OTIMIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA SOLDAGEM A LASER PULSADA ND:YAG EM AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX UTILIZANDO TOPSIS

Bruna Berbel Seloto [(1)] (b.seloto@unesp.br), Gillian da Silva Crespo [(1)] (gillian.engmec@gmail.com), Vicente Afonso Ventrella [(1)] (vicente.ventrella@unesp.br)

[(1)] Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Soldagem, Ilha Solteira, SP, Brasil.

RESUMO: *Os aços inoxidáveis Duplex apresentam elevada resistência à corrosão e mecânica devido sua estrutura praticamente balanceada de austenita e ferrita que ao soldá-los ocorre o desbalanceamento de ambas as fases. Dessa forma para melhorar esses resultados, este trabalho buscou otimizar os melhores parâmetros de um estudo que utilizou o processo de soldagem a Laser pulsado Nd:YAG em aço inoxidável UNS S32205 em chapas de 3mm através do uso tomadas de decisões de multicritérios tais como potência de pico e posição focal em três níveis diferentes, para isso utilizou o método TOPSIS ("Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution"). Os resultados indicam que as combinações de parâmetros ideais são para posição focal de -1mm e potência de pico de 1,5kW a fim de obter melhor penetração de soldagem, dureza e porcentagem de austenita balanceada.*

PALAVRAS-CHAVE*:* *Laser pulsado Nd:YAG, aço inoxidável duplex; TOPSIS; otimização.*

OPTIMIZATION AND CHARACTERIZATION IN ND: YAG PULSED LASER WELDING OF UNS S32205 DUPLEX USING TOPSIS

ABSTRACT: *Duplex stainless steels have high resistance to corrosion and mechanics due to their balanced structure of austenite and ferrite which when welding them there is an unbalance of both phases. Thus, to improve these results, this work sought to optimize the best parameters of a study that used the Nd:YAG pulsed laser welding in stainless steel UNS S32205 in 3mm plates through the use of multi-criteria decision making such as power peak and focal position at three different levels, for this he used the TOPSIS method (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). The results show that the combination of ideal parameters are a focal position of -1mm and peak power of 1.5kW to get better welding penetration, hardness and percentage of balanced austenite.*

KEYWORDS: *Nd:YAG pulsed laser welding, duplex stainless steels, TOPSIS, optimization*

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex (DSS) são compositamente formulados e termomecanicamente processados de forma a apresentar duas microestruturas, ferrita e austenita, com aproximadamente a mesma proporção volumétrica (50% - 50%), resultando em boas propriedades mecânicas e alta resistência a corrosão - Leite *et al.* (2019) e Moteshakker e Danaee (2016). Por essa razão, os DSS são usualmente utilizados em ambientes química e mecanicamente agressivos, tais como indústrias petroquímicas, de papel e celulose, plantas nucleares e destilarias – Elsaady *et al.* (2018).

Cruz Junior *et al.* (2019) afirmam que o grande desafio na soldabilidade desses materiais está na obtenção de uma junta com fração de fases volumétricas mais balanceada, visto que, de forma geral, após o processo de soldagem, os DSS apresentam microestrutura predominantemente ferrítica.

Devido a elevada gama de utilização do DSS UNS S32205, é fundamental compreender os fatores que os afetam e assim definir os parâmetros ideais para seu processo de soldagem. Entre os diversos processos de soldagem existentes, a soldagem a laser Nd:YAG pulsada é uma ótima candidata para os DSS. Esse processo apresenta uma estreita área de focalização do feixe de laser que, combinada com uma alta intensidade, produz uma ZTA (Zona Termicamente Afetada) diminuta quando comparada a outros processos de soldagem. Além disso, segundo Saravanan *et al.* (2017) e Bolut *at al.* (2016), a soldagem Nd:YAG inibe formação de fases secundárias nos DDS, comumente formadas em processos convencionais de fusão.

A definição de parâmetros de soldagem é o primeiro passo na busca pela obtenção de um metal de solda com elevada qualidade, tanto do ponto de vista mecânico, quanto do ponto de vista químico. Para tanto, ferramentas como MCDM (tomadas de decisões de multicritérios) aplicadas aos processos de fabricação tornam-se uma alternativa viável e cada vez mais empregada. O algoritimo TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) é uma técnica amplamente utilizada em estudos e que, define a melhor alternativa (escolha) de forma eficiente. Mahidhar *et al.* (2020), por exemplo, buscaram identificar os melhores parâmetros de soldagem no Hastelloy C-276 com uso do laser CO_2. Srirangan *et al.* (2017) utilizaram o método TOPSIS com base na matriz L9 de Taguchi a fim de definir os parâmetros ótimos na soldagem TIG com o material Incoloy 800HT. Mirhedayatian *et al.* (2013) definem qual o melhor processo de soldagem para reparar um bloco de motor de ferro fundido utilizando TOPSIS combinado com Fuzzy DEA *(Data envelopmen Analysist*), concluindo que o método é eficaz e sugerindo aprofundamento da pesquisa nesse tópico referente aos processos de fabricação. Shivakoti *et al.* (2017) ressaltam em seu trabalho a importância de definição dos parâmetros ideais

em processos de fabricação, utilizando para isso o método Fuzzy-TOPSIS na busca pela definição das melhores condições no processo Laser Beam Micro-marking. O trabalho de Sampreet *et al*. (2020) estudou o melhor parâmetro de soldagem a laser Nd:YAG na liga ti-6Al-4V (Grau 5), com uso do TOPSIS auxiliado por ANOVA (análise de variância), chegando ao resultado de que a potência do laser é o parâmetro mais significativo na função multiobjetivo geral.

Desse modo, objetivo principal deste trabalho foi a aplicação do método TOPSIS, em dados do trabalho de Crespo *et al.* (2016) acerca de soldagem na condição *bead on plate* no aço inoxidável duplex UNS S 32205 na forma de chapas com 3,0 mm de espessura com uso do Laser Nd:YAG pulsado (120 W). Os parâmetros de entrada foram baseados na matriz ortogonal L9 para concepção dos cordões de solda, buscando-se o melhor parâmetro de soldagem no processo de soldagem Nd:YAG para esse DSS.

2. TOPSIS

O TOPSIS é uma das técnicas de classificação MCDM, foi proposto pela primeira vez em 1981 por Hang Yoon (Yu e Pan (2021)). O método se baseia em encontrar a melhor alternativa por meio da menor distância Euclidiana da solução ideal positiva (PIS) e maior distância da solução ideal negativa (NIS) indicado na Figura 1. Nesse gráfico é possível notar as alternativas A, B, C, D e E, além dos pontos dos parâmetros ideias e anti-ideais. O ponto C apesar de ser o valor mais próximo do ponto ideal está à uma distância menor do ponto anti-ideal que D. O método TOPSIS aborda a solução ideal para esses casos. Entre as vantagens do uso do método TOPSIS citadas por Hung e Cheng (2009) estão:

- Fácil aplicação - algoritmo relativamente simples;
- Apresenta o resultado da melhor e pior alternativa simultaneamente;
- Critérios de pesos são incorporados durante a comparação.

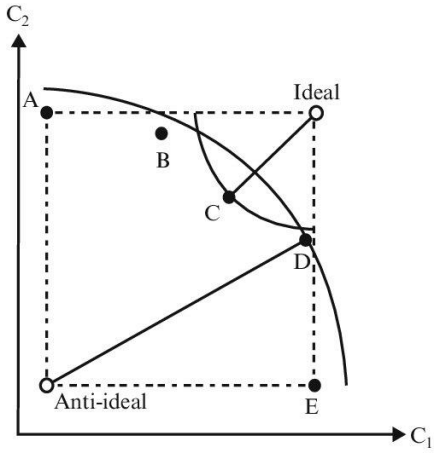


Figura 1. Representação gráfica do método TOPSIS. Fonte: Vavrek *et al*. (2017).

O algoritmo TOPSIS segue 6 etapas descritas por Vavrek *et al.* (2017) a seguir:

Etapa 1: Definir a matriz de decisão D composta de alternativas e critérios. A_i, i=1,...,n representa as alternativas e X_j, j=1,...,m representa os critérios. A Equação 1 representa essa configuração.

$$D=\begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \end{array} \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \end{array} \quad (1)$$

Etapa 2: Determinar a matriz normalizada através da matriz D. O valor normalizado r_{ij} é dado pela Equação (2):

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Etapa 3: Obter a matriz de decisão normalizada ponderada (Equação 3) por meio da multiplicação dos pesos w_{ij} com cada elemento da matriz normalizada (r_{ij}):

$$v_{ij}=w_j * r_{ij} \quad (3)$$

Etapa 4: Definir a Solução Ideal Positiva (PIS - A^+) e a Solução Ideal Negativa (NIS - A^-) pela Equação 4 e Equação 5, respectivamente.

$$A^{+}=\{(\text{máx}_i\, v_{ij} \mid i\in J^{'});(\min{}_i v_{ij} \mid i\in J^{''})\} \quad (4)$$

$$A^{-}=\{(\min_i v_{ij} \mid i\in J^{'});(\max{}_i v_{ij} \mid i\in J^{''})\} \quad (5)$$

Etapa 5: Calcular a distância Euclediana entre o valor obtido e PIS e NIS para cada alternativa pela Equação 6 e Equação 7.

$$D_j^{+}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_{ij}-v_i^{+})^2} \quad (6)$$

$$D_j^{-}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_{ij}-v_i^{-})^2} \quad (7)$$

Etapa 6: Calcular a Medida de Similaridade (ξ_i) de acordo com a Equação 8.

$$\xi_i=\frac{D_i^{-}}{D_i^{+}+D_i^{-}} \quad (8)$$

3. METODOLOGIA

Utilizou-se o sistema de soldagem a laser Nd:YAG (Figura 2) do Laboratório de Aplicações Industriais de Laser do Centro de Lasers do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares) , na condição pulsada com auxílio de CNC de 3 eixos. A potência máxima de saída do laser foi de 120W.

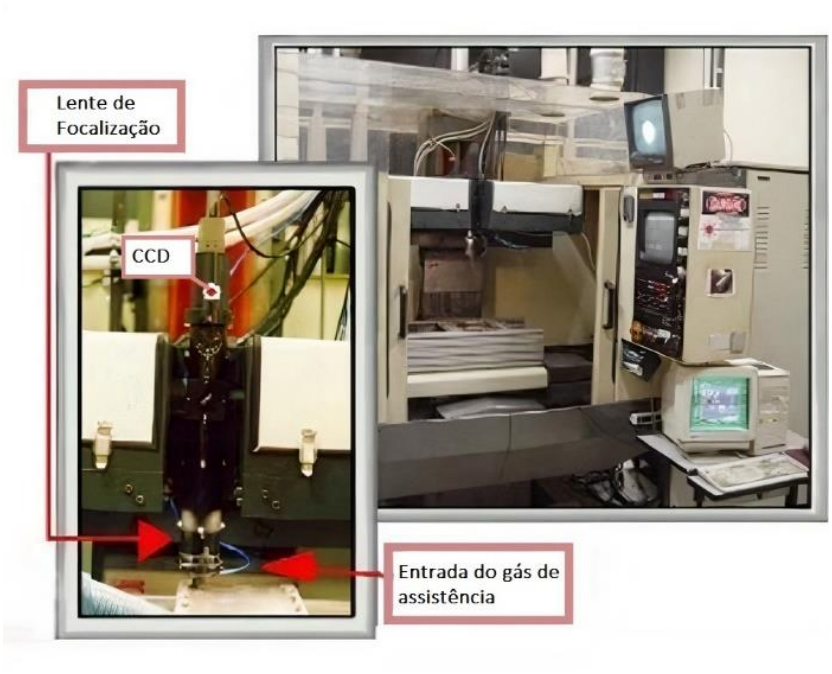


Figura 2. Central a Laser utilizada. Fonte: próprios autores.

O metal de base utilizado foi o DSS UNS S32205, em formato de chapas laminadas, sem pré-tratamentos e com espessura de 3mm. A Tabela 1 traz a composição química do material fornecida pelo fabricante.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável UNS S 32205.

Proporção dos elementos constituintes (% em peso)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0,019	0,39	1,51	0,022	0,002	22,45	5,50	3,12	0,169

Fonte: Aperam South América.

A natureza complicada dos parâmetros da soldagem a laser pulsada permite uma elevada gama de possibilidades experimentais - Tzeng (2000). Para avaliar a influência da posição focal e da largura temporal, a solda foi realizada na condição *bead on plate* com fluxo de gás argônio de 15 l/min e energia de pulso de 6 J. A taxa de repetição e velocidade de soldagem foram mantidas a 9 Hz e 140mm/min, respectivamente, a fim de se obter uma taxa de sobreposição de 50% no cordão de solda, dados do trabalho de Crespo *et al.* (2016). Os parâmetros de entrada e os três níveis utilizados estão indicados na Tabela 2. O procedimento experimental baseado na matriz L9 de Taguchi é apresentado na Tabela 3.

Cada cordão de solda foi seccionado em três partes as quais foram embutidas em resina à frio, posteriormente, preparadas metalograficamente e atacadas por Behara moficado (100 ml de H_2O + 20 ml de HCl + 0,4 g de metabissulfito de potássio). As medidas da profundidade e largura dos cordões foram obtidas pelo microscópio óptico Neophot 21. Para análise da fração volumétrica de ferrita/austenita do cordão de solda, as micrografias foram binarizadas pelo software livre Image J, assim pela diferença entre as cores da austenita (região clara) e ferrita (escura), calculou-se as proporções. As durezas dos metais de solda, das ZTA e metal de base foram avaliadas com uso de microdureza Vikers, com carga de 65 kgf. Todos os resultados utilizados na Tabela 3 utilizaram a média das três amostras por experimento.

Tabela 2. Parâmetros do processo.

Variável	Unidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Potência de Pico	kW	1.5	1	0.75
Posição focal	mm	-1	-1.5	-2

Fonte: próprios autores.

Tabela 3. Matriz L9 de Taguchi com os parâmetros e suas respectivas respostas.

Exp no.	Parâmetros do processo			Resultados experimentais			
	Posição Focal [mm]	Potência de Pico [kW]	Largura Temporal [ms]	Largura [µm]	Profundidade do cordão [µm]	Dureza [HV]	Austenita [%]
1	-1	1,5	4	820	897	347	30
2	-1	1	6	730	503	356	29
3	-1	0,75	8	603	377	359	25
4	-1.5	1,5	4	737	1063	257	22
5	-1.5	1	6	767	800	231	23
6	-1.5	0,75	8	680	513	204	24
7	-2	1,5	4	630	1053	349	30
8	-2	1	6	647	747	379	30
9	-2	0,75	8	600	547	323	29

Fonte: próprios autores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Macrografia

A Figura 3 apresenta as imagens macrográficas utilizadas para cálculo da profundidade e largura dos cordões de solda. Nota-se que as amostras com maior potência de pico apresentaram as maiores larguras e profundidades para os metais de solda.

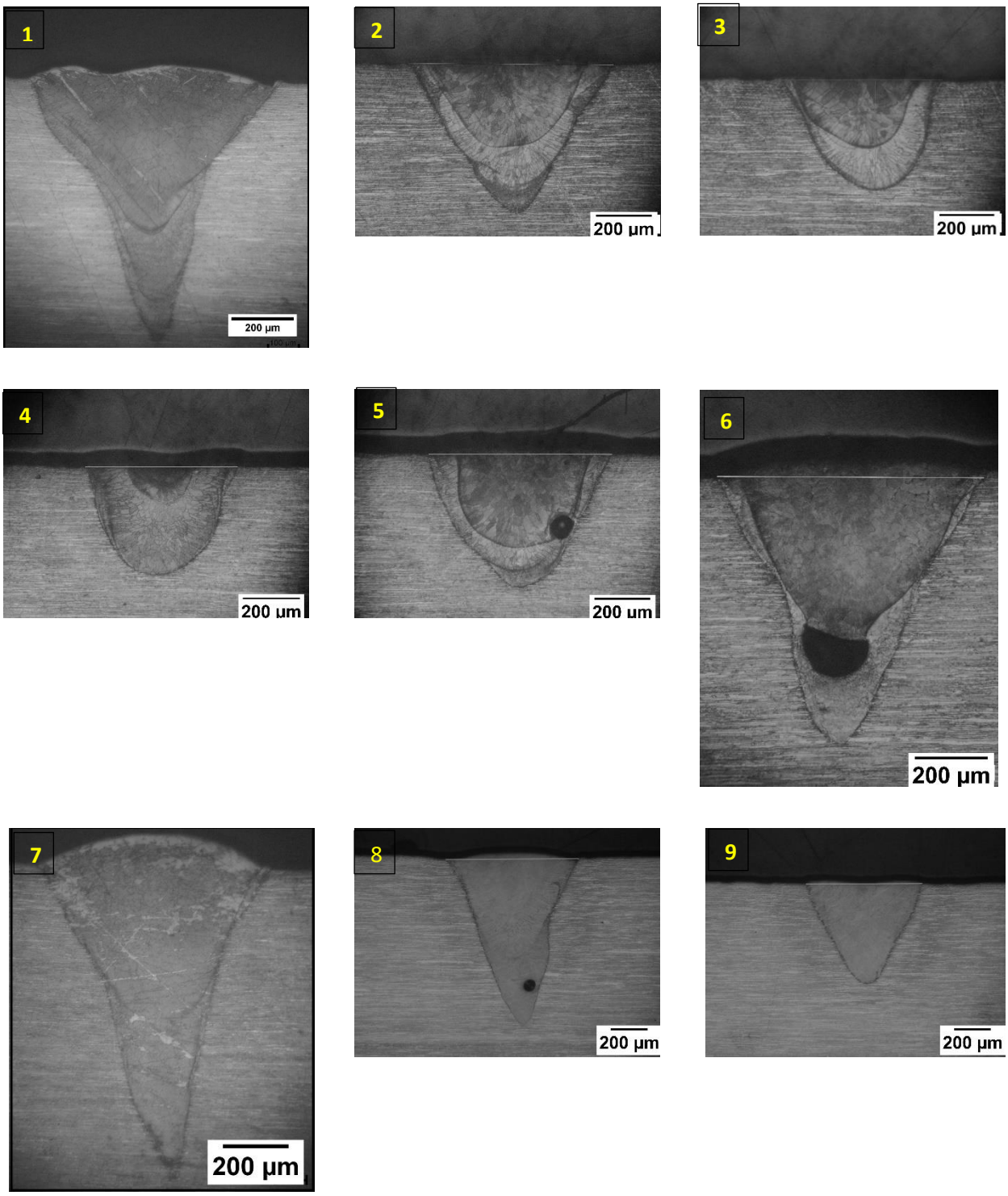


Figura 3. Macrografia dos 9 cordões executados. Fonte: próprios autores.

4.2 Otimização com método TOPSIS

A Tabela 4 apresenta os dados do experimento normalizados e normalizados ponderados. Para cada critério foi suposto que os pesos fossem no valor de 0,25. Definiu-se como melhor solução ideal positiva os maiores valores da largura, profundidade, dureza e austenita. Considerou-se que, quanto maior a quantidade de austenita, melhor o resultado, visto que depois da soldagem dos DDS há formação de um cordão predominantemente ferrítico e o resultado ideal é a composição padrão do metal de base (50% de ferrita e 50% de austenita). Na Tabela 5 encontram-se a distância Euclediana do PIS e NIS com os quais se calcula os ξ_i. Dessa forma, classifica-se os melhores experimentos em ordem decrescente. Quanto mais próximo de 1 é o valor do ξ_i , melhor ranqueado é o resultado. Pelos dados, o melhor resultado foi obtido para a amostra nº1, com posição focal de -1mm, potência de pico de 1,5 kW e largura temporal de 4ms. Por outro lado, a amostra nº 6 apresentou o pior desempenho, dentro dos parâmetros adotados.

Tabela 4. Dados normalizados e normalizados ponderados

Exp. No.	Valores normalizados				Dados ponderados e normalizados			
	Largura	Profundidade do cordão	Dureza	Austenita	Largura	Profundidade do cordão	Dureza	Austenita
1	0,393	0,393	0,364	0,369	0,098	0,098	0,091	0,092
2	0,350	0,220	0,373	0,357	0,087	0,055	0,093	0,089
3	0,289	0,165	0,377	0,307	0,072	0,041	0,094	0,077
4	0,353	0,466	0,269	0,270	0,088	0,116	0,067	0,067
5	0,368	0,350	0,242	0,283	0,092	0,087	0,060	0,070
6	0,326	0,225	0,214	0,295	0,081	0,056	0,053	0,073
7	0,302	0,461	0,366	0,369	0,075	0,115	0,091	0,092
8	0,310	0,327	0,398	0,369	0,077	0,081	0,099	0,092
9	0,288	0,239	0,339	0,357	0,072	0,060	0,084	0,089

Fonte: próprios autores.

Tabela 5. Os experimentos com seus respectivos valores de Medida de Similaridade e Rank entre as alternativas.

Exp. No.	D^+	D^-	ξi	Rank
1	0,020	0,077	0,793	1
2	0,062	0,045	0,419	6
3	0,081	0,041	0,339	8
4	0,033	0,078	0,699	3
5	0,053	0,051	0,489	5
6	0,060	0,018	0,235	9
7	0,024	0,086	0,782	2
8	0,040	0,066	0,621	4
9	0,064	0,042	0,397	7

Fonte: próprios autores.

A Figura 4 indica gráfico dos efeitos principais proveniente do valor de ξ_i. Pode-se observar que o valor de ξ_i foi maior para o terceiro nível de posição focal, porém em relação a potência de pico, o valor de ξ_i foi maior para o primeiro nível e menor para o terceiro. O segundo nível apresentou valor intermediário para ambos os parâmetros. Dessa forma, a Figura 4 confirma que o melhor parâmetro é para o experimento nº1.

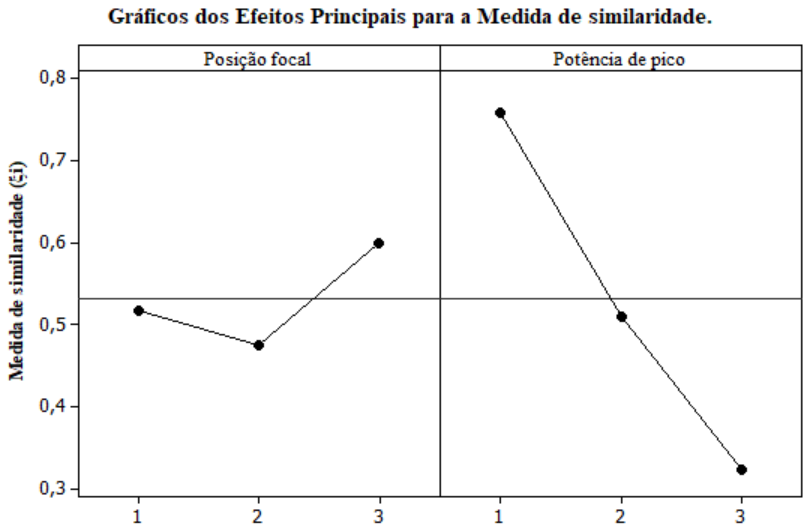


Figura 4. Gráficos dos Efeitos Principais para a Medida de similaridade. Fonte: próprios autores.

4.3 Micrografia

Com o uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV) notou-se que o cordão de solda 1 apresenta estrutura predominantemente ferrítica, com austenita (γ) restrita apenas aos contornos de grão. A Figura 5 A) apresenta a micrografia do cordão de solda 1, determinado o melhor cordão de acordo com a análise TOPSIS efetuada. A Figura 5 B) traz a imagem do metal base para efeito de comparação com estrutura aproximadamente 50% de ferrita (α) e 50% austenita (γ).

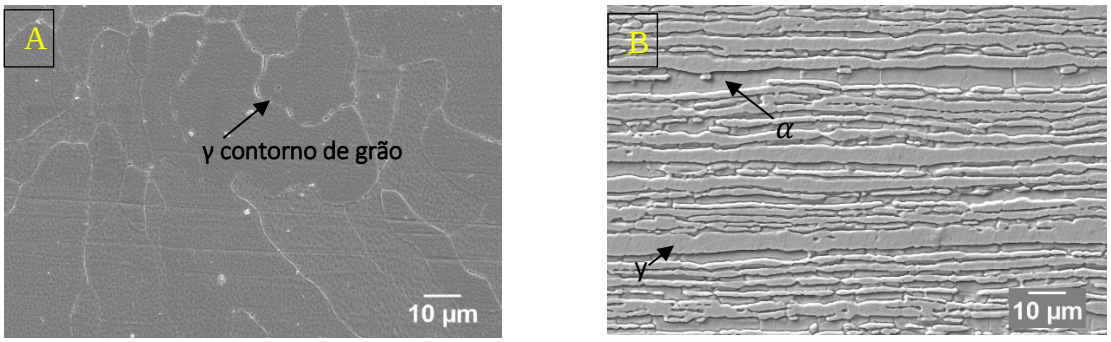


Figura 5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) A) cordão de solda 1 e B) metal de base.
Fonte: próprios autores.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho efetuou uma análise dos dados de soldagem a laser pulsada com Nd:YAG de chapas de 3mm de DSS UNS S32205 trazidos por Crespo *et al.* (2016) através do método TOPSIS, buscando a determinação dos melhores parâmetros, tais como Posição Focal e Potência de Pico, considerando como critérios de qualidade a quantidade de austenita formada no metal de solda, a largura e profundidade dos cordões de solda e os valores de dureza dos metais de solda. Os resultados TOPSIS indicaram como melhor cordão de solda o cordão de número 1 (posição focal de -1 mm e potência de pico de 1,5 kW). Análises de MEV revelaram que a zona fundida é prioritariamente constituída por ferrita, com a austenita formando-se basicamente nos contornos de grãos. A aplicação do método TOPSIS se mostrou eficiente, apresentando abordagens simples para tomada de decisões multicritérios, além de mostrar norteamentos para próximos trabalhos no que tange às escolhas de parâmetros em soldagens a Laser Nd:YAG pulsado com UNS S32205.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) no Laboratório de Aplicação Industriais de Laser pela disponibilização do maquinário e ao Conselho e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

BOLUT, M.; KONG, C. Y.; BLACKBURN, J.; CASHELL, K. A.; HOBSON, P. R. Yb-fibre laser welding of 6 mm duplex stainless steel 2205. *Physics Procedia: of the 9th International Conference on Photonic Technologies*, Vol. 8383, Furth, Germany, p.417-425, 2016.

CRESPO, G. da S.; PADILHA, J. L.; SOKEI, C. R.; TOKIMATSU, R. C.; GALLEGO, J.; VENTRELLA, V. A. (2016). Pulsed Nd: YAG Laser Welding of UNS S 32205 Duplex Stainless Steel. *Materials Science Forum*, v. 869, p. 458-463, 2016.

CRUZ JUNIOR, E. J. da; FRANZINI, O. D.; CALLIARI, I., VENTRELLA, V. A. Effects of Nickel Addition on the Microstructure of Laser-Welded UNS S32750 Duplex Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 50, n. 4, p. 1616-1618, 2019.

ELSAADY, M. A.; KHALIFA, W.; NABIL, M. A.; EL-MAHALLAWI, I. S. Effect of prolonged temperature exposure on pitting corrosion of duplex stainless steel weld joints. *Ain Shams Engineering Journal*, v.9, n. 4, p. 1407-1415, 2018.

HUNG, C.; CHEN, L. A fuzzy TOPSIS decision-making model with entropy weight under intuitionistic fuzzy environment. *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists*, Vol. 1 Hong Kong, p. 13-16, 2009.

LEITE, C. G. da S.; CRUZ JUNIOR, E. J. da; LAGO, M.; ZAMBON, A.; CALLIARI, I.; VENTRELLA, V. A.. Nd: YAG pulsed laser dissimilar welding of UNS S32750 duplex with 316L austenitic stainless steel. *Materials,* v. 12, n. 18, p. 2906, 2019.

MAHIDHAR, V.; SAMPREET, K. R.; KANNAN, R.; KANNAN, T. D. B. Parameter optimization in laser welding of Hastelloy C-276 using TOPSIS. *Materials Today: Proceedings*, v. 21, p. 595-600, 2020.

MIRHEDAYATIAN, S. M.; VAHDAT, S. E.; JELODAR, M. J.; SAEN, R. F. Welding process selection for repairing nodular cast iron engine block by integrated fuzzy data envelopment analysis and TOPSIS approaches. *Materials & Design*, v. 43, p. 272-282, 2013.

MOTESHAKKER, A.; DANAEE, I. Microstructure and corrosion resistance of dissimilar weld-joints between duplex stainless steel 2205 and austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Science & Technology*, v. *32*, n. 3, p. 282-290, 2016.

SAMPREET, K. R.; MAHIDHAR, V.; KANNAN, R.; KANNAN, T. D. B. Optimization of parameters in Nd: YAG laser welding of Ti-6Al-4V using TOPSIS. Materials Today: Proceedings, v. 21, p. 244-247, 2020.

SARAVANAN, S.; RAGHUKANDAN, K.; SIVAGURUMANIKANDAN, N. Studies on metallurgical and mechanical properties of laser welded dissimilar grade steels. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 39, n. 9, p. 3491-3498, 2017.

SHIVAKOTI, I.; PRADHAN, B. B.; DIYALEY, S.; GHADAI, R. K.; KALITA, K. Fuzzy TOPSIS-based selection of laser beam micro-marking process parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 42, n. 11, p. 4825-4831, 2017.

SRIRANGAN, A. K.; SATHIYA, P. Optimisation of process parameters for gas tungsten arc welding of Incoloy 800HT using TOPSIS. *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 2, p. 2031-2039, 2017.

TZENG, Y.-F. Process characterisation of pulsed Nd: YAG laser seam welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 16, n. 1, p. 10-18, 2000.

VAVREK, R.; KOTULIC, R.; ADAMISIN, P.; SIRA, E.; VOZAROVA, I. K. Effectiveness of use of MCDM methods in the terms of local self-government. *Advances in Applied Economic Research*, p. 279-288, 2017.

YU, D.; PAN, T. Tracing knowledge diffusion of TOPSIS: A historical perspective from citation network. *Expert Systems with Applications*, v. 168, p. 114238-114250, 2021.