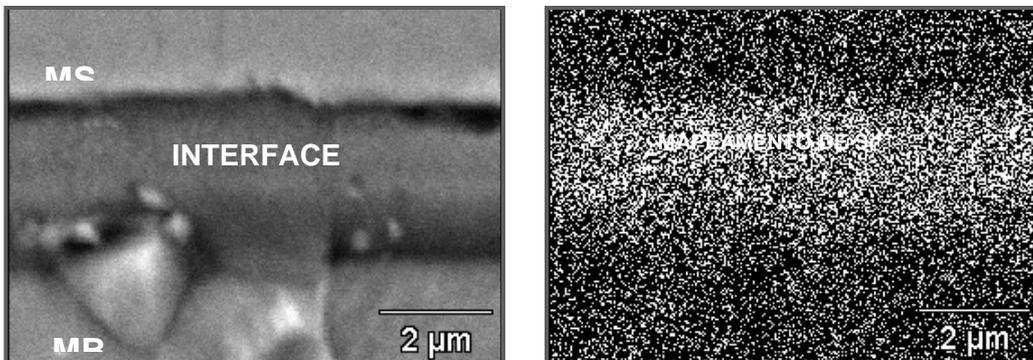


Figura IV. 32 – Interface MS X MB da MATRIZ C.

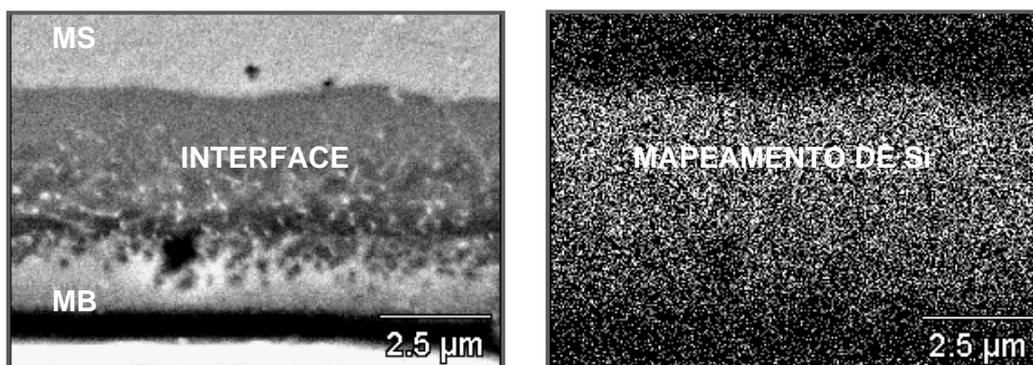


Figura IV. 33 – Interface MS X MB da MATRIZ D.

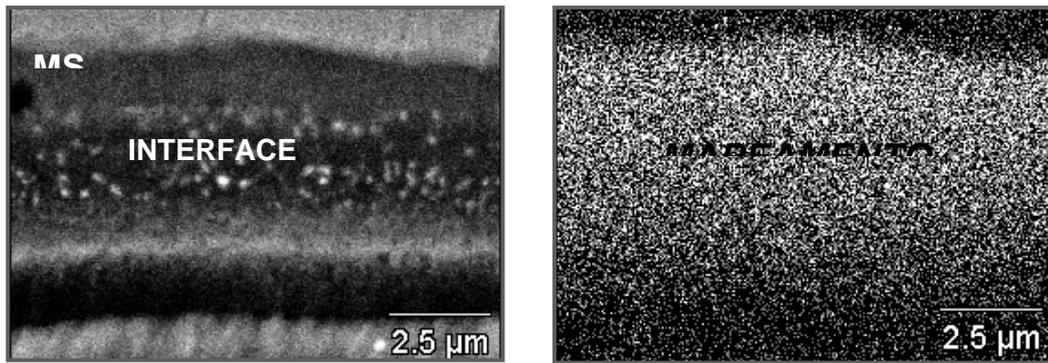


Figura IV. 34 – Interface MS X MB da MATRIZ E.

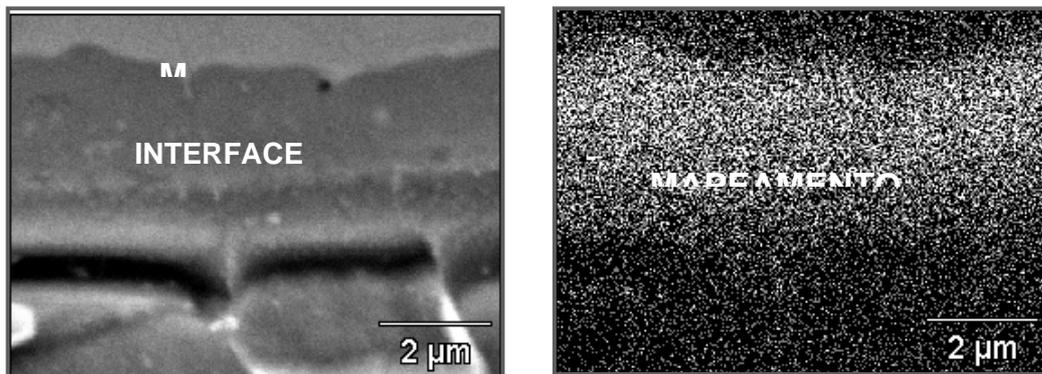


Figura IV. 35 – Interface MS X MB da MATRIZ F.

#### IV. 8 – VARREDURA DE LINHA DOS ELEMENTOS Fe e Zn FEITA POR MEV – EDS

Na tentativa de se avaliar uma possível influência dos parâmetros de brasagem com o comportamento do revestimento galvannealed (liga Fe-Zn), foram feitas em todas as Matrizes e após a brasagem dos corpos de prova, varredura de linha dos elementos Fe e Zn, através de MEV – EDS. A análise consistiu no mapeamento destes elementos no revestimento do substrato, a partir da margem do cordão de solda e afastando-se do mesmo em direção ao material de base, obedecendo à distância de 0,5 mm. As Figuras IV. 36 a IV. 41 mostram os resultados deste ensaio.

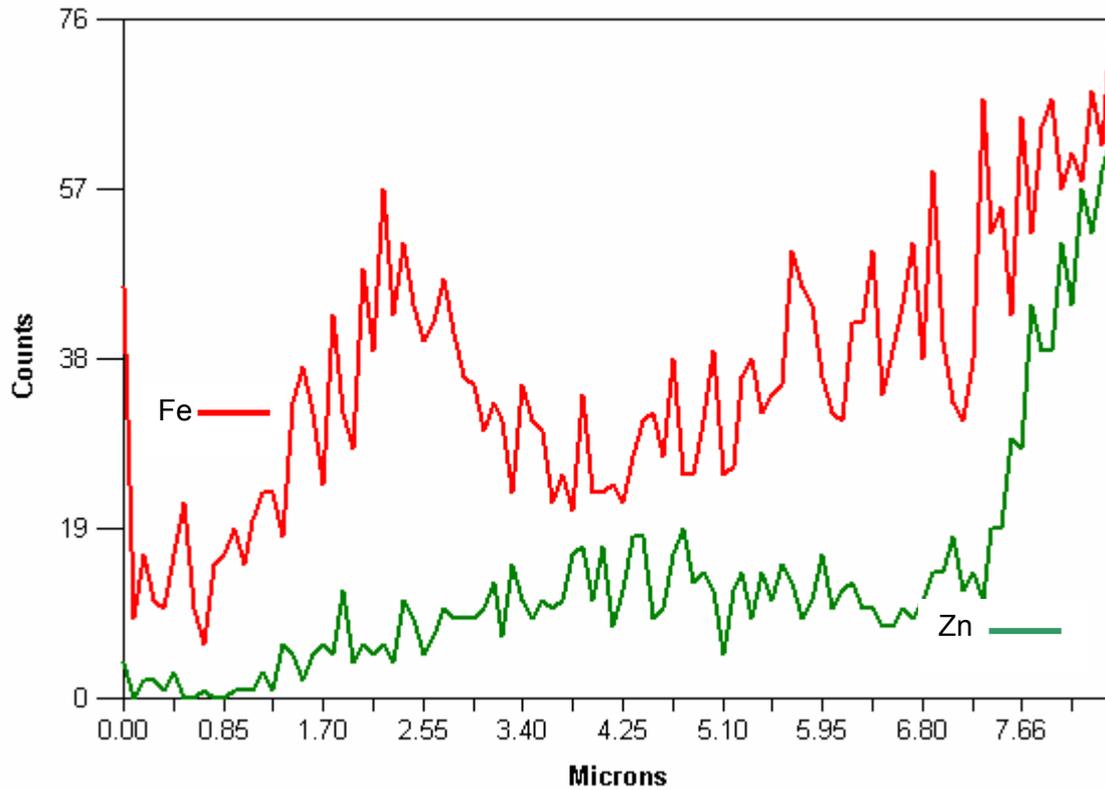


Figura IV. 36 – Espectro da varredura de linha dos elementos Fe e Zn da Matriz A.

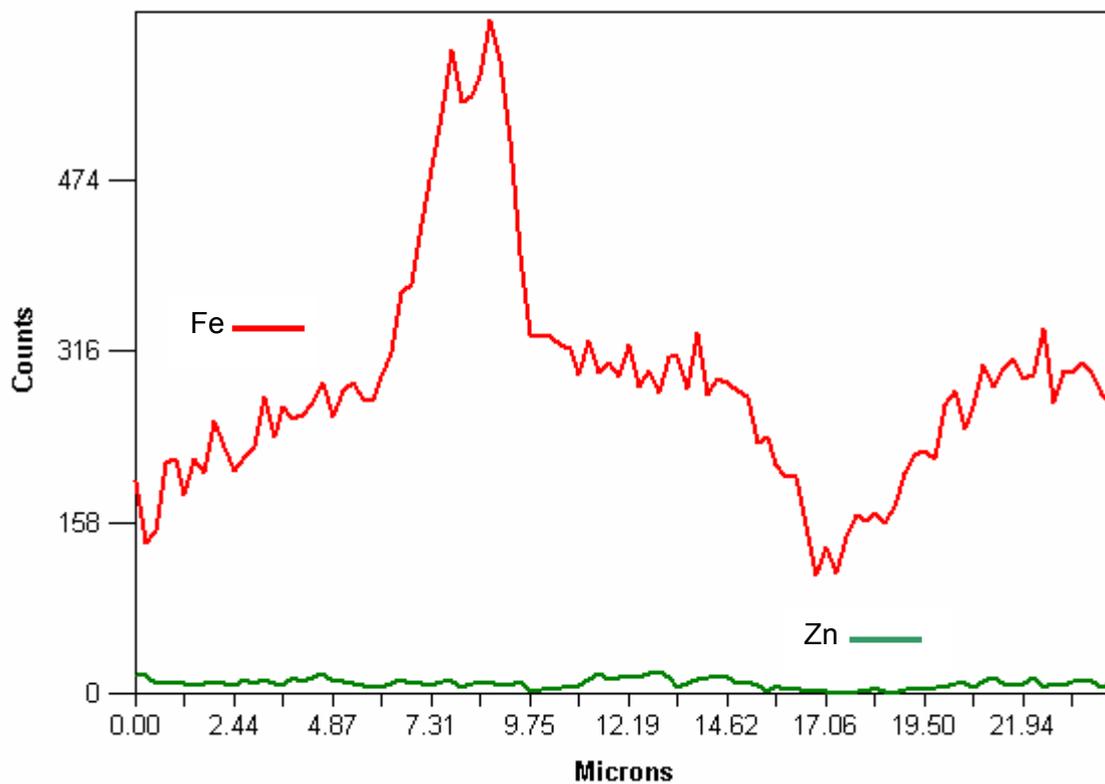


Figura IV. 37 – Espectro da varredura de linha dos elementos Fe e Zn da Matriz B.

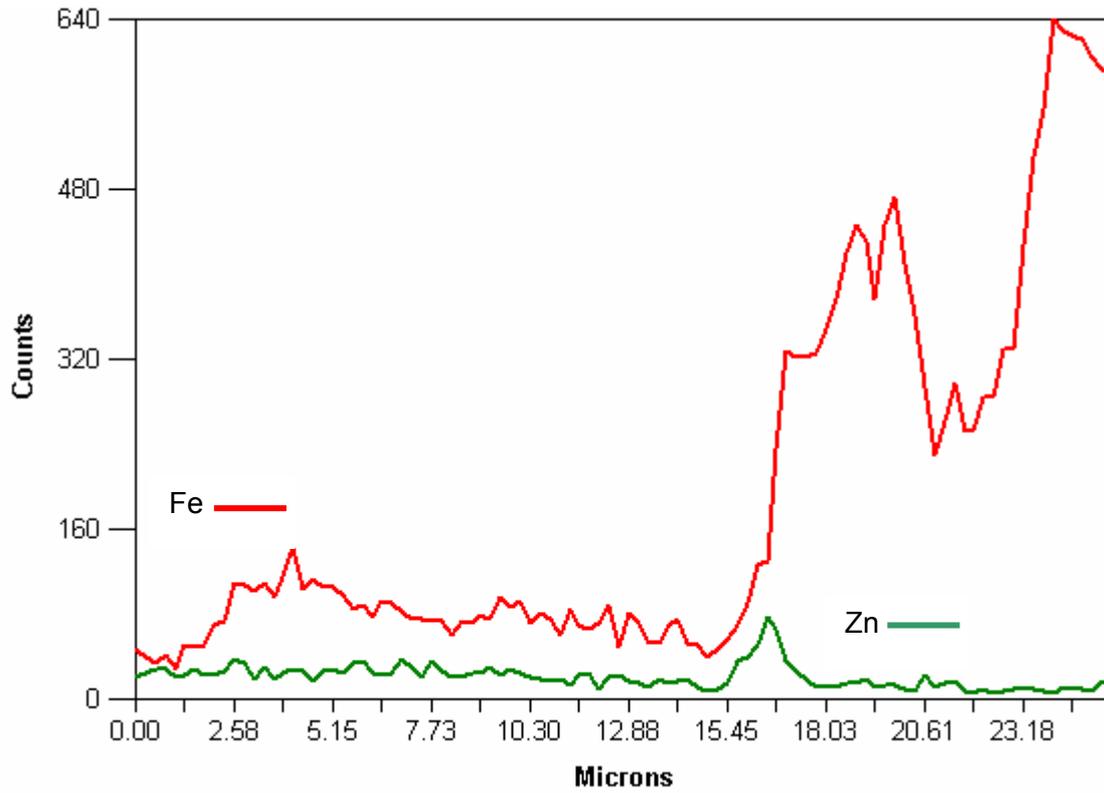


Figura IV. 38 – Espectro da varredura de linha dos elementos Fe e Zn da Matriz C.

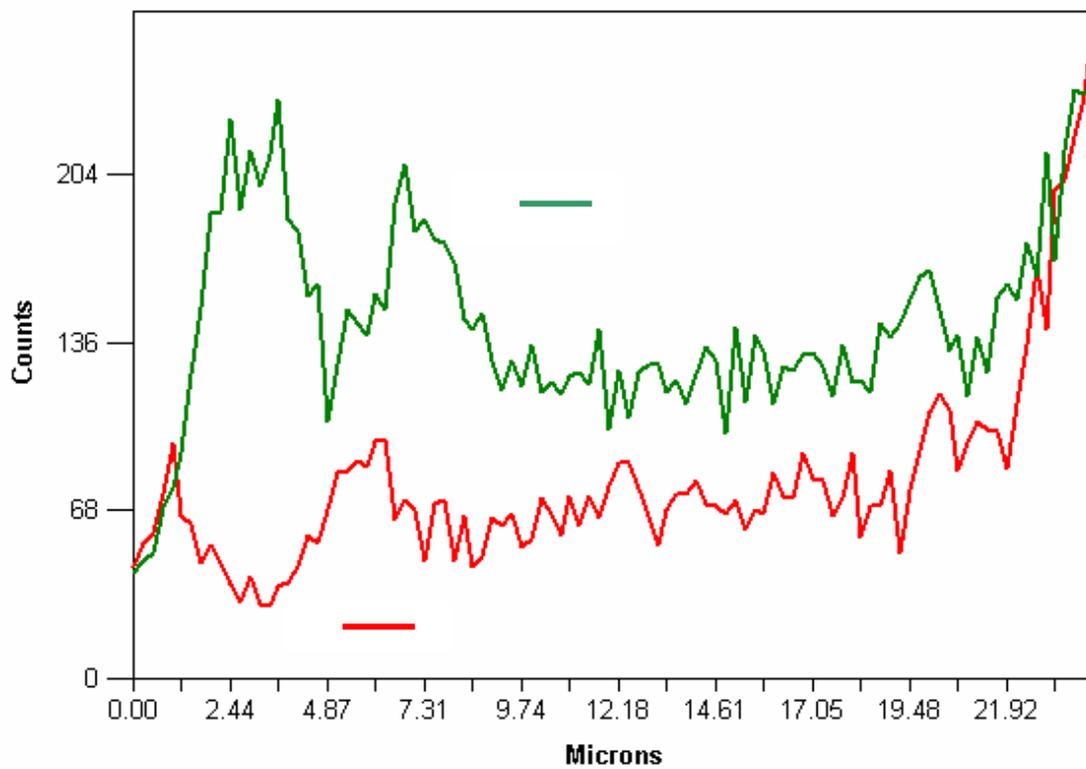


Figura IV. 39 – Espectro da varredura de linha dos elementos Fe e Zn da Matriz D.

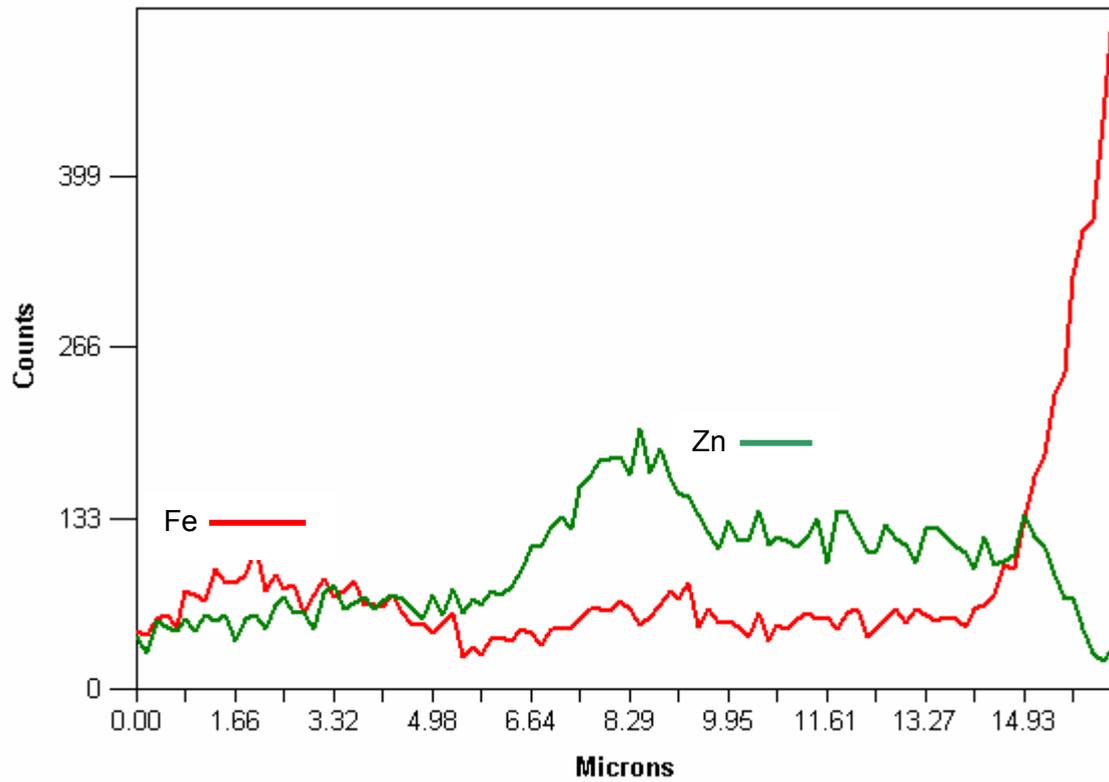


Figura IV. 40 – Espectro da varredura de linha dos elementos Fe e Zn da Matriz E.

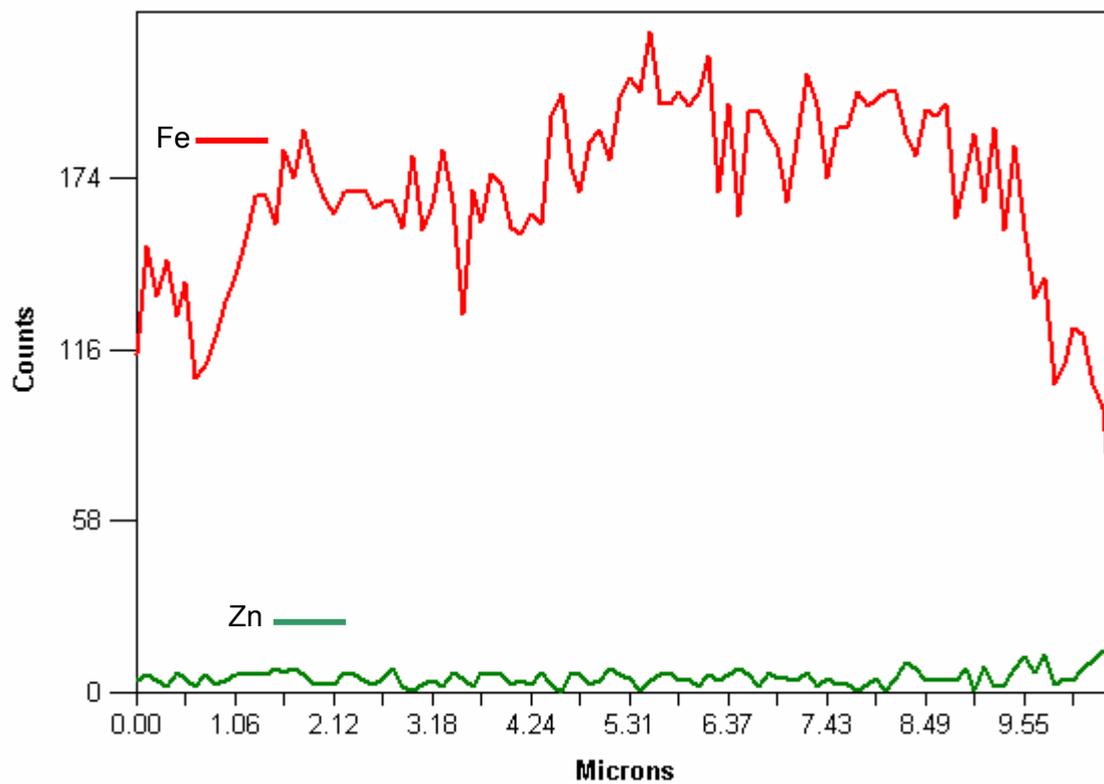


Figura IV. 41 – Espectro da varredura de linha dos elementos Fe e Zn da Matriz F.

## IV. 9 – ESAIO DE CORROSÃO ACELERADA EM CÂMERA DE NÉVOA SALINA

O item IV. 8 mostra espectros na tentativa de se avaliar uma possível influência dos parâmetros de brasagem ( Matrizes A, B, C, D, E, e F ) com o comportamento do revestimento galvannealed ( liga Fe-Zn ), após a brasagem dos corpos de prova. Complementando aquele ensaio fez-se, então, o ensaio de susceptibilidade a corrosão em câmara de névoa salina para tentar ratificar as informações obtidas no item IV. 8, isto é, as Matrizes que após a brasagem apresentassem o revestimento com degradação do Zn, Figuras IV. 36 a IV. 41, supostamente resistiriam menos ao ensaio de corrosão. No entanto, os resultados obtidos com o ensaio de corrosão acelerada em câmara de névoa salina mostraram que as chapas zincadas à quente com acabamento galvannealed, não apresentaram um bom desempenho em relação à resistência a corrosão. Deve-se, entretanto, mencionar que as condições do ensaio foram consideradas muito agressivas, promovendo, desta forma, muita dificuldade para identificar, ao longo do tempo, o início da corrosão vermelha em quaisquer das Matrizes ensaiadas. As Figuras IV. 42 a IV. 59 mostram os resultados do ensaio.

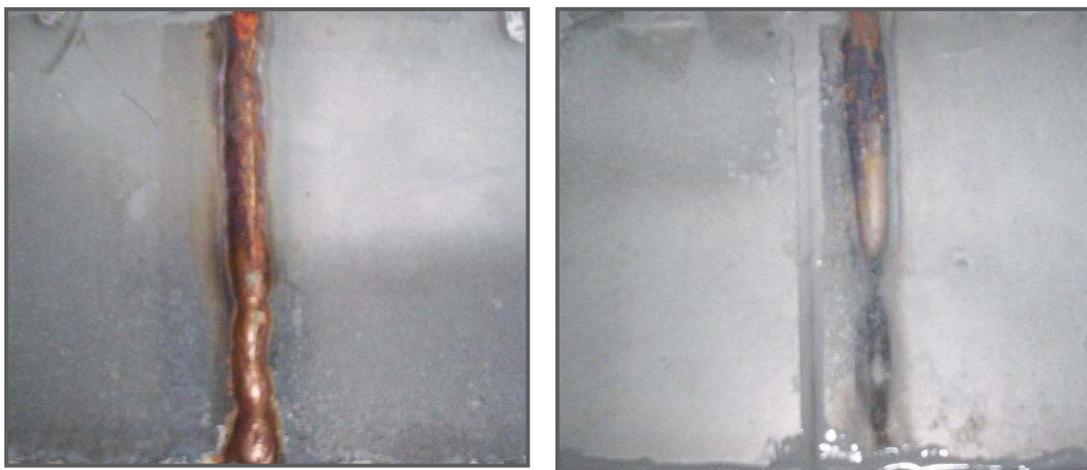


Figura IV. 42 – Matriz A frente e verso com 24 horas de exposição.

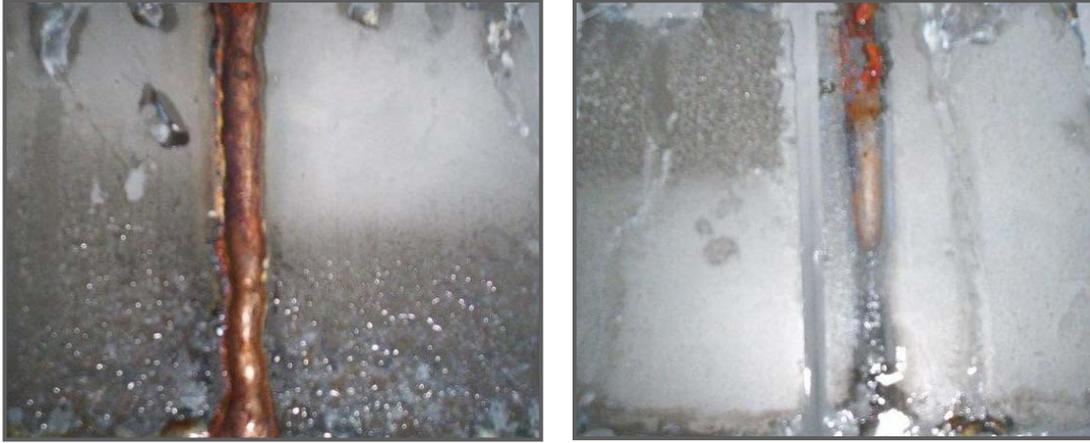


Figura IV. 43 – Matriz A frente e verso com 48 horas de exposição.

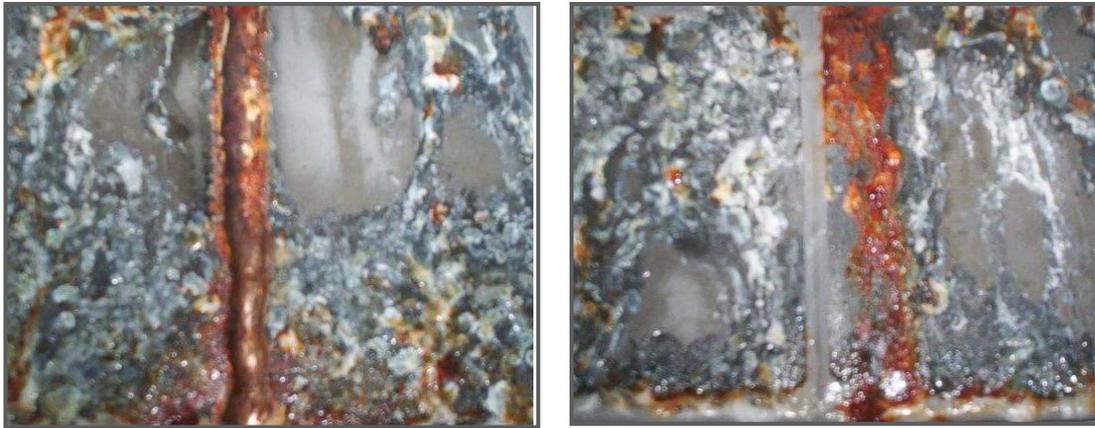


Figura IV. 44 – Matriz A frente e verso com 120 horas de exposição.

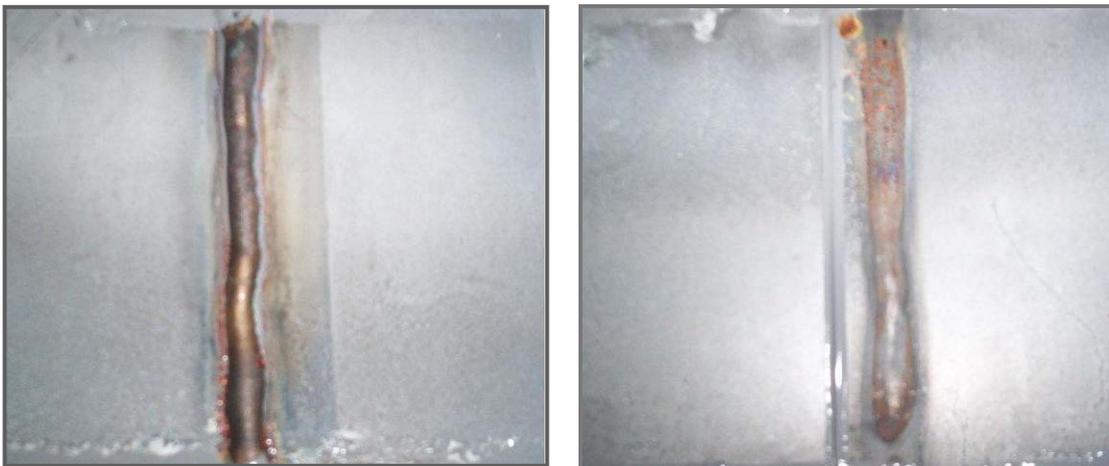


Figura IV. 45 – Matriz B frente e verso com 24 horas de exposição.

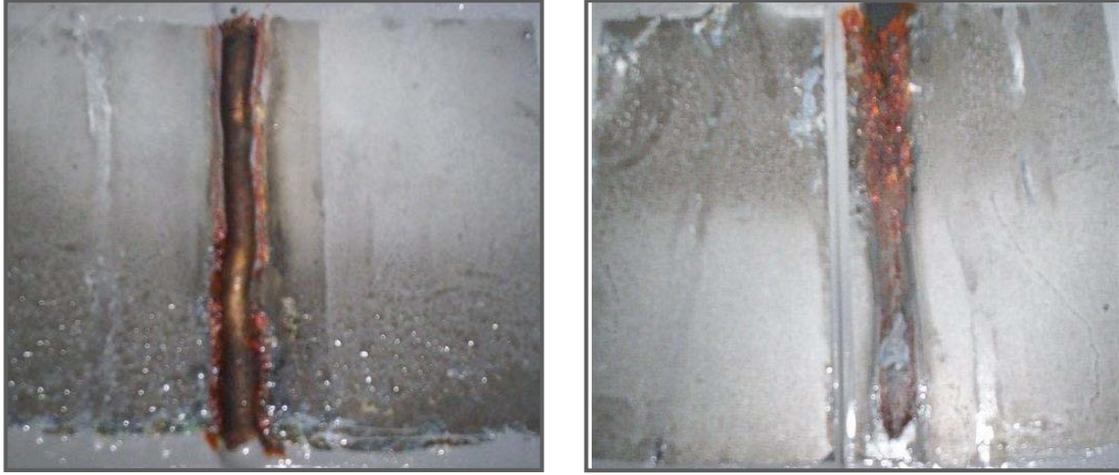


Figura IV. 46 – Matriz B frente e verso com 48 horas de exposição.



Figura IV. 47 – Matriz B frente e verso com 120 horas de exposição.

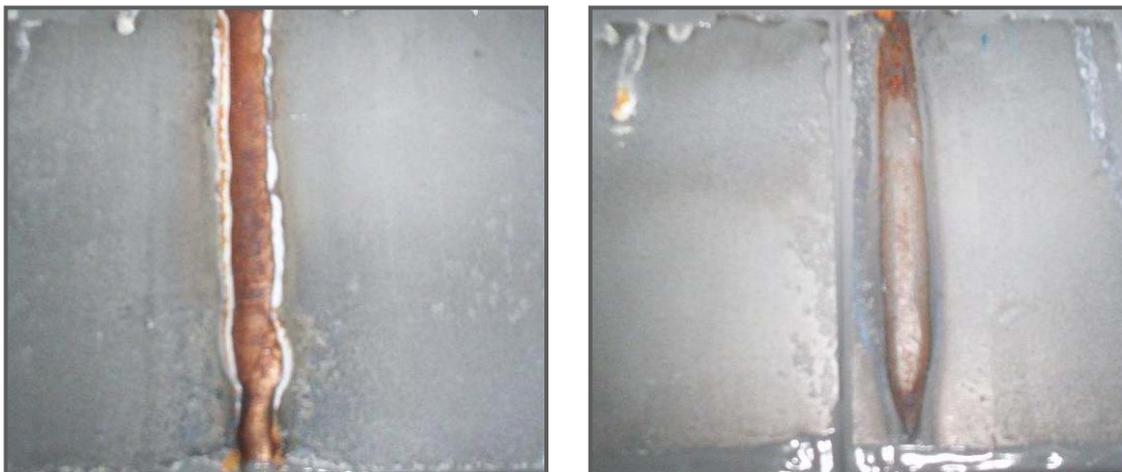


Figura IV. 48 – Matriz C frente e verso com 24 horas de exposição.

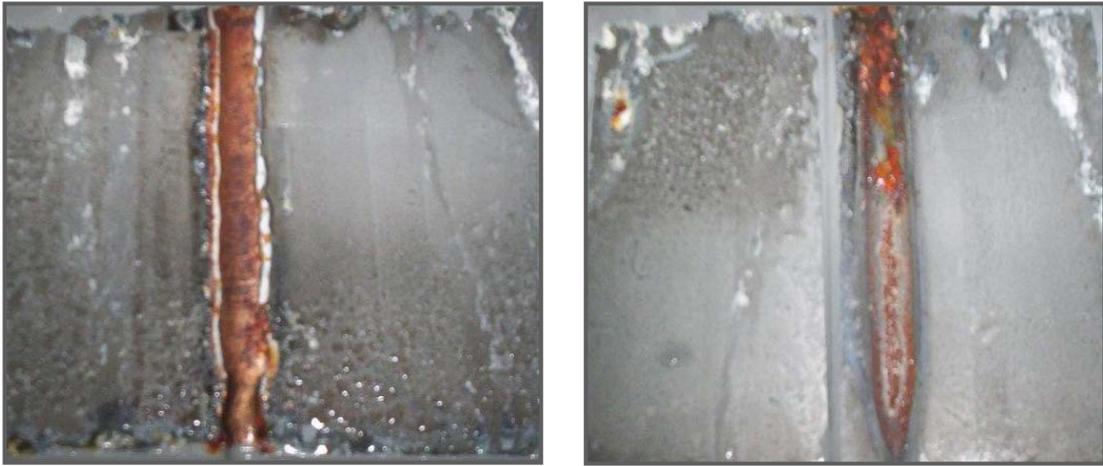


Figura IV. 49 – Matriz C frente e verso com 48 horas de exposição.

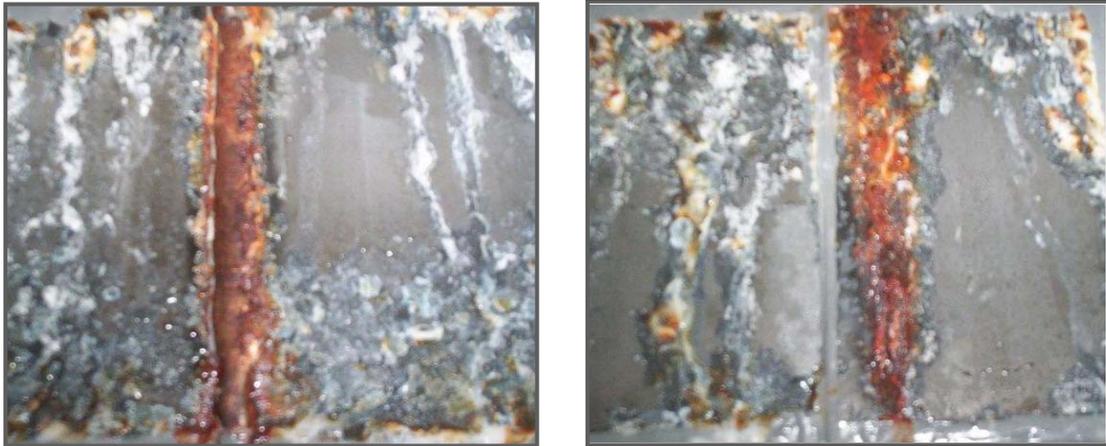


Figura IV. 50 – Matriz C frente e verso com 120 horas de exposição.

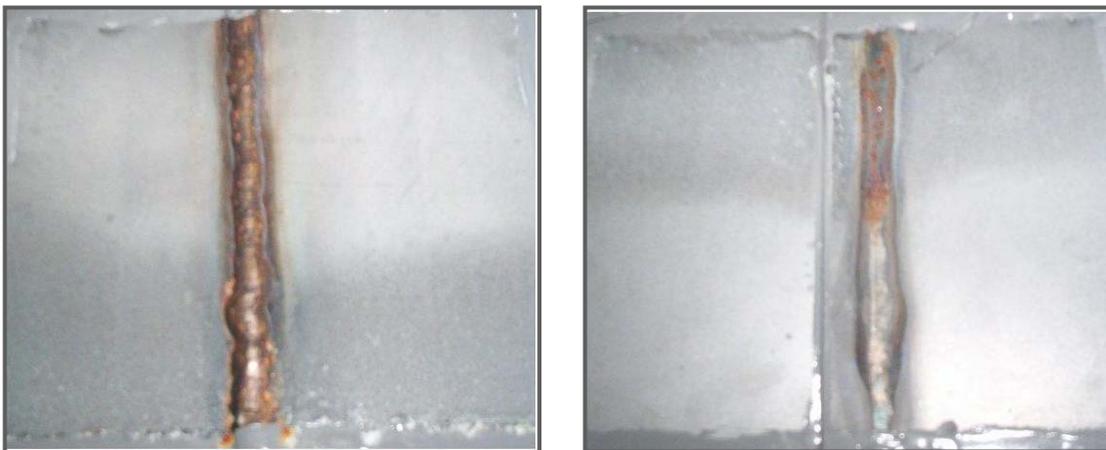


Figura IV. 51 – Matriz D frente e verso com 24 horas de exposição.

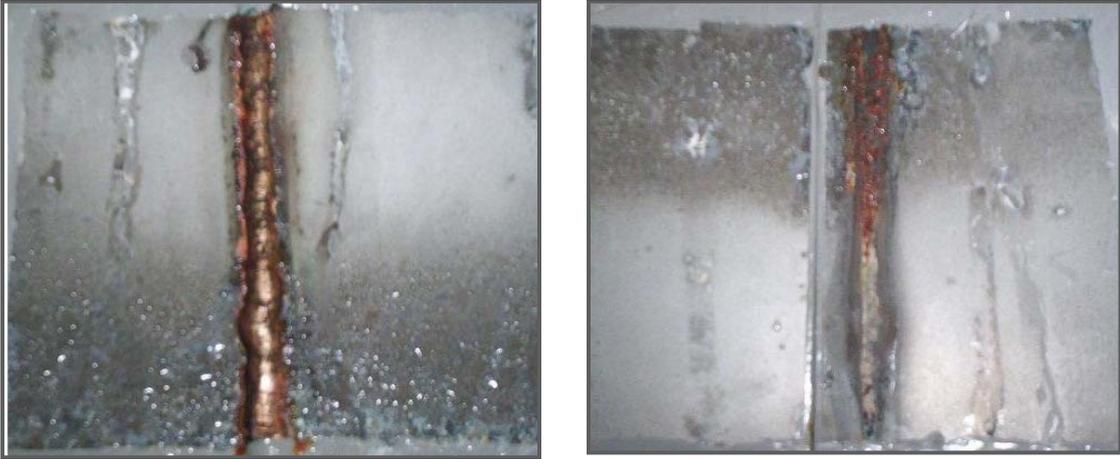


Figura IV. 52 – Matriz D frente e verso com 48 horas de exposição.

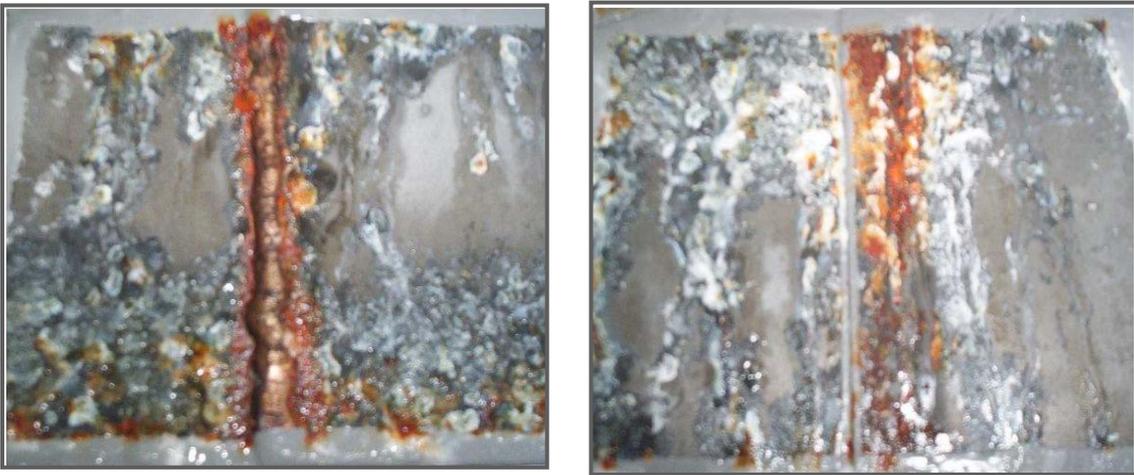


Figura IV. 53 – Matriz D frente e verso com 120 horas de exposição.

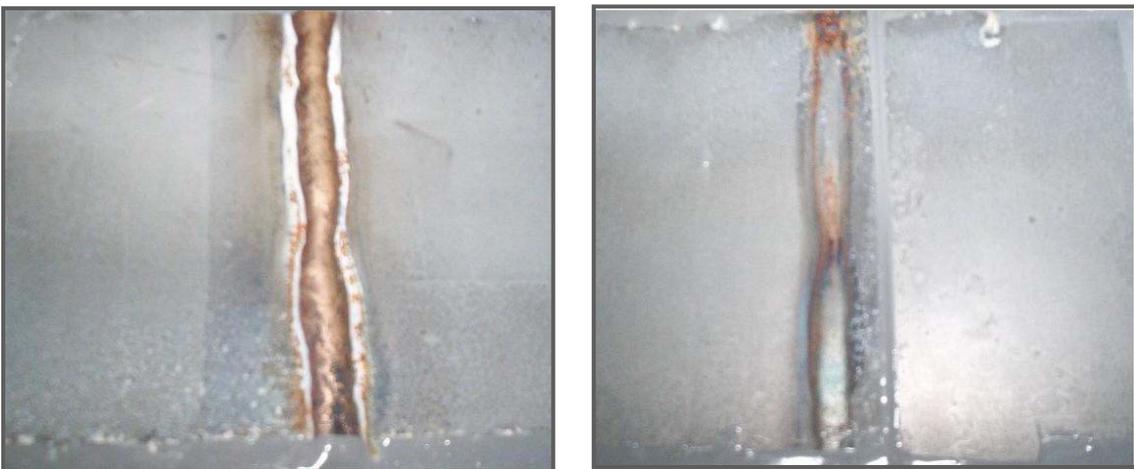


Figura IV. 54 – Matriz E frente e verso com 24 horas de exposição.



Figura IV. 55 – Matriz E frente e verso com 48 horas de exposição.



Figura IV. 56 – Matriz E frente e verso com 120 horas de exposição.

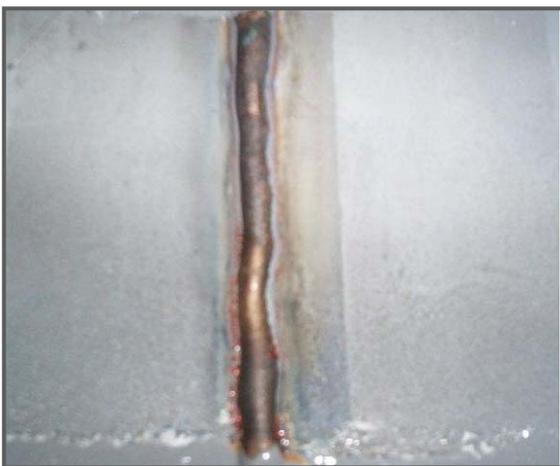


Figura IV. 57 – Matriz F frente e verso com 24 horas de exposição.

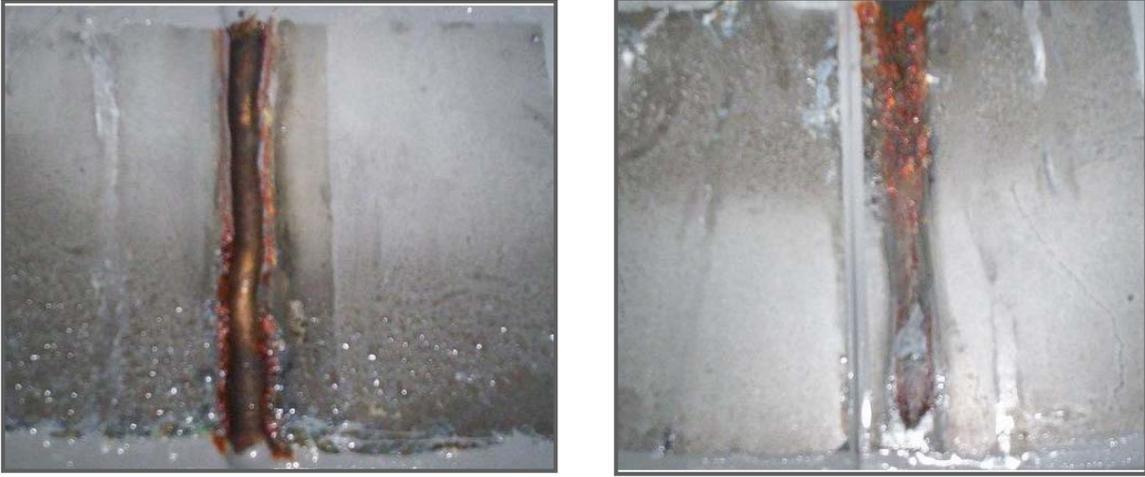


Figura IV. 58 – Matriz F frente e verso com 48 horas de exposição.

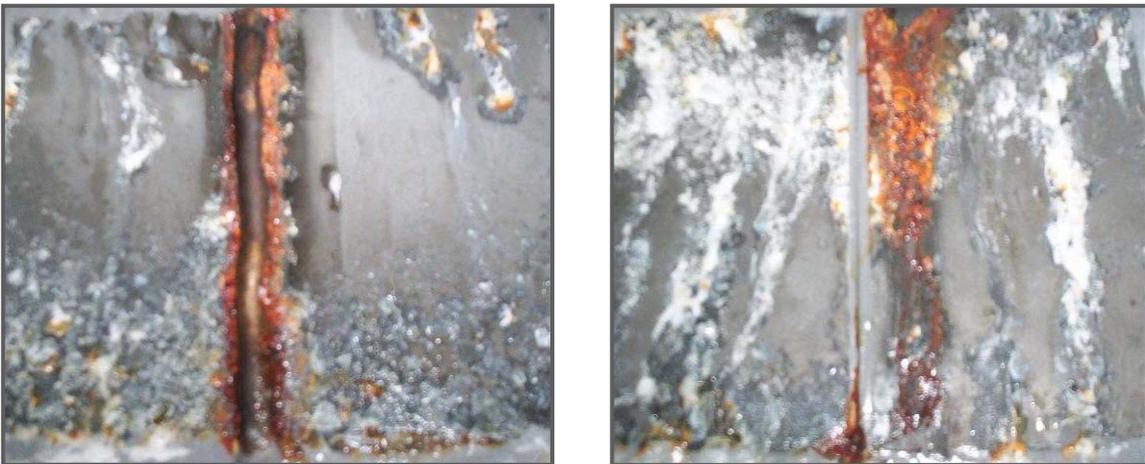


Figura IV. 59 – Matriz F frente e verso com 120 horas de exposição.

## **CAPÍTULO V**

### **DISCUSSÃO**

#### **V. 1 – SUBSTRATO**

Com relação ao substrato da chapa zincada utilizada neste trabalho é importante destacar que a classificação comercial CSN BGA - IF 166, que atende as especificações mostradas nas Tabelas IV. 1 e IV. 2, apresentou alguns valores fora do especificado pela norma NBR 7008/03 [ 66 ]; porém não comprometeram as propriedades mecânicas do material e não afetaram a qualidade do cordão de solda, satisfazendo plenamente a norma em questão; porém apresentou uma redução significativa na propriedade mecânica de alongamento.

#### **V. 2 – REVESTIMENTO**

O revestimento da chapa zincada, em forma de liga Fe-Zn (galvannealed), apresenta-se bastante uniforme ao longo da chapa [ 20, 22, 29 ]. No entanto, a varredura de linha de Fe e Zn feita no revestimento e vista no item IV. 1.2, revelou uma variação não uniforme dos elementos Fe e Zn, Figura IV. 2. Este tipo de revestimento advém de um processo difusional que é obtido através de tratamento térmico, após a emersão da chapa do pote de Zn fundido [ 20, 22 ]. Portanto, acredita-se que as condições de tratamento térmico não tenham sido suficientes para promoverem uma completa ligação entre os elementos Fe e Zn. Além destes fatores, uma preparação inadequada das amostras, como lixamento e polimento, podem ter contribuído com a remoção do Zn presente no revestimento.

### V. 3 – ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração permitiu verificar a integridade da junta sobreposta de chapas zincadas de 0,8 mm de espessura, quando brasadas por arco elétrico. Os corpos de prova das Matrizes A, B, C, D, E, e F romperam fora dos cordões de solda, confirmando, portanto, que a resistência mecânica da junta não foi comprometida. Os resultados podem ser vistos na Tabela IV. 3 e a Figura IV. 4 mostra um corpo de prova ensaiado. Acredita-se que a brasagem por arco elétrico, mesmo sem abertura de raiz, tenha promovido satisfatoriamente o fenômeno da capilaridade, assim como, uma boa molhabilidade. Estes fatores, juntos, podem ter contribuído com o aumento da área de contato entre o metal fundido e o metal de base, o que conseqüentemente aumentou, também, a interface de difusão interatômica através da molhabilidade [ 50, 51, 58 ], configurando portanto, uma melhor resistência da junta.

### V. 4 – PARÂMETROS DE BRASAGEM

O equipamento de soldagem Solmig 200 Star permitiu, com a utilização de gases e consumíveis adequados, obter parâmetros de brasagem considerados satisfatórios utilizando-se a transferência metálica por curto circuito. Os parâmetros definidos para cada Matriz promoveram uma energia de brasagem que pôde ser observado no lado oposto da junta sobreposta, Figura IV. 11; porém estes mesmos parâmetros proporcionaram um arco elétrico razoavelmente estável e com ausência de respingos, Figuras IV. 12 a IV. 17. Quanto a estabilidade do arco, esta foi avaliada através da relação entre a corrente de pico média (  $I_{pm}$  ) e o seu respectivo desvio padrão (  $DI_{pm}$  ), uma vez que a instabilidade do arco elétrico tenha ocorrido principalmente nas correntes de pico. A Tabela IV. 5 mostra esta relação, de onde conclui-se que as Matrizes A, D e E apresentaram uma estabilidade de arco elétrico mais estável, em relação das demais Matrizes.

## V. 5 – SOLDAGEM MIG/MAG DE CHAPA ZINCADA

GREGORY [ 44 ] faz menção ao fato de que independentemente do gás usado na proteção do arco elétrico, ocorrem respingos na soldagem de chapas zincadas, mesmo com a indutância na regulagem ótima. Os resultados conseguidos neste trabalho discordam de GREGORY e mostram que a aplicação do processo “MIG-Brazing” em chapas galvanizadas à quente com acabamento superficial galvanized, promove cordões de solda com ausência de respingos, indiferentemente das misturas utilizadas no processo: Stargold; 100% Argônio, e 98% Ar + 2% O<sub>2</sub>, Figuras IV. 12 a IV. 17.

KRYSIK e BHADHA [ 11 ] e PERDIGÃO [ 41 ], também alegam que na soldagem da chapa zincada, vantagem como melhor aparência quando se utiliza uma mistura baseada em Argônio ( 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> ), não se aplica. Quanto a STENBACKA e PERSON [ 14 ], ambos afirmam que misturas com baixo teor de O<sub>2</sub> não são apropriadas para soldagem com transferência por curto circuito. Este trabalho comprova que a proteção gasosa baseada em Argônio e constituída com baixo teor de O<sub>2</sub> ( 98% Ar + 2% O<sub>2</sub> ), utilizada na aplicação do “MIG-Brazing” permitiu a utilização de uma transferência por curto circuito, proporcionando um cordão de solda com boa aparência, Figuras IV. 14 e IV. 16.

GREGORY [ 44 ] sugere que a interferência de vapor de Zn no arco elétrico poderia ser minimizada mediante a oscilação do eletrodo frente a poça de fusão ou também, reduzindo-se a velocidade de soldagem, resultando também em um metal de solda de boa qualidade. A aplicação do processo “MIG-Brazing” em juntas sobrepostas, utilizando-se a técnica “Empurrando” [ 41 ], mostrou que nenhuma das duas alternativas foi necessária para se obter o mesmo resultado, e a Tabela IV. 3 mostra os valores diferenciados para as diversas condições de brasagem.

Nos processos de brasagem convencional recomenda-se uma limpeza adequada para os membros da junta a ser brasada, assim como uma abertura de raiz ideal, para que o fenômeno de capilaridade seja facilitado [ 50, 53, 56 ]. A aplicação do “MIG-Brazing” dispensa esses cuidados e o fenômeno predominante neste processo não é o da capilaridade e sim o da molhabilidade [ 50, 52 ]. Por tanto, não foi necessária preparação prévia das superfícies a serem brasadas, tais como: limpeza por meios mecânicos ou químicos, muito menos foi necessário a utilização de fluxos para garantir a molhabilidade do metal de adição. Isto diminuiu significativamente o tempo e o custo do processo.

## **V. 6 – ASPECTO GEOMETRICO DO CORDÃO DE SOLDA**

O fenômeno de capilaridade pôde ser observado em todas as Matrizes através da penetração do material de adição ( MA ) entre os membros das juntas, mesmo sem abertura de raiz, Figuras IV. 12 a IV. 17. Acredita-se que este fenômeno tenha ocorrido em função dos parâmetros de cada Matriz; portanto, sua performance estaria relacionada com as propriedades físicas dos gases de proteção utilizados. Quanto aos os cordões de solda das Matrizes, estes apresentaram uma aparência visual relativamente boa, com uniformidade, ausência de respingos, inclusive com boa molhabilidade. A exceção ficou por conta das Matrizes B e F que apresentaram um metal de solda com dimensões irregulares, variação na largura e altura, coincidindo com baixa molhabilidade, Figuras IV. 13 e IV. 17. Estas Matrizes apresentaram, também, uma coloração escura tanto no cordão de solda quanto nas margens do mesmo. Este fato pode estar associado às características físicas do gás de proteção utilizado na brasagem ( 100% Ar ) [ 14 ], como também, com o ângulo de molhabilidade [ 50, 51 ] dos cordões de solda.

A Matriz C apresentou um cordão de solda baixo e excessivamente largo, configurando excesso de molhabilidade, Figura IV. 14. Este fato pode estar relacionado ao baixo teor de  $O_2$  utilizado na proteção gasosa [ 70 ] e associado, também, ao teor de Si do metal de adição, que contribui bastante na mudança do ângulo de molhagem. Já as Matrizes D e E apresentaram cordões de solda bem regulares, acompanhados de uma molhabilidade razoável, Figuras IV. 15 e IV. 16. Quanto a Matriz A, a mesma mostrou um comportamento melhor, sendo na média uma das melhores Matrizes, Figura IV. 12. A Geometria do cordão de solda desta Matriz apresentou um ângulo de convexidade em torno de  $132^\circ$ , Tabela IV. 7, sendo considerado ideal o ângulo de aproximadamente  $135^\circ$  [ 71 ] que promove uma face de cordão relativamente plana, evitando concentração de tensão na margem ou no centro do cordão de solda.

## V. 7 – MOLHABILIDADE

O mapeamento por pontos de Si, conforme descrito no item IV. 7, revelou uma presença diferenciada do elemento Si nas Matrizes. As Figuras IV. 30 a IV. 35 mostram os resultados deste ensaio e conclui-se que as Matrizes A, D e E apresentaram uma área bem nítida de contraste mostrando a presença forte de Si na interface MS X MB. CUNY e SCHULTZ [ 70 ] informam que misturas com baixo teor de  $O_2$  fornecem bons resultados de molhamento, e isto pôde ser observado na Matriz C ( Ar + 2%  $O_2$  ), Figura IV. 32. No entanto a Matriz E que utilizou a mesma mistura ( Ar + 2%  $O_2$  ), porém com teor de Si maior no material de adição, não promoveu a mesma molhabilidade, Figura IV. 16. Quanto as Matrizes B, e F, as Figuras IV. 13 e IV. 17 mostram que não houve um bom molhamento e este fato pode estar associado à proteção gasosa utilizada ( 100 % Ar ). Geralmente é necessário o uso de uma mistura gasosa para uma aplicação específica [ 13 ], por tanto acredita-se que este fato esteja associado a baixa molhabilidade das Matrizes B e F.

## V. 8 – VARREDURA DE LINHA DOS ELEMENTOS Fe e Zn FEITA POR MEV – EDS

O mecanismo de transformação do Zn puro em ligas Zn-Fe ocorre devido à difusão do ferro do substrato ( aço ) para dentro do revestimento [ 20, 35 ], gerando compostos intermetálicos, entre camadas, com conteúdo específico de Fe. Já no item IV. 1.2 foi revelado que a camada de liga Fe-Zn não é completamente homogênea, no entanto, percebe-se através da Figura IV. 2 que há uma região equilibrada da presença dos elementos Fe e Zn no revestimento. Após a brasagem dos corpos de prova, todas as Matrizes foram submetidas a uma nova varredura de linha dos elementos Fe e Zn, conforme descrito no item IV. 8. Este ensaio permitiu concluir que as condições de brasagem das Matrizes foram suficientes para degradar parte do Zn existente no revestimento e isto pode ser visto através das Figuras IV. 36 a IV. 41. As Matrizes C e E apresentam um aspecto superficial, com coloração branca, evidenciando claramente a degradação do Zn, Figuras IV. 14 e IV. 16. No entanto, as varreduras de linha destas Matrizes mostraram uma relação quase que proporcional dos elementos Fe e Zn. Provavelmente esta degradação não está relacionada à energia de brasagem dispendida no processo, isto porque as referidas Matrizes não apresentaram um ciclo térmico tão intenso, conforme mostra a Tabela IV. 6. MACEDO et al. [ 45 ] informam que a utilização de  $O_2$  nos gases de proteção favorece a formação de óxido de Zn ( composto branco ), nas adjacências da solda. Por tanto, a presença deste composto pode estar associada à existência considerável de Zn no revestimento, Figuras IV. 38 e IV. 40; e isto pode ter ocorrido em função da sensibilidade do equipamento utilizado para este fim, e não em função da quantidade de Zn presente no revestimento.

Quanto as Matrizes B e F, pode ser visto que a degradação do Zn foi bastante intensa, Figuras IV. 37 e IV. 41; e este fato pode estar associado ao aporte térmico das Matrizes, que foi um dos maiores utilizados. Já as Matrizes A e D,

mostraram um desempenho relativamente melhor na varredura de linha, em relação às demais matrizes. As Figuras IV. 36 e IV. 39 mostram os resultados deste ensaio, onde pode ser concluído que existe uma presença mais significativa do Zn no revestimento.

#### **V.9 – ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA EM CAMARA DE NÉVOA SALINA**

Os resultados obtidos com este ensaio mostraram que as chapas zincadas à quente com acabamento superficial em forma de liga Fe-Zn, não apresentam um bom desempenho em relação à resistência a corrosão. Deve-se, entretanto, ser mencionado que as condições do ensaio de corrosão acelerada em névoa salina foram consideradas muito agressivas, promovendo desta maneira, muita dificuldade para identificar, em todas as Matrizes ( A, B, C, D, E, e F ), o início da corrosão vermelha ao longo do tempo. Resumidamente a Matriz A ( Figuras IV. 42 e IV. 43 ), assim como a Matriz D ( Figuras e IV. 51 e IV. 52 ), obtiveram um desempenho relativamente melhor nas primeiras 48 horas, em relação às demais Matrizes. Após este período todas as Matrizes apresentaram pequenos pontos brancos espalhados pelo material de base, evidenciando o início da corrosão branca, e posteriormente a intensificação de corrosão vermelha acompanhando a margem do cordão de solda, e espalhando-se pelo material de base, Figuras IV. 42, IV. 43, IV. 45, IV. 46, IV. 48, IV. 49, IV. 51, IV. 52, IV. 54, IV. 55, IV. 57, e IV. 58.

A literatura menciona que um processo de corrosão é muito mais acentuado quando dois materiais metálicos de diferentes potenciais eletroquímicos estão em contato em um eletrólito, o que promove uma diferença de potencial e origina a chamada corrosão galvânica [ 21, 22 ]. Embora se tenha trabalhado com materiais metálicos com potenciais elétricos diferentes, não se pode afirmar que o início da corrosão tenha ocorrido em função deste fenômeno. Pois além de se ter

trabalhado com materiais dissimilares, as transformações ocorridas na margem do cordão de solda, assim como a formação de uma grande ZTA, também podem contribuir com um processo prematura de corrosão da junta soldada [ 48 ].

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSÕES**

1. Os problemas tradicionais comumente encontrados na soldagem a arco elétrico de chapas zincadas, como respingos, aparência ruim do cordão de solda, porosidade superficial, excesso de fumaça na soldagem MIG/MAG, são contornados quando se utiliza a brasagem por arco elétrico. O “MIG-Brazing” apresentou, como principais vantagens, a ausência de defeitos superficiais na junta, eliminação de respingos, redução significativa da queima da camada protetora de zinco, e redução dos danos metalúrgicos provocados no material de base. Além destes fatores o processo dispõe, também, de grandes velocidades de brasagem e altas taxas de deposição, promovendo, por tanto, alta produtividade, o que viabiliza sua automação. Quanto às áreas que supostamente apresentaram degradação da camada de Zn ( margem do cordão de solda ), não preocupa, uma vez que esta região apresenta uma proteção galvânica de até 2 mm, devido a utilização de um material de adição não ferroso ( mais nobre ).
2. Os resultados dos ensaios de tração confirmaram que a resistência mecânica da junta brasada por arco elétrico não foi comprometida. As propriedades mecânicas obtidas mostraram-se satisfatórias assemelhando-se àquelas reportadas na

soldagem MIG/MAG convencional. Entretanto, sugere se ensaios mecânicos específicos para cada aplicação e ou utilização do componente a ser brasado.

3. Tratando-se da proteção gasosa utilizada na brasagem por arco elétrico percebeu-se que a mistura binária ( Ar + 2%O<sub>2</sub> ) promoveu um cordão de solda com uma aparência boa, no entanto a mistura facilitou a formação de óxidos de zinco na margem do cordão de solda, indiferentemente dos parâmetros de brasagem utilizados;
4. Os melhores parâmetros de brasagem foi obtido com a utilização da mistura StarGold. Estes parâmetros permitiram obter boa condição de molhabilidade, e de aspecto geométrico de cordão de solda, além de promover, também, um aumento de área considerável, da interface metal de solda – metal de base. Percebeu-se também que o arame eletrodo com o teor de Si um pouco mais elevado ( BT 513 ) não foi suficiente para promover uma boa molhabilidade, indiferentemente da proteção gasosa utilizada. Já as Matrizes utilizando o Ar puro como gás de proteção revelou um cordão de solda com uma mancha escura, inclusive nas adjacências, e não proporcionou boas condições de molhabilidade, independentemente do consumível utilizado.
5. A combinação dos consumíveis e gases de proteção utilizados na brasagem MIG não proporcionou uma mudança microestrutural significativa, salvo as regiões reaquecidas que apresentaram crescimento de grãos. Essa mudança não foi suficiente para afetar a propriedade mecânica de resistência à tração do material, pois os ensaios de resistência à tração mostraram que os corpos de prova de todas as Matrizes ( A, B, C, D, E, e F ) romperam no material de base e não no metal de solda.

6. A mistura StarGold aparentemente mostrou-se melhor, comparando-se as demais misturas, quando se trata da degradação da camada de revestimento. Este fato foi verificado através de uma varredura de linha dos elementos Fe e Zn, após a brasagem dos corpos de prova. E estes resultados puderam ser confirmados no ensaio de corrosão acelerada em câmara de névoa salina, pois foi visto que as amostras que utilizaram o StarGold apresentaram uma performance diferenciada nas primeiras 48 horas, em relação as demais misturas. Todavia ao final do ensaio não houve diferença relevante no que diz respeito à resistência à corrosão das amostras.

### **SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros que envolvem o estudo da aplicação do processo de brasagem por arco elétrico ( "MIG-Brazing" ) em chapas fina zincada, propõe-se:

- Automatizar o processo a fim de melhor compreender o efeito dos parâmetros de brasagem ( stick out, ângulo de trabalho, velocidade de brasagem, etc. ).
- Estudar o comportamento da chapa zincada com revestimento de zinco puro quando brasadas ao arco elétrico, a fim de servir de parâmetro para outros tipos de revestimentos.
- Estudar a degradação da camada de zinco através de análise quantitativa para melhor caracterizar a degradação.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [ 01 ] [http://www.fronius.com/download/welding.technology/papers/14\\_mig\\_loeten\\_von\\_verzikten\\_duennblechen\\_gb.pdf](http://www.fronius.com/download/welding.technology/papers/14_mig_loeten_von_verzikten_duennblechen_gb.pdf)
- [ 02 ] Welding Handbook; Welding Processes; American Welding Society – AWS; vol. 2; 8ª edição, USA; 1991.
- [ 03 ] Norrish, J. & Richardson, I. F. , “Back to Basics: Metal Transfer Mechanisms”, Welding & Metal Fabrication, jan.-fev. 1988, pp.17-22.
- [ 04 ] MARQUES, P. V. , Tecnologia da Soldagem; UFMG; Escola de Engenharia-Departamento de Engenharia Metalúrgica; Belo Horizonte: ESAB, 1991.
- [ 05 ] New Lessons in Arc Welding; Third Edition, September 1981; Capítulo 7; printed in U.S.A; LB 10 library of congress.
- [ 06 ] CARY, Howard B. , Modern Welding Technology, 3ed. Englewood Cliffs, New Jersey, Regents/Prentice Hall, 1994.
- [ 07 ] LESNEWICH, A. , “Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal Arc , Welding Part 1- Control of Electrode Melting Rate”, Welding research Supplement, pp.343 – 353, aug. , 1958.
- [ 08 ] TUTTLE, W. , “Understanding Aluminium Welding” , Welding Journal, PP.43-46, feb. , 1991.
- [ 09 ] FIGUEIREDO, K. M. , FERRARESI, V. A. , “Influência do Tipo de Gás de Proteção nos Modos de Transferência Metálica da Soldagem MIG de Alumínio”, Congresso Nacional de Soldagem, 03 à 06 de Setembro de 2000, Curitiba-PR.
- [ 10 ] WAINER, E. , BRANDI, S. D. , MELLO, F. D. H. , Soldagem – Processos e Metalurgia, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1992.
- [ 11 ] KRYSIAK, K. F. , BHADHA, P. M. , “Shielding Gas Purification Improves Weld Quality”, Welding Journal, pp.47-49, nov., 1990.

- [ 12 ] DILLENBECK, V. R. , CASTAGNO, L. , “The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel”, Welding Journal, pp.45-49, sep. , 1987.
- [ 13 ] LYTLE, K. A. , STAPON, W. F. G. , “Select the Best Shielding Gas Blend for the Application”, Welding Journal, pp.21-27, nov. , 1990.
- [ 14 ] STANBACKA, N. , & PERSON, K. A. , “Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding”, Welding Journal, pp.41-47, nov. ,1989.
- [ 15 ] HILTON, D. E. , McKEOWN, D. , “Improvements in Mild Steel Weld Properties by Changing the Shielding Gas-Theory or Practice?” , Metal Construction, pp.617-619, oct. , 1986.
- [ 16 ] FRANCIS, R. E. , JONES, J. E. , OLSON, D. L. , “Effect of Shielding Gas Oxygen Activity on Weld Metal Microstructure of GMA Welded Microalloyed HSLA Steel “, Welding Journal, pp.408-415, nov., 1990.
- [ 17 ] HONEYCOMBRE, R. W. K. , BHADESHIA, H. K. D. H., “Steels – Microstructure and Properties” , Metalurgy & Materials Science Series, London, 1995.
- [ 18 ] International Institute of Welding – IIW, Doc. N° IX-1533-88: “Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metal”, Jun, 1988.
- [ 19 ] Corrosion, Edited by L. L. SHREIR, Corrosion Control; Jhon Wiley & Sons, Vol. 2, Inc. New York; 1963.
- [ 20 ] Revista Siderurgia Brasil – Processos e Produtos, Grips Editoras, Ano 3, nº 5, pp.47-53, Março-Abril, 2002.
- [ 21 ] H. E. Townsend, “Coated Steel Sheets for Corrosion Resistant Automobiles”, Materials Performance, pp.60-65, 1991.
- [ 22 ] ZINC, The Science and Technology of the Metal, Its Alloys and Compounds, C. H. MATHEWSON, 1970.
- [ 23 ] BOXTER Jr. , DONALD F. , Developments in Coated Steels, Metal Progress, may 1986.

- [ 24 ] M. Joy, "Zinc Electrolitico e sue Leghe", Galvano-Organo-treatments de Surface, pp.352-353, 1986.
- [ 25 ] A.Abibsi, "Electrodeposition of Corrosion Resistant Zinc Alloy Coatings", Thesis, University of Aston, 1988.
- [ 26 ] W. Kautek, M. Sahre, W. Paatsch, "Transition Metal Effects in the Corrosion Protection of Electroplated Zinc Alloy Coatings", Electrochimica Acta, pp.1151-1157, 1994.
- [ 27 ] M.R. Kalantary, "Zinc alloy electrodeposition for corrosion protection", Plating and Surface Finishing, 81, 80-88, 1994.
- [ 28 ] T.E. Sharples, "ZnCo: Fighting corrosion in the 90's", Products Finishing, 54, 38-44, 1990.
- [ 29 ] SOUZA, A. H. , FERNANDES, C. A. S. , SILVA, F. H. A. , "Processos de Fabricação, Características e Principais Aplicações das Chapas Galvanizadas", Apostila da Companhia Siderúrgica Nacional, pp.4-5, 9, 32-36.
- [ 30 ] HOSTMANN, D. & PETERS, F . K. , "The Reactions Between Iron and Zinc", Proceedings of the 9 th Internacional Hot-Dip Galvanizing Conference, Zinc Development Association, Londres, 1971 p. 75-166.
- [ 31 ] HERSHMAN, A. A. , "Alloy Formation in Hot-Dip Galvanizing: A Short Review", Proc. Of the 8 th Internacional Galvanizing Conference, Londres. P. 3-29, 1969.
- [ 32 ] American Welding Society - AWS, Welding Handbook, Materials and applications, part 2, 8ª ed. , v. 4, p.118-136; Miami Fl., 1998.
- [ 33 ] FREIRE, A. M. C. & BRESCIANI FILHO, E. , Estrutura e Composição das Camadas de Ligas de Chapas Zincadas, Relatório Técnico Final, Convênio CSN/UNICAMP, Campinas, SP. Jan. 1990.
- [ 34 ] Revista – Metalurgia & Materiais – Volume 58; Nº 58, p.178-185, Março de 2002.
- [ 35 ] SLUNDER, C. J. & BOYD, W. K. , Zinc: Its Corrosion Resistance. S. I. Batelle Columbus Laboratories, 2.ed. 1983.

- [ 36 ] T. J. Natorsky, "Zinc and Zinc Alloy Plating in the 90's", Metal Finishing, pp.15-17, 1992.
- [ 37 ] BRAGANÇA, L. R. B. , A Produção de Chapas Zincadas Na Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, CSN, 1976.
- [ 38 ] PORTER, F. C. , "Galvanizing and Welding Structural Steel Part 1 – Fusion Welding", Metal Construction, pp.606-609, oct. , 1983.
- [ 39 ] NATAL, Y. D. & BARCELOS, E. J. , Relatório Final de Estudo Sobre Soldabilidade de Chapas Zincadas de Alta Resistência por Soldagem à Ponto por Resistência Elétrica. Volta Redonda, CSN, Jul. 1990.
- [ 40 ] World Centre for Materials Joining Technology, Welding Galvanized Steel, TWI Connect; nº23, July 1991.
- [ 41 ] PERDIGÃO, S. C. , "Soldagem MAG de Chapas Finas Galvanizadas". In. Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – XIII, ABS, Anais, pp.146-159, Guarujá-SP, Outubro de 1987.
- [ 42 ] The Welding Institute, welding Coated Steels, Abington Hall, Abington Cambrige, CBIGAL, 1978.
- [ 43 ] GUPTA, S. R. , GUPTA, P. C. , "Effect of Some Variables on Spatter Loss", Welding and Metal Fabrication, pp. 361-364, nov./dec. , 1984.
- [ 44 ] GREGORY, E. N. , "Fusion Welding of Galvanized Sheet", Sheet Metal Industries, pp.79-86, feb. , 1973.
- [ 45 ] MACEDO, W. A. , TORRES, R. , ZEEMANN, A. , EMYGDIO, P. R. O. , "Soldagem de chapas galvanizadas" In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – ABS, Anais, pp.173-185, Blumenau - Santa Catarina, 1996.
- [ 46 ] SUGA, T. , "Recent Progress of Mag Welding Material for Automation", Welding in the World, Great Britain, v. 34: pp.301-308; 1994.
- [ 47 ] BANG, K. S. , AHN , Y. H. CHANG, R. W. , "Effects of Welding Condition and Deoxidizing Elements of Wire on the Spatter Generation in GMAW", Welding in the World, Great Britain, n. 34: pp.411- 412, 1994.

- [ 48 ] KJELD, F. , “Gas Metal Arc welding for the Collison Repair Indutry”, Welding Journal, pp.39-46, apr., 1991.
- [ 49 ] DIN – Norm 8505 – Loeten. Teil 1: Allgemeines, Begriffe; Teil 2: Einteilung der Verfahren Begriffe; Teil 3: Einteilung der Verfahren nach Energietraegen. Verfahrenbeschreibun gen, 1979.
- [ 50 ] DOLGOV e SIDOKHINE – “La Formation du joint Brasé“, Publicação da Soudure Autogene, Paris, 1977.
- [ 51 ] <http://www.infosolda.com.br/acrobat/colunistas/009.pdf>
- [ 52 ] ADAMSON, A. W. , GASTRO, A. P. , Physical Chemistry of Surfaces, 6ed. New York, John Wiley & Sons, 1997.
- [ 53 ] SAUER, A. , Apostila de Brasagem, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFRJ, 1987, pp.1-4.
- [ 54 ] DIN – Norm 32506 – Part 1: Testing of Solderability for Soft Soldering: Wetting Tests, 1981.
- [ 55 ] DIN – Norm 32506 – Part 2: Testing of Solderability for Soft Soldering – Vertical Dipping test form Especimens of Copper Alloys: Testing Assessment, 1981.
- [ 56 ] LASHKO, N. , LASHKO, S. , “Brazing and Soldering of Metals”, Mir Publishers, Revisão da 3ª Edição Russa, Moscou, 1979.
- [ 57 ] ZIMMERMANN, K. F. – Mechanisiertes Hartloeten auf Loet – Vorrichtungen un Loetmaschinen – Ausfuehrungsbeispiele induktive beheizter, maschineller Hartloeteinrichtungen. Relatório Degussa – Technik dle Verbindet, H.23. Degussa, Hanau.
- [ 58 ] RIBEIRO, G. J. , “União de chapas finas de aço inoxidável pelo processo MIG-Brazing”, Relatório Técnico – Universidade Federal de Minas Gerais;2000.
- [ 59 ] [http://www.fronius.com/download/welding.technology/papers/13\\_mig\\_loeten\\_gb.pdf](http://www.fronius.com/download/welding.technology/papers/13_mig_loeten_gb.pdf)
- [ 60 ] [http://www.infosolda.com.br/acrobat/informe\\_cores.pdf](http://www.infosolda.com.br/acrobat/informe_cores.pdf)
- [ 61 ] NORMA AWS 5.18/93 – Especification for Carbon Steel Filler Metals for GMAW.

- [ 62 ] <http://www.brastak.com.br/catalogo.pdf>
- [ 63 ] GENTIL, V. , Corrosão, 2ª ed. , Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.
- [ 64 ] <http://www.abraco.org.br/corros10.htm>
- [ 65 ] FRIEHE, W. , SCHWENK. , “Resistance to Atmospheric Corrossion of Post-Treated Welded Joints of Hot Galvanized Steel”, Metallurgical Plant and Technology, pp.62-68, may, 1980.
- [ 66 ] NBR 7008/2003 – Chapas e bobinas de aço revestidas com Zinco ou com liga Zinco-Ferro pelo processo contínuo de imersão à quente – Especificação.
- [ 67 ] AWS A5.7/96, Especification for Cupper and Cupper Alloy Bare Welding Hot and Electrods.
- [ 68 ] Norma ASTM B-117/97, “Standar Praticce for Operating Salt Spray ( Fog ) Apparatus <sup>1</sup>.
- [ 69 ] ASTM A 370/97-A, Test and Definition Methods for Mechanical Testing of Steel Products.
- [ 70 ] CUNY, F. , SCHULTZ, J. P. , “Soudage MIG Pulse des Acieres au Carbone Presentation d’un Nouveau Melange Gazeux”, Soudage et Techniques Connexes, pp.531 – 540, nov. /dec. , 1988.
- [ 71 ] Metals HandBook - ASM; Vol. 6, Welding and Brazing, 8<sup>th</sup> Edition.