

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MAG COM PULSAÇÃO TÉRMICA E SUA RELAÇÃO COM OS NÍVEIS DE ENERGIA

Roney Fonseca (Unifei) roneyfo@yahoo.com.br
Carlos Andrés Arango Hincapié (Unifei)
Edmilson Otoni Corrêa (Unifei)
Sebastião Carlos da Costa (Unifei)

Resumo: As grandes vantagens do processo de soldagem MIG/MAG convencional e os avanços tecnológicos no campo da eletrônica levaram ao desenvolvimento de novas variantes do processo, baseados na alteração da forma da onda de corrente usada. Dentre estes modos de soldagem destacam-se a soldagem com corrente pulsada, a soldagem com pulsação térmica e o modo denominado superpulso (patente ESAB) que consiste na combinação de modos diferentes de soldagem em duas fases distintas denominadas: primária e secundária. Tais variantes do processo MIG/MAG permitem, entre outras vantagens, melhorias nas propriedades físicas do cordão de solda em comparação ao modo convencional. Neste artigo foram estudados os efeitos do aporte térmico no tamanho de grão da ZTA e o perfil da microdureza na ZF e na ZTA da soldagem com pulsação térmica e o modo superpulso ao entregar o mesmo nível de energia em cada processo. Os resultados demonstram uma refinação de grão maior na ZTA do processo com pulsação térmica comparado com o modo superpulso, e um grão mais grosseiro quando aumentado o aporte térmico dos processos gerando uma queda de dureza na ZF e na ZTA.

Palavras-chave: MIG/MAG, Pulsação Térmica, Superpulso, Processos de Soldagem.

MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF THE MAG WELDING THERMAL PULSED PROCESS AND ITS ENERGY LEVEL RELATIONSHIP

Abstract: The great advantages of the welding process GMAW conventional and the technological advances in the field of electronics led to the development of new variants of the process, based on the change of the waveform of current used. Among these methods include welding is pulsed welding current, welding and thermal pulse mode called super-pulse (ESAB's Patent) it consists of the combination of different welding modes in two distinct phases, called: primary and secondary. Such variants GMAW process allows carry out advantages such as, improvements in the physical properties of the weld in comparison with the conventional way. In this article were studied the effects of heat input in the grain size of the HAZ and the profile of hardness in merged zone and welding HAZ with thermal pulse and the super-pulse mode with the same heat input in each process. The results show a grader grain refining in HAZ process with thermal pulse compared to the super-pulse mode, and a coarser grain when increased heat input processes generating a hardness drop in merged zone and HAZ.

Key-words: GMAW, Thermal Pulsation, Superpulse, Welding Processes.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG (ou GMAW do inglês Gas Metal Arc Welding) ou soldadura por arco com proteção gasosa é utilizado amplamente pela qualidade da solda, ampla faixa de aplicação em termos de espessuras e materiais utilizados, além da sua alta produtividade quando comparado com outros processos alternativos como o processo com eletrodos revestidos e o processo TIG. O eletrodo em forma de arame consumível com diâmetro entre 0,8 e 1,6 mm [1] é fornecido continuamente a partir de uma bobina facilitando sua automatização e adaptação em linhas de produção [2]. O arame-eletrodo se funde no calor do arco e o metal liquefeito é impelido em direção ao material de base, onde formará a poça de fusão. A proteção é realizada por um gás externo, que pode ser totalmente inerte (MIG, do inglês Metal Inert Gas) usando Ar ou He, ou parcialmente ativo (MAG, do inglês Metal Active Gas), usando CO₂ puro ou misturas de Ar com CO₂ ou O₂, é responsável por criar o ambiente em que se forma o arco e por evitar a oxidação a poça

de fusão e as gotas metálicas em transferência. Na Figura 1 é mostrado esquematicamente o processo

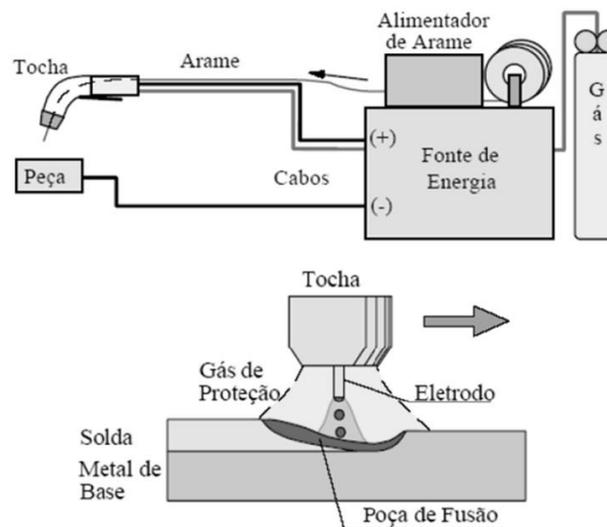


Figura 1: Desenho esquemático do processo MIG/MAG [3].

Uma variante do processo MIG/MAG convencional baseada na alteração da forma de onda é a soldagem com pulsação térmica. No Brasil, o início das pesquisas sobre o MIG/MAG com pulsação térmica teve início na década de 90. Este modo de soldagem une as características do MIG/MAG pulsado com as vantagens do TIG pulsado [4].

O principal objetivo na utilização da soldagem MIG duplamente Pulsado é obter benefícios similares aos encontrados na soldagem TIG pulsada com baixa frequência, entre os quais se destacam: a redução da zona afetada pelo calor, o controle no gotejamento na raiz da solda e, principalmente, o refinamento dos grãos através de nucleação heterogênea devido à agitação da poça de fusão, causada por variações nos níveis da potência térmica na soldagem [5-7].

A forma de onda de saída que caracteriza o processo MIG/MAG com pulsação térmica é ilustrada na Figura 2, observa-se que o processo de pulsação se dá em duas fases distintas (pt e bt) e que esta variação dará como resposta diferentes níveis de calor aportado (valores diferentes para I_m) e frequência de destacamento das gotas metálicas.

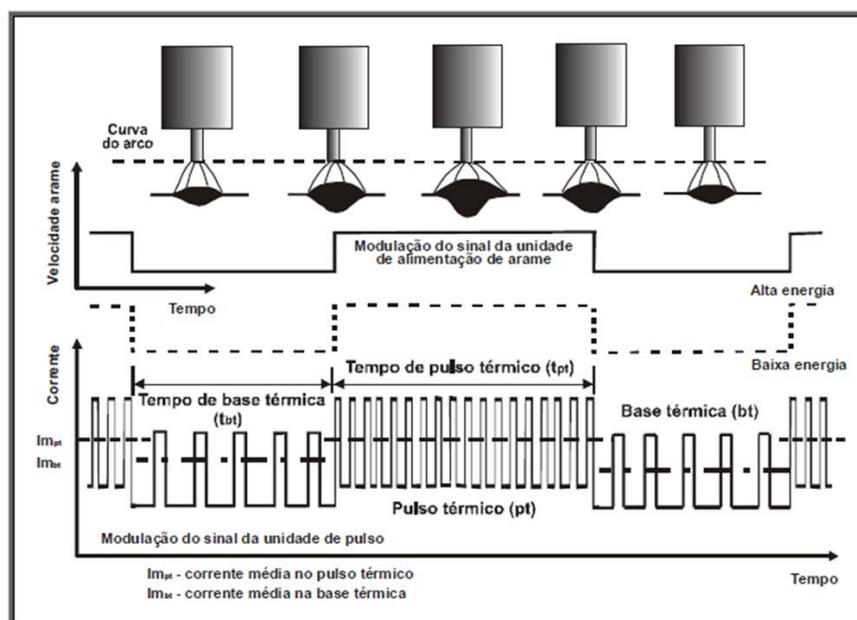


Figura 2: Representação da variante MIG/MAG Térmico [8].

Aliando-se a vantagem dos dois processos, MAG pulsada e TIG pulsado, foi possível obter uma combinação na qual é obtida com a imposição conjunta da modulação nos sinais de corrente média e da velocidade de alimentação do arame em duas fases distintas. A primeira fase, denominada fase primária ou pulso térmico (pt), é caracterizada pela presença de valores altos de corrente média (corrente média no pulso térmico – I_{mpt}) e da velocidade de alimentação do arame (velocidade de alimentação do arame no pulso térmico – v_{apt}). Complementando o período térmico (T_t) vem a fase secundária ou base térmica (bt), que se distingue pela injeção de valores baixos de corrente média (corrente média na base térmica – I_{mbt}) e da velocidade de alimentação do arame (velocidade de alimentação do arame na base térmica – v_{abt}).

A principal desvantagem da pulsação térmica é o aumento da complexidade do processo ao triplicar a quantidade de variáveis ou parâmetros quando comparado com o modo convencional.

O modo de soldagem superpulso patenteado pela ESAB® combina as duas variantes da soldagem MIG/MAG explicadas anteriormente com uma onda de corrente onde a fase primária pertence ao processo superpulso e a fase secundária pertence ao processo convencional como apresenta a Figura 3.

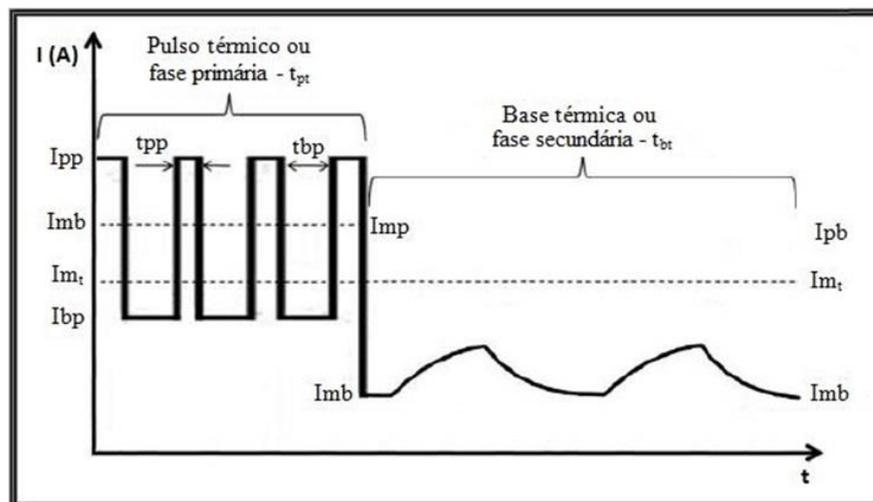


Figura 3: Onda de corrente esquemática da variante superpulso ou modo combinado Pulsado/Convencional.

Ao ser um processo inovador, a documentação científica do modo superpulso é quase inexistente e limitada aos dados fornecidos pela ESAB® [9]. Neste contexto, objetivando o aprimoramento dos processos e a busca por condições de soldagem otimizadas para aumentar a rentabilidade das empresas, deve-se partir da total compreensão de cada processo de soldagem, ademais das vantagens e desvantagens de cada um deles.

Pelo exposto anteriormente, este artigo pretende contribuir com o estudo dos efeitos do aporte térmico na metalurgia da soldagem ao realizar uma comparação dos modos de soldagem com pulsação térmica e superpulso, ao entregar o mesmo nível de energia em cada modo. Numa primeira etapa foi contemplada a influencia de cada processo e da energia de soldagem na microestrutura apresentada na Zona fundida (ZF) e a medição do refinamento dos grãos de ferrítita e perlíta de origem austenítico na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Na etapa final da pesquisa foi analisado o efeito das mudanças microestruturais, das ZF e da ZTA de cada processo e nível de aporte térmico, na microdureza do cordão de solda.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 MATÉRIAS E EQUIPAMENTOS

A fonte utilizada no desenvolvimento da pesquisa foi o equipamento AristoPower 460, sendo esta uma fonte corrente constante (CC) e tensão constante (CV), trifásica, projetada com tecnologia chopper dc no secundário sem contator e circuito de controle eletrônico. É considerada uma fonte multiprocesso projetada para fornecer a característica volts/ampères para a soldagem MIG convencional (GMAW) e arames tubulares (FCAW) no modo tensão constante (CV), MIG Pulsado (GMAW-P), eletrodos revestidos (SMAW).

Esta fonte fornece uma corrente nominal de 450 ampères a 100% do ciclo de trabalho; o alimentador AristoFeed 3004W junto com o controle digital de segunda geração Aristo U82 e tocha PMC 501 RW refrigerada por água, fornece arame com velocidades entre 0,8 m/min e 25 m/min.

A técnica utilizada para a confecção dos cordões de solda foi de simples deposição sobre chapas de 6,35 mm de espessura do aço ASTM A36 e arame AWS ER 70S-6 como material de aporte. A composição química destes elementos é apresentada na

Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% peso) do metal base e o arame utilizados nos experimentos.

Elemento	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu
Meta base	0,06-0,15	0,8-1,15	0,035	0,025	1,4-1,85	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5
Arame	0,25	0,4	0,05	0,04						

A Tabela 2 apresenta os parâmetros que não são objeto do estudo desta pesquisa e foram deixados fixos ao longo do desenvolvimento dos experimentos pela alta quantidade de variáveis dos processos de soldagem com pulsação térmica e superpulso.

Tabela 2: Parâmetros de soldagem fixos durante o desenvolvimento dos experimentos.

DBCP	Gás de proteção	Vazão de gás	Ângulo de trabalho (θ)	Ângulo plano de deslocamento (α)
17 mm	Ar / 2% O ₂	20 l/min	0°	0°

2.2 ENERGIA DE SOLDAGEM

As temperaturas nas quais a junta soldada é submetida durante a soldagem dependem basicamente da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento, neste caso não tem temperatura de pré-aquecimento.

A energia de soldagem ou aporte térmico do processo é calculada pela Equação 1:

$$H = f \frac{V \cdot I}{v_s} \quad (1)$$

Onde:

- H : Energia de soldagem. (Joules)
- V : Tensão do arco (Volts).
- I : Intensidade de corrente (A).
- v_s : Velocidade de soldagem (mm/min)
- f : Eficiência térmica.

A eficiência térmica f é função do processo: SMAW, GMAW ou GTAW [10]. Todos os modos de soldagem considerados em este estudo pertencem ao processo GMAW tornando

esta função em uma constante, e como o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito metalúrgico da energia de soldagem na zona fundida (ZF) e na ZTA, considerou-se $f=1$.

A tensão (V) da Equação 1 é calculada de igual maneira para os dois processos de soldagem com a Equação 2 assim:

$$V_m = \frac{V_{pt} \times t_{pt} + V_{bt} \times t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}} \quad (2)$$

Onde:

- V_{pt} : Tensão no pulso térmico
- V_{bt} : Tensão na base térmica
- t_{pt} : Tempo do pulso térmico
- t_{bt} : Tempo da base térmica

A corrente (I) da Equação 1 para os processos de soldagem no modo superpulso e com corrente pulsada é calculada com as Equações 3 e 4 respetivamente:

$$I_m = \frac{\left(\frac{I_{pp} \times t_{pp} + I_{bp} \times t_{bp}}{t_{pp} + t_{bp}} \right) \times t_{pt} + (I_b) \times t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}} \quad (3)$$

$$I_m = \frac{\left(\frac{I_{pp} \times t_{pp} + I_{bp} \times t_{bp}}{t_{pp} + t_{bp}} \right) \times t_{pt} + \left(\frac{I_{pb} \times t_{pb} + I_{bb} \times t_{bb}}{t_{pb} + t_{bb}} \right) \times t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}} \quad (4)$$

Onde:

- I_b : Corrente na base térmica
- I_{pp} : Corrente de pulso no pulso térmico
- I_{bp} : Corrente de base no pulso térmico
- t_{pp} : Tempo de pulso no pulso térmico
- t_{bp} : Tempo de base no pulso térmico
- I_{pb} : Corrente de pulso na base térmica
- I_{bb} : Corrente de base na base térmica
- t_{pb} : Tempo de pulso na base térmica
- t_{bb} : Tempo de base na base térmica

Para os dois processos de soldagem adotados, foram procurados os parâmetros da fonte de soldagem para **dois níveis diferentes de aporte térmico**, tendo como objetivo principal uma boa estabilidade de cada um deles visando sempre a menor quantidade de respingos e o melhor acabamento da superfície do cordão.

As equações descritas anteriormente foram inseridas numa planilha de *Microsoft Excel* para auxiliar no processo de busca dos parâmetros de soldagem cada processo.

2.3 PONTOS DE ANÁLISE

Para a análise das características apresentadas pela zona fundida ZF e na ZTA, foram extraídos corpos-de-prova situados nos terços médios dos cordões. Esta condição teve como objetivo garantir que a amostra pertencesse a uma região do cordão já em regime (longe das extremidades descartadas).

A Figura 4 traz uma apresentação esquemática da forma de corte dos cordões e detalhes das regiões selecionadas para análise metalográfica e de microdureza.

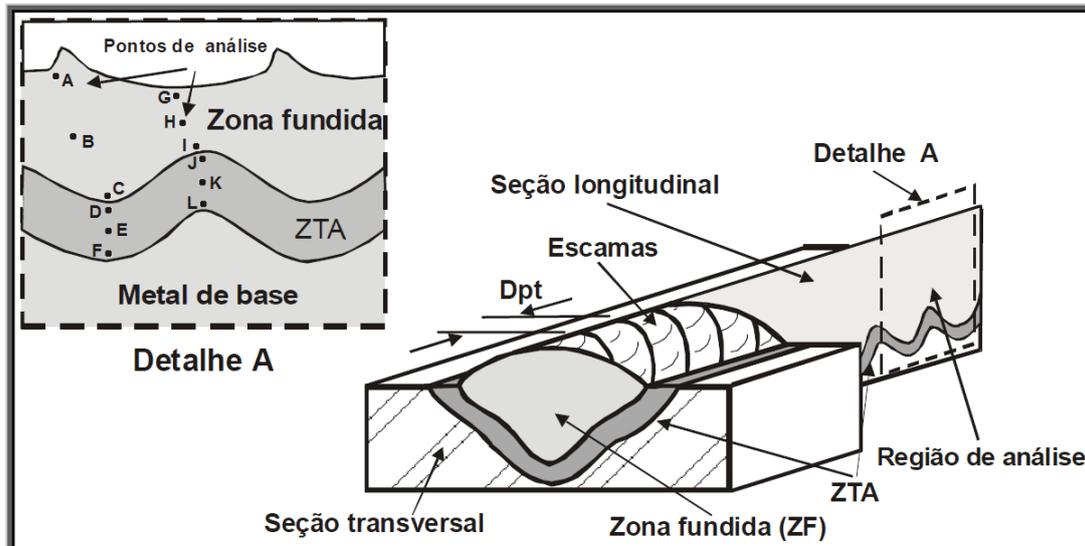


Figura 4: Características do cordão de solda e do detalhe da região de medição das respostas de interesse. Adaptado de [8].

O procedimento com os materiais e técnicas para a revelação da microestrutura nas macrografias e micrografias foi feito segundo [11, 12].

2.4 MICROESTRUTURA NA ZONA FUNDIDA

O objetivo deste tópico é apenas registrar de maneira geral algumas fases da microestrutura obtida na zona fundida, em cada processo de soldagem e nível de energia adotados nesta pesquisa. Para identificar as fases presentes na microestrutura da Zona Fundida, foram utilizados os códigos das fases descritas por [13].

As micrografias desta zona foram tomadas nos pontos B e H da Figura 4.

2.5 MICROESTRUTURA NA ZTA

A microestrutura do aço ASTM A36 utilizado como metal base nos experimentos, está constituída por ferrita equiaxial e perlita [14]. A evolução dos grãos perlíticos e ferríticos nos aços de baixo teor de carbono é descrita por [15]; basicamente partindo desde o metal base, com o aumento da temperatura o grão ferrítico é refinado para depois começar a crescer, o grão perlítico (P) evolui para o grão Austenítico (γ) (austenitização) e junto com as altas taxas de resfriamento a ferrita forma placas laterais nos contornos do grão austenítico chamadas Ferrita de Widmanstätten [16], e neste resfriamento os grãos de austenita viram grãos de perlita, isto devido que o metal base usado nos experimentos, não tem elementos químicos autenitizadores que permitam ao grão austenítico permanecer na temperatura ambiente.

Baseado no anterior e com ajuda do software livre Image J foram mensuradas as áreas dos grãos ferríticos e/ou perlíticos dos corpos de prova nos pontos D-F e J-L da Figura 4. Logo foram calculadas as médias dos valores obtidos entre as fases para cada nível como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Identificação dos pontos entre as fases para o cálculo da média em cada nível.

	Pontos primeira fase	Pontos segunda fase	Zona da solda
Níveis de cada fase	A	G	ZF
	B	H	
	C	I	
	D	J	ZTA
	E	K	
	F	L	

2.6 ENSAIO DE MICRODUREZA

Os procedimentos para os ensaios de microdureza foram realizados segundo [17] no microdurômetro marca Time, modelo TH712.

O perfil de microdureza HV10, Hardness Vickers com carga de 9,8 N; foi realizado com o objetivo de avaliar as mudanças nesta propriedade nas diferentes condições de energia de soldagem na ZF e da ZTA das amostras. A impressão foi realizada nos pontos A-L da Figura 4 para os corpos de prova confeccionados nos processos e níveis de energia de soldagem adotados.

Para a abordagem estatística de microdureza, em cada ponto foram feitas três medições (Figura 5) espaçadas segundo [17], calculando-se cada nível identificado na Tabela 3 a média aritmética e o desvio padrão para os seis valores de dureza tomados.

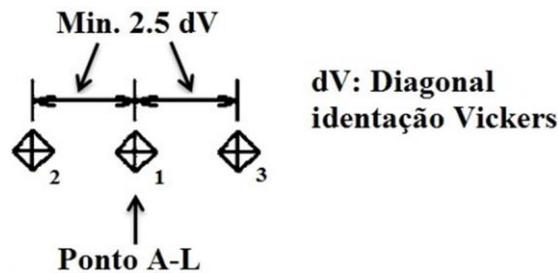


Figura 5: Representação esquemática das durezas tomadas em cada ponto de interesse.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados experimentais obtidos decorrentes da adoção de dois diferentes níveis de aporte térmico nos processos de soldagem MAG no modo superpulso e com pulsação térmica, inicialmente avalia-se a relação entre o processo de soldagem, o aporte térmico, a estrutura obtida na zona fundida, o refinamento do grão na zona termicamente afetada, e posteriormente, a influência na microdureza destas zonas.

3.1 A ZONA FUNDIDA (ZF)

Durante o processamento dos resultados, verificou-se que a microestrutura encontrada na zona fundida das soldas feitas com o metal base ASTM A36 e o arame AWS ER 70S-6 adotados nesta pesquisa, coincide com o descrito por autores como [13, 18] para esta zona nas soldas dos aços de baixo teor de carbono.

As Figuras 6 e 7 apresentam as imagens metalográficas para os dois processos de soldagem a 600 J/mm e 1300 J/mm respectivamente. Pode-se verificar que ao aumentar a

energia de soldagem aumenta também a matriz ferrítica na Zona Fundida (fase clara) contribuindo ao decréscimo da dureza nesta zona por ser uma fase macia [19].

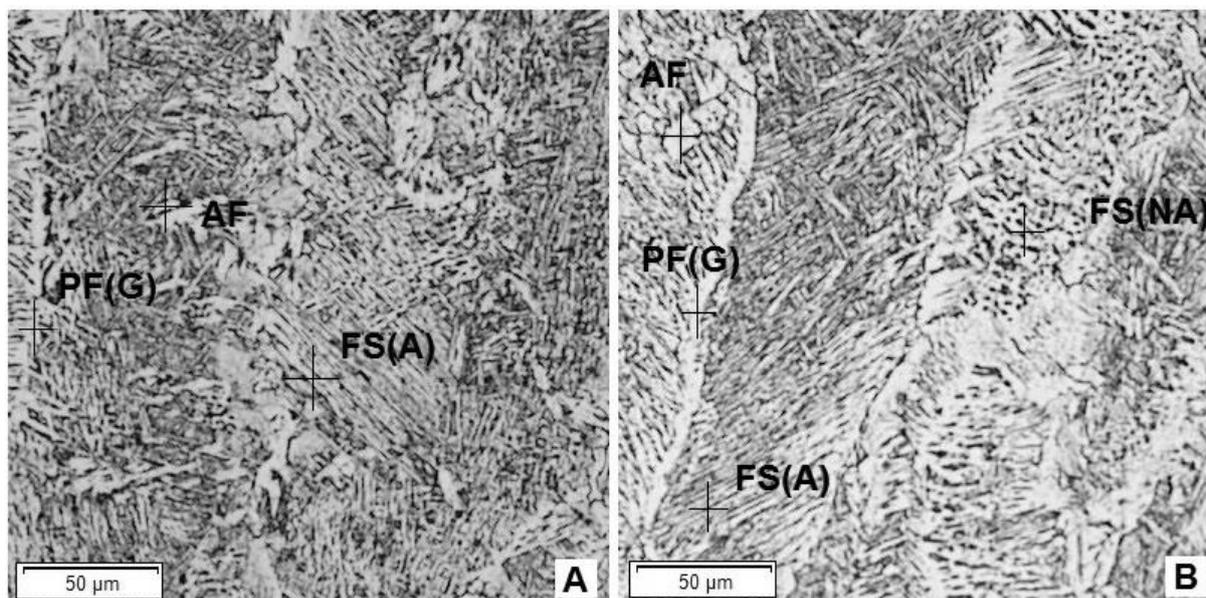


Figura 6: Metalografias a 100x da área central na zona fundida á 600 J/mm de energia de soldagem para os processos: A – Superpulso, B – Pulsado térmico.

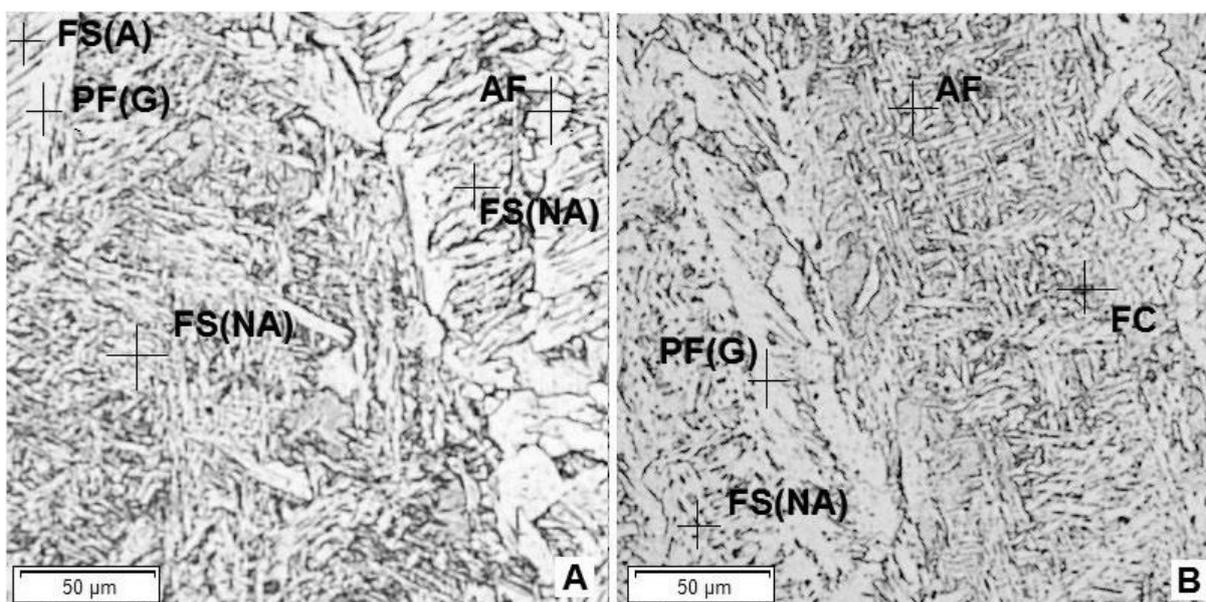


Figura 7: Metalografias a 100x da área central na zona fundida á 1300 J/mm de energia de soldagem para os processos: A – Superpulso, B – Pulsado térmico.

3.2 TAMANHO DE GRÃO NA ZTA

Os processos de soldagem e o aporte térmico em cada um deles têm influência no tamanho de grão perlítico e ferrítico como apresenta a Figura 8.

Basicamente, o grão obtido seja ferrítico ou perlítico é mais grosseiro no processo Superpulso e mais refinado Pulsado térmico (Fig. 4.3). Este fenômeno foi validado nos dois níveis de energia adotados nesta pesquisa.

As observações experimentais demonstram que a maior nível de energia, o tamanho do grão perlítico e ferrítico aumentam, e de fato, pode-se verificar facilmente comparando de forma horizontal cada processo na Figura 8.

Nas Figuras 9 e 10 pode-se verificar a evolução do grão do Pulsado térmico partindo desde o metal base até o ponto de análises D (Figura 4) na ZTA perto da zona de ligação.

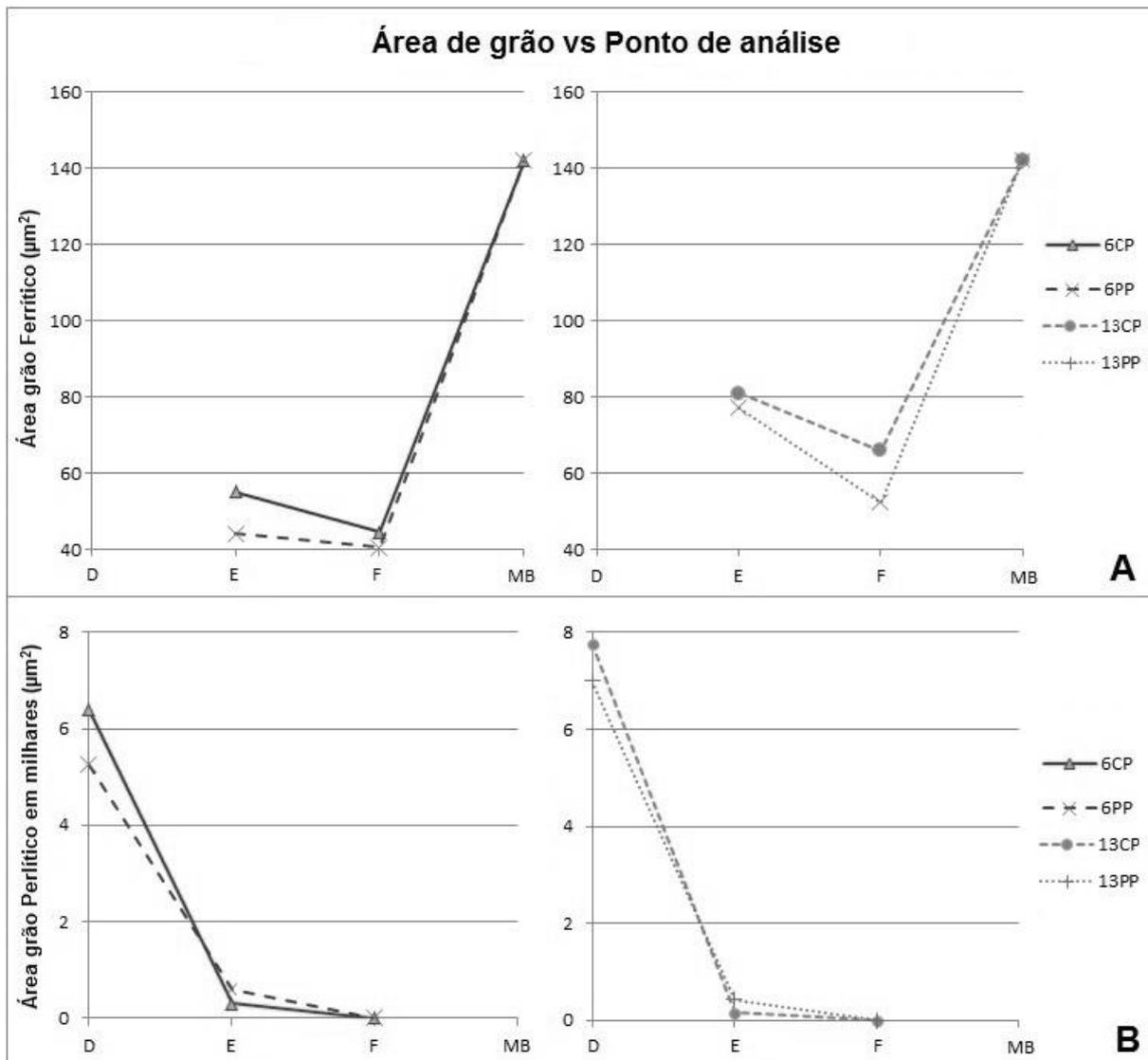


Figura 8: Gráficos das áreas de grão dos processos de soldagem a 600J/mm e 1300 J/mm: A – Grão perlítico, B – Grão ferrítico.

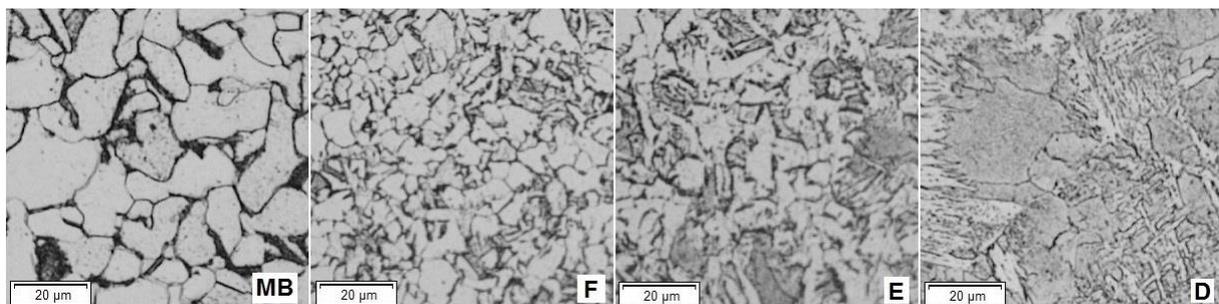


Figura 9: Evolução do tamanho do grão no perfil de solda do Pulsado térmico a 600 J/mm. Imagens com ampliação de 200x.

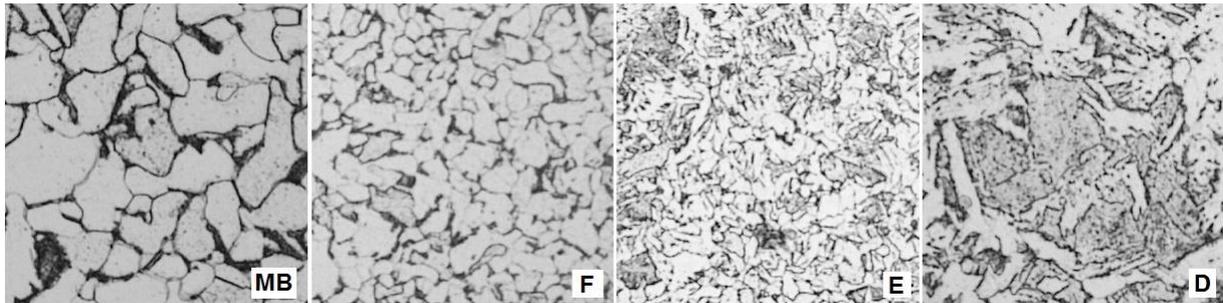


Figura 10: Evolução do tamanho do grão no perfil de solda do Pulsado térmico o a 1300 J/mm. Imagens com ampliação de 200x.

3.3 A MICRODUREZA NA ZF E NA ZTA

A microdureza da solda também tem relação com os processos de soldagem e o aporte térmico.

A energia de soldagem em cada processo diminui a dureza do perfil da solda, encontrando uma relação congruente com os resultados do item anterior, porque quando aumenta a área de aplicação de uma força, que basicamente é o efeito da energia no tamanho de grão, o efeito dela diminui. Este efeito pode-se verificar comparando de forma horizontal cada processo na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Consequentemente com o exposto no parágrafo anterior o processo Superpulso apresenta grãos mais grosseiros e tem menor dureza e quando comparado com o Pulsado térmico como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para 600 J/mm de energia de soldagem.

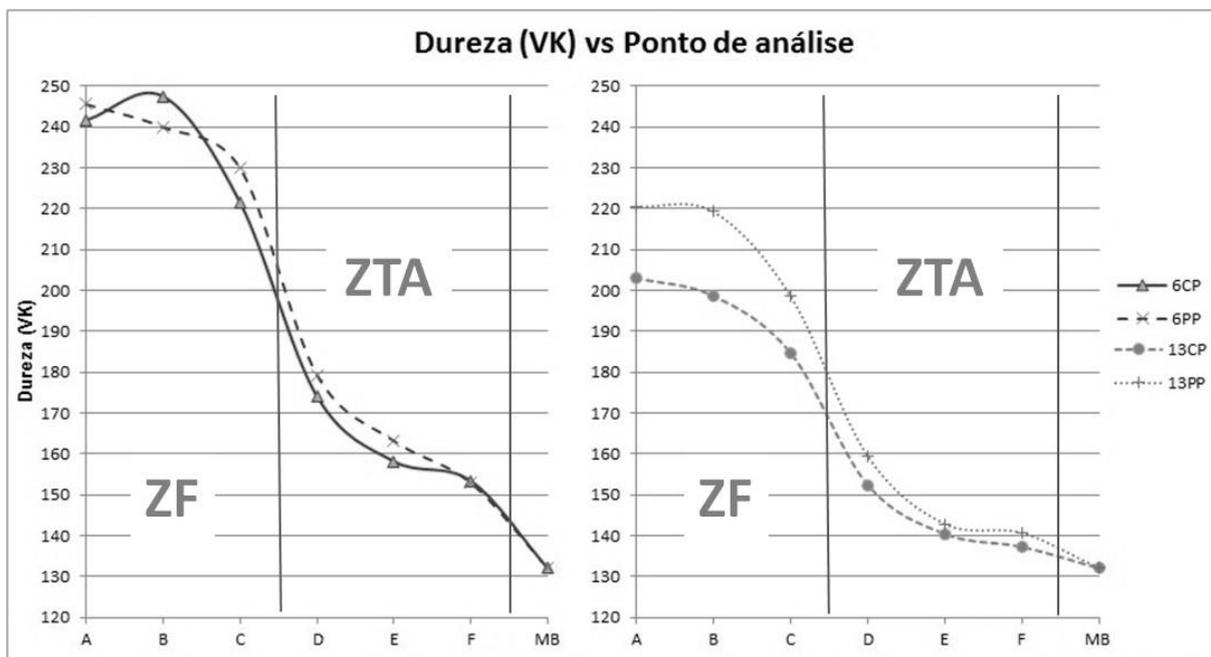


Figura 11: Perfil de dureza na seção longitudinal da solda para os processos de soldagem a 600 J/mm e 1300 J/mm.

Logo, para 1300 J/mm de energia de soldagem, observam-se uma diferencia: Uma queda do processo Superpulso em comparação ao processo com Pulsado térmico.

A queda do processo Superpulso é uma mistura do processo convencional com o duplamente pulsado como foi detalhado na introdução deste artigo. Durante a base térmica (vide Figura 3) a 600 J/mm, a soldagem convencional apresentou uma transferência metálica de tipo Curto-Circuito, ao mudar para 1300 J/mm de aporte térmico percebe-se uma mudança na transferência metálica para o tipo Globular, o que possivelmente gerou um maior aquecimento na peça ocasionando a queda da dureza do processo.

Porém o laboratório de soldagem da UNIFEI não contou com o equipamento para filmagem em alta velocidade (shadowgrafia) para verificar este fenômeno durante o desenvolvimento dos experimentos, de fato, pode-se verificar que a transferência metálica para esta fase do processo convencional a 1300 J/mm não continuou sendo curto circuito porque a tensão utilizada foi de 25,5 V e, segundo [20], no processo GMAW a transferência pelo modo curto-circuito é realizada em baixas tensões, geralmente de 15 a 22 V.

4. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos e as análises efetuadas para os processos os níveis de energia de soldagem adotados, estabelecem-se, para o presente trabalho, as seguintes conclusões:

- A microestrutura da ZF do cordão de solda muda com o nível de energia de soldagem adotados.
- O perfil de dureza do cordão de solda diminui com a maior energia de soldagem e muda com o processo de soldagem, obtendo uma dureza menor no Superpulso em comparação com o Pulsado térmico.
- A maneira pela qual o metal de adição é transferido do eletrodo para a poça fundida pode afetar o perfil de dureza da zona fundida e da zona termicamente afetada do cordão de solda no processo de soldagem por Superpulso.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNIFEI, pela disponibilidade da infraestrutura laboratorial, e à CAPES, pela concessão de incentivos financeiros à presente pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] JEFFUS, L. *Welding: Principles and applications*. United States of America, Thomson/Delmar Learning, 2004, 904 p.

[2] WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F. D. H. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. 1^a Ed., São Paulo, Edgard Blücher Ltda. ed. 1992, 494 p.

[3] MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. *Introdução aos Processos de Soldagem*. UFMG, Belo Horizonte, 2006, pp. 18-19.

[4] CAMPOS, E. A., RIOS, C. M., MENDONÇA, L. P. B. *Influência dos parâmetros de pulso na microestrutura e perfil de dureza na soldagem de ligas de alumínio pelo processo mig superpulso*. In: *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, 2^o Trimestre, 2012 pp. 42-56.

- [5] DA SILVA, T. B., DA SILVA FILHO, C. B. A., DE SIQUEIRA FILHO, C. A., DA MOTA, C. A. M., DE MALAGALHÃES, B. E. *Influência dos parâmetros operacionais do processo Mig sobre a microestrutura e perfil de dureza na soldagem de alumínio naval. In: IV CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife, Agosto, 1995.*
- [6] HENKE, S.L. *Efeito da soldagem plasma pulsada na microestrutura e resistência à fadiga de um aço inoxidável supermartensítico, Curitiba, 2010, 120 p. Tese de Doutorado, UFPR.*
- [7] JANAKI, G.D.R., MURUGESAN, R., SUNDARESAN, S. *Fusion Zone Grain Refinement in Aluminum Alloy Welds through Magnetic Arc Oscillation and Its Effect on Tensile Behavior. Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 8(5), 1999, pp. 513-520, October.*
- [8] BARRA, S. R. *Influência do processo MIG/MAG Térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida, Florianópolis, 2003, 220 p. Tese de Doutorado, UFSC.*
- [9] RADICI, E. *Soldadura en sistemas de escapes de automóviles con proceso mig – mag aristo superpulse. In: Soldar Conarco, Argentina, no. 134, 2011, pp. 17-29.*
- [10] AWS, *Welding Process, Welding Handbook, 8th Ed. vol. 2, 1991, Miami, AWS ed.*
- [11] ASTM E407. *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, 2007, DOI: 10.1520/E0407-07, www.astm.org.*
- [12] ROHDE, R. A. *Metalografia, preparação de amostras. Uma abordagem pratica (Apostila), Laboratório de ensaios mecânicos e materiais LEMM, URI, Santo Ângelo, 2010.*
- [13] PARGETER, R.J., DOLBY, R.E. *Guidelines for Classification of Ferritic Steel Weld Metal Microstructural Constituents Using the Light Microscope, IIW Doc no. IX-1377-85, 1985.*
- [14] ASM. *Metallography and Microstructures, Metals Handbook, 9th Ed. vol. 9, Miami, ASM International ed., 1992, 1627 p.*
- [15] KOU, S. *Welding Metallurgy, New Jersey, Wiley-Interscience Publication, 2002, 461 p.*
- [16] CHADWICK, G. A. *Metallography of Phase Transformations, New York, Crane, Russak and Company, Inc. ed., 1972, 309 p.*
- [17] ASTM E384. *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, 2011, DOI: 10.1520/E0384-11E01, www.astm.org.*
- [18] MODENESI, P. J. *Soldabilidade dos Aços Transformáveis (Apostila), UFMG, Belo Horizonte, 2004.*
- [19] AWS. *Weldability, Welding Metallurgy, and Welding Chemistry, 1995.*

[20] MACHADO, I. G. *Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, editado pelo autor, 1996, 477 p.*