

Bruna Martinello Savi

**DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO PARA SOLDAGEM
MIG DE LIGAS DE ALUMÍNIO 5083 H116**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon

Coorientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Savi, Bruna Martinello

Desenvolvimento Tecnológico para Soldagem MIG de Ligas Alumínio 5083 H116 / Bruna Martinello Savi ; orientador, Orestes Estevam Alarcon ; coorientador, Jair Carlos Dutra. - Florianópolis, SC, 2014.

101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Soldagem Ligas de Alumínio. 3. MIG. 4. Cold Metal Transfer. 5. MIG Pulsado. I. Alarcon, Orestes Estevam. II. Dutra, Jair Carlos. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Bruna Martinello Savi

**DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO PARA SOLDAGEM
MIG DE LIGAS DE ALUMÍNIO 5083 H116**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 07 de março de 2014.

Prof. Antônio Pedro Novaes de Oliveira, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

Raul Gohr Jr., Dr. Eng.
IMC - Engenharia de Soldagem Instrumental e Automação

Prof. Américo Scotti, Ph. D.
UFU – Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Carlos Enrique Niño, Dr. Eng.
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Orestes Estevam Alarcon e coorientador Jair Carlos Dutra pelo ensinamento e oportunidade de fazer parte da equipe LABSOLDA.

Ao meu colega Cleber Marques por todo suporte e conhecimentos transmitidos.

A toda equipe LABSOLDA, Engenheiros Raul Gohr Jr. e Régis Henrique Gonçalves e Silva, soldados Cleber Guedes e Adrian Savaris, e demais colaboradores, João Facco de Andrade, Marcelo Pompermaier Okuyama, Márcia Paula Thiel, Marcus Barnetche e Ricardo Campagnin.

Aos bolsistas, Aloysio Becker Fogliatto, Claudio Luis da Silva Jr, Diego Erdmann dos Santos, Eduardo Bidese Puhl, Everton Werlang, Ezequiel Gonçalves, Felipe Kalil Mendonça, Fernando Costenaro, Guilherme de Santana Weizenmann, Hellinton Direne Filho, Ivan Olszanski Pigozzo, Julia Dornelles, Juliano Nilo Espindola, Leonardo Brüggemann, Luiz Fernando Suliman, Miguel Mannes Hillesheim, Natália Wendt Dreveck, Pedro Bruciapaglia, Rafael Nunes, Ramon Natal Meller, Renan Kindermann, Rodrigo da Silva Machado, Tiago Rodrigo de Lima Fernandes, pela amizade e ajuda.

À Universidade Federal de Santa Catarina e Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

À CAPES pela concessão bolsa de mestrado.

“A confiança em si mesmo é o primeiro e o maior segredo para chegar ao sucesso em qualquer empreitada.”.

(Dirk Wolter)

RESUMO

As ligas de alumínio-magnésio apresentam uma posição de destaque na indústria naval por se constituírem em materiais estruturais com baixo peso específico e de excelente resistência à corrosão em ambientes marítimos. A soldagem se apresenta como principal processo de fabricação neste setor, e é por isso, que o Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA) se encarregou em desenvolver soluções tecnológicas utilizando diferentes modalidades de soldagem do processo MIG/MAG, levando em consideração o objetivo de construção de um veleiro oceanográfico utilizando a liga de alumínio naval 5083/H116. Esta dissertação de mestrado apresenta uma contribuição técnico-científica com relação aos processos variantes do MIG Convencional: (I) com transferência metálica por curto-circuito controlada designada CMT (*Cold Metal Transfer*) e, (II) de uma tecnologia que utiliza a pulsação da corrente com transferência metálica que evita o curto-circuito. Quanto à modalidade CMT, verificou-se a compatibilidade dos programas já existentes no equipamento de soldagem, com os metais de adição ER 5183 e ER 5087, com foco na obtenção de passe de raiz para chapas de 6 mm, a qual se mostrou com alta capacidade de obtenção de passe de raiz. Averigou-se também a incursão deste processo sobre os efeitos metalúrgicos para as duas opções de metais de adição, sendo que a liga 5087 apresentou-se como melhor alternativa. Num segundo momento, o trabalho trata do estudo da soldagem MIG Pulsada em aplicações onde a transferência por curto-circuito não era mais admissível, mais especificamente nos passes de preenchimento. Com relação ao MIG Pulsado com corrente contínua foram avaliados alguns conjuntos de parâmetros pré-definidos considerando o expoente da corrente de pulso de 1,83 na equação do coeficiente de destacamento de gota $D=I_p^n \cdot t_p$. Como esta modalidade permite o uso de corrente alternada com introdução de período negativo, também foi desenvolvido uma metodologia para definição de parâmetros com propósito de se obter um programa sinérgico, já que esta variante trouxe benefícios em relação à soldagem pulsada com corrente constante. Ambos os processos da versão pulsada já estão sendo utilizados na soldagem do veleiro e também apresentam programas em fontes comerciais.

Palavras-chave: Soldagem de Alumínio, Ligas de Alumínio, MIG, Cold Metal Transfer (CMT), MIG Pulsado, MIG Pulsado CA

ABSTRACT

Aluminum-magnesium alloys have great prominence in the naval sector as they represented structural materials with low specific weight and excellent corrosion resistance in marine environments. The welding represents the major manufacturing process in this sector, and that's why the LABSOLDA undertook to develop technology solutions using different modalities of the welding process MIG/MAG, taking into account the aim of building an oceanographic sailboat in 5083 H116 naval aluminum alloy. This dissertation presents both technical and scientific contribution in relation to the conventional MIG process variants: (I) with metal transfer by short circuit designated CMT (Cold Metal Transfer) and (II) a technology that uses the pulse current with metal transfer that avoids short circuit. About the CMT, was verified the compatibility of existing programs in welding equipment, with welding wires that were investigated, the ER 5183 and ER 5087 focused on obtaining root and fill pass to 6 mm plates, which showed high capacity to obtain the root pass. It was also investigated the incursion of this process on metallurgical effects for the different kinds of welding wires, and alloy 5087 was presented as the best alternative. In a second moment, the work deals with the study of Pulsed GMAW welding in applications where the transfer by short circuit was no longer permissible, more specifically in the fill passes. With respect to Pulsed GMAW direct current, some sets of preset parameters were evaluated considering de equation $D=I_p^{1,83} \cdot t_p$. This technique allows the use of alternating current, introducing negative period, also a study was developed aiming to obtain a synergistic program, since this variant provided benefits in relation to pulsed welding with direct current. Both processes of pulsed version are already being used in welding sailboat and also feature programs from commercial sources

Keywords: Aluminum Welding, Aluminum alloys, GMAW, Cold Metal Tranfer (CMT), Pulsed GMAW DC, Pulsed GMAW AC

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: A 5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio) [15]	34
Figura 2 - Efeito da recristalização e superaquecimento na microestrutura e dureza na ZTA e MB encruados sem transformação alotrópica.....	35
Figura 3 - Oscilograma de tensão e corrente para o modo MIG convencional com curto-circuito ($I_m= 86$ A e $P= 1121$ W).....	38
Figura 4 - Cordão de solda corrente média 86 A MIG Convencional... 38	
Figura 5 - Oscilograma de tensão e corrente para o modo MIG Pulsado ($I_p= 316$ A, $t_p= 1,6$ ms; $I_b= 40$ A, $t_b= 9,5$ ms ($I_m= 86$ A e $P= 1733$ W) 39	
Figura 6 - Cordão de solda corrente média de 86 A MIG Pulsado.....	40
Figura 7 - Oscilogramas de tensão e corrente para o modo MIG CMT 42	
Figura 8 - Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT, soldagem de alumínio ER 5183 [3].....	44
Figura 9 - Representação da amostra em mm	47
Figura 10 - Bancada de ensaios CMT	48
Figura 11 - Perfil de microdureza.....	48
Figura 12 - Modelo corpo de prova ensaio de dobramento em mm [45]	49
Figura 13 - Modelo corpo de prova ensaio tração em mm [45]	49
Figura 14 - Montagem dispositivo ensaio CTOD	50
Figura 15 - Representação esquemática do corpo de prova do tipo SE(B) com as dimensões em milímetros [41]	50
Figura 16 - Aspecto passe de raiz do metal de adição ER 5087.....	52
Figura 17 - Aspecto cordão de solda com preenchimento do metal de adição ER 5087	52
Figura 18 - Aspecto da seção transversal da solda com metal de adição ER 5087.....	52
Figura 19 - Local fratura das amostras em tração	54
Figura 20 - Micrografias obtidas em MEV da liga 5083 ensaiado em tração, mostrando: (a) Visão geral da fratura (b) Superfície de fratura com aumento de 500x	54
Figura 21 - Micrografias obtidas em MEV do local da fratura das amostras soldadas e ensaiadas em tração: (a) visão geral da fratura no cordão de solda com metal de adição ER 5087 com fratura no metal de base e no metal de solda; (b) superfície de fratura do cordão de solda, com aumento 500x, mostrando presença de dimples; (c) visão geral da fratura no cordão de solda com metal de adição ER 5183; (d) superfície	

de fratura do cordão de solda, com aumento 500x, mostrando presença de dimples e poros.	55
Figura 22 - Perfil de microdureza para o cordão de solda (a) ER 5	56
Figura 23 - Dobramento de raiz nas amostras soldadas com liga (a) 5087	57
Figura 24 – Detalhe abertura de poros no ensaio de dobramento com liga 5183	57
Figura 25 - Radiografia dos cordões de solda com liga (a) 5087 (b) 5183	58
Figura 26- Curva carga versus abertura pontada trinca para as amostras do metal de base.....	59
Figura 27 - Curva carga versus abertura na ponta da trinca para as amostras com metal de adição ER 5183	60
Figura 28 - Curva carga versus abertura na ponta da trinca para as amostras com metal de adição ER 5087	60
Figura 29 - Superfície da fratura ensaio CTOD (a) metal de base (b) solda ER 5183 (c) solda ER 5087	61
Figura 30 - Micrografias obtidas em MEV da liga 5083 H116 mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD (a) Visão geral da interface pré-trinca e trinca correspondente ao ensaio CTOD aumento 50x (b) Superfície de fratura da trinca no ensaio CTOD com aumento de 1000x	62
Figura 31 - Micrografias obtidas em MEV do metal de adição 5183 mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD (a) Visão geral da interface pré-trinca e trinca correspondente ao ensaio CTOD aumento 50x (b) Superfície de fratura da trinca no ensaio CTOD com aumento de 1000x	63
Figura 32 - Micrografias obtidas em MEV do metal de adição 5087 mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD (a) Visão geral da interface pré-trinca e trinca correspondente ao ensaio CTOD aumento 50x (b) Superfície de fratura da trinca no ensaio CTOD com aumento de 1000x	64
Figura 33 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 160$ A, $t_p = 5$ ms, diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma.....	68
Figura 34 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 250$ A, $t_p = 2,2$ ms, $I_b = 36$ A, $t_b = 8,5$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma	69
Figura 35 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 36	69

Figura 36 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p=350$ A, $t_p= 1,2$ ms, $I_b= 46$ A, $t_b= 9,5$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma.....	70
Figura 37 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 39.....	70
Figura 38 - Comportamento da transferência metálica ($I_p= 350$ A; $t_p= 1,2$ ms, $d_g= 1,2$ mm) destacamento de uma única gota por pulso	71
Figura 39 – Detalhe formação gota secundária	71
Figura 40 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p=430$ A, $t_p= 0,8$ ms, $I_b= 52$ A, $t_b= 9,9$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma.....	72
Figura 41 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 43.....	73
Figura 42 - Comportamento da transferência metálica ($I_p= 430$ A; $t_p= 0,8$ ms; $d_g= 1,2$ mm) destacamento de uma única gota por pulso	73
Figura 43- Aquisição de dados referente ao depósito de solda com $I_p=300$ A, $t_p= 1,5$ ms, $I_b= 48$ A, $t_b= 10,3$ ms, diâmetro de gota de 1,2 mm	74
Figura 44 - Aquisição de dados referente ao depósito de solda com $I_p = 385$ A, $t_p= 1,0$ ms, $I_b= 52$ A, $t_b= 10,8$ m, diâmetro de gota de 1,2 mm.	75
Figura 45 - Defeito observado na raiz durante a execução de preenchimento com MIG Pulsado com corrente contínua	76
Figura 46 - Modelos de forma de onda utilizados neste trabalho.....	80
Figura 47- Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p= 350$ A e $t_p= 1,2$ ms , $EN=30\%$ e $V_a = 5$ m/min (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II.....	83
Figura 48 - Cordão de solda referente aos oscilogramas da Figura 49 (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II	83
Figura 49 - Sequência destacamento de uma gota por pulso oscilograma Figura 49 (a).....	84
Figura 50 - Detalhe formação de gota secundária	84
Figura 51 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p= 430$ A e $t_p= 0,8$ ms, $EN=30\%$ e $V_a= 5$ m/min (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II.....	85
Figura 52 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p= 430$ A e $t_p= 0,8$ ms, $EN=50\%$ e $V_a= 5$ m/min (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II.....	86
Figura 53 - Imagens da câmera de alta velocidade para o conjunto de parâmetros $I_p= 430$ A e $t_p= 0,8$, $EN= 50\%$ e $V_a= 5$ m/min.....	87
Figura 54 - Cordão de solda referente aos oscilogramas da Figura 51 (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II	87
Figura 55 - Cordão de solda referente aos oscilogramas da Figura 52 (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II	88

Figura 56 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p= 430$ A e $t_p= 0,8$ ms, EN= 30% (a) $V_a= 8$ m/min (b) $V_a= 10$ m/min	90
Figura 57 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p= 430$ A e $t_p= 0,8$ ms, EN= 50% (a) $V_a= 8$ m/min (b) $V_a= 10$ m/min	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química nominal liga de alumínio 5083-H116 [38].....	46
Tabela 2 - Composição Química nominal liga 5183 [11]	46
Tabela 3 - Composição Químicanominal liga 5087 [11]	46
Tabela 4- Propriedades mecânicas nominais ligas de alumínio [11][38]	46
Tabela 5 - Valores médios e desvio padrão de tensão máxima.....	53
Tabela 6 - Valores ensaio carga máxima (P_m), relação trinca inicial largura da amostra (a_0/W), e CTOD (δ) para metal de base (MB), solda com liga 5183 e solda com liga 5087.....	59
Tabela 7 - Conjunto de parâmetros de soldagem MIG Pulsado com $d_g=1,2\text{mm}$	67
Tabela 8 - Conjunto de parâmetros de soldagem MIG Pulsado.....	68
Tabela 9 - Conjunto de novos valores de parâmetros de soldagem aplicando o expoente 1,83 para $d_g=1,2\text{ mm}$	74
Tabela 10 - Parâmetros calculados para processo MIG Pulsado CA diâmetro de gota 1,2 mm.....	82
Tabela 11 - Resultados de velocidade de arame, corrente eficaz e potência para o conjunto de parâmetros $I_p=350\text{ A}$, $t_p=1,2\text{ ms}$ e $EN=30\%$	84
Tabela 12 - Resultados de velocidade de arame, potência e corrente eficaz para o conjunto de parâmetros $I_p=430\text{ A}$ e $t_p=0,8\text{ ms}$	88
Tabela 13 - Valores comparativos de potência processos MIG Pulsado CC, MIG Pulsado CA ($EN=30\%$ e 50%).....	89
Tabela 14 - Parâmetros calculados para processo MIG Pulsado CA diâmetro de gota 1,2 mm.....	90
Tabela 15 - Resultados de velocidade de arame, potência e corrente eficaz para conjunto de parâmetros $I_p=430\text{ A}$ e $t_p=0,8\text{ ms}$	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Å – Angstrom
 a_0 – tamanho inicial de trinca
CC + – corrente contínua positiva
CC - – corrente contínua negativa
CMT – Cold Metal Transfer
CFC – cúbica de face centrada
CTOD – Crack Tip Opening
D – Parâmetro de destacamento de gota
DBCP – Distância entre o Bico de Contato e a Peça
 d_g – diâmetro de gota
 d_a – diâmetro do arame, bitola do arame
EN – eletrodo negativo
EP – eletrodo positivo
f – frequência
FSW – Friction Stir Welding
gap – distância ou abertura entre chapas em uma junta
 I_b – corrente de base
 I_{ef} – corrente eficaz
 I_m – corrente média
 I_n – corrente negativo
 I_p – corrente de pulso
LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da UFSC
MB – metal base
MEV – microscópio eletrônico de varredura
MIG CA – Metal Inert Gas Alternate Current
MIG CC – Metal Inert Gas Direct Current
MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas
P – Potência
 P_m – carga máxima aplicada ensaio CTOD
SAP – Sistema de Aquisição Portátil
SE(B) – corpo de prova para flexão em três pontos
T – período
TIG – Tungsten Inert Gas
 t_b – tempo de base
 t_n – tempo negativo
 t_p – tempo de pulso
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
 V_a – Velocidade de arame
 V_p – componente plástica de deslocamento CTOD medida em clip gage

ZTA – zona termicamente afetada
W – largura do corpo de prova
 Φ – diâmetro arame
 φ – fator adimensional proposto por Gosh
 δ – valor tenacidade pelo ensaio CTOD
 σ_{esc} – tensão de escoamento
 $\sigma_{m\acute{a}x}$ – tensão máxima de resistência
 α – constante de fusão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	25
1.1 ESTRUTURA DO TEXTO	28
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	30
2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO NAVAL.....	30
2.1.1 Ligas Utilizadas como Metal de Adição na Soldagem Naval	31
2.2 SOLDABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	32
2.2.1 Aspectos Operacionais: Propriedades Físico-químicas que Influenciam no Processo	32
2.2.2 Aspectos Metalúrgicos: Descontinuidades em Soldas – Zona de Fusão e Zona Termicamente Afetada.....	34
2.3 PROCESSO MIG/MAG E SUAS VARIANTES	36
3 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO NAVAL 5083 H116 SOLDADA PELO PROCESSO MIG CMT	43
3.1 METODOLOGIA	46
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4 SOLDAGEM MIG PULSADO CORRENTE CONSTANTE.....	65
4.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA CORRENTE PULSADA	65
4.2 METODOLOGIA	66
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
5 SOLDAGEM MIG PULSADO CORRENTE ALTERNADA	76
5.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO CÁLCULO DE PARÂMETROS PARA O MIG PULSADO CA.....	77
5.2 METODOLOGIA APLICADA	79
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
6 CONCLUSÕES.....	93
SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O forte aquecimento da construção Naval e Offshore no Brasil vêm sendo impulsionado principalmente pelo setor de petróleo e gás, e tem criado ainda maior demanda com a exploração do pré-sal. Em 13 anos, desde o ano 2000, os estaleiros brasileiros realizaram uma transformação impressionante, não só pelo aumento do volume de empregos, que passaram de dois mil para mais de 70 mil, mas, principalmente, na entrega de navios e plataformas, e na construção de novos estaleiros, sendo que quatro estão em implantação este ano no Brasil [1]. A observação do mercado realizado pelo Sinaval – Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e Offshore [2] indica a perspectiva de uma demanda de 100 novos navios de apoio marítimo para a Petrobrás. O cenário é otimista e por conta disso a formação da mão de obra vem passando por constante qualificação, vindo daí o surgimento de formação complementar voltada para o segmento de petróleo e gás.

Atualmente, o mercado mundial de construção de embarcações apresenta-se em um estágio bastante avançado, não somente em termos de desenvolvimento de materiais mais apropriados para a indústria naval, mas também em relação ao estudo de novos processos de fabricação capazes de aumentar a produtividade, reduzir os custos de produção e melhorar a qualidade do produto final. Dentre os principais processos de soldagem utilizados neste setor, o processo MIG/MAG é que tem maior destaque. Além de alta produtividade e flexibilidade, este processo é o que apresenta maior potencial para desenvolvimento de inovações, possibilitando assim o aparecimento de novas modalidades do processo originadas a partir do processo MIG Convencional. Essas variações têm por objetivo adequar o processo MIG para materiais com propriedades específicas e também atingirem a máxima qualidade do produto. Isto está vinculado, principalmente, a evolução da eletrônica de controle e potência, aos sistemas de controle e à informática que, aplicadas neste setor, possibilitaram a fabricação das modernas fontes de soldagem.

Inserido neste contexto, e também, atendendo a necessidade de fabricação de um veleiro de pesquisas oceanográficas para a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, o presente trabalho busca soluções para melhor desempenho da soldagem neste projeto de construção. O veleiro terá 60 pés (~18,6 metros), em alumínio 5083/H116 e soldado com tecnologia MIG que atendam as condições de soldagem específicas, como diferentes espessuras, tipos de junta e

posições. O interesse pelo alumínio na construção prende-se essencialmente ao fato de ser um material que possui excelente combinação de propriedades, como alta relação resistência/peso aliada a uma boa resistência à corrosão, resultando numa adequabilidade técnica para um campo vasto de aplicações em engenharia. Em contrapartida, este material apresenta certas peculiaridades que tornam sua soldagem dificultosa quando comparado ao aço e dependendo do processo e procedimento utilizados os resultados atingidos podem não atender os requisitos e especificações.

A soldagem de juntas realizadas em estaleiros nacionais geralmente é feita aplicando-se dois passes pelos dois lados da chapa, onde o soldador aplica um passe na junta, e em seguida esmerilha o passe do lado oposto da junta e faz uma segunda deposição. Além de contaminações que podem gerar defeitos nas etapas seguintes de solda, isso requer maior tempo de produção e experiência do soldador.

Para realizar um passe de raiz com o processo MIG, o modo de transferência metálica por curto-circuito é encontrado como melhor opção, já que assim é possível dirigir a gota metálica ao fundo do chanfro. Em outras modalidades que utilizam o modo de transferência metálica por *spray* o maior comprimento do arco acaba fundindo uma maior área das laterais do chanfro e a gota metálica nem sempre possui direcionabilidade para o fundo do chanfro. No trabalho de Marques [3], que deu início e avaliou um procedimento adequado para passe de raiz de juntas de chapas da liga 5083 H116 do veleiro utilizando metal de adição ER 5183, para que a soldagem fosse conduzida de forma unilateral e automatizada, o uso da variante do processo MIG denominado CMT (*Cold Metal Transfer*) apresentou-se como melhor opção frente a outra opção de soldagem por curto-circuito, o MIG Convencional.

Como oportunidade de melhorar o desempenho das soldas, o presente trabalho apresenta um contributivo para a soldagem MIG CMT de outro metal de adição de alumínio, o ER 5087. Esta liga se tornou uma opção de metal de adição, já que é amplamente utilizado em estaleiros Europeus e, no Brasil, há pouco conhecimento de seus benefícios. Sua principal diferença para a liga 5183 é que a liga 5087 possui zircônio em sua composição química com a finalidade de refino de grão, de forma a melhorar as propriedades metalúrgicas/mecânicas da liga. Além disso, o trabalho propõe a qualificação da junta soldada com ambos metais de adição, visto as dificuldades em encontrar um procedimento apropriado para a soldagem das ligas de alumínio, que muitas vezes acaba não se adequando as normas.

Em outras aplicações de soldagem do veleiro, como de preenchimento de chapas mais espessas, o uso de processos com transferência metálica por curto-circuito não se tornam cabíveis, já que operam em baixos níveis de tensão, que acarreta em um processo com baixa relação potência/velocidade de arame. Esta baixa relação se torna problemática na soldagem de ligas de alumínio, que aliado a sua baixa condutividade térmica, não permite obter um cordão de boa qualidade. Por isso, torna-se necessário a avaliação do uso das modalidades do processo MIG que utilizam a corrente pulsada, já que estas operam em faixas de maiores potência e possibilitam alcançar um cordão aceitável para esta situação. Isto ocorre devido ao modo pulsado evitar o evento de curto-circuito pela imposição de dois níveis de corrente, evitando que a tensão caia para valores muito baixos, tendo assim um arco voltaico continuamente aceso. Haverá, portanto, um aumento da relação potência/velocidade do arame, que na soldagem de ligas de alumínio permite obter um passe de preenchimento com bom acabamento, não obtível com o processo por curto-circuito.

No entanto, em algumas aplicações o modo pulsado pode fornecer potência excessiva, e como solução promissora para esta situação autores como Ueyama [4] citam o uso do MIG Pulsado com corrente alternada (CA), já que esta modalidade permite reduzir a relação potência/velocidade do arame para um valor intermediário entre o processo MIG convencional e MIG Pulsado com corrente contínua. Sendo assim, é possível controlar o aporte térmico e ainda aumentar a produtividade devido à introdução de período de corrente em polaridade negativa.

Diante de toda a problemática citada, e a inexistência de uma única modalidade do processo MIG que forneça uma solução universal aos problemas inerentes a soldagem de liga de alumínio, este trabalho tem por objetivo reunir contribuições sobre a base de funcionamento e desempenho do processo de soldagem MIG, nas modalidades CMT e MIG Pulsado, buscando soluções tanto do ponto de vista metalúrgico, quanto de processo, que permitam obter o máximo de qualidade e produtividade para soldas em ligas de alumínio naval, contribuindo desta forma para o avanço do conhecimento científico e tecnológico do setor naval brasileiro.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivos específicos:

- Avaliar e parametrizar uma metodologia de processo com transferência metálica por curto-circuito controlado denominado CMT - *Cold Metal Transfer* para dois tipos de metais de adição (ER 5183 e ER 5087) que resulte em um procedimento adequado

para passe de raiz e que assegure uma boa fusão que garanta a junção entre as chapas, com adequada resistência mecânica;

- Estabelecer a diferença das características microestruturais e de propriedades mecânicas entre os depósitos de solda realizados com os metais de adição ER 5183 e ER 5087, tendo em conta a possibilidade de se obter melhor desempenho da junta soldada com a liga 5087;
- Avaliar uma metodologia de processo utilizando MIG Pulsado CC para liga de alumínio naval 5083, a partir de parâmetros pré-definidos, que resultem em um processo estável e de possível aplicação de preenchimento na soldagem do veleiro;
- Desenvolver uma metodologia de cálculo para um programa sinérgico do processo MIG Pulsado CA, tendo por base as fundamentações já conhecidas para o MIG Pulsado CC, que resulte além de estabilidade do processo, em melhor desempenho de qualidade na soldagem do veleiro buscando aprimorar a qualidade do preenchimento.

1.1 ESTRUTURA DO TEXTO

O trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo o número 1 de introdução e o de número 2 uma breve fundamentação sobre as principais ligas de alumínio utilizadas no setor naval e problemas decorrentes na soldagem destas ligas, e também as modalidades do processo MIG onde se destaca o processo CMT e Pulsado.

Num segundo momento, o capítulo 3 trata da aplicação do processo CMT na soldagem de raiz de juntas de topo de chapas de 6 mm do veleiro e da qualificação do processo utilizando-se de dois diferentes materiais de adição (ER 5183 e ER 5087). Neste capítulo também foram realizadas análises comparativas entre os dois metais de adição.

Dando seqüência ao trabalho no capítulo 4 são apresentados os estudos desenvolvidos sobre a variante MIG Pulsado, já que na soldagem de chapas mais espessas, o processo MIG Convencional ou CMT não fornecem potência necessária para a execução de passes de preenchimento.

O capítulo 5 trata de estudos desenvolvidos sobre a variante MIG Pulsado com corrente alternada, visto que a mesma apresenta-se como uma solução onde se precisa controlar o aporte térmico, uma vez que houve situações em que o MIG Pulsado com corrente contínua forneceu potência excessiva.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões gerais sobre o trabalho e o capítulo 7 traz as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo será dada uma introdução sobre as ligas de alumínio navais e suas características, além dos problemas encontrados durante a soldagem deste material. Também são discutidos fundamentos sobre o processo MIG e suas opções de variantes e aplicações.

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO NAVAL

O aumento da demanda por embarcações maiores e com menor peso (menor consumo energético) faz das ligas de alumínio um material com alto potencial de aplicação na indústria naval, visto que seu peso específico é aproximadamente 35% do peso específico do aço. Suas propriedades mecânicas também são consideráveis quando adicionados elementos de liga, que permitem obter um material de ampla utilização para estruturas com alta resistência específica (MPa/kg), ou seja, consegue-se com uma liga de alumínio naval uma relação resistência/peso de 112 MPa/kg enquanto para uma liga de aço naval tem-se 76 MPa/Kg. As ligas mais utilizadas neste setor apresentam o magnésio como principal elemento de liga, abrangendo ligas da série 5XXX (Al-Mg) e 6XXX (Al-Mg-Si).

Dentre as diversas ligas de alumínio encontradas no mercado, as mais utilizadas para construção naval e offshore são as da série 5XXX que apresentam o magnésio como principal elemento de liga. Em 1954, foi registrada na *Aluminium Association* a liga 5083, que é considerada a liga-base da indústria naval [5]. Outras ligas como 5383 e 5059 foram consideradas por apresentarem melhor resistência mecânica e ao impacto que a citada anteriormente, por terem em sua composição química o elemento zircônio. Além das ligas de Al-Mg, as ligas da série 6XXX, de alumínio, magnésio e silício, também podem ser utilizadas, no entanto, apresentam certa desvantagem por serem tratáveis termicamente, e em processos de fabricação, como o de soldagem, poderem sofrer variações metalúrgicas que irão comprometer a integridade da solda [6].

As ligas de alumínio e magnésio são as mais usadas em estruturas marítimas por apresentarem boa soldabilidade associado a elevada resistência mecânica, sendo a mais resistente entre as demais ligas trabalhadas a frio (1XXX, 3XXX e 4XXX), e tem uma resistência adicional por conformação plástica a frio e não por tratamento térmico, logo suas propriedades são estáveis no tempo, ou seja, o material não “envelhece”. Além disso, possuem a melhor resistência à corrosão frente

as demais ligas de alumínio em ambientes marinhos, e são praticamente inertes em água salgada, com vida útil prolongada e baixos custos de manutenção. O aumento do teor do magnésio para mais de 5%, que faria aumentar a resistência, não é normalmente usado devido à maior susceptibilidade à corrosão. Embora as ligas Al-Mg estejam classificadas como ligas não tratáveis termicamente, por não apresentarem ganho de dureza devido à precipitação, em ligas com teor de magnésio que supera o limite de solubilidade, como o caso da liga 5083, em condições termodinamicamente favoráveis como temperaturas elevadas, ou mesmo longos tempos à temperatura ambiente, pode ocorrer precipitação das fases Al_3Mg_2 , Al_3Mg_5 ou Al_8Mg_5 nos contornos de grão, que, em vez de proporcionar algum ganho de dureza, causa problemas como aumento da susceptibilidade à corrosão nos contornos de grão e diminuição da resistência à corrosão sobtensão. Esse problema resultou no desenvolvimento de uma têmpera especial H116, que segundo Hatch [7] a aplicação deste tratamento termomecânico está associada a um elevado nível de resistência mecânica e a uma resistência à corrosão também elevada.

2.1.1 Ligas Utilizadas como Metal de Adição na Soldagem Naval

Os consumíveis mais indicados e utilizados para a soldagem de chapas de alumínio naval 5083, também devem ser da mesma série, com composição química semelhante. Além disso, deve atender algumas propriedades necessárias para a integridade da junta com relação a trincas de solidificação, ductilidade, resistência mecânica da junta soldada, temperatura de serviço e resistência à corrosão [5]. As ligas 5356 e 5183 tem ampla utilização neste setor. A principal diferença entre as duas classificações de consumíveis é o teor de manganês, que conseqüentemente, faz com que o consumível 5183 apresente resistência mecânica do metal depositado ligeiramente maior do que o depositado 5356. Outra opção é a liga 5087, que é uma liga especial para soldagem de ligas de Al-Mg, semelhante as 5183 e 5356, porém com adição de zircônio (Zr), que é responsável pelo incremento nas propriedades mecânicas e de corrosão. Isto ocorre devido a este elemento de liga possuir a função de controlar o tamanho de grão, refinando a microestrutura da solda. As conseqüências do refino de grão são de melhorar a resistência mecânica, resistência à fadiga, resistência à corrosão sobtensão, tenacidade, e até mesmo reduzir ou dispersar porosidade [8,9]. Ainda, os fabricantes [10,11] ainda ressaltam sua

importância em relação aos demais metais de adição em diminuir a susceptibilidade às trincas de solidificação.

2.2 SOLDABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

2.2.1 Aspectos Operacionais: Propriedades Físico-químicas que Influenciam no Processo

A soldagem das ligas de alumínio apresentam algumas peculiaridades em relação à soldagem dos aços, devido principalmente as suas propriedades físico-químicas, apesar de ser uma técnica já considerada praticamente dominada. Dentre estas propriedades pode-se citar o baixo ponto de fusão, alto coeficiente de expansão linear, alta condutividade térmica, formação de uma fina camada de óxido e baixa resistividade elétrica, que irão influenciar no aspecto do cordão de solda, na formação de defeitos e na variação da altura do arco.

Numa primeira análise, devido ao ponto de fusão do alumínio ser menor que a do aço, supõe-se que o calor necessário para realizar a soldagem seja menor. Porém, a condutividade térmica exerce uma grande influência na soldabilidade, pois ela é cerca de cinco vezes maior que a do aço. Isto significa que na prática as ligas de alumínio necessitam de um fornecimento de maior aporte térmico. Assim sendo, a alta condutividade térmica do alumínio atua como um impasse para formação da poça de fusão, já que no início do cordão, a alta condutividade dissipa o calor rapidamente, dificultando a molhabilidade do metal base e de solda e a profundidade de penetração.

Outro agravante, diz respeito à alta reatividade do alumínio com o oxigênio, formado naturalmente, em sua superfície, uma camada de óxido de alumínio (Al_2O_3). Em ambiente seco, a camada estabiliza a cerca de 25 – 50Å e em condições de umidade, ou anodização, a camada pode crescer até cerca de mil vezes. Essa camada apesar de ser muito fina, é suficiente para proteger o metal em diversos meios corrosivos, o que explica sua excelente resistência à corrosão. Entretanto, apesar de todos os metais formarem óxidos em sua superfície, no caso do alumínio há uma particularidade devido à diferença de temperatura de fusão entre o óxido. Enquanto a alumina se funde a 2052°C, o ponto de fusão do alumínio é em torno de 660°C. A princípio isto não seria um problema, já que o arco elétrico atinge temperaturas de até 6000 °C, mas devido à alta condutividade do alumínio, há dissipação rápida de calor, fazendo com que apenas o metal se funda e a camada de óxido permaneça intacta. Além disso, o Al_2O_3 é eletricamente não condutor o que causa

uma dificuldade de passagem de corrente, resultando em instabilidade no arco, logo, se faz necessária à remoção deste óxido.

A hipótese mais aceita que tenta explicar a remoção de óxidos está ligada ao mecanismo de emissão de elétrons a partir da peça de trabalho, a qual ocorre durante as fases de corrente positivas. Segundo autores como Lancaster [12] e Fuerschbach [13] este mecanismo é conhecido como efeito de campo e causa a limpeza catódica. Baseia-se no fato de que, durante a polaridade positiva, ocorre a formação de múltiplas manchas catódicas microscópicas sobre a região onde está ocorrendo a soldagem. Essas apresentam-se em uma pequena área de concentração e, assim, uma alta densidade de corrente é capaz de remover ou fundir a camada de óxidos [14]. Como a polaridade comumente utilizada no processo MIG de ligas de alumínio é positiva, o óxido já é naturalmente removido. No entanto, quando se utilizada polaridade negativa o mesmo não acontece.

Outro problema importante é sua baixa resistividade elétrica. Em modalidades de soldagem em que a fonte impõe a corrente, o arco elétrico tende a variar aleatoriamente seu comprimento, ou seja, para uma dada corrente o arco pode assumir valores diferentes de tensão. Este comportamento pode ser melhor entendido pela Figura 1, verificados no trabalho de Kiohara [15] que interpreta as características de fusão de eletrodos de alumínio na soldagem MIG e que apresentam uma ligação direta com o comprimento de arco. A Figura 1 mostra seus resultados para o eletrodo de alumínio ER 5183 em que são plotadas curvas de tensão média por corrente média, denominada por Quite e Dutra [16] curvas de isoconsumo. Pode-se perceber que para uma tensão de arco elevada a corrente de soldagem é praticamente constante, independentemente do aumento da tensão do arco. Nesta região, onde ocorre transferência *spray*, o aumento de tensão pode apresentar o mesmo valor de corrente (reta vertical), sendo este fenômeno associado à instabilidade do arco. Já para tensões mais baixas, onde a transferência se dá por curto circuito, para cada valor de corrente há um valor de tensão correspondente. Estes problemas relacionados com a variação da altura do arco muitas vezes acabam dificultando ou até inviabilizando a solda.

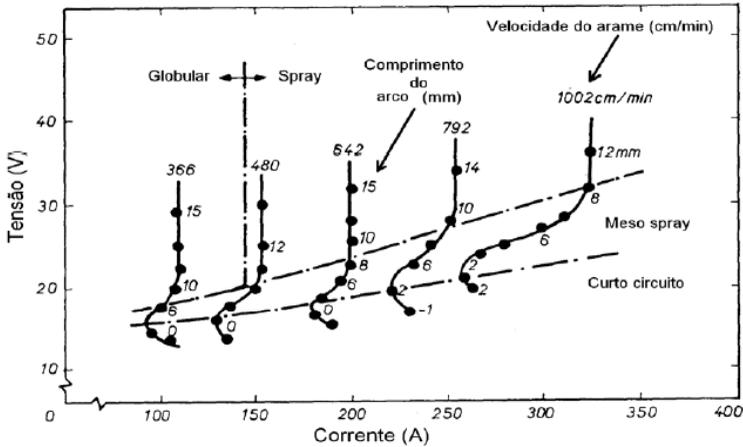


Figura 1 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: A 5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio) [15]

2.2.2 Aspectos Metalúrgicos: Descontinuidades em Soldas – Zona de Fusão e Zona Termicamente Afetada

Além dos aspectos físico-químicos, há ainda as alterações de composição química e microestruturais na poça de fusão e zonas adjacentes que dão lugar a zona termicamente afetada (ZTA) no metal de base. As características da ZTA dependem fundamentalmente do tipo de metal de base e do processo de soldagem, isto é, do ciclo térmico que são expostos e da repartição térmica característica do tipo de liga. De acordo com o tipo de metal que está sendo soldado, os efeitos do ciclo térmico poderão ser dos mais variados. As ligas de alumínio utilizadas neste trabalho são classificadas em não tratáveis termicamente. Para estes materiais, sem transformação alotrópica, os grãos encruados por trabalho a frio do metal de base dão lugar na ZTA a grãos equiaxiais, cujo tamanho é crescente com a proximidade da linha de fusão, devido ao maior pico de temperatura. A Figura 2 ilustra esse fenômeno juntamente com o comportamento da dureza da liga. Assim, o risco na soldagem é que o efeito endurecedor do encruamento desapareça localmente, e sua dureza e resistência mecânica fiquem inferiores ao metal de base deformado frio.

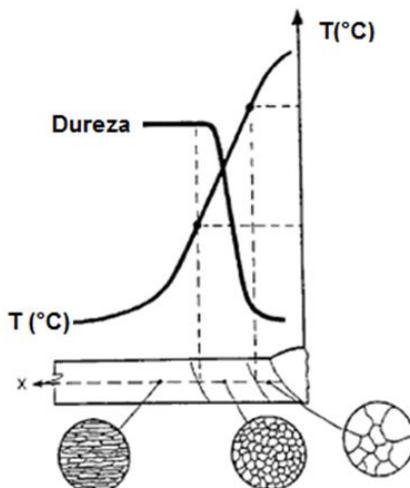


Figura 2 - Efeito da recristalização e superaquecimento na microestrutura e dureza na ZTA e MB encruados sem transformação alotrópica

Os problemas relacionados à soldabilidade das ligas de alumínio citados no tópico anterior, aliado as mudanças de composição química e microestruturas na poça de fusão e ZTA, podem levar a uma redução das propriedades mecânicas e incidência de defeitos como porosidade, trincas e falta de fusão. Segundo a *American Welding Society* [17], as discontinuidades são divididas em três categorias básicas:

- a) Descontinuidades Dimensionais: distorção, dimensões incorretas da solda, e perfil incorreto do cordão de solda.
- b) Descontinuidades Estruturais: porosidade, inclusões, trincas, falta de fusão, falta de penetração, mordedura.
- c) Propriedades Inadequadas: propriedades mecânicas e propriedades químicas.

As discontinuidades estruturais geralmente são as que mais comprometem a solda. A falta de fusão refere-se à ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou dos passes adjacentes, resultante do não aquecimento adequado do metal presente na junta e/ou da presença de camadas de óxidos refratários, no caso do alumínio. A falta de penetração também é comum nas soldas deste trabalho, já que é mais presente em passe de raiz de juntas e refere-se às falhas de fusão desta.

Outros dois defeitos presentes na soldagem do alumínio são a porosidade e trincas. O mecanismo de formação de porosidade é um problema confinado ao metal de solda e esta associado à alta

condutividade térmica, que não permite tempo para que os gases saiam do metal de solda já que a resfriamento é rápido, e também ao aprisionamento de gases durante a solidificação, principalmente relacionado ao hidrogênio. Segundo Woods [18] a solubilidade do hidrogênio no alumínio é maior do que em qualquer outro material, e também, que pequenas concentrações de hidrogênio são suficientes para formar bolhas de gás. Já as trincas decorrentes do processo de soldagem podem ser de vários tipos e ter diferentes causas de formação, mas de uma forma geral, são decorrentes da susceptibilidade do material e do ciclo térmico a que a liga foi submetida, que devido aos efeitos da contração e da expansão térmica resultam em elevadas tensões residuais na junta soldada.

Quanto às propriedades inadequadas que ocorrem devido ao calor fornecido durante o processo que leva a formação de grãos grosseiros que irão influenciar diretamente as propriedades mecânicas da junta. Geralmente, há o decréscimo de resistência, dureza, tenacidade, entre outros aspectos, que deverão ser avaliados por meio de testes normalizados com a realização de ensaios destrutivos e/ou ensaios não destrutivos para qualificação de um procedimento de soldagem e para avaliação da integridade da junta soldada.

2.3 PROCESSO MIG/MAG E SUAS VARIANTES

O processo de soldagem por fusão MIG/MAG é basicamente caracterizado pela abertura e manutenção de um arco voltaico estabelecido entre uma peça e um eletrodo alimentado continuamente, protegido por um fluxo de gás. A polaridade geralmente utilizada na soldagem MIG de alumínio é positiva (CC+), já que a mesma possui ação de remoção da camada de óxido superficial (Al_2O_3) que é fundamental para realização desta soldagem. Além disso, mesmo para outros materiais, a polaridade CC+ confere maior estabilidade do arco, melhor geometria do cordão, e convencionalmente é a polaridade mais utilizada para este processo. O uso da polaridade negativa permaneceu por muito tempo sendo considerado impraticável devido ao seu grande nível de instabilidade durante o destacamento da gota do material a ser depositado. Por outro lado, o uso da condição CC- pode proporcionar maior taxa de fusão do arame, o que pode trazer como consequência vantajosa maior produtividade, além de reduzir o calor fornecido à peça, já que a maior parte do calor esta concentrado na ponta do eletrodo.

Além da polaridade, o modo de transferência influi grandemente à eficiência de deposição, na qualidade estética e estrutural da junta

realizada, na geometria da solda, no aporte térmico ao material de base, entre outros aspectos relacionados [19]. A mesma é resultado de um conjunto de forças eletromagnéticas, e dependendo dos valores destas, junto ao de corrente e tensão, tem-se diferentes modos de transferência. Dentre as principais, ressalta-se aqui neste trabalho, o modo de transferência por curto-circuito, e aquele que evita o mesmo em correntes mais baixas, denominada de transferência por corrente pulsada.

O processo MIG Convencional é aquele que apresenta forma mais simples e é caracterizado pela ocorrência de curto-circuito. As fontes utilizadas neste processo são, na sua grande maioria, do tipo tensão constante. Logo, as variáveis de entrada são a tensão do processo e a velocidade de arame. Nestes sistemas ainda pode ser regulada a indutância, que nada mais é, que a dinâmica com que a corrente varia. Nesta situação, a corrente não pode permanecer fixa, pois, no final de cada curto-circuito a corrente precisa ser elevada para que a gota metálica formada no extremo do eletrodo se destaque, dando continuidade ao processo. Caso a corrente não fosse aumentada o eletrodo não se destacaria da peça e conseqüentemente o arco não se restabeleceria. A Figura 3 ilustra um oscilograma para uma situação onde foi regulada uma velocidade de arame de 6 m/min para o processo MIG Convencional numa faixa onde a transferência dá-se por curto-circuito. Pode-se observar uma queda abrupta da tensão que caracteriza os curtos. Resumidamente, este processo requer baixos níveis de tensão que acarreta numa baixa relação potência/velocidade de arame. Esta baixa relação se faz sentir principalmente na soldagem de ligas de alumínio, que implicará diretamente nas características de molhabilidade, mostrada na Figura 4. Observa-se um cordão com falta de fusão nas bordas e pouca penetração, advindo da baixa potência do processo.

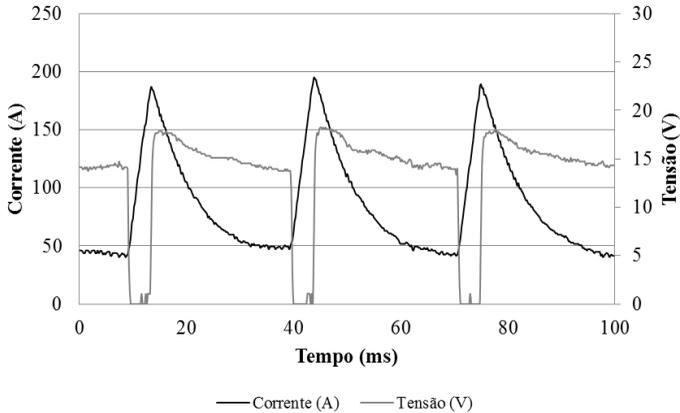


Figura 3 - Oscilograma de tensão e corrente para o modo MIG convencional com curto-circuito ($I_m = 86$ A e $P = 1121$ W)



Figura 4 - Cordão de solda corrente média 86 A MIG Convencional

A constante necessidade por maiores níveis de produção e qualidade do produto faz com que apareçam no mercado diferentes versões dos processos de soldagem tradicionais, que tem por objetivo atender tais aplicações específicas. Estas versões estão basicamente relacionadas com o modo de transferência metálica e com o desenvolvimento de formas de ondas que melhoram o desempenho e o controle do processo. Algumas vezes, estas características são obtidas com o lançamento de tecnologias complexas e de alto valor agregado. Entretanto, uma simples variação de um processo tradicional pode fornecer resultados até então inatingíveis.

Com a problemática perceptível na soldagem de ligas de alumínio utilizando MIG Convencional, mais recentemente, o modo pulsado do processo aumentou a faixa de utilização deste processo, com transferência metálica que evita o curto-circuito pela imposição de dois níveis de correntes diferenciados, denominados corrente de pulso e corrente de base, cada qual com seu tempo de duração. Desta maneira, evitando-se o curto a tensão não alcança níveis baixos e consegue-se, portanto, um aumento da relação potência/velocidade de arame, comparando-se com a transferência por curto-circuito, a qual esta

relação é reduzida pelo fato do arco extinguir-se. Nas primeiras fontes de energia, este aumento de corrente de pulso era regulado pela elevação da tensão, assim como nas fontes do modo convencional. Entretanto, na prática, este processo não alcançou êxito já que o controle da transferência metálica dá-se pelo controle da corrente. Portanto, só com o a inserção das fontes de controle da corrente que o processo pulsado atingiu seus propósitos. A forma de onda varia de fabricante para fabricante, e outros detalhes científicos sobre a estabilidade do processo, e melhor conjuntos de variáveis são conjecturados por diferentes autores. A principal premissa e utilizada por todos é a condição de destacamento de uma única gota por pulso [20-24].

A Figura 5 ilustra um oscilograma para uma situação onde foi regulada uma velocidade de arame de 4,8 m/min para o MIG Pulsado utilizando parâmetros de pulso da fonte *Digitec* da IMC. Optou-se por manter a mesma corrente média entre os dois processos para fins comparativos, pois uma mesma velocidade de arame ocasionaria correntes médias diferentes. Neste modo de operação, a potência é maior, mesmo com uma velocidade de arame mais baixa que no MIG Convencional. Pode-se observar pelo oscilograma que em nenhum instante há extinção do arco. A Figura 6 mostra o cordão de solda obtido por este processo, e é perceptível a melhor geometria do cordão de solda, com maior penetração e molhamento, quando comparado ao MIG Convencional.

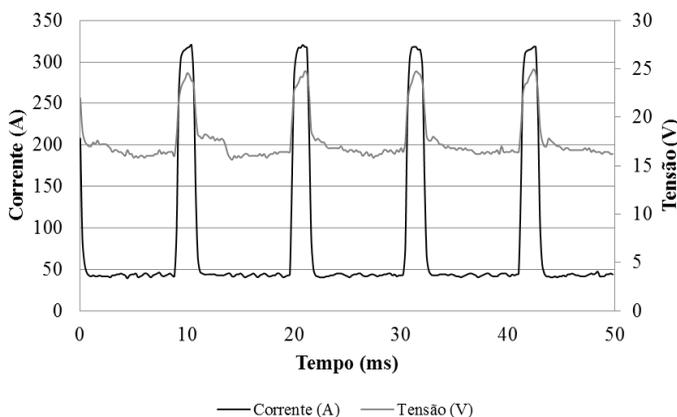


Figura 5 - Oscilograma de tensão e corrente para o modo MIG Pulsado ($I_p= 316$ A, $t_p= 1,6$ ms; $I_b= 40$ A, $t_b= 9,5$ ms ($I_m= 86$ A e $P= 1733$ W)

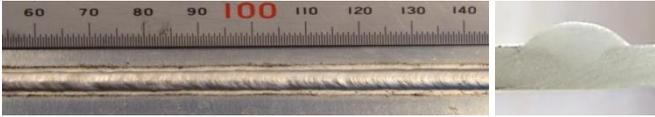


Figura 6 - Cordão de solda corrente média de 86 A MIG Pulsado

A versão pulsada ainda oferece a opção de se trabalhar com corrente alternada (CA). Basicamente, a versão MIG Pulsado CA utiliza-se das premissas fundamentais empregadas pela versão MIG Pulsado com corrente contínua (CC), ou seja, o destacamento de uma única gota por período e a igualdade entre velocidade de alimentação e a velocidade de fusão de arame [20]. O principal diferencial do CA em relação ao CC é a introdução de um intervalo de corrente na polaridade negativa. A ideia é que, com isso, sejam combinadas as vantagens da utilização de cada uma das polaridades.

O tempo de polaridade positiva tem por finalidade promover a transferência metálica por meio do pulso de corrente e, no caso do alumínio, é o momento onde ocorre o efeito de limpeza catódica para a remoção da camada de óxidos. Nessa polaridade, o arco fica ancorado na extremidade da gota, oferecendo condições para que as forças eletromagnéticas associadas ao efeito *pinch* realizem o seu destacamento.

Muitos autores [4,25] afirmam que o uso da polaridade negativa possibilita uma maior taxa de fusão do arame e ao mesmo tempo uma menor energia térmica aportada à peça. Segundo Lancaster [26], a maior taxa de fusão na polaridade negativa está relacionada ao fenômeno de escalada da mancha catódica para parte sólida do eletrodo, fazendo com que haja uma maior exposição do arame ao arco voltaico. Entretanto, produzir um cordão de solda utilizando somente a polaridade negativa pode ser algo extremamente difícil e em alguns casos impossível, como na soldagem de alumínio. De modo geral, nessa polaridade, o processo não apresenta estabilidade suficiente para produzir um cordão de solda sem respingos e falhas de fusão. Talkinton [25] e Lancaster [26] atribuem a ocorrência de instabilidade e respingos a uma força repulsiva que atua sobre a extremidade fundida do eletrodo.

Apesar dos problemas relacionados à polaridade negativa, o uso da corrente alternada pode ser uma solução adequada para a soldagem de chapas finas, onde se tem a necessidade de controle do aporte térmico, e também uma maior capacidade para realização do preenchimento de juntas variáveis (*gap*) por meio da pulsação da corrente e período em cada polaridade.

As versões do MIG acima citadas têm como variáveis de atuação direta a tensão ou a corrente, e apresentam-se como simples variação de um processo convencional. Uma outra versão do processo MIG, denominada *Cold Metal Transfer* (CMT), além de controlar a corrente, ainda atua na velocidade e sentido de avanço do arame, por meio de um motor localizado na tocha do equipamento. Esta se apresenta como uma tecnologia de destaque, utilizada principalmente na soldagem do alumínio. Segundo o fabricante [27] este processo possui como vantagens a redução do aporte térmico, um arco voltaico estável e praticamente nenhuma formação de respingo. Estas características são possíveis devido ao método controlado de transferência metálica que ocorre em baixas correntes e a alternância de ciclos quentes e frios do processo que acabam resultando em baixa potência do processo.

O oscilograma da Figura 7 mostra que o processo é caracterizado por ciclos de alta potência, quando o arco está aberto, e de baixas potências, quando ocorre o curto e a tensão é zero até o arco se reacender. De maneira análoga ao MIG Convencional é perceptível que as fases do arco são muito mais distintas. No momento anterior ao curto há uma redução da corrente para um valor mais baixo que o do pulso, que será responsável pela redução de respingos e fumos devido ao baixo nível de energia. No momento que a tensão está em zero e ocorre o curto-circuito, acontece a desaceleração do arame logo após o material se acomodar a peça, propiciando um destacamento muito mais suave que no modo MIG Convencional. Este controle da corrente e retrocesso do arame conduz a uma transferência metálica por tensão superficial de maneira suave, estável e regular [28]. Quando o arco reacende a tensão e a corrente assumem valores altos e constantes, e como consequência valores relativamente altos de potência. Neste intervalo é favorecido tanto o aquecimento quanto a fusão do material de base e da ponta do eletrodo.

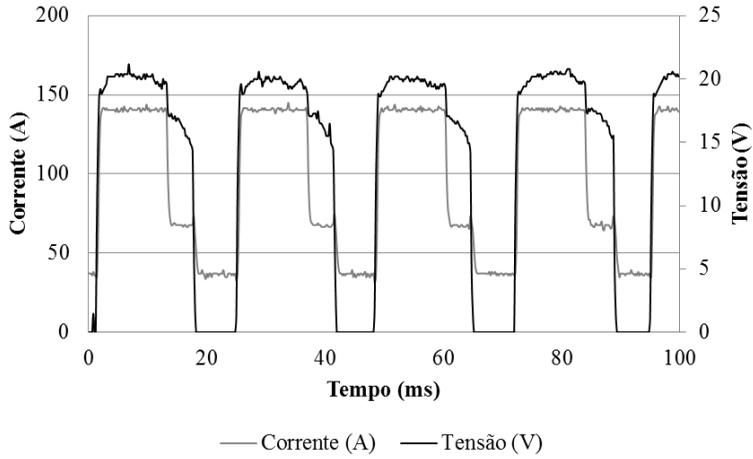


Figura 7 - Oscilogramas de tensão e corrente para o modo MIG CMT

3 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO NAVAL 5083 H116 SOLDADA PELO PROCESSO MIG CMT

O presente capítulo apresenta uma solução desenvolvida para a soldagem de raiz para o veleiro construído em liga de alumínio 5083/H116. No intuito de se realizar um único passe de raiz, de forma unilateral, a utilização de versões do processo MIG em que a transferência ocorre por *spray* não se tornam cabíveis, pois, o maior comprimento do arco nesta situação acaba fundindo uma maior área das laterais do chanfro e nem sempre a direcionabilidade da gota metálica ocorre para o fundo do chanfro e, conseqüentemente, não ocorre formação de uma boa raiz. Durante a execução de alguns ensaios exploratórios onde se testou variantes do processo MIG, como o MIG Convencional, MIG Pulsado CC e CA e diferentes versões do CMT, pode-se concluir que para a condição testada a melhor solução para se obter uma raiz adequada foi a utilização de um processo com transferência metálica por curto-circuito, com destaque para o MIG Convencional e CMT, já que com estas versões é possível que o material seja depositado no fundo do chanfro.

O processo denominado CMT (*Cold Metal Transfer*) foi utilizado como uma opção de solução de soldagem de raiz, já que opera na faixa de transferência por curto-circuito. Basicamente, seu diferencial para o processo MIG Convencional, é que este controla a corrente e, além disso, o processo utiliza um movimento mecânico de recuo do arame por intermédio de um motor posicionado na tocha que permite a deposição de material por tensão superficial com reduzidos níveis de energia nesse período, que proporciona uma transferência metálica suave, com praticamente nenhuma formação de respingos. Na Figura 8 pode ser acompanhada pela sequência de imagens e pelo oscilograma de tensão e corrente a descrição de funcionamento deste processo. O ponto “a” corresponde à fase em que um pulso de corrente fornece a energia necessária para a formação de uma gota metálica na extremidade do arame eletrodo. E então a corrente é reduzida em “b” para que com a continuidade do avanço do arame, ocorra o curto-circuito em correntes baixas, evitando a formação de respingos e a vaporização metálica. O ponto “c” é o instante anterior ao curto-circuito que a corrente baixa até então chegar a um valor baixo no ponto “d”. Nesse momento, além da corrente ser mantida em valores baixos, acontece a desaceleração do arame que continua avançando até o ponto “e”. O material líquido se acomoda à poça de fusão e o arame inicia o movimento de recuo. Em “f” é possível ver a constricção da ponte metálica. De maneira análoga

ao curto-circuito convencional, onde a constrictão acontece sob a ação de forças eletromagnéticas, no CMT esse evento é dado predominantemente pela ação de recuo do arame, contribuindo para que a transferência metálica aconteça de forma muito suave. Durante a abertura do arco a corrente é mantida em um baixo valor, como indicado pelo baixo índice de luminosidade na imagem correspondente ao ponto “g”. Ainda sob esse ponto, acontece a desaceleração do movimento do arame, que continua recuando até “h” quando o ciclo começa novamente [3].

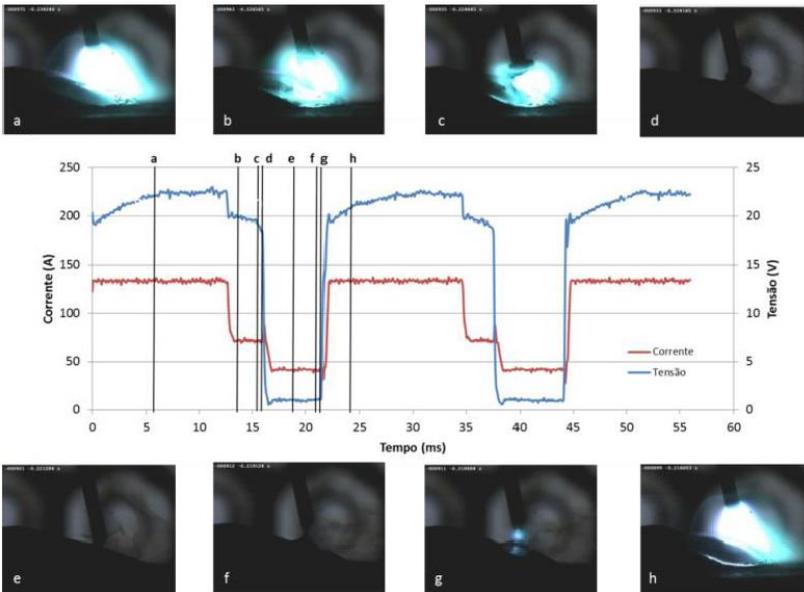


Figura 8 - Oscilogramas de tensão e corrente para o modo CMT, soldagem de alumínio ER 5183 [3]

Como o próprio nome sugere, este processo é normalmente dito ser um processo “frio”. A maioria dos trabalhos publicados sobre este processo [29-37] afirmam que este se destaca pelo fato de reduzir o aporte térmico e a incidência de respingos frente a outras modalidades de processo, e também se mostra útil para diversas aplicações, que vai da soldagem de ligas de alumínio [29], materiais dissimilares [30-33], chapas finas [34], revestimento [35] e para passe de raiz [36, 37]. No entanto, na soldagem, esta afirmação é muito relativa, e deveria ser comparada sempre em mesmas condições do processo. Gongur [29]

relata no seu trabalho as características mecânicas e microestruturais em ligas de Al-Mg e Al-Mg-Si, utilizando o processo CMT, como melhores do que utilizando processos MIG Pulsado e FSW (*Friction Stir Welding*), devido ao menor aporte térmico. Suas conclusões são baseadas apenas em valores encontrados para microdureza, não levando em consideração, a forma da junta, a corrente utilizada, entre outros aspectos necessários para tal afirmação. Kim [36] em seu estudo para formação de raiz de junta, atribui a baixa pressão formada no arco do CMT, devido à alternância de ciclos quentes e frios, como uma barreira na formação de raiz, diferentemente do que foi encontrado por Marques [3]. Em seu trabalho, Marques [3], comparando o processo MIG Convencional e CMT nas mesmas condições de processo, relata que o CMT fornece melhor raiz principalmente pelo fato deste processo ser mais “quente”, já que por intermédio do correto cálculo de potência, que considera os valores pontuais de tensão e corrente conforme Equação 1, o CMT possui valores relativamente maiores.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \times I_i}{n} \quad (1)$$

Logo, o processo CMT apresenta-se como uma opção tecnológica, não devido as menores potências, mas sim pelo fato de ser mais estável e pela boa capacidade de formar raiz, devido controle da transferência metálica apropriado, que ocorre pela imposição de corrente e controle da velocidade e sentido de avanço do arame.

Quanto à modalidade CMT, este capítulo ainda avalia os efeitos metalúrgicos causados por este processo em juntas de topo que serão utilizadas na construção do veleiro. Tendo em vista os problemas relacionados às propriedades físico-químicas do alumínio que influenciam na formação de porosidades e trincas, outro problema importante é a mudança de composição química e microestrutural na poça de fusão e na zona termicamente afetada, que geralmente tendem a degradar as propriedades mecânicas de qualquer tipo de solda. Estas mudanças na microestrutura podem incluir recuperação, recristalização, crescimento de grão e reações de precipitações, e vai depender do tipo de metal de base e do processo e procedimento de soldagem. Assim, o presente capítulo trata de qualificar um possível procedimento automatizado na soldagem naval com o processo CMT, além de investigar as características de soldabilidade da liga de alumínio 5083/H116, utilizando-se dois diferentes tipos de metal de adição, o ER 5183 e o ER 5087. A liga 5087 é considerada uma evolução da liga

5183, já que possui zircônio em sua composição química, que por refinar a microestrutura espera-se que irá melhorar as propriedades da solda.

3.1 METODOLOGIA

Para este procedimento foram utilizadas chapas da liga naval 5083-H116 com 6 mm de espessura e composição química representada na Tabela 1. A têmpera utilizada H116 corresponde ao estado de encruamento devido à laminação. As duas ligas de alumínio utilizadas como metais de adição foram a ER 5183 e ER 5087, ambos com 1,2 mm de diâmetro, e composição química nominal na Tabela 2 e 3, respectivamente. Na Tabela 4 encontram-se as propriedades mecânicas de resistência estabelecidas pelos fornecedores de cada liga.

Tabela 1 - Composição química nominal liga de alumínio 5083-H116 [38]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,4	0,4	0,1	0,4 - 0,1	4,0 - 4,9	0,05 - 0,25	0,25	0,15

Tabela 2 - Composição química nominal liga 5183 [11]

Fe	Si	Mn	Mg	Zr	Cr
<0,4	<0,40	0,5 - 1,0	4,3 - 5,2	-	0,05- 0,25

Tabela 3 - Composição química nominal liga 5087 [11]

Fe	Si	Mn	Mg	Zr	Cr
<0,4	<0,25	0,7- 1,1	4,5 - 5,2	0,1 - 0,2	0,05 - 0,25

Tabela 4- Propriedades mecânicas nominais ligas de alumínio [11][38]

Liga	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	σ_{esc} (MPa)
5083 H116	305	215
ER 5087	275	125
ER 5183	275	125

Os ensaios de soldagem foram realizados no LABSOLDA empregando-se o processo CMT (*Cold Metal Transfer*). A metodologia consistiu em desenvolver um passe de solda com boa formação de raiz e com parâmetros adequados, utilizando o mesmo procedimento do trabalho de Marques [3] para passe de raiz. Posteriormente, foi realizado um segundo passe para preenchimento do cordão de solda. As chapas de 6 mm de alumínio foram dispostas em junta de topo com espaçamento

de 2 mm, chanfro em V de 80° na com 300 mm de comprimento e 250 mm de largura, conforme esquema da Figura 9. Foi utilizado a fonte TPS3200 da *Fronius*, modo MIG CMT 4043 sinérgico e um sistema de movimentação automático em dois eixos (Tartlope V2F) com tocha com ângulo 5° empurrando, como mostra a bancada da Figura 10 e utilização de backing de cobre. Nos ensaios com backing cerâmico quando o arame passava entre o *gap* e batia no *backing*, provocava uma grande perturbação no arco, por isso a escolha do backing de cobre. O gás de proteção utilizado foi argônio com vazão de 15 l/min e a distância bico de contato peça de 15 mm. Para o passe de raiz foram regulados na fonte uma velocidade de arame de 7 m/min que corresponde a uma corrente média de 106 A. A velocidade de soldagem foi de 40 cm/min e para o tecimento utilizou-se uma amplitude de 3,5 mm e frequência de 4 Hz. Para o segundo passe, de preenchimento, também foi ajustado uma velocidade de arame de 7 m/min correspondente a uma corrente média de 106 A. Nesta situação a velocidade de soldagem foi de 30 cm/min e para o tecimento foi programado uma amplitude de 8,5 mm e frequência de 2 Hz.

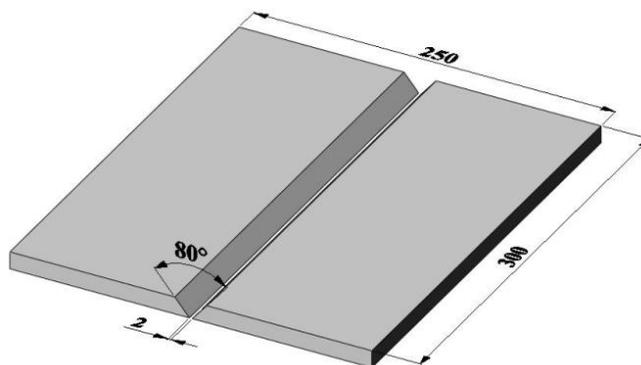


Figura 9 - Representação da amostra em mm



Figura 10 - Bancada de ensaios CMT

No intuito de determinar a influência do processo na qualidade da solda e nas propriedades mecânicas, seguindo recomendações de normas, foram realizadas os seguintes testes e análises: ensaio visual, macrografia, ensaios de tração, dobramento, microdureza, tenacidade à fratura (CTOD), e inspeção radiográfica.

O ensaio de microdureza foi realizado na seção transversal das amostras soldadas, abrangendo a região do metal de adição, metal de base e a interface metal de base – metal de adição. A Figura 11 mostra claramente o perfil do teste. O equipamento utilizado foi um Microdurômetro da marca Shimadzu modelo HMV-2 com carga de 300g. Os valores de microdureza foram obtidos na escala Vickers, e foram referentes aos dois metais de adição utilizados e também serviu para avaliar possíveis mudanças das propriedades mecânicas na zona termicamente afetada (ZTA).

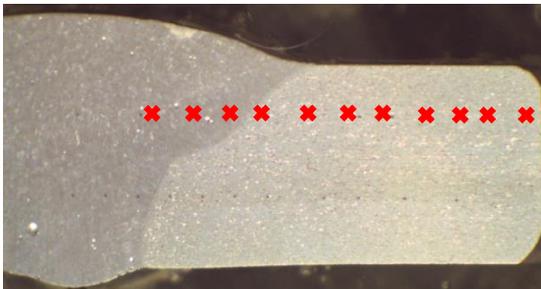


Figura 11 - Perfil de microdureza

O exame macrográfico foi realizado na seção transversal da amostra com ataque por imersão de 30 segundos, utilizando reagente Keller (2mL HF + 3 mL HCl + 5 mL HNO₃ + 190 mL H₂O).

Os ensaios de tração e dobramento foram conduzidos segundo as normas ASME – *Welding and Brazing Qualifications* [39], respectivamente. A escolha da norma ASME ocorreu pelo fato de ser um trabalho acadêmico e a inexistência de normas utilizadas no setor naval no laboratório. O ensaio de dobramento é utilizado para verificar a ocorrência de defeitos no cordão de solda e foi realizado no lado da raiz da solda. Os critérios de validação são: (a) não existir nenhuma trinca ou outra imperfeição lateral excedendo 3 mm em qualquer direção e (b) trincas originadas na superfície externa de dobramento, originadas durante o teste devem ser desconsideradas, a não ser que tenham mais de 6 mm. Para o procedimento foram confeccionadas amostras com cada liga e dimensões conforme a Figura 12 para chapa de 6 mm de espessura. Os reforços da solda foram removidos na face e na raiz.

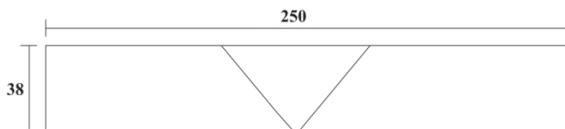


Figura 12 - Modelo corpo de prova ensaio de dobramento em mm [45]

No ensaio de tração, para que as soldas fossem aprovadas, o limite de resistência máximo deve ser um valor maior ou igual ao especificado para o metal de adição, já que neste caso se trabalhou com um liga com menor resistência que o metal de base. Foram confeccionadas amostras de metal de base e com soldas para cada metal de adição, conforme Figura 13, para chapas de 6 mm de espessura. Os ensaios foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC. Após o ensaio de tração as fraturas foram observadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) XL30 Philips.

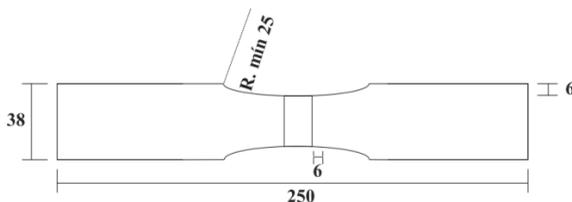


Figura 13 - Modelo corpo de prova ensaio tração em mm [45]

Inspeção radiográfica também foi realizada para avaliar a formação de poros. As imagens do raio-X foram analisadas em um negatoscópio, e observados as quantidades e distribuições dos poros conforme norma ASME IX [39], apenas na vista superior. Este ensaio também permite detectar a presença de outros defeitos, como falta de fusão e penetração.

O ensaio de tenacidade à fratura CTOD foi realizado em uma máquina servohidráulica marca MTS modelo 810 a temperatura ambiente com a montagem apresentada na Figura 14. O ensaio foi conduzido conforme as normas ISO 12135 [40] e BS EN ISO 15653 [41], para o metal base e o metal de adição, respectivamente, e as amostras foram confeccionadas com dimensões especificadas para o corpo de prova do tipo SE(B) (Figura 15), usinados pelo processo de eletroerosão com entalhe no metal de adição, já que se procura comparar a tenacidade dos diferentes materiais de adição empregados. O mesmo corpo de prova foi confeccionado em chapas do metal de base.

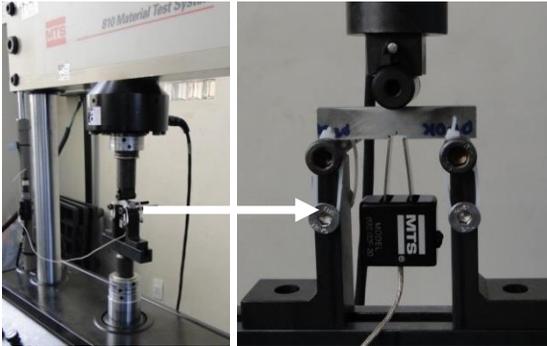


Figura 14 - Montagem dispositivo ensaio CTOD

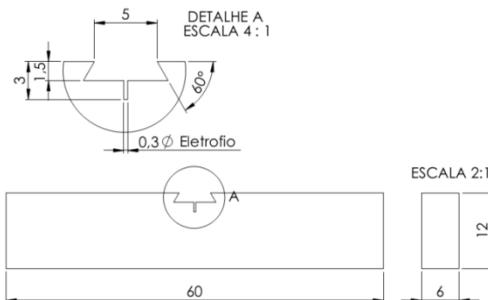


Figura 15 - Representação esquemática do corpo de prova do tipo SE(B) com as dimensões em milímetros [41]

Antes do ensaio propriamente dito, procedeu-se o pré-trincamento por fadiga a partir do entalhe usinado no corpo de prova, utilizando o software *MTS Fracture Toughness TestWare*. O teste foi realizado a temperatura ambiente e os dispositivos foram bem alinhados de forma que as distribuições das tensões fossem mais homogêneas possíveis.

Na execução do ensaio CTOD, a amostra foi carregada em flexão com carga crescente na amostra já pré-trincada e utilizado controle do deslocamento com taxa de carregamento de 1 mm/min com uso de um extensômetro (*clip-gage*). Por fim as amostras foram fraturadas por sobrecarga para que a superfície de fratura das amostras fossem analisadas e validadas. O valor de CTOD é validado pelo conhecimento do tamanho real da trinca, que deve ser maior que 1,3 mm ou 2,5% da largura da amostra, e também a relação tamanho inicial de trinca e largura da amostra (a_0/W) que deve ter entre 0,45 e 0,55.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As imagens da Figura 16 e 17 mostram o aspecto do cordão obtido nos ensaios, mostrando a qualidade da raiz Figura 16 e o bom acabamento com um passe de preenchimento, Figura 17. Na Figura 18 também é possível observar a imagem de uma seção da solda de cada metal de adição empregado, mostrando que não houve problemas referentes à geometria da solda, com boa formação de raiz e sem desalinhamento do cordão.

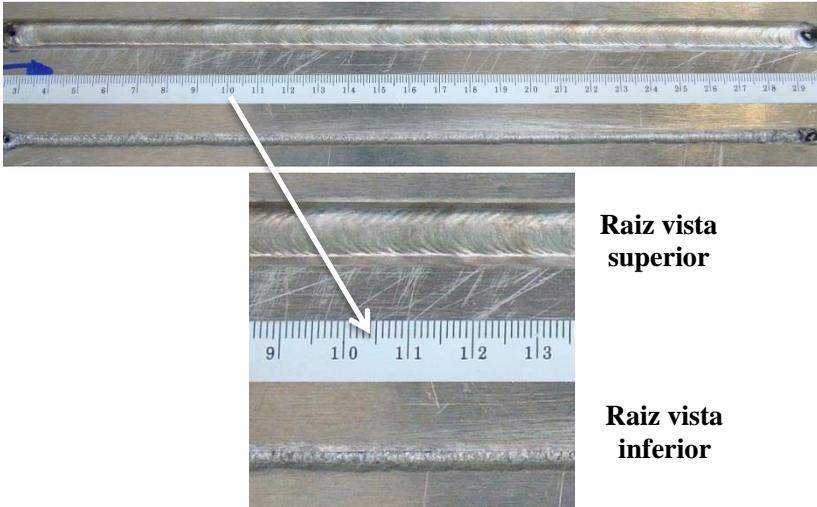


Figura 16 - Aspecto passe de raiz do metal de adição ER 5087

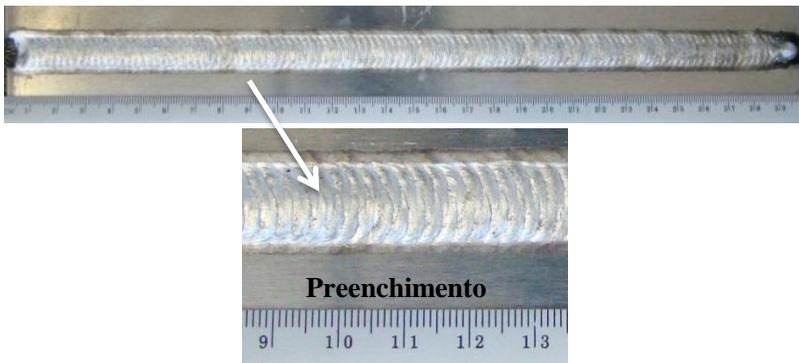


Figura 17 - Aspecto cordão de solda com preenchimento do metal de adição ER 5087

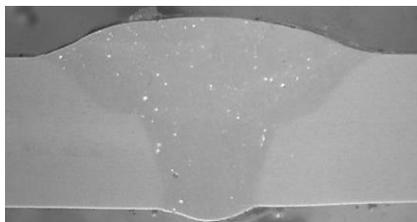


Figura 18 - Aspecto da seção transversal da solda com metal de adição ER 5087

Na Tabela 5 encontram-se os resultados obtidos no ensaio de tração, com os valores médios e desvio padrão do limite de escoamento e resistência máxima de cada metal de adição e metal de base. O material utilizado como metal de base apresenta resistência superior ao metal de adição, resultado coerente com as resistências fornecidas pelos fabricantes. Ainda pode-se observar que as soldas feitas com a liga 5087 apresentam uma resistência superior as com liga 5183, de aproximadamente 20 MPa.

Tabela 5 - Valores médios e desvio padrão de tensão máxima

Liga	Tensão Máxima (MPa)	Desvio Padrão
5083 H116	328,1	1,1
ER 5183	282,8	0,8
ER 5087	301,3	2,3

A imagem da Figura 19 mostra um corpo de prova fraturado após os ensaios da solda com o metal de adição ER 5183. No caso das soldas, as fraturas ocorreram na maioria dos casos numa região que abrange o cordão de solda e a zona termicamente afetada do metal de base ou inteiramente no metal de solda. Os trabalhos [29, 42, 43] citam que o metal de adição destas ligas de alumínio geralmente é a parte mais frágil da junta e é o local onde ocorrerá a falha, devido a sua menor resistência. Isto está em contraste com a maioria das ligas de alumínio tratáveis termicamente ou ligas de aço, em que a zona afetada pelo calor geralmente é o local mais propício a romper. Nesta situação, pode-se observar que a junta soldada da liga e a zona termicamente afetada são praticamente semelhantes em termos de propriedades. Este resultado ainda pode ser relacionado com o perfil de microdureza do cordão de solda, que será discutido a seguir. Os resultados apresentam-se coerentes com outros estudos [29, 43, 44], e já que se utiliza um metal de adição com menor limite de resistência que o metal de base, os mesmos devem atingir no mínimo o valor de resistência especificado pelo fabricante. O desempenho da junta soldada foi de 92% e 86% para a liga 5087 e 5183, respectivamente.

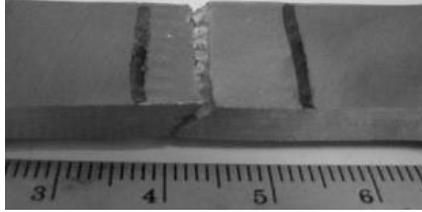


Figura 19 - Local fratura das amostras em tração

A Figura 20 (a) e (b) mostra a superfície típica observada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da fratura do metal de base. Observa-se que a liga 5083 apresenta uma superfície de fratura com característica dúctil, observando o mecanismo de fratura por formação de alvéolos (*dimples*).

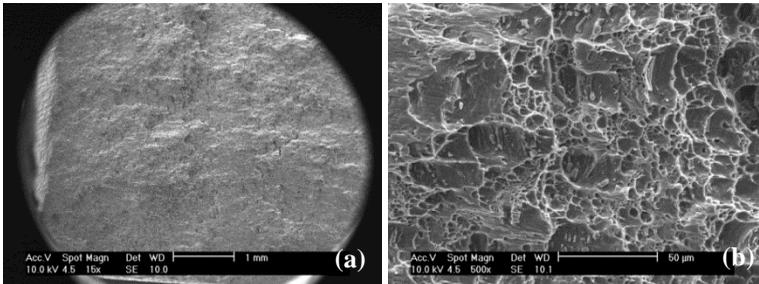


Figura 20 - Micrografias obtidas em MEV da liga 5083 ensaiado em tração, mostrando: (a) Visão geral da fratura (b) Superfície de fratura com aumento de 500x

Na Figura 21 (a), (b), (c) e (d) são mostradas as superfícies de fratura dos corpos de prova soldados com metal de adição ER 5087 e ER 5183 ensaiados em tração. Nas micrografias obtidas em MEV para liga 5087 nota-se uma fratura com aspecto dúctil, evidenciando predominantemente a presença de *dimples*. A superfície de fratura das amostras soldadas com a liga 5183 apresentaram características similares quanto ao tipo de fratura da amostra com liga 5087, porém há incidência mais acentuada de poros provenientes do processo de soldagem nestas imagens.

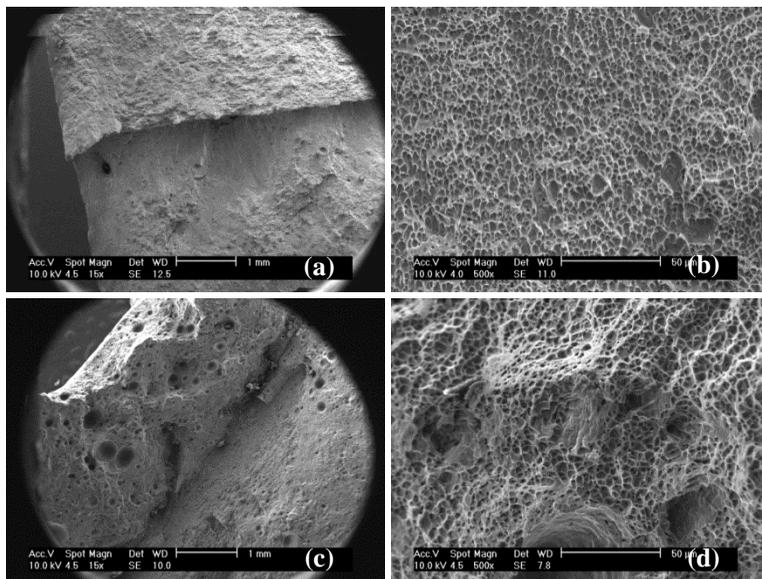


Figura 21 - Micrografias obtidas em MEV do local da fratura das amostras soldadas e ensaiadas em tração: (a) visão geral da fratura no cordão de solda com metal de adição ER 5087 com fratura no metal de base e no metal de solda; (b) superfície de fratura do cordão de solda, com aumento 500x, mostrando presença de dimples; (c) visão geral da fratura no cordão de solda com metal de adição ER 5183; (d) superfície de fratura do cordão de solda, com aumento 500x, mostrando presença de dimples e poros.

Na Figura 22 encontra-se o perfil de microdureza da seção transversal dos cordões de solda, onde a região de solda apresentou um valor de microdureza médio de 81,9 HV e 84,4 HV para os metais de adição ER 5183 e ER 5087, respectivamente, comprovando a maior resistência mecânica da liga 5087. O metal base apresentou uma variação de microdureza entre 80 e 95 HV. No ensaio não se observou um decréscimo ou aumento abrupto de microdureza na região entre solda e metal base, característico de uma zona termicamente afetada com alteração microestrutural, apenas um pequeno decréscimo, que provavelmente ocorreu pela recristalização e/ou crescimento de grão do metal base devido o aquecimento que ocorre durante a soldagem, de aproximadamente 15% na ZTA. Como já citado, a propriedade da zona de fusão é muito semelhante à zona termicamente afetada. Resultado semelhante foi encontrado por Gungor [29] que utilizou processo CMT Pulse, com redução de 16% do valor de microdureza na ZTA. Hakem

[43] em seu estudo para mesma liga utilizando processo TIG encontrou um decréscimo de 20% e Mirihanage [45] de 32% com processo MIG, todos para amostras de 6 mm.

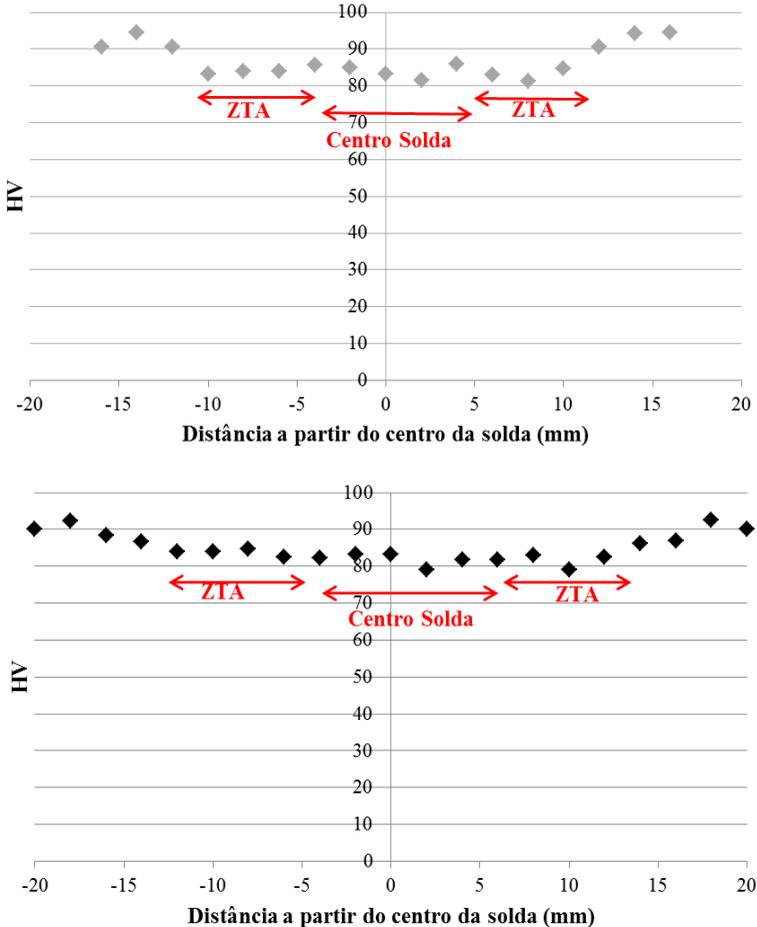


Figura 22 - Perfil de microdureza para o cordão de solda (a) ER 5

No ensaio de dobramento, as chapas soldadas com a liga 5087 não apresentaram defeitos quando submetidas ao dobramento transversal de raiz de 180°. Os ensaios com a liga 5183 também apresentaram bons resultados, como pode ser observado na Figura 23, porém apresentaram alguns defeitos superficiais que são mostradas com

mais detalhes na Figura 24. Pode-se observar a abertura de poros na superfície externa ao dobramento, entretanto, não impediu o dobramento completo das amostras. Segundo a norma, a presença de defeitos superiores a 3 mm desqualificariam a solda, porém, os defeitos observados foram menores que 1 mm, qualificando a solda.

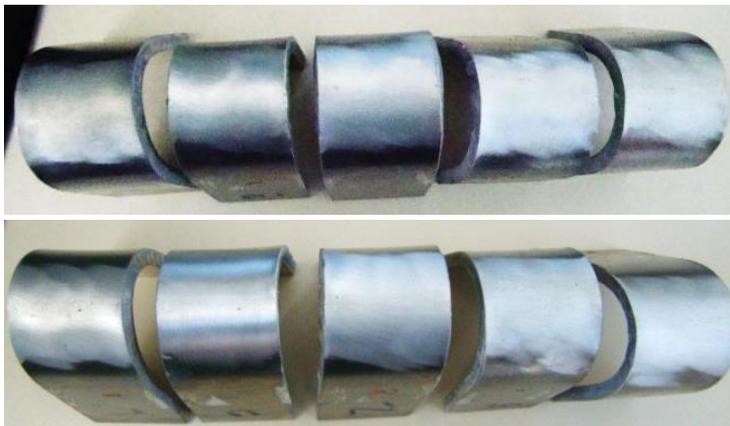


Figura 23 - Dobramento de raiz nas amostras soldadas com liga (a) 5087
(b) 5183



Figura 24 – Detalhe abertura de poros no ensaio de dobramento com liga 5183

A inspeção radiográfica mostrou a boa qualidade do cordão de solda com as duas ligas. Como pode ser observado na Figura 25, não se notou a presença de acentuada de poros e outros defeitos que desqualificassem o procedimento. Durante a execução do procedimento de soldagem, pode-se perceber visualmente que o arame ER 5087 apresentou melhor fluidez e também a impressão de que o mesmo forma menos poros, e

também, a formação de respingos com menos frequência. A mesma percepção foi observada pelo soldador em testes manuais.

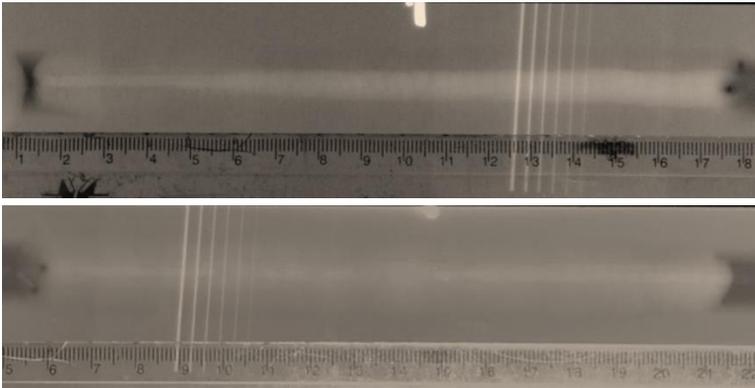


Figura 25 - Radiografia dos cordões de solda com liga (a) 5087 (b) 5183

Na Tabela 6 encontram-se as medidas dos ensaios para o metal de base, solda com a liga 5183 e solda com a liga 5087, respectivamente. O valor de P (N) encontrado é a carga máxima que o material suporta durante os ensaios, visto que os gráficos de COD das Figuras 26, 27 e 28 mostram que não houve instabilidade durante os ensaios, logo os valores de CTOD encontrados são todos de carga máxima. Aparentemente as curvas do ensaio do metal de base apresentam um decréscimo da força (*pop-in*) característico de uma instabilidade, mas, não ocorre, já que a força máxima ocorre antes dessa queda. Os maiores valores de CTOD foram encontrados para os metais de solda, sendo que para as duas ligas 5183 e 5087 os valores encontrados foram muito próximos.

Tabela 6 - Valores ensaio carga máxima (P_m), relação trinca inicial largura da amostra (a_0/W), e CTOD (δ) para metal de base (MB), solda com liga 5183 e solda com liga 5087

Condição	P_m [N]	a_0/W	δ [mm]
MB-1	1537	0,507	0,059
MB-2	1370	0,533	0,049
MB-3	1322	0,541	0,052
MB-4	1423	0,531	0,052
MB-5	1449	0,515	0,051
Média			0,05
DesPad			0,004
5183-1	1086	0,531	0,140
5183-2	1056	0,535	0,176
5183-3	939	0,523	0,155
5183-4	1139	0,535	0,197
5183-5	1135	0,519	0,205
Média			0,17
DesPad			0,027
5087-1	1021	0,543	0,173
5087-2	1132	0,541	0,141
5087-3	1128	0,524	0,186
5087-4	1229	0,501	0,158
5087-5	1061	0,542	0,137
Média			0,16
DesPad			0,021

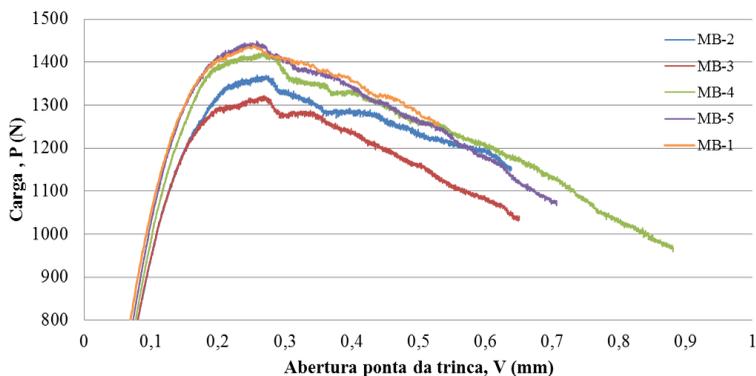


Figura 26- Curva carga versus abertura pontada trinca para as amostras do metal de base

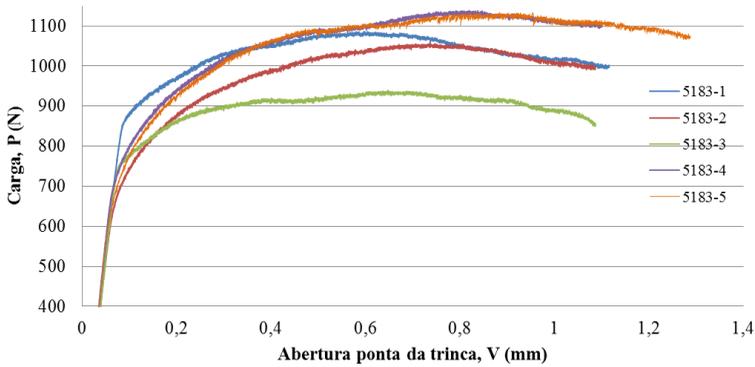


Figura 27 - Curva carga versus abertura na ponta da trinca para as amostras com metal de adição ER 5183

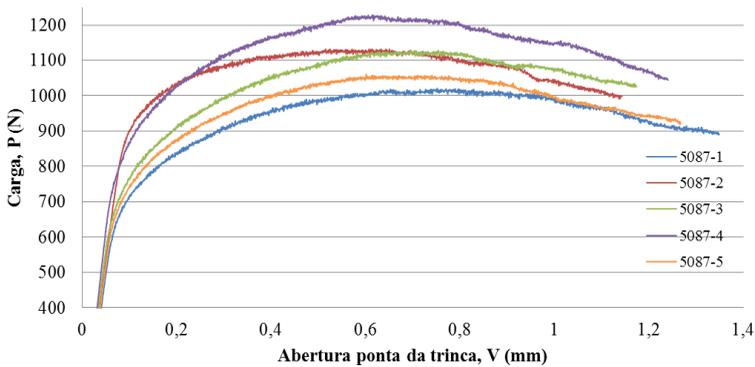


Figura 28 - Curva carga versus abertura na ponta da trinca para as amostras com metal de adição ER 5087

A imagem da Figura 29 mostra a superfície fraturada após o ensaio CTOD, em que a região 1 da Figura 29 (a) corresponde ao entalhe usinado, região 2 a pré-trinca, região 3 a trinca do ensaio CTOD e a região 4 a fratura por sobrecarregamento. A medição da relação do tamanho da trinca inicial pela largura (a_0/W) foi validada para todas as amostras com valor médio de aproximadamente 0,5 tanto para o metal de base quanto para as soldas.

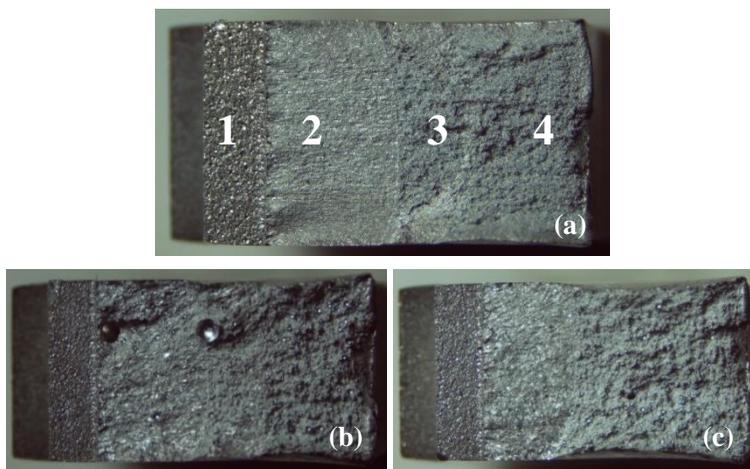


Figura 29 - Superfície da fratura ensaio CTOD (a) metal de base (b) solda ER 5183 (c) solda ER 5087

Uma ampliação da trinca induzida pelo ensaio, da região 3, é mostrada nas micrografias obtidas em MEV a seguir. Na Figura 30 relativa ao metal de base pode-se observar superfícies de fratura contendo dimples. O que provavelmente originou um comportamento menos tenaz do metal de base 5083 em relação a solda é o estado de encruamento desta liga, devido a tempera H116, que forma uma subestrutura de discordâncias.

As micrografias da Figura 31 e 32 correspondentes as soldas, utilizando os metais de adição ER 5183 e ER 5087, respectivamente, mostram os *dimples* melhores definidos em relação ao metal de base. Observa-se também que os tamanhos dos *dimples* são comparativamente menores nas imagens de fratura obtidas em MEV do metal de solda, fato que sugere a presença de uma microestrutura mais refinada e, conseqüentemente, maior resistência a tenacidade, mesmo observando-se a presença de defeitos tipo poros oriundos da soldagem.

Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores [46-50], onde provavelmente trabalhou-se em condições de “*undermatching*”, já que a força máxima cai para as amostras com soldas e nos ensaios se verifica um aumento de tenacidade, mesmo na presença de defeitos. *Undermatching* é um termo utilizado quando se usa na soldagem um metal de solda de menor resistência que o metal de base. Em situação contrária, quando o metal de solda é mais resistente que o metal de base tem-se a condição *overmatching*. Uma vantagem do

consumível “*undermatching*” é de minimizar a tendência à trinca, tanto no metal de solda, quanto no metal base. A redução da tendência à trinca no metal base, através da utilização de um metal de solda mais dúctil, é que o metal de solda coopera para redução do nível geral das tensões na junta soldada [51].

Mochizuki [46] estuda o efeito da microestrutura na iniciação e propagação da trinca a fim de clarificar a diferença na resistência a tenacidade entre a zona soldada e o metal de base. O mesmo atribui a presença de grãos refinados na região de solda responsável por aumentar a ductilidade na região de iniciação e propagação de trincas, o que consequentemente, aumenta a tenacidade.

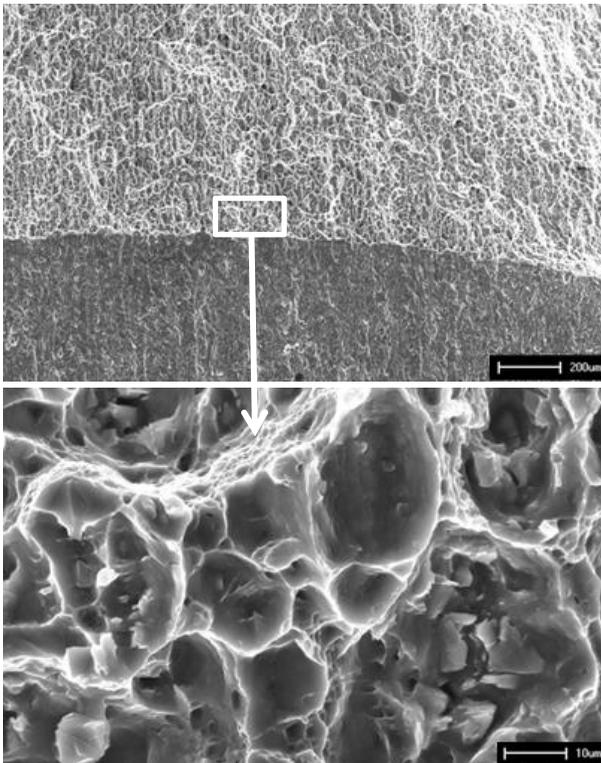


Figura 30 - Micrografias obtidas em MEV da liga 5083 H116 mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD (a) Visão geral da interface pré-trinca e trinca correspondente ao ensaio CTOD aumento 50x (b) Superfície de fratura da trinca no ensaio CTOD com aumento de 1000x

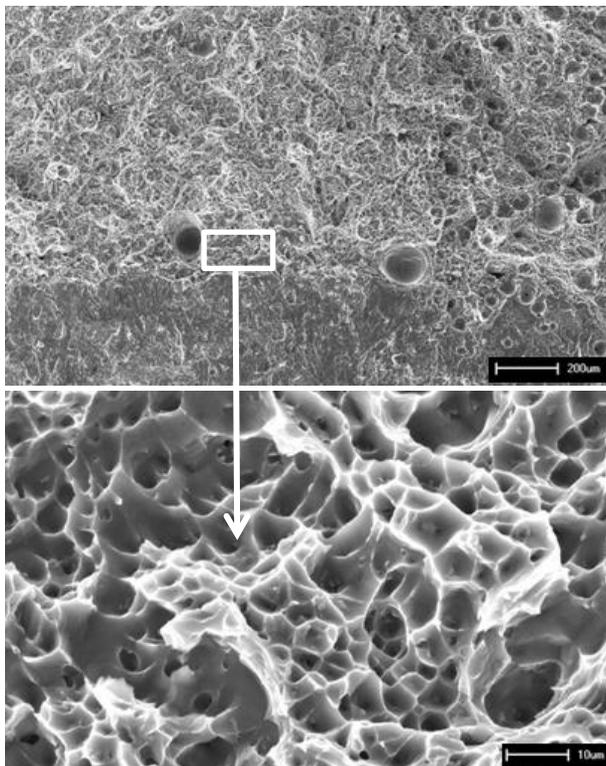


Figura 31 - Micrografias obtidas em MEV do metal de adição 5183 mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD (a) Visão geral da interface pré-trinca e trinca correspondente ao ensaio CTOD aumento 50x (b) Superfície de fratura da trinca no ensaio CTOD com aumento de 1000x

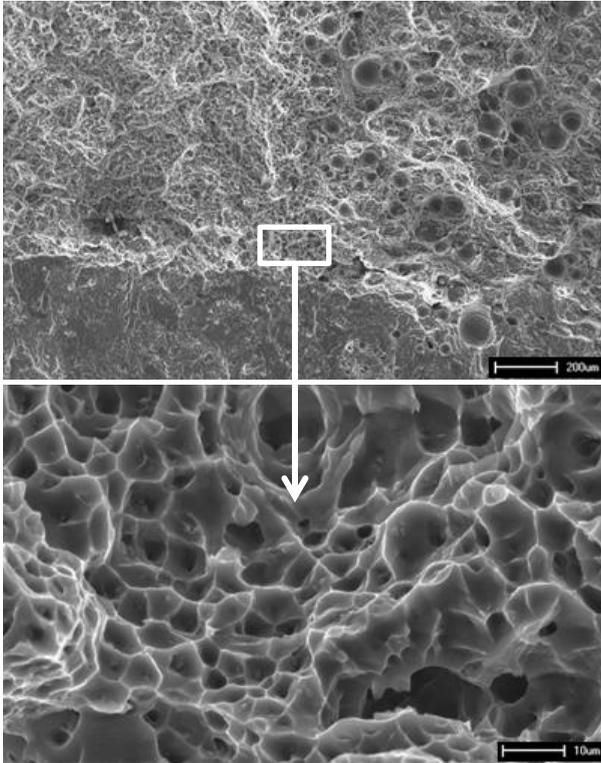


Figura 32 - Micrografias obtidas em MEV do metal de adição 5087 mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD (a) Visão geral da interface pré-trinca e trinca correspondente ao ensaio CTOD aumento 50x (b) Superfície de fratura da trinca no ensaio CTOD com aumento de 1000x

4 SOLDAGEM MIG PULSADO CORRENTE CONSTANTE

O presente capítulo trata da contribuição da definição de parâmetros adequados para a soldagem MIG Pulsado do metal de adição ER 5087 utilizado no veleiro. As versões do processo MIG com transferência metálica por curto-circuito não fornecem energia suficiente para soldagem de chapas mais espessas (8 mm) principalmente quando o material em questão é o alumínio, já que o mesmo possui alta condutividade térmica e o processo convencional não permite obter um cordão de preenchimento com boa qualidade advindo da baixa potência do processo.

4.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA CORRENTE PULSADA

As vantagens da transferência por corrente pulsada em relação à por curto-circuito são relevantes quando utilizadas na soldagem de materiais como o alumínio e aços inoxidáveis. A primeira devido a sua alta condutividade térmica, e o segundo por sua baixa capacidade de molhamento. Na prática, a vantagem do uso da corrente pulsada ainda é atribuída à redução de salpicos, não muito relevante, mas principalmente pelo fato de que na primeira há sempre um arco voltaico aceso que contribui para que haja um aumento de energia para a poça de fusão, que irá interferir diretamente na característica de molhabilidade. Ocorre, portanto, um aumento da relação potência/velocidade de arame, já que no processo MIG Convencional com transferência por curto circuito esta relação é reduzida pelo fato do arco extinguir-se.

Fundamentalmente, o processo é baseado em duas premissas. Uma delas se trata do equilíbrio entre a velocidade alimentação do arame-eletrodo e sua velocidade de fusão, que reflete na estabilidade do arco. A segunda diz que o controle do processo ocorre devido a cada pulso de corrente transferir somente uma gota metálica, já que o propósito do processo é aumentar a relação potência/velocidade de arame, e a expulsão de mais gotas iria reduzir esta vantagem. Isto é conseguido com a combinação adequada de duas variáveis: corrente de pulso e tempo de pulso, denominadas, segundo a literatura, de parâmetro de destacamento de gota ($D=I_p^2 \cdot t_p$) [52-54]. Os trabalhos de Amin [24] consideram um expoente de 2,3, e mais recentemente, no trabalho de Marques [3] para ligas de alumínio-silício, valida um novo expoente, de 1,83, que atende todos os critérios de estabilidade. Sabe-se que estas duas variáveis tem maior influencia no processo e que a corrente de pulso deve ter maior valor que a corrente de transição, que no caso do

alumínio, para um eletrodo de 1,2 mm corresponde a 140 A [55]. Além destes aspectos, outras questões são mencionadas por pesquisadores. Uma delas seria do momento em que a gota deve ser expelida, se durante o pulso, ou logo no início do tempo de base. Alguns trabalhos fazem referência para que o destacamento de gota ocorra no período de pulso, mas, em trabalhos mais recentes pode-se constatar que o destacamento no instante inicial de base proporciona um desprendimento mais suave da gota [56, 57]. Há também questões sobre o melhor diâmetro de gota de se utilizar no processo. Gosh [22, 58] ainda sugere um fator hipotético de estabilidade ϕ para o MIG Pulsado, calculado pela Equação 2. As conclusões apresentadas pelo autor indicam que para menores valores de ϕ há maior a estabilidade do processo.

$$\phi = \frac{I_b}{I_p} \cdot f \cdot t_b \quad (2)$$

O desenho da forma de onda também é outro fator de relevância nesta operação, sendo que, sua forma varia de fabricante para fabricante. O que é comum para todos são os parâmetros que influenciam o desempenho do processo pulsado, sendo estes: tempo de pulso, corrente de pulso, tempo de base, corrente de base. O controle sobre os parâmetros de pulso tem uma influência significativa sobre as características da deposição da solda, permanecendo dúvidas sobre qual o conjunto melhor satisfaz, já que há muitos aspectos específicos que atendem a estabilidade do processo.

Dentro deste contexto, esta parte do trabalho trata da análise de conjuntos de parâmetros de pulso pré-definidos que atendam as premissas de estabilidade utilizando o expoente de 1,83 da equação de destacamento de gota ($D=I_p^x \cdot t_p$) com o objetivo de verificar se o novo expoente encontrado tem somente validade para as ligas de alumínio Al-Si, ou se tem validade para outras séries das ligas de alumínio, no caso Al-Mg para aplicação da soldagem do veleiro. Além disso, também foi verificada a utilidade do índice ϕ .

4.2 METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados com arame eletrodo ER 5087 ($\phi=1,2\text{mm}$) tendo como objetivo verificar o conjunto de parâmetros que atenda a teoria de destacamento de uma gota por pulso, no início do tempo de base. A avaliação dos procedimentos foi realizada por meio de

depósito sobre chapa de alumínio 1100 de 3 mm na posição plana, velocidade de soldagem fixada em 6,67 mm/s (40 cm/min), com aquisição de dados para a elaboração de oscilogramas, ciclogramas e filmagem de alta velocidade. A fonte utilizada foi a *Digiplus* da fabricante IMC, com vazão de gás argônio (15 l/min), distância entre o bico de contato e a peça de 15 mm, ângulo da tocha 5° empurrando.

Os conjuntos de parâmetros utilizados foram calculados para a equação $D=I_p^{1,83} \cdot t_p$ tomando como partida valores de corrente e tempo de pulso do programa pulsado sinérgico da fonte de soldagem *Fronius* que são $I_p=320$ e $t_p=1,4$ ms. O parâmetro “D” calculado foi de 53772 e foi aplicado na fórmula $D=I_p^{1,83} \cdot t_p$ para encontrar os novos conjuntos de parâmetros (I_p e t_p).

Para o cálculo das demais variáveis (I_b e t_b) considerou-se como parâmetros fixos uma corrente média de 80 A que corresponde a uma velocidade de arame de 4,1 m/min, diâmetro de gota e do arame de 1,2 mm, constante de fusão da liga 5087 de 0,051 m/min.A. O período necessário para destacar uma gota foi calculado pela Equação (3), e diminuindo-se o tempo de pulso já pré-definido encontrou-se o valor de tempo de base pela Equação (4). Por fim, a corrente de base foi calculada pela Equação (5). Na Tabela 7 encontra-se os conjuntos de parâmetros definidos e demais variáveis do processo MIG Pulsado calculadas. Além disso, o índice ϕ proposto por Gosh [22, 58] foi utilizado para análise dos resultados e calculdo pela Equação (2). Para o conjunto de dados com os melhores resultados procederam-se os ensaios com diâmetro de gota de 1,1 mm e 1,44 mm encontrados na Tabela 8.

$$T = \frac{40 \cdot d_g^3}{d_a^2 \cdot V_a} \quad (3)$$

$$t_b = T - t_p \quad (4)$$

$$I_b = \frac{(I_m \times T) - (I_p \times t_p)}{t_b} \quad (5)$$

Tabela 7 - Conjunto de parâmetros de soldagem MIG Pulsado com $d_g=1,2$ mm

I_p (A)	t_p (ms)	I_b (A)	t_b (ms)	$\phi = (I_b/I_p) \cdot ft_b$
160	5	10	5,7	0,0333
250	2,2	36	8,5	0,1144
350	1,2	46	9,5	0,1167
430	0,8	52	9,9	0,1119

Tabela 8 - Conjunto de parâmetros de soldagem MIG Pulsado

I_p (A)	t_p (ms)	d_g (mm)	I_b (A)	t_b (ms)	$\phi = (I_b/I_p)*t_b$
350	1,2	1,1	34	7,1	0,0831
430	0,8	1,1	42	7,5	0,0883
350	1,2	1,44	61	17,3	0,1630
430	0,8	1,44	64	17,7	0,1424

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os parâmetros ajustados em $I_p=160$ A e $t_p=5$ ms não foi possível obter um cordão de solda regular. A Figura 33 mostra um oscilograma que evidencia a irregularidade das ondas de corrente e tensão e o ciclograma que confirma esta condição. Este conjunto de parâmetros não torna possível a execução de um processo estável. O fator ϕ nesta situação foi o menor encontrado dentre os demais parâmetros, que indicaria melhor estabilidade do processo, mostrando controversia com a literatura proposta.

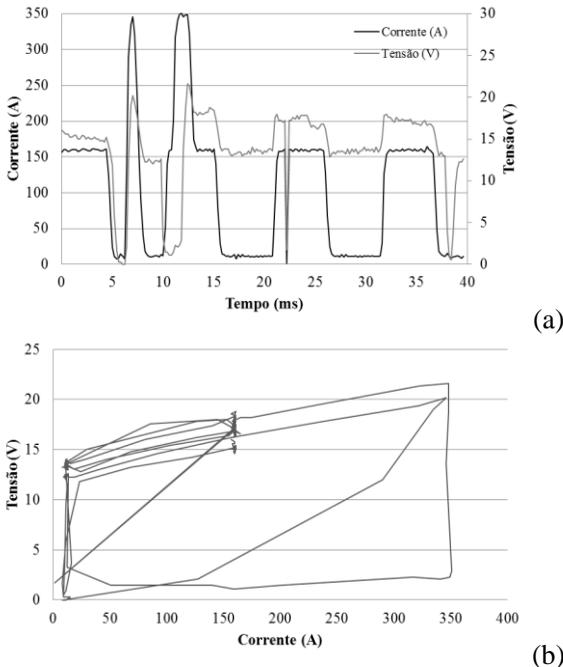
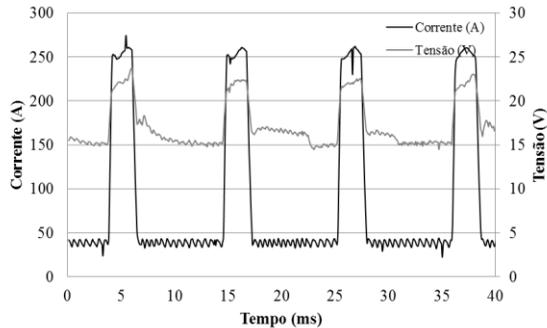
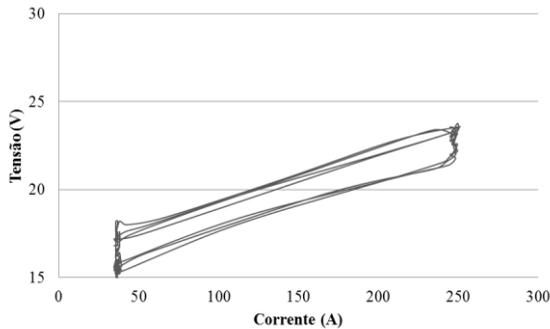


Figura 33 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 160$ A, $t_p = 5$ ms, diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma

Para o segundo conjunto de parâmetros pode-se constatar certa irregularidade do processo, onde o destacamento de gota ocorreu ora na fase de pulso e ora na fase de base, e também períodos que a gota não destacava. Além disso, pode-se observar a ocorrência de respingos. O oscilograma é mostrado na Figura 34. Obteve-se um cordão de solda com bom aspecto, com boa textura e limpeza, que pode ser visualizada pela imagem da Figura 35.



(a)



(b)

Figura 34 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 250$ A, $t_p = 2,2$ ms, $I_b = 36$ A, $t_b = 8,5$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma

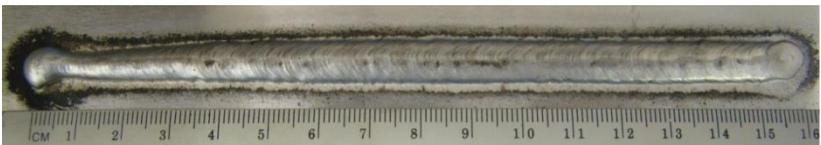


Figura 35 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 36

Para o terceiro conjunto de dados ($I_p = 350$ A e $t_p = 1,2$ ms) a Figura 36 traz seu oscilograma junto ao ciclograma. O destacamento de gota nesta situação ocorre na fase inicial de base indicadas no oscilograma. O cordão de solda da Figura 37 mostra-se com um bom acabamento e limpeza. O fator ϕ para este parâmetro é semelhante ao conjunto $I_p = 250$ A, mas ainda com um valor maior, este conjunto de parâmetros mostrou melhor estabilidade e atendeu os critérios fundamentais deste processo, o que leva a concluir novamente a invalidade deste índice.

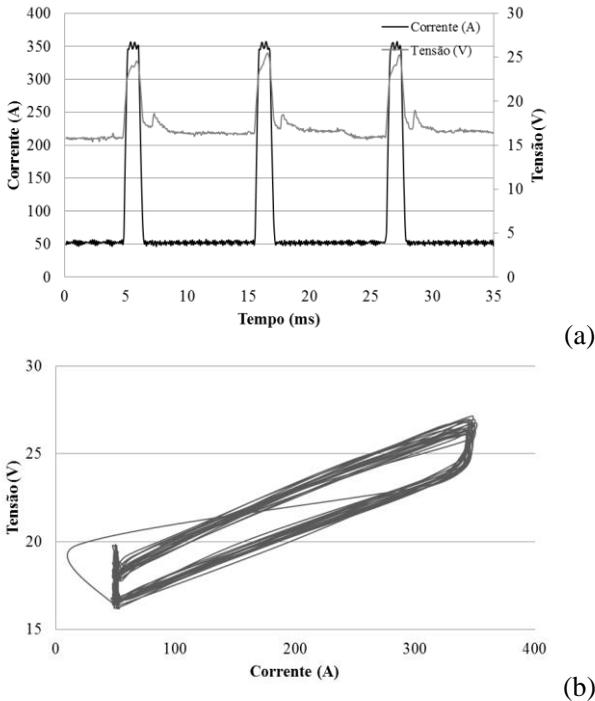


Figura 36 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 350$ A, $t_p = 1,2$ ms, $I_b = 46$ A, $t_b = 9,5$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma



Figura 37 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 39

Na filmagem de alta velocidade pode-se observar a seqüência de destacamento de gota com a formação de uma única gota por pulso, tal comportamento pode ser visto na Figura 38. Em alguns instantes também pode-se notar a formação de uma gota secundária de pequeno diâmetro junto ao destacamento, destacada na imagem da Figura 39. Suponha-se que este comportamento seja inerente a esse tipo de liga de alumínio.

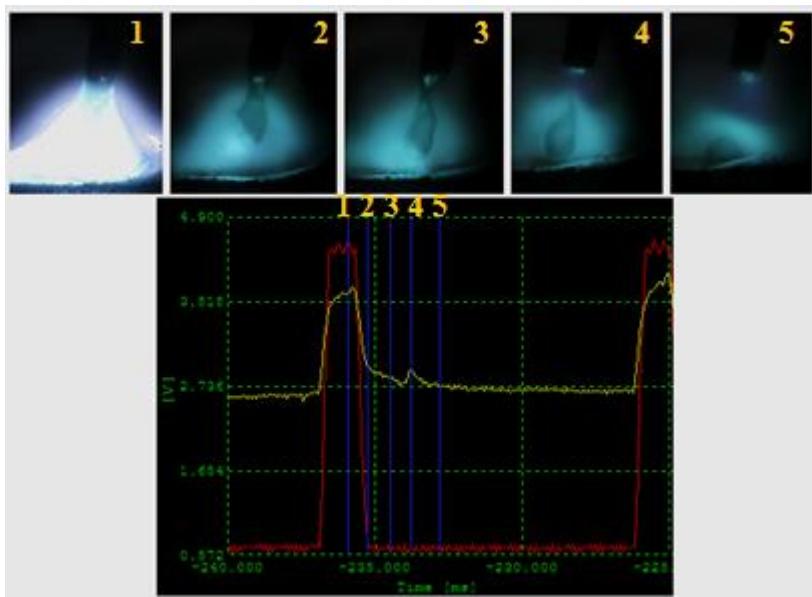


Figura 38 - Comportamento da transferência metálica ($I_p= 350$ A; $t_p= 1,2$ ms, $d_g= 1,2$ mm) destacamento de uma única gota por pulso



Figura 39 – Detalhe formação gota secundária

Quando utilizado um diâmetro de gota teórico de 1,1 mm foi possível obter um processo estável, semelhante ao quando utilizado 1,2 mm, mas com ocorrência mais frequente de respingos. Os resultados

com diâmetro de gota 1,44 mm não foram satisfatórios, com destacamento de gota entre o pulso e a base, além de formar mais salpicos que os demais ensaios.

Com a elevação da corrente de pulso para 430 A ($t_p = 0,8$ ms) pode-se observar novamente boa estabilidade do processo, evidenciado por seu oscilograma e ciclograma da Figura 40. A Figura 41 mostra um cordão de solda obtido. Como no conjunto de parâmetros descritos anteriormente ($I_p = 350$ A; $t_p = 1,2$ ms) o destacamento de apenas uma gota ocorreu na fase inicial de base, e pelas filmagens também pode-se observar a formação de uma pequena gota. O fator ϕ apresentou valor muito próximo referente aos conjunto $I_p = 250$ A e $I_p = 350$ A.

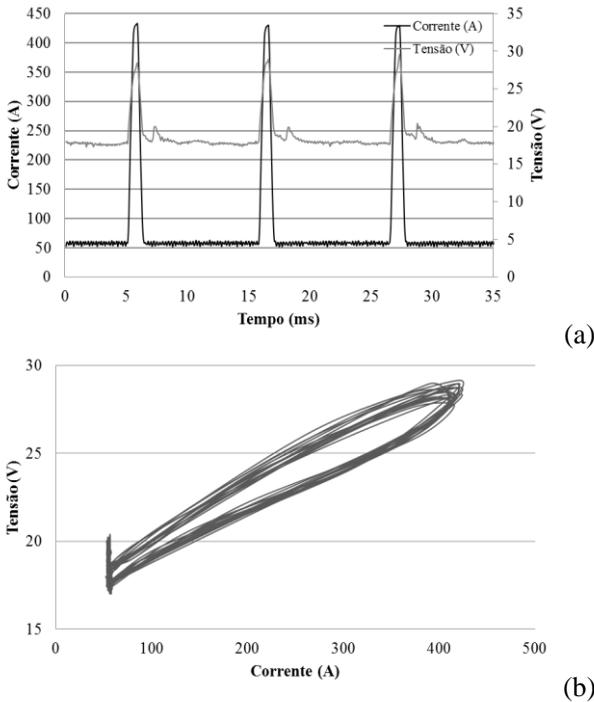


Figura 40 - Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 430$ A, $t_p = 0,8$ ms, $I_b = 52$ A, $t_b = 9,9$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm (a) Oscilograma (b) Ciclograma

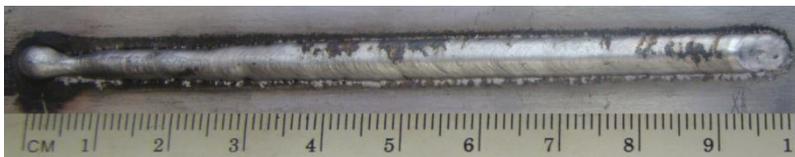


Figura 41 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 43

A Figura 42 mostra as imagens obtidas na câmera de alta velocidade sincronizado com seu oscilograma, em que é possível observar a sequência do destacamento do processo. No tempo 1 o arco está na fase de pulso onde é fornecida energia para que a gota se forme, logo a corrente baixa para um nível baixo (tempo 2) e a gota já começa a estreccionar, no tempo 3 em que há um pico de elevação da tensão a gota se destaca e nos tempos 4 e 5 o arco mantém-se num nível de corrente baixo.

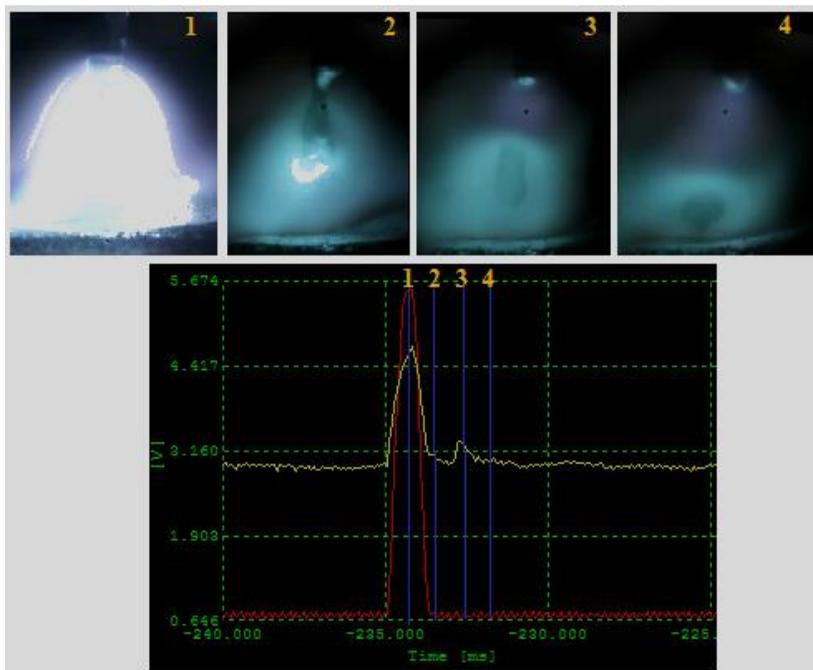


Figura 42 - Comportamento da transferência metálica ($I_p = 430$ A; $t_p = 0,8$ ms; $d_g = 1,2$ mm) destacamento de uma única gota por pulso

Quando aplicados os diâmetros de gota de 1,1 mm e 1,44 mm, observou-se os mesmos comportamentos anteriormente citados para o

conjunto de parâmetros $I_p = 350$ A $t_p = 1,2$ ms. O uso destes diâmetros teóricos de gota levou a uma ocorrência maior de salpicos finos e ainda nos ensaios com 1,44 m o destacamento de gota ocorreu na fase de pulso e de base. Logo, o diâmetro de gota ideal nesta situação é o do mesmo valor da bitola do arame (1,2 mm).

O valor de ϕ encontrado para cada conjunto de parâmetro proposto por Gosh [22, 58], na prática, não apresentou nenhuma relação do valor com o grau de estabilidade do processo.

De todos os conjuntos de variáveis, os melhores resultados foram encontrados para maiores níveis de corrente de pulso ($I_p = 430$ A e $I_p = 350$ A), sendo difícil discernir qual o melhor conjunto. Estipulou-se mais dois valores de corrente de pulso, de $I_p = 300$ A e $I_p = 385$ A, e aplicando o mesmo coeficiente “D” e expoente 1,83, novos conjuntos de parâmetros foram encontrados e avaliados, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Conjunto de novos valores de parâmetros de soldagem aplicando o expoente 1,83 para $d_w = 1,2$ mm

I_p (A)	t_p (ms)	I_b (A)	t_b (ms)	$\phi = (I_b/I_p)^{1,83}$
300	1,5	48	10,3	0,1397
385	1	52	10,8	0,1236

Para os dois casos obteve-se bons resultados com processo estável, e houve somente o destacamento de uma gota em cada início da fase de base, evidenciado pelo pico de tensão dos oscilogramas da Figura 43 e 44.

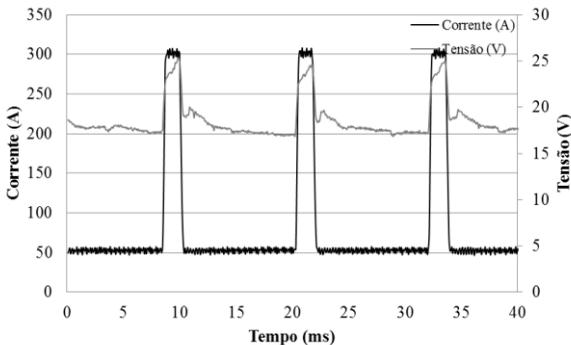


Figura 43- Aquisição de dados referente ao depósito de solda com $I_p = 300$ A, $t_p = 1,5$ ms, $I_b = 48$ A, $t_b = 10,3$ ms, diâmetro de gota de 1,2 mm

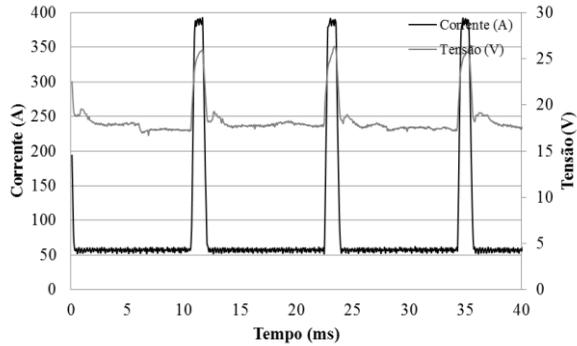


Figura 44 - Aquisição de dados referente ao depósito de solda com $I_p = 385$ A, $t_p = 1,0$ ms, $I_b = 52$ A, $t_b = 10,8$ ms, diâmetro de gota de 1,2 mm

5 SOLDAGEM MIG PULSADO CORRENTE ALTERNADA

Durante a execução das soldas de preenchimento do veleiro, mais especificamente nas juntas das chapas de 8 mm, ocorreu um problema na raiz que pode ser melhor compreendida pela imagem da Figura 45, advindo da alta potência do MIG Pulsado em corrente contínua.



Figura 45 - Defeito observado na raiz durante a execução de preenchimento com MIG Pulsado com corrente contínua

A utilização do processo MIG Pulsado com corrente alternada é uma opção de solução para tal situação inoportuna, já que com esta modalidade tem-se o controle do aporte térmico e penetração à peça, devido a menor relação potência/velocidade do arame em relação ao MIG Pulsado CC. Para a mesma condição de soldagem do modo pulsado com corrente contínua e alternada, utilizando-se a mesma velocidade de arame e corrente média, pode-se obter resultados satisfatórios com corrente alternada, com o incremento da velocidade de soldagem e ausência de defeito da Figura 45 que ocorreu com corrente constante.

Basicamente o processo utiliza as mesmas premissas do MIG Pulsado CC, mas com introdução de um intervalo em polaridade negativa, resultando em maior número de variáveis. Para essa versão do processo, a quantidade de parâmetros que devem ser definidos e as variações da forma de onda da corrente, tornam a operacionalização difícil.

Considerando o potencial de aplicação do MIG Pulsado CA, sua escassez de informações sobre variáveis e técnicas, e a dificuldade de selecionar parâmetros adequados devido ao grande número de variáveis envolvidas neste modo de operação, esse capítulo propõe uma metodologia de cálculo que propicie uma relação sinérgica entre as variáveis, além da metodologia resultar em um processo estável, com exemplo de aplicação na soldagem de ligas de alumínio, especificamente com o arame-eletrodo ER 5087.

5.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO CÁLCULO DE PARÂMETROS PARA O MIG PULSADO CA

A principal motivação para o desenvolvimento de um programa sinérgico de um processo de soldagem é a necessidade de simplificar a regulagem da fonte, diminuindo o número de parâmetros de entrada por parte do operador. Grande parte das versões sinérgicas comercialmente disponíveis possui como dado de entrada um único parâmetro (geralmente velocidade de arame ou corrente) e, dependendo do fabricante, tem ainda parâmetros relacionados a correções, como por exemplo, comprimento do arco. Entende-se que para o MIG Pulsado CA, além de uma entrada em corrente ou V_a , é interessante que um dos parâmetros de entrada seja o percentual de eletrodo negativo. Isso oferece ao operador uma maior gama de configuração para diferentes níveis de aporte térmico.

Um aspecto fundamental a ser considerado na soldagem MIG Pulsado CA é a diferença entre a taxa de fusão do arame em cada uma das polaridades, o que pode acarretar em um desequilíbrio na fusão e consequentemente na instabilidade do comprimento do arco. Em alguns trabalhos que avaliam a parametrização do processo MIG pulsado CA [59–61], essa é a primeira problemática analisada pelos autores. De modo geral, para manter a estabilidade no comprimento de arco, o primeiro passo é o conhecimento da constante de fusão para as polaridades positiva e negativa. Com o conhecimento da variação da taxa de fusão e de compensação correspondente, é possível manter constante a velocidade de alimentação do arame, apesar do fato de que a polaridade negativa tem uma taxa de fusão mais elevada. A diferença é compensada por ajustes distintos dos níveis de corrente aplicados em cada fase (EP e EN).

Para se atingir a melhor estabilidade no processo devem ser levados em consideração diversos aspectos como, o conjunto de parâmetros de pulso mais adequado para se obter o destacamento de

uma única gota, o instante temporal do destacamento de gota, o tipo da forma de onda de corrente mais adequado, entre outros. Na maioria dos casos, os parâmetros utilizados são os mesmos do MIG Pulsado CC. Entretanto, quando a questão se refere à forma de onda de corrente, várias são as possibilidades encontradas na literatura [4, 59, 61, 62], cada uma delas possui características que acabam, às vezes, se contrapondo as outras.

Em um trabalho onde se avaliou a transferência metálica no MIG Pulsado CC para a liga de alumínio ER4043, Dutra [57] constataram que o destacamento da gota nos instantes iniciais da corrente base proporcionou bons resultados. Nesse momento a gota não está sujeita as forças relacionadas com o nível alto de corrente, o que proporcionou um destacamento mais suave. Com base nesta filosofia, o uso de uma forma de onda CA sem corrente de base positiva não caberia nesta aplicação. Além disso, nos trabalhos de Vilarinho [61], para aço, e Bohme [62], para alumínio, é constatado que com uma forma de onda sem corrente de base positiva não se consegue uma boa estabilidade e, no caso das ligas de alumínio, não há quase nenhuma limpeza catódica. Os trabalhos de Scotti [59] e Ueyme [4] fazem referência à utilização de uma forma de onda que tenha base positiva antes e após o pulso. Vilarinho [61] cita ainda o uso de uma forma de onda com base positiva somente antes do pulso, o que implica no destacamento de gota durante o pulso.

A definição de um programa sinérgico para a regulação dos parâmetros da fonte inicia, em primeira instância, com a escolha do tipo do material de adição, do diâmetro do arame e do gás de proteção utilizado. Com essa combinação é possível estabelecer as demais variáveis que condicionam o processo à uma boa estabilidade do arco e da transferência metálica. Geralmente os parâmetros extraídos dessa combinação são:

- coeficiente de fusão relativos a corrente média (polaridade positiva e negativa);
- parâmetros de pulso (I_p e t_p) que são escolhidos segundo a condição de destacamento de uma única gota por pulso;
- diâmetro de gota

Esses parâmetros são considerados fixos no cálculo para toda a faixa de aplicação do processo. Os trabalhos de Scotti [59] Vilarinho [61] para aço também definem a corrente de base positiva como parâmetro fixo seguindo um critério de estabilidade ($I_b > 20$ A). Scotti [59] também utiliza a corrente média no positivo (I_{m+}) desejada como parâmetro de entrada e apenas o I_p como fixo. Os dois trabalhos indicam bons

resultados para a soldagem MIG Pulsado CA para aço, todavia, algumas informações a respeito do cálculo deixam dúvidas. Vilarinho [61] utiliza a forma de onda mais simples (pulso positivo e base negativa) como padrão de cálculo, não ficando bem claro a definição de alguns parâmetros quando se utiliza formas de onda com base positiva, pulso positivo e base negativa. Scotti [59] diz em sua metodologia que os valores de diâmetro de gota devem ser próximo ao do eletrodo (1,2 mm), sendo que os seus resultados indicam diâmetros de gota que variam de 1,4 mm a 1,7 mm.

Baseado nas fundamentações citadas e na falta de conhecimento científico sobre a regulação adequada das variáveis do processo bem como sua operacionalidade, a seguir é proposta uma metodologia que permita um cálculo de parametrização deste procedimento, avaliando-se os diferentes tipos de onda sugeridos, tempo de eletrodo no negativo e dois conjuntos de parâmetros de pulso de corrente que garantam o destacamento de uma gota por pulso, além de contribuir para mostrar as características físicas inerentes ao processo.

5.2 METODOLOGIA APLICADA

A metodologia para definir parâmetros do processo MIG Pulsado CA foi desenvolvida com intuito de que garantisse boa estabilidade do arco e de transferência metálica, e ainda boa aparência do cordão de solda. Sabe-se que a taxa de fusão é aumentada em polaridade negativa, o que acarretará em uma mudança no comprimento do arco. Deste modo, assim como alguns autores [59-61], procurou-se prever as constantes de fusão nas duas polaridades (CC+ e CC-) por meio da Equação de consumo (6). O conhecimento destas variáveis torna-se necessário para que se possa igualar a velocidade de arame em polaridade positiva e negativa. Como o alumínio apresenta a característica de baixa resistividade, esta equação pode ser expressa pela primeira parcela, que resulta numa Equação linear (7).

$$V_a = \alpha \cdot I + \beta \cdot I^2 \cdot L \quad (6)$$

$$V_a = \alpha \cdot I \quad (7)$$

O procedimento para obter os valores das constantes α consistiu no depósito de cordões sobre chapas utilizando somente polaridade positiva para α^+ e polaridade negativa para α^- . Os depósitos para avaliação do processo foram realizados sobre chapas de alumínio 1100

de espessura de 3 mm e o arame eletrodo empregado foi alumínio ER 5087 de 1,2 mm de diâmetro. O gás utilizado foi argônio com 13 l/min de vazão e a distância entre bico de contato e peça de 15 mm. A soldagem foi realizada na posição plana com 5° empurrando, uma velocidade de 6,66 mm/s (40 cm/min). Os sinais de tensão, corrente e velocidade de arame foram medidos com o Sistema de Aquisição Portátil (SAP-4) com taxa de aquisição de 5 kHz. Estas mesmas condições foram utilizadas, posteriormente, para avaliar o processo MIG Pulsado CA, sendo que esta ainda foi filmada com uma câmera de alta velocidade para aquisição de imagens. Os valores médios das constantes α calculadas a partir da regressão linear dos valores de I_m e V_a obtidos a partir da monitoração das experiências foram de $\alpha = 0,051$ m/min.A $\alpha = 0,129$ m/min.A.

Para definir os parâmetros, tomou-se como partida, o uso da forma de onda retangular (Figura 46) do tipo (I) pulso – base positiva – base negativa e (II) base positiva – pulso – base positiva – base negativa, já que estas permitem que o destacamento de gota ocorra na corrente de base, após o pulso.

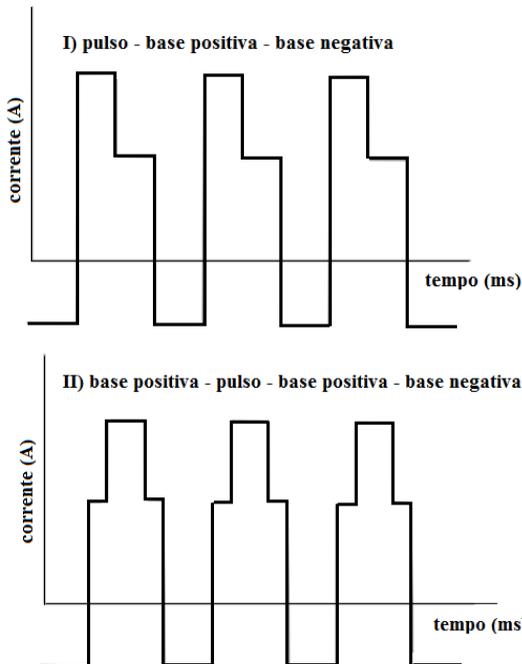


Figura 46 - Modelos de forma de onda utilizados neste trabalho

Alguns parâmetros são invariáveis durante o processo e foram utilizados como parâmetros de entrada para realizar cálculos das demais variáveis. Dentre eles estão: coeficiente de fusão negativo ($\alpha -$), coeficiente de fusão positivo ($\alpha +$), corrente de pulso (I_p), tempo de pulso (t_p), diâmetro de gota (d_g), bitola arame (d_a), e percentual do eletrodo negativo (%EN).

Os parâmetros de pulso (I_p e t_p) foram os mesmos utilizados no MIG Pulsado CC, que garantiram o destacamento de uma única gota por pulso com seu destacamento logo após o pulso, na corrente de base. O parâmetros definidos foram de $I_p=430$ A com $t_p=0,8$ ms e $I_p=350$ A com $t_p= 1,2$ ms. Cada um dos dois grupos de variáveis foi avaliado para dois níveis de percentual do eletrodo negativo (30 e 50%) para o diâmetro de gota de 1,2 mm.

As demais variáveis a serem definidas foram calculadas por meio de fórmulas utilizando os parâmetros de entrada. A corrente negativa é calculada pela relação entre a velocidade de arame desejada e o coeficiente de fusão negativo, por meio da Equação (8), e o tempo no negativo é calculado pela Equação (9), de acordo com o percentual desejado em eletrodo negativo. O período de destacamento de gota (T) é calculado em função do diâmetro de gota desejado, do diâmetro do arame utilizado e da velocidade de arame, conforme a Equação (3).

$$V_a = I_n \cdot \alpha_{(-)} \quad (8)$$

$$t_n = \frac{T \cdot \%EN}{100} \quad (9)$$

A corrente de base é definida pela fórmula da Equação (10). O valor de I_{m+} necessário para este cálculo é definido pela Equação (11). O tempo de base é calculado baseado no período e tempo negativo já encontrados, por meio da Equação (12).

$$I_b = \frac{[I_{m+} \cdot (t_p + t_b) - (I_p \cdot t_p)]}{t_b} \quad (10)$$

$$V_a = I_{m+} \cdot \alpha_{(+)} \quad (11)$$

$$t_b = T - t_p - t_n \quad (12)$$

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela aplicação da metodologia proposta, encontraram-se os parâmetros listados na Tabela 10, referentes ao tipo de onda I e II e para uma faixa de velocidade de arame de 3 a 6 m/min. Para realizar os ensaios com forma de onda do tipo II, apenas dividiu-se o tempo de base por dois. Os ensaios com parâmetros $I_p= 350$ e $A t_p= 1,2$ ms com percentual do eletrodo negativo em 50% não foram avaliados devido a corrente de base calculada ser muito baixa, inviabilizando o processo.

Tabela 10 - Parâmetros calculados para processo MIG Pulsado CA diâmetro de gota 1,2 mm

%EN	I_p (A)	t_p (ms)	I_b (A)	t_b (ms)	I_n (A)	t_n (ms)	V_a (m/min)
30%	350	1,2	24	10,0	23	4,8	3
	350	1,2	33	7,2	31	3,6	4
	350	1,2	43	5,5	39	2,9	5
	350	1,2	54	4,4	47	2,4	6
30%	430	0,8	30	10,4	23	4,8	3
	430	0,8	41	7,6	31	3,6	4
	430	0,8	53	5,9	39	2,9	5
	430	0,8	66	4,8	47	2,4	6
50%	350	1,2	7	6,8	23	8,0	3
	350	1,2	11	4,8	31	6,0	4
	350	1,2	14	3,6	39	4,8	5
	350	1,2	18	2,8	46	4,0	6
50%	430	0,8	18	7,2	23	8,0	3
	430	0,8	24	5,2	31	6,0	4
	430	0,8	32	4,0	39	4,8	5
	430	0,8	40	3,2	47	4,0	6

Numa primeira análise com o conjunto de parâmetros $I_p= 350$ A com $t_p= 1,2$ ms e EN=30% obteve-se cordões de bom aspecto, além de um oscilograma com boa repetitividade e picos de tensão referente ao destacamento de gota na corrente de base, como demonstrado na Figura 47. A Figura 48 traz as imagens do cordão referentes aos oscilogramas da Figura 47.

A Tabela 11 apresenta os resultados da velocidade de arame, potência e corrente eficaz medido em cada ensaio. Pelos resultados pode-se afirmar que não há uma diferença expressiva nos valores de

corrente e potência entre os formatos de onda empregados, logo tanto a forma de onda I e II, a princípio, poderiam ser utilizados para uma determinada aplicação com este processo.

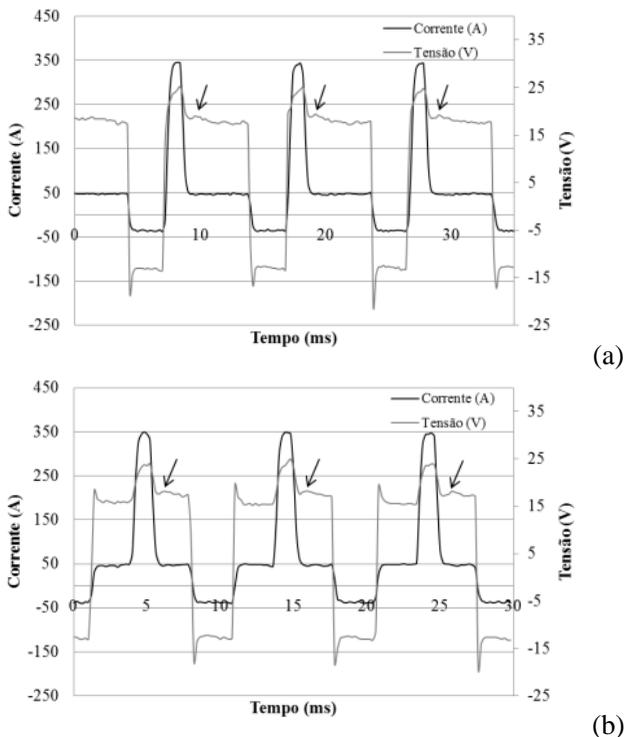


Figura 47- Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p=350$ A e $t_p=1,2$ ms , $EN=30\%$ e $V_a=5$ m/min (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II



Figura 48 - Cordão de solda referente aos oscilogramas da Figura 49 (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II

Tabela 11 - Resultados de velocidade de arame, corrente eficaz e potência para o conjunto de parâmetros $I_p=350$ A, $t_p= 1,2$ ms e $EN=30\%$

Forma de onda I	V_a (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
	3	90	1077
	3,9	105	1332
	4,9	119	1578
	5,9	131	1853
Forma de onda II	V_a (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
	3,1	95	1030
	4	110	1253
	4,9	124	1551
	5,9	138	1880

Pelas imagens da Figura 49 da câmera de alta velocidade é possível observar o destacamento da gota no momento indicado pelos oscilogramas da Figura 47(a), condizente com a premissa de condição de estabilidade. Em alguns momentos, durante a transferência metálica deste mesmo oscilograma, houve ocorrência de gotas secundárias de pequeno diâmetro junto ao destacamento, que pode ser vista com detalhes na Figura 50.



Figura 49 - Sequência destacamento de uma gota por pulso oscilograma Figura 49 (a)

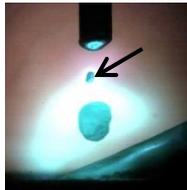


Figura 50 - Detalhe formação de gota secundária.

Com os resultados referente ao conjunto $I_p=430$ A e $t_p= 0,8$ ms pode-se constatar, além da influência do formato de onda, a de um maior tempo em polaridade negativa. A Figura 51 traz o oscilograma para os

dois tipos de ondas analisados em EN=30% e a Figura 52 para EN=50%. Nas duas situações foi possível observar o pico de tensão referente ao destacamento de gota, após o pulso. Na Figura 53 é possível ver o destacamento de uma única gota pela câmera de alta velocidade e também o fenômeno de “escalada” do arco característico da polaridade negativa.

Quanto ao aspecto do cordão de solda, não se obteve uma diferença significativa nos resultados utilizando forma de onda I e II para um mesmo %EN, vide Figura 54 e 55. O que se pode observar é um maior molhamento dos corpos de prova utilizando percentual de eletrodo negativo em 30%, já que o mesmo permanece mais tempo em polaridade positiva, aumentando o calor fornecido à chapa.

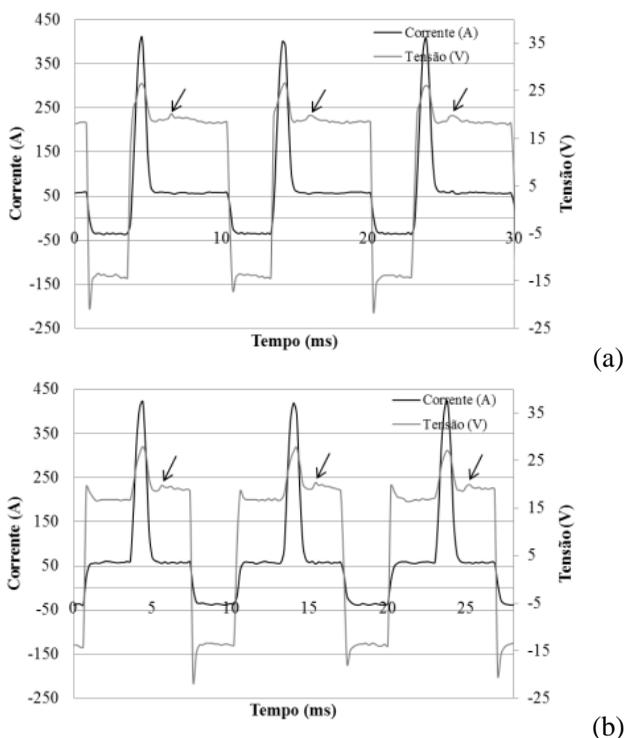


Figura 51 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p=430$ A e $t_p=0,8$ ms, EN=30% e $V_a=5$ m/min (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II

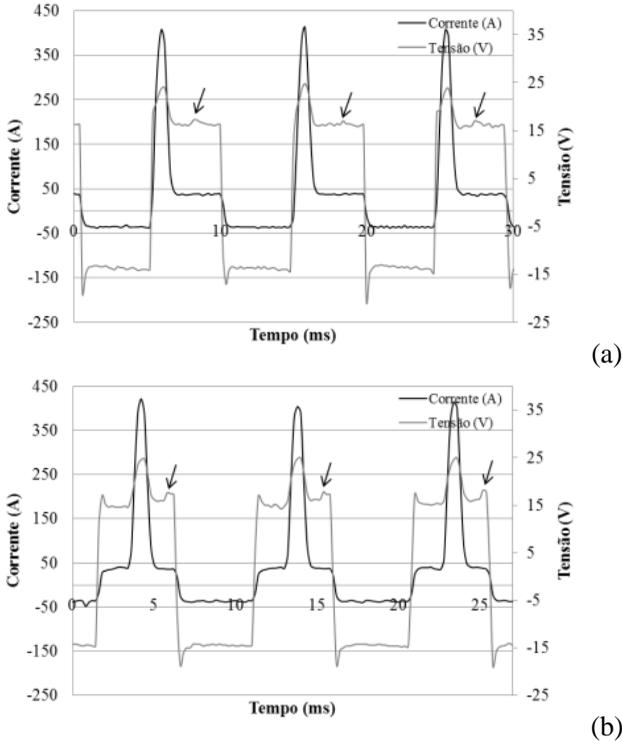


Figura 52 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p=430$ A e $t_p=0,8$ ms, EN=50% e $V_a=5$ m/min (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II

Na Tabela 12 encontram-se os valores de potência e corrente eficaz para cada ensaio, sendo possível observar que em EN=30% tem-se uma maior potência gerada. Isso já é esperado devido a tensão na polaridade negativa ser menor que a tensão na polaridade positiva, como pode ser observado nos gráficos.

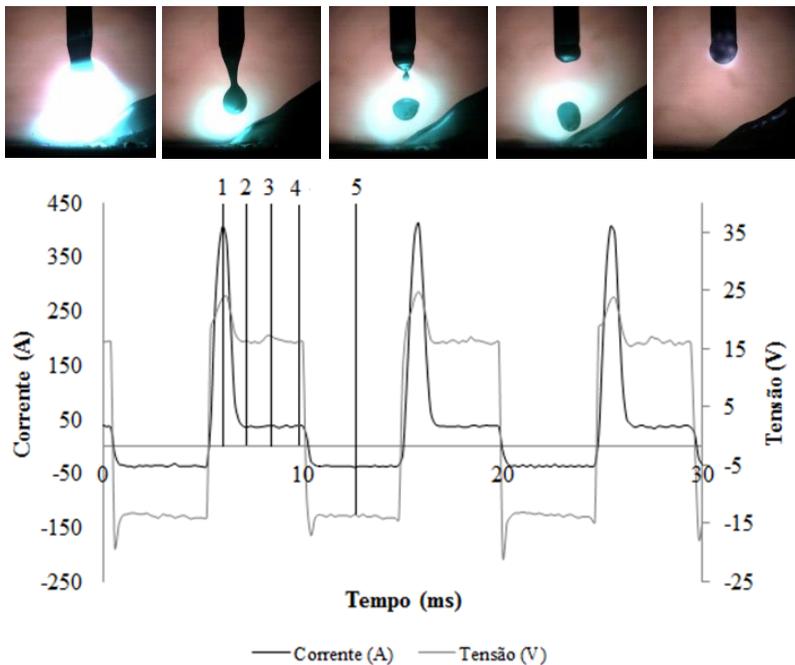


Figura 53 - Imagens da câmara de alta velocidade para o conjunto de parâmetros $I_p = 430$ A e $t_p = 0,8$, EN= 50% e $V_a = 5$ m/min

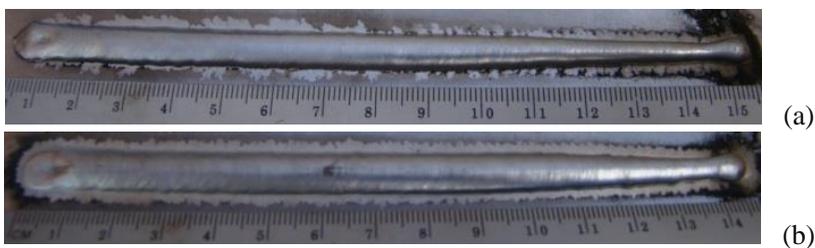


Figura 54 - Cordão de solda referente aos oscilogramas da Figura 51 (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II

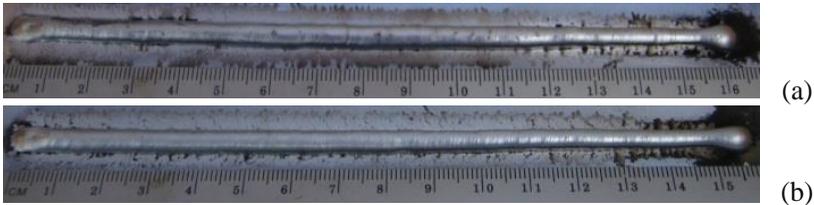


Figura 55 - Cordão de solda referente aos oscilogramas da Figura 52 (a) Forma de onda I (b) Forma de onda II

Tabela 12 - Resultados de velocidade de arame, potência e corrente eficaz para o conjunto de parâmetros $I_p=430$ A e $t_p=0,8$ ms

EN=30%			
Forma de onda I	V_a (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
	3	81	1053
	4	100	1263
	4,9	113	1563
	5,9	125	1842
Forma de onda II	V_a (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
	3,1	90	1017
	4	107	1276
	4,9	121	1664
	5,9	137	1871
EN=50%			
Forma de onda I	V_a (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
	3	83	833
	4	99	1030
	4,8	111	1233
	5,6	121	1446
Forma de onda II	V_a (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
	3,1	89	809
	4,1	104	1055
	4,9	116	1360
	5,8	130	1569

Foi possível observar também que nos ensaios com EN=50% houve momentos de instabilidade do processo, com alguma presença de curto devido à variação do comprimento do arco que pode ter ocorrido pelo maior tempo do arco em polaridade negativa.

Pelos resultados expostos na Tabela 13, com a velocidade de arame mantida em aproximadamente 5 m/min, conseguiu-se diminuir 330 W (cerca de 20% da potência) de um percentual de eletrodo negativo de 30 para 50%. Ainda comparando-se estes resultados com o MIG Pulsado CC para velocidade de arame de 4,8 m/min conseguiu-se reduzir a potência por volta de 500 W (30% da potência).

Tabela 13 - Valores comparativos de potência processos MIG Pulsado CC, MIG Pulsado CA (EN= 30% e 50%)

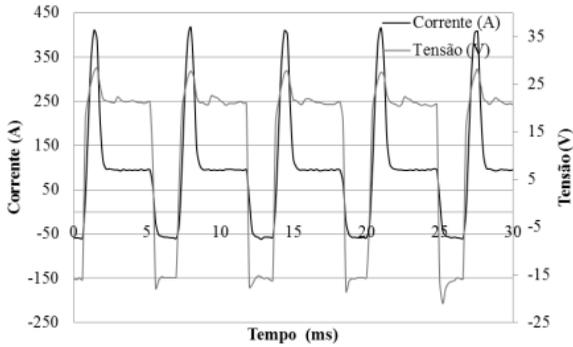
Processo	V_a (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
MIG Pulsado CC	4,8	112	1728
MIG Pulsado CA 30%	4,9	113	1563
MIG Pulsado CA 50%	4,8	111	1233

Dentro da faixa de velocidade de arame testada, atingiu-se a condição de destacamento de uma única gota por pulso para as duas formas de onda (I e II), com boa estabilidade e resultados semelhantes de potência e corrente eficaz. Seguindo a filosofia de destacamento da gota no início da corrente de base, a forma de onda I leva certa vantagem sobre a outra, já que com a forma de onda II o tempo de base após o pulso é curto comparado a anterior e, à medida que se aumenta a velocidade de arame, o destacamento da gota começa a acontecer muito próximo da inversão de polaridade. Quanto aos dois parâmetros de pulso avaliados não se observou diferença quanto ao aspecto do cordão e estabilidade do processo. O que pôde ser analisado e citado como vantagem do uso da corrente de pulso maior (430 A) seria o fato de com esse conjunto de parâmetros é possível de se chegar a menores níveis de corrente média.

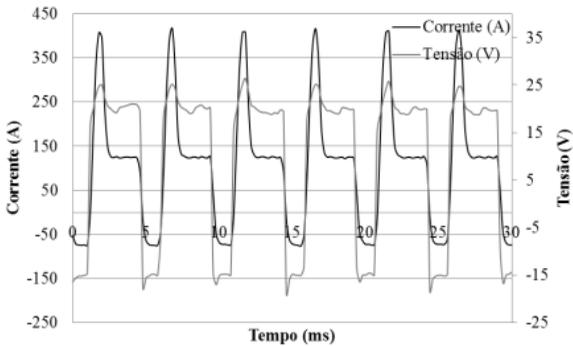
Aumentando-se a faixa de utilização do processo, ensaios com maiores velocidades de arame também foram realizados para o conjunto de parâmetro $I_p = 430$ A e $t_p = 0,8$ ms, para EN= 30% e 50%, com o objetivo de uma possível aplicação em preenchimento de chanfros, já que as velocidades até aqui testadas são úteis para soldagem de chapas de menor espessura. A Tabela 14 indica os valores das variáveis calculadas para uma faixa de velocidade de 7 a 10 m/min. Na Figura 56 apresenta-se os oscilogramas para o conjunto de parâmetros $I_p = 430$ A $t_p = 0,8$ ms para a velocidade de 8 e 10 m/min com EN=30% e na Figura 57 os oscilogramas a mesma condição para EN=50%.

Tabela 14 - Parâmetros calculados para processo MIG Pulsado CA diâmetro de gota 1,2 mm

EN= 30%						
I_p (A)	t_p (ms)	I_b (A)	t_b (ms)	I_n (A)	t_n (ms)	V_a (m/min)
430	0,8	79	4,0	54	2,1	7
430	0,8	93	3,4	62	1,8	8
430	0,8	107	2,9	70	1,6	9
430	0,8	123	2,6	78	1,4	10
EN= 50%						
430	0,8	48	2,6	54	3,4	7
430	0,8	58	2,2	62	3,0	8
430	0,8	68	1,9	70	2,7	9
430	0,8	79	1,6	78	2,4	10



(a)



(b)

Figura 56 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p=430$ A e $t_p=0,8$ ms, EN= 30% (a) $V_a=8$ m/min (b) $V_a=10$ m/min

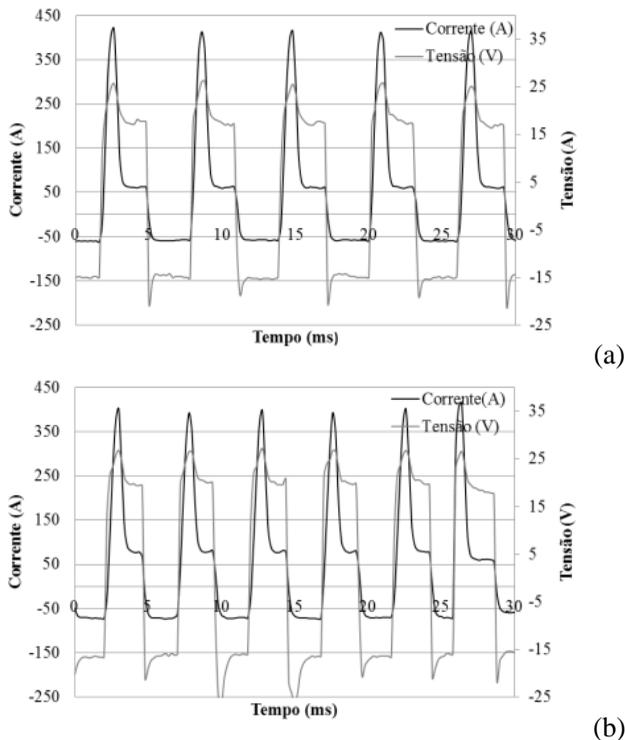


Figura 57 - Oscilograma de corrente e tensão para o conjunto de parâmetros $I_p=430$ A e $t_p=0,8$ ms, $EN=50\%$ (a) $V_a=8$ m/min (b) $V_a=10$ m/min

Para o $EN=30\%$ o arco apresentou-se estável assim como nos ensaios com menores velocidades de arame, sendo evidente o momento de destacamento de gota nos oscilogramas. Já para o $EN=50\%$ foi constatado que a medida que se aumenta a velocidade de arame o destacamento da gota não é regular e repetitivo, e se distancia do pulso, onde não ficam evidentes os picos de destacamento de gota nos oscilogramas. O menor tempo em polaridade positiva, não foi suficiente para a gota se desprender. Uma hipótese é que o aumento da taxa de fusão não seja linear, como foi calculado. Outra seria que a força de constrictão da corrente de base possa estar influenciando no destacamento da gota e como este tempo de corrente de base é diminuído essa força deixa de existir. Também se considerou que os efeitos da polaridade negativa estão presentes apenas em EN e somente neste período, não considerando os efeitos inerciais ou de atraso. Embora se saiba que existem alguns efeitos sobre o arco que não estão

completamente em fase com as variações dos parâmetros de arco, os vídeos de alta velocidade mostram que para o contexto do presente trabalho, discrepância significativa ou a influência deste tipo não pode ser notado.

Foi possível observar uma grande instabilidade do arco para EN=50%, sendo que a alternativa foi o ajuste da altura do arco pela redução da velocidade de arame. Esses resultados são expostos na Tabela 15 que traz os valores medidos de velocidade de arame, corrente eficaz e potência.

Tabela 15 - Resultados de velocidade de arame, potência e corrente eficaz para conjunto de parâmetros $I_p=430$ A e $t_p= 0,8$ ms

EN=30%				
	V_a calculado (m/min)	V_a regulado (m/min)	I_{ef} (A)	P (W)
Forma de onda I	7	7	140	2250
	8	7,8	148	2544
	9	8,9	162	2830
	10	9,8	174	2978
EN=50%				
Forma de onda II	7	6,6	135	1812
	8	7,4	145	1973
	9	8,1	150	2244
	10	8,6	159	2557

* valor definido foi ajustado (reduzido) durante a soldagem para evitar curto-circuito para a manutenção da estabilidade

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou várias abordagens sobre a soldagem do alumínio, dando ênfase a necessidade de soluções tecnológicas para aplicação da construção do veleiro. Certamente, estes resultados servem para atender outras necessidades, visto as dificuldades e desafios encontrados em soldagem, especialmente nas aplicações com ligas e materiais não convencionais.

O processo por curto circuito, CMT, nas condições testadas, apresentou-se como boa solução para soldagem de raiz para as duas ligas utilizadas neste trabalho, 5183 e 5087. Todas as amostras contendo os dois metais de adição atenderam satisfatoriamente as normas, comprovando a qualidade do processo. Comparativamente, observou-se pouca diferença metalúrgica entre as duas ligas utilizadas como opção de consumível do veleiro. Pode-se perceber uma melhoria na qualidade da solda utilizando-se o metal de adição ER 5087 quanto ao desempenho mecânico nos ensaios de tração. A diferença nos resultados não foi tão acentuada, mas quando utilizada em aplicações onde se requer o máximo de segurança e qualidade como de embarcações, este se torna a melhor opção.

Em relação a versão pulsada, os conjuntos de parâmetros calculados para $D=I_p^{1,83} \cdot t_p$ que resultaram em maiores valores de I_p apresentaram melhores resultados. Com correntes de pulso de 300, 350, 385 e 430 A obteve-se a condição de destacamento de uma única gota por pulso, e um processo MIG Pulsado estável.

Quanto à versão pulsada com corrente alternada, a metodologia proposta permitiu um cálculo sinérgico para o MIG pulsado CA, sendo possível obter os parâmetros necessários para a execução da soldagem com essa versão do processo. Para os dois conjuntos de parâmetros de pulso avaliados, os mesmos já propostos no MIG Pulsado CC ($I_p=430$ A e $I_p=350$ A) não se observaram diferenças no quesito estabilidade do processo. Nos ensaios com %EN=30 para aplicações de preenchimento do veleiro, os resultados obtidos foram melhores que para EN=50%, já que se conseguiu um processo estável para velocidades de arame de até 10 m/min.

As duas versões MIG Pulsada CC e CA já possuem programas sinérgicos com resultados obtidos neste trabalho e já estão sendo aplicadas na construção do veleiro.

SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar outros parâmetros de pulso da versão MIG Pulsado CC, e também levar em consideração outro expoente da corrente de pulso ($D=I_p^n \cdot t_p$);
- Avaliar se a mesma metodologia de cálculo utilizada para versão MIG Pulsado CA tem aplicabilidade para aço;
- Comparar resultados da versão MIG Pulsado CA com o a modalidade do processo CMT que utiliza corrente alternada (CMT *Advanced*);
- Aplicar controle adaptativo para as versões MIG Pulsado (CC e CA) para melhor desempenho da soldagem.

REFERÊNCIAS

- [1] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO E REPARAÇÃO NAVAL E OFFSHORE. Ponto de Vista: Consolidação naval. Disponível em: <<http://www.sinaval.org.br>> Acesso em: 13/12/2013
- [2] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO E REPARAÇÃO NAVAL E OFFSHORE. Construção naval brasileira com demanda firme para os próximos 20 anos. Disponível em: <<http://www.sinaval.org.br/noticia-602.php>> Acesso em: 15 de janeiro 2014.
- [3] MARQUES, C. Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio. UFSC. Florianópolis, p. 101. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [4] UEYAMA; et al. AC pulsed GMAW improves sheet metal joining. *Welding Journal*, v. 84, n. 2, p 40-46, 2005. ISSN: 00432296.
- [5] ALCAN. Manual de Soldagem do Alumínio e Ligas. São Paulo: Alcan S/A, 1993.
- [6] GERR, Dave. The Elements of BOAT STRENGTH for Builders, Designers, and Owners. International Marine: McGraw-Hill, 1999.
- [7] HATCH, J.E. Aluminium – Properties and Physical Metallurgy. ASM Metals Park, Ohio, 1984.
- [8] WANG, Jian-Zhao; et. al. Effects of Zr on microstructures and mechanical properties of 2E12 aluminum alloy. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, v 19, n 2, p 247-251, 2009.
- [9] POURKIA, N.; et. al. The effect of Ti and Zr elements and cooling rate on the microstructure and tensile properties of a new developed super high-strength aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, v. 527, n. 20, 2010, p. 5318–5325.
- [10] T-PUT Phoenix-Union-Thermanit. Consumíveis de Soldagem para Alumínio, [S.I; s.n]. Disponível em: <http://www.t-put.com/content/page/de/Produktportfolio-23.php>.

- [11] MIG WELD. Products: Aluminum Welding Wires. [S.I; s.n] Disponível em: <<http://www.migweld.de/english/products/aluminium-welding-wire/ml-5087-almg45mnzr.html>>
- [12] LANCASTER, J. F. The physics of welding. Physics Technology: Northern Ireland. Vol. 15, 1984.
- [13] FEURSCHBACH, P.W. Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum. Welding Journal, v. 77, n. 07, p. 76s-85s, fev. 1998.
- [14] CIRINO, Luciano Machado. Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG. UFSC. Florianópolis, p. 89. 2002. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica).
- [15] KIYOHARA, M.; YAMAMOTO, H.; HARADA, S. Melting characteristics of a wire electrode in the MIG-welding of aluminum. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, 1979. p. 165-175.
- [16] QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico. Florianópolis: EDEME, 1979. 248 p.
- [17] AWS - American Welding Society. Welding Handbook: Welding Processes Part II. 9ª edição, vol.3.
- [18] WOODS, R. A. Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds. Welding Research Supply, pp 97-108, March, 1974
- [19] SILVA, Régis Henrique Gonçalves e. Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 127. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia).
- [20] DUTRA, Jair Carlos; OLLÉ, Larry Fiori; JÚNIOR, Raul Gohr. O processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica. XXI ENTS, Caxias do Sul, p. 889, 1995.

- [21] VILARINHO, Louriel O.; SCOTTI, Américo. Um algoritmo não-linear para controle sinérgico de equipamentos para soldagem MIG Pulsada de Alumínio. 1ª COFEB - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba – PR, 2001.
- [22] GHOSH, P. K. et al. Thermal and metal transfer behaviours in pulsed current gas metal arc weld deposition of Al-Mg alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11, 2006, p.232-242
- [23] PALANI, P. K; MURUGAN N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 172 p.1–10, 2006.
- [24] AMIN, M. Pulse current Parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. *Metal Construction*, 15 (5), p. 272-278, 1983.
- [25] TALKINGTON, John. Variable Polarity Gas Metal Arc Welding. Dissertação de Mestrado. The Ohio State University, 1998, 113p.
- [26] LANCASTER, J. F. Metal Transfer in Fusion Welding, *Arc Physics and Weld Pool Behaviour*. p. 135-146, 1979.
- [27] FRONIUS. CMT: Cold Metal Transfer – Processo de solda MIG/MAG com arco voltaico em curto-circuito; [S.I; s.n]. Disponível em: http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-9411282F-A30EAF18/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf
- [28] PICKIN, C. G.; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, n. 5, 2006.
- [29] GUNGOR, B.; et al. Mechanical and Microstructural Properties of Robotic Cold Metal Transfer (CMT) Welded 5083-H111 and 6082-T651 Aluminum Alloys. *Materials and Design*, v 54, p 207-211, 2014.
- [30] CAO, R.; Feng, Z.; Chen, J.H. Microstructures and properties of titanium–copper lap welded joints by cold metal transfer technology. *Materials and Design*, 53, 2014. 192-201.

- [31] SHANG, J; et. al. Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of Cold Metal Transfer Welding Mg/Al Dissimilar Metals. *Materials and Design*, v.34, p. 559–565, 2012.
- [32] ZHANGA, H.T.; et al. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel. *Materials and Design*, 499, 2009. 111-113.
- [33] BRUCKNER, J. Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to Aluminum. *Welding Journal*, vol.84, n.6, jun. 2005, p.38-40.
- [34] FENG, J.; ZHANG, H.; HE, P. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. *Materials and Design*, 30, 2009. 1850-1852.
- [35] PICKING, C. G; WILLIAMS, S.W.; LUNT, M. Characterisation of the Cold Metal Transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, vol.211, 2011. 496-502.
- [36] KIM, C. Back Bead Characteristics during Butt Welding of a thick Plate for Various Backing Conditions. *Materials Science Forum*, 654-656, jun. 2010. 350-353.
- [37] FOKENS, R. Cold Metal Transfer – CMT – A revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding. 4th Pipeline Technology Conference. Hannover, Germany, 2009.
- [38] ALCOA. Nautic Al - Designed for maritime use. Disponível em: <http://www.alcoa.com/mill_products/europe/en/pdf/Nautic_AI_EN>
- [39] ASME. Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX - Welding and Brazing Qualifications. New York, 2010
- [40] ISO 12135. Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. 2002
- [41] BS EN ISO 15653. Metallic materials - Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. 2010

- [42] LIU, Yao; et al. Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum 5083 Weldments by Gas Tungsten Arc and Gas Metal Arc Welding. *Materials Science and Engineering A* 549 7– 13, 2012. DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.108
- [43] HAKEM, Maamar; et al. Welding and Characterization of 5083 Aluminum Alloy. *METAL*, 23. - 25. 5. Brno, Czech Republic, EU, 2012.
- [44] ROMHANJI, Endre; et al. Mechanical Properties of two Al-Mg Welded Plates After Applying Different Welding Procedures. 15th International Research/Expert Conference, TMT, Prague (Czech Republic), 12-18, 2011.
- [45] MIRIHANAGE, Wajira; MUNASINGUE, Nanda. Modification of AA 5083 Weld Joint Characteristics. International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering. Chennai (India), 2004.
- [46] MOCHIZUKI, M; et al. Fracture toughness of structural aluminium alloy thick plate joints by friction stir welding. *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 11, N° 3, pp. 366-370(5), 2006.
- [47] SCOTT, M. H; GITTO, M. F. Tensile and Toughness Properties of Arc-Welded 5083 and 6082 Aluminum Alloys. *WELDING RESEARCH SUPPLEMENT*, p. 243-s 252-s, 1983
- [48] STROMBECK, A. V.; et al. Fracture toughness behaviour of FSW joints aluminium alloys. First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousands Oaks (United States), 14-16 Jun 1999.
- [49] SEIB, E.; KOÇAK, M.. Fracture Analysis of Strength Undermatching Welds of Thin-Walled Aluminum Structures Using FITNET Procedure. *Welding in the World*, Vol. 49, n° 11/12, 2005.
- [50] KOÇAK, Mustafa. Structural Integrity of Welded Structures: Process - Property – Performance (3P) Relationship. 63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding, Istanbul, Turkey, 11-17, 2010.

[51] MACHADO, I.G. New Paradigms for Specification of Welded Joints. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, Vol.17, Nº. 3, p.278-288, 2012.

[52] RAJASEKARAN, S. Weld bead characteristics in pulsed GMA welding of Al–Mg alloys. *Welding Journal*, 78 (12), 1999, 397-s–407-s.

[53] RAJASEKARAN, S; KULKARNI S.D. Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gas metal arc welding. *Welding Journal*, 77 (6), 1998, 254-s–269-s.

[54] AMIN, M. Synergic pulse MIG welding. *Metal Construction*, Vol. 13, 1981, pp. 349-353.

[55] LINCOLN ELECTRIC. Aluminum Welding Guide. [S.l.], p. 32.101. Disponível em: http://www.lincolnelectric.com/assets/en_US/Products/Consumable_AluminumMIGGMAWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5556/c8100.pdf.

[56] PRAVEEN, P; KANG, M. J.; PRASAD Y. K. D. V. Behavior of Metal Transfer Modes in Pulse Gas Metal Arc Welding of Aluminum. *Proceedings of Advanced Materials Processing Technologies Conference*, 2006, pp. 1-8, Las Vegas, USA.

[57] DUTRA, Jair Carlos; MARQUES, Cleber; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e. Consonâncias e dissonâncias interpretativas no inter-relacionamento das variáveis da corrente pulsada aplicada à soldagem com arame de alumínio 4043. *Soldag. insp.*, São Paulo, v. 17, n. 3, set. 2012.

[58] GHOSH, P. K. et al. Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 194, novembro 2007. 163-175.

[59] SCOTTI, Américo; MONTEIRO, Lindbergh Souza. A methodology for parameterization of the AC MIG/MAG process. *Soldagem & Inspeção*, v. 17, n. 3, p. 271-277, 2012.

[60] PARK, Hyoung Jin; et al. The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 66, n. 5-8, p. 867-875, 2013.

[61] VILARINHO, L. O. et al. Methodology for Parameter Calculation of VP-GMAW. *Welding Journal*, v. 88, n. 4, p. 92S-98S, 2009.

[62] BÖHME, D.; ROSENFELD, W.; BAUM, L.; CRAMER, H. Mig-Welding of Very Thin Al-Sheets by A.C. Pulsed Arc. International Institute of Welding IIW, doc. XII-1720-02, 2002.