

# OTIMIZAÇÃO E COMPARAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE SOLDAS GMAW E FCAW

**José Hilton Ferreira da Silva**<sup>1</sup>

E-mail - [jose.hilton@cefetpa.br](mailto:jose.hilton@cefetpa.br)

**Hélio Antônio Lameira deAlmeida**<sup>1</sup>

E-mail - [almeidahelio@yahoo.com.br](mailto:almeidahelio@yahoo.com.br)

**Carlos Alberto Mendes da Mota**<sup>1</sup>

E-mail - [cmota@ufpa.br](mailto:cmota@ufpa.br)

**Eduardo de Magalhães Braga**<sup>2</sup>

E-mail - [edbraga@ufpa.br](mailto:edbraga@ufpa.br)

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação tecnológica do Pará, Coordenação de Mecânica, Fone: (91) 32011772. Avenida Almirante Barroso, 1155. Bairro do Marco. CEP: 66093-020; Belém – Pa.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica; Fone: (91) 32017956, Bairro do Guamá, Belém, Pa.

**Resumo.** Neste trabalho propõe-se comparar modelos matemáticos desenvolvidos por análise de regressão múltipla e otimizados pelo método da transformação da potência para a resposta ( $Y^z$ ), utilizando os processos de soldagem GMAW e FCAW, e correlacionar a representatividade dos modelos com a estabilidade do arco elétrico para cada processo. O experimento foi desenvolvido utilizando um planejamento fatorial  $3^1 \times 2^1$ . As variáveis de influência foram a corrente elétrica e o tipo de gás de proteção ( $CO_2$  puro e a mistura 75% de argônio + 25% de  $CO_2$ ), e como variáveis de resposta foram analisados os parâmetros geométricos do cordão de solda (penetração, largura, reforço). Os cordões de solda analisados foram depositados sobre chapas de aço ABNT 1020. Duas réplicas foram realizadas para cada condição de ensaio e os resultados analisados para uma confiança de 95%. Os resultados mostraram que a representatividade dos modelos matemáticos desenvolvido para as características geométricas dos cordões independe da estabilidade do arco nos processos FCAW e GMAW; os modelos matemáticos obtidos por análise de regressão múltipla foram otimizados pelo método da transformação da resposta e tornaram-se mais representativos da geometria dos cordões de solda versus corrente de soldagem e gás de proteção.

**Palavras-chave.** Processo FCAW; Processo GMAW; modelos matemáticos, parâmetros de soldagem; geometria de cordões de solda.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de modelos matemáticos para um determinado processo é de extrema relevância em várias áreas da engenharia mecânica, tais como análise, simulação, controle, otimização, etc. Um modelo nada mais é do que uma abstração matemática de um processo real.

Dentre as várias áreas da engenharia, a aplicação de modelos matemáticos em soldagem possui grande destaque. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos nos últimos anos a fim de explicar os principais mecanismos físicos que têm surgido na penetração de soldagem laser (Solana & Ocaña<sup>(1)</sup>; Kapadia, Solana, & Dowden<sup>(2)</sup>). Modelos também têm sido aplicados para avaliar as características da mecânica dinâmica de máquinas para soldagem por resistência elétrica (Wu, Zhang & Bay<sup>(3)</sup>) e para observar experimentalmente as variações macroestruturais em uma série de depósitos de solda de aço baixa liga contendo diferentes concentrações de carbono.

Ki, Mohanty & Mazumder<sup>(5)</sup> desenvolveram um modelo tri-dimensional para a soldagem laser-keyhole, caracterizando a evolução alto-consistente da interface líquido/vapor juntamente com uma simulação completa da transferência de calor e do fluxo de fluido. Outros estudos com modelos matemáticos também têm sido desenvolvidos em soldagem híbrida entre os processos MIG/LASER (Zhou, et al<sup>(5)</sup>); na soldagem a arco plasma (Dowden et al<sup>(6)</sup>) e no processo MIG/MAG (Wang & Tsai<sup>(7)</sup>). Neste sentido, a modelagem matemática tem sido utilizada nos diversos processos de soldagem como ferramenta eficaz para prever as diversas variáveis de respostas objetivando as suas otimizações.

O desenvolvimento de modelos matemáticos da junta soldada e do processo de soldagem utilizado, para todas as relações quantitativas a serem estabelecidas entre os parâmetros de soldagem e as dimensões do cordão de solda, tem sido uma crescente abordagem adotada no oeste europeu e em outras partes do mundo; para resolver e/ou minimizar os muitos problemas enfrentados por técnicos e engenheiros de soldagem, em virtude do uso comum de soldagem mecanizada e automatizada (Silva e Alfaro<sup>(8)</sup>). Para o desenvolvimento de modelos matemáticos; considerável trabalho experimental é requerido para estabelecer as relações realísticas.

A crescente utilização do processo GMAW tem promovido rapidamente, desenvolvimentos de arames sólidos consumíveis, porém os mais significantes desenvolvimentos nesta área são relatados para os eletrodos tubulares (Norrish<sup>(9)</sup>). Os eletrodos tubulares e arames sólidos possuem muita similaridade quanto aos equipamentos usados na soldagem, bem como no tipo de aplicações para as quais eles são recomendados. Características tais como alta produtividade, flexibilidade, facilidade de operação e conveniência para automatização, tornam os processos que utilizam esses tipos de consumíveis altamente competitivos e, em muitos casos, concorrentes diretos nas aplicações de soldagem.

Muitas são as aplicações de modelos matemáticos aos processos de soldagem, no entanto nenhuma abordagem relacionando a representatividade dos modelos com a estabilidade do arco elétrico dos processos foi desenvolvida. Assim, com ênfase no que foi exposto, este trabalho tem como objetivo comparar modelos matemáticos, para a geometria dos cordões de solda em função da corrente de soldagem e do tipo de gás de proteção, desenvolvidos por análise de regressão múltipla e otimizados pelo método da transformação da potência para a resposta ( $Y^{\lambda}$ ), para os processos de soldagem GMAW e FCAW, e correlacionar a representatividade dos modelos com a estabilidade do arco elétrico para cada processo.

## **2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Foram utilizados corpos de prova do aço ABNT 1020 com dimensões de 9,5 mm x 25 mm x 150 mm. Os cordões de solda consistiram de uma simples deposição sobre as chapas na posição plana.

As soldas foram realizadas no LABSOLDA da UFPA, para tanto foi utilizada uma célula de soldagem que consistiu de uma fonte de energia microprocessada, multiprocessos e sinérgica, modelo MTE DIGITEC 600; um cabeçote de alimentação de arame STA-20D e um sistema eletromecânico (carro motriz), TARTÍLOPE V1, usado para o controle da velocidade de soldagem e da distância bico de contato peça (DBCP).

Um sistema de aquisição computadorizado constituído de uma placa A/D e do software Oscilos4, para aquisição e monitoramento dos sinais elétricos do arco (corrente e tensão). Este sistema foi utilizado na aquisição de dados e geração de oscilogramas para análise e avaliação do comportamento do arco.

Para o processo GMAW e FCAW utilizaram-se arames da classe AWS ER70S-6 e E71T-1 respectivamente, ambos com 1,2mm de diâmetro na vazão de 15 L/min.

A constante de deposição ( $K_D$ ) definida como a razão entre a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem foi o parâmetro de controle aplicado aos processos de soldagem nas condições ensaiadas. Esse procedimento teve como objetivo manter um referencial constante entre os processos, bem como para diminuir a interferência de qualquer diferença na quantidade de material depositado por comprimento de solda na análise dos resultados.

Testes preliminares foram realizados para definir os parâmetros de soldagem a serem utilizados para cada eletrodo, visando à obtenção de cordões de solda com geometrias similares. Estes parâmetros foram determinados de forma a se obter um arco estável, cordões de solda homogêneos e com bom acabamento superficial. As Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros de soldagem usados para o processo GMAW e FCAW respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem para o processo GMAW

Ensaio	Arame ER70S-6 - Gás CO <sub>2</sub>					
	Va (m/min)	I (A)	U (V)	DBCP (mm)	Vs (cm/mim)	Kd = Va/Vs
1	3,4	150	23,0	15	0,200	17
2	5,2	200	26,0	15	0,200	26
3	7,0	250	28,0	15	0,200	35
Ensaio	Arame ER70S-6 - Gás C25					
	Va (m/min)	I (A)	U (V)	DBCP (mm)	Vs (cm/mim)	Kd = Va/Vs
4	3,5	150	23,0	15	0,206	17
5	5,1	200	26,0	15	0,196	26
6	6,7	250	28,0	15	0,191	35

Tabela 2. Parâmetros de soldagem para o processo FCAW

Ensaio	Arame E71T-1 - Gás CO <sub>2</sub>					
	Va (m/min)	I (A)	U (V)	DBCP (mm)	Vs (cm/mim)	Kd = Va/Vs
7	4,8	150	24,7	15	0,282	17
8	7,0	200	28,2	15	0,269	26
9	8,8	250	31,5	15	0,251	35
Ensaio	Arame E71T-1 - Gás C25					
	Va (m/min)	I (A)	U (V)	DBCP (mm)	Vs (cm/mim)	Kd = Va/Vs
10	4,7	150	24,5	15	0,276	17
11	6,7	200	28,0	15	0,258	26
12	9,0	250	31,1	15	0,257	35

O experimento foi desenvolvido utilizando um planejamento fatorial  $3^1 \times 2^1$ . As variáveis de influência foram a corrente elétrica em três níveis (150, 200 e 250 A), como as soldas foram realizadas no modo tensão constante esses níveis de corrente são conseqüências das condições de soldagem ajustadas e apresentadas nas Tabelas 1 e 2; e o gás de proteção em dois níveis (CO<sub>2</sub> puro e a mistura 75% de argônio + 25% de CO<sub>2</sub>); os gases de proteção foram selecionados de acordo com as recomendações dos fabricantes dos eletrodos e normas recomendadas para o ensaio. A variável de reposta analisada foi os parâmetros geométricos do cordão de solda (penetração, largura, reforço). Foram realizadas 2 réplicas para cada condição, resultando num total de 24 ensaios.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho são apresentados em função da morfologia dos cordões de solda; estabilidade do arco; modelos matemáticos relacionando a morfologia dos cordões de solda com a corrente e gás de proteção para cada processo e a otimização dos modelos. A discussão dos resultados avalia a otimização dos modelos e relaciona sua representatividade com a estabilidade de cada processo.

### 3.1. Características Geométricas dos Cordões de Solda

As características morfológicas dos cordões de solda foram medidas conforme mostrado na macrografia da Figura 1. Em cada cordão foram realizadas três medidas de cada parâmetro geométrico; uma no centro e as outras a 15 mm de cada extremidade do cordão de solda.

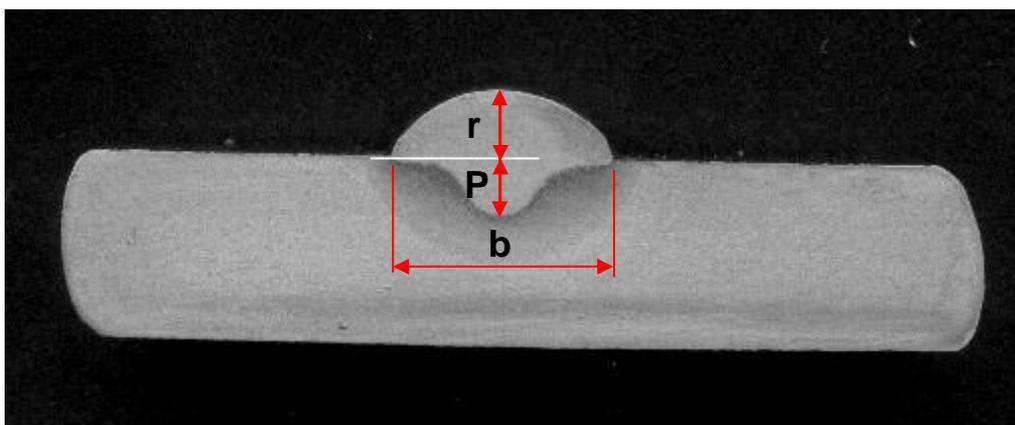


Figura 1. Seção transversal do cordão de solda

Na Tabela 3 são quantificados os parâmetros geométricos penetração (p), largura (b) e reforço (r) dos cordões de solda para os processos GMAW (arame E70S-6) e FCAW (arame E71T-1). Observa-se na tabela os índices usados, para cada nível das variáveis de influência, no desenvolvimento dos modelos matemáticos.

Tabela 3. Parâmetros geométricos para os processos GMAW e FCAW

	GMAW					
	Gás CO <sub>2</sub> (-1)			Gás C25 (1)		
	p (mm)	b (mm)	r (mm)	p (mm)	b (mm)	r (mm)
150 (-1)	2,28	9,28	2,90	2,44	9,50	2,83
200 (0)	3,52	11,36	3,93	3,00	12,97	3,23
250 (1)	4,32	13,75	4,28	3,45	14,84	3,66
	FCAW					
	Gás CO <sub>2</sub> (-1)			Gás C25 (1)		
	p (mm)	b (mm)	r (mm)	p (mm)	b (mm)	r (mm)
150 (-1)	1,30	8,93	2,25	0,83	9,47	2,17
200 (0)	1,47	12,17	2,29	1,42	11,68	2,15
250 (1)	1,55	14,99	2,52	1,58	15,94	2,29

A Tabela 4 apresenta o resultado da análise de variância (ANOVA), dos resultados apresentados na Tabela 3, para uma confiança de 95% ( $\alpha = 5\%$ ). A análise de variância mostrou que para o processo GMAW, todos os parâmetros geométricos (penetração, largura e reforço) foram influenciados pela corrente de soldagem, e que apenas o reforço foi influenciado pelo gás de proteção. Para o processo FCAW, a ANOVA mostrou que a penetração e a largura dos cordões de

solda foram influenciadas apenas pela corrente de soldagem, enquanto o reforço não sofreu nenhuma influência da corrente e do tipo de gás de proteção.

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para a geometria dos cordões de solda

Processo GMAW			
Variável de influência	Nível de significância ( $\alpha$ em %) para a geometria dos cordões de solda		
	Penetração	Largura	Reforço
Corrente (I)	<b>0,7</b>	<b>0,027</b>	<b>0,3</b>
Gás (G)	18,8	11,18	<b>3,4</b>

Processo FCAW			
Variável de influência	Nível de significância ( $\alpha$ em %) para a geometria dos cordões de solda		
	Penetração	Largura	Reforço
Corrente (I)	<b>4,5</b>	<b>0,0012</b>	23,9
Gás (G)	26,9	47,7	17,1

### 3.2. Estabilidade do Arco

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os oscilogramas de corrente e tensão para os processos GMAW e FCAW para as soldagens utilizando o gás CO<sub>2</sub>. Já nas Figuras 4 e 5 são apresentados os oscilogramas de corrente e tensão para os processos GMAW e FCAW para as soldagens utilizando o gás C25. Esses oscilogramas permitem a análise da estabilidade do arco através da regularidade das transferências das gotas.

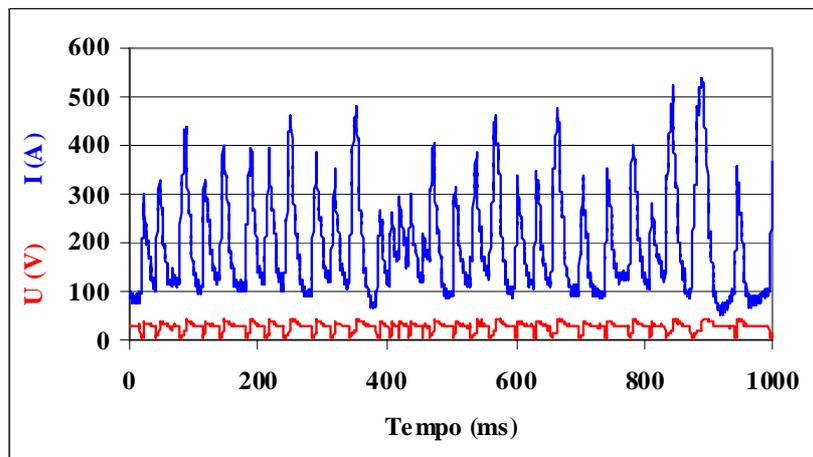


Figura 2 – Oscilogramas para o processo GMAW, I de 200 A e gás CO<sub>2</sub>

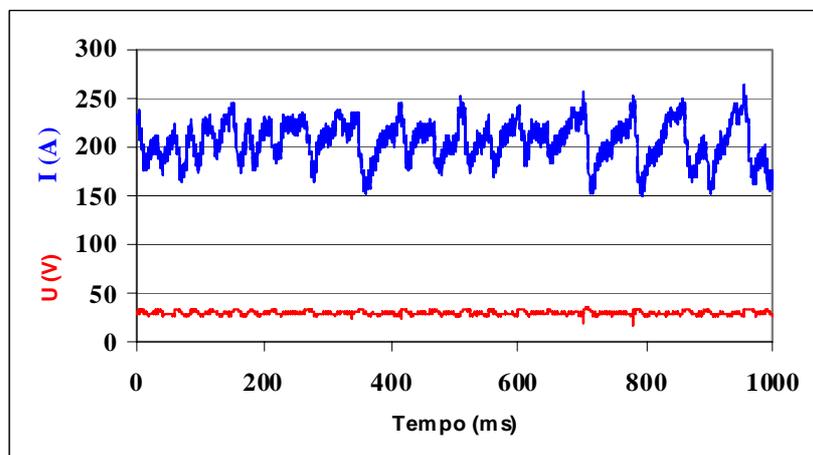


Figura 3 – Oscilogramas para o processo FCAW, I de 200 A e gás CO<sub>2</sub>

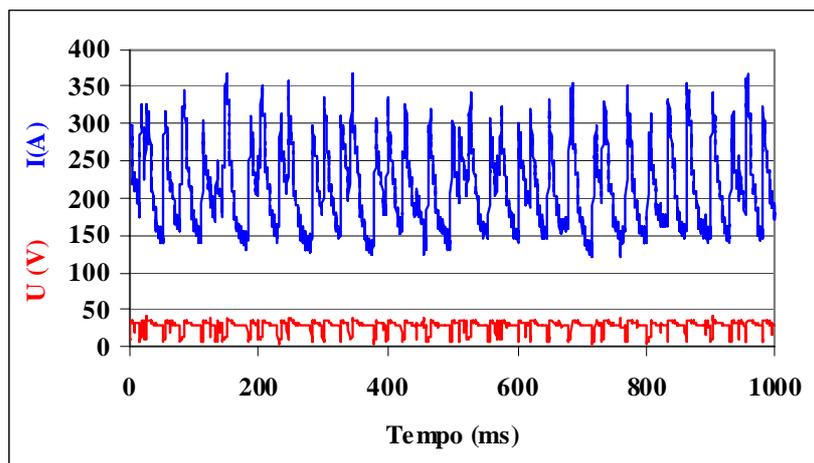


Figura 4 – Oscilogramas para o processo GMAW, I de 200 A e gás C25

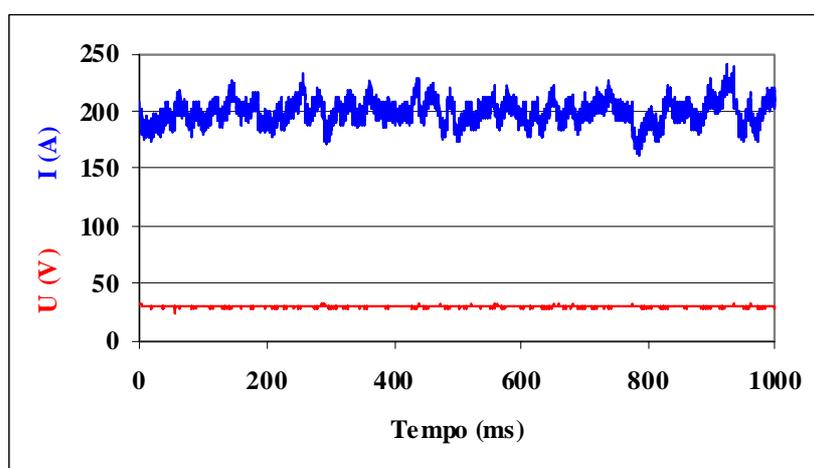


Figura 5 – Oscilogramas para o processo FCAW, I de 200 A e gás C25

Pode ser observado na Figura 2 que o modo de transferência caracteriza-se pela incidência de curtos-circuitos de pequeno tempo de duração, com alguns períodos de instabilidades. Já na Figura 3 observa-se o modo de transferência por spray com gotas em vôo livres.

A análise da Figura 4 mostra que o processo GMAW quando soldado com o gás C25 teve um comportamento semelhante ao observado quando foi soldado com o gás CO<sub>2</sub>, porém a frequência de curto circuito foi mais regular e o arco mais estável. O gráfico da Figura 5 mostra os oscilogramas da corrente e tensão de soldagem, para o processo FCAW utilizando o gás C25. Por esta Figura observa-se que para o gás C25 houve uma maior regularidade de transferência metálica do que quando foi usado o gás CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, uma maior estabilidade.

### 3.3. Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos para a geometria dos cordões de solda, penetração (Equação 1 e Equação 4); largura (Equação 2 e Equação 5) e reforço (Equação 3 e Equação 6) para os processos GMAW e FCAW, respectivamente, foram desenvolvidos em função dos valores da corrente de soldagem e do tipo de gás de proteção (Tabela 3). Os modelos foram obtidos por análise de regressão múltipla (Software comercial). Os índices estatísticos utilizados para avaliar a adequação dos modelos são mostrados na Tabela 5. Quanto maior o Razão-F e menor o Valor-P mais representativo é o modelo do fenômeno estudado, considerando o grau de liberdade. Já o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), que indica o quanto o modelo se adequou aos pontos com que eles foram gerados deve está próximo da unidade. E o erro padrão (EP), dá a idéia do desvio esperado entre os valores experimentais e os valores preditos pelos modelos. Para se determinar o valor predito para

qualquer parâmetro geométrico do cordão de solda, deve-se substituir nas equações a corrente (I) e o gás (G), pelo índice correspondente ao valor desejado ou seja -1 para 150 A; 0 para 200 A e 1 para 250 A; e -1 para o gás CO<sub>2</sub> e 1 para o gás C25, conforme apresentado na Tabela 3. Os modelos matemáticos para prever a morfologia dos cordões de solda para o processo GMAW estão apresentados a seguir:

$$p = 3,16833 + 0,7625 \cdot I - 0,205 \cdot G \quad (1)$$

$$b = 11,94667 + 2,4525 \cdot I + 0,48667 \cdot G \quad (2)$$

$$r = 3,47 + 0,55375 \cdot I - 0,233333 \cdot G \quad (3)$$

Os modelos matemáticos para prever as características geométricas dos cordões de solda para o processo FCAW estão apresentados abaixo:

$$p = 1,35833 + 0,25 \cdot I - 0,081667 \cdot G \quad (4)$$

$$b = 12,195 + 3,13125 \cdot I \quad (5)$$

$$r = 2,275833 + 0,1 \cdot I - 0,074167 \cdot G \quad (6)$$

Tabela 5. Índices estatísticos dos modelos

Processo GMAW			
Índices estatísticos	p	b	r
Razão-F	12,91003	61,10904	15,3757
Valor-P	0,03358	0,003708	0,02650
R <sup>2</sup>	0,825812	0,97604	0,911115
EP	0,31596	0,45660	0,22474
Processo FCAW			
Índices estatísticos	p	b	r
Razão-F	4,5953	166,5004	6,858429
Valor-P	0,12208	0,000208	0,076024
R <sup>2</sup>	0,7539	0,97654	0,82054
EP	0,485333	0,43533	0,072953

A análise da estabilidade do arco elétrico comprovou uma maior estabilidade do processo FCAW. No entanto, a representatividade dos modelos matemáticos desenvolvidos por análise de regressão múltipla mostrou-se independente da estabilidade dos processos de soldagem. Os índices estatísticos da Tabela 5 mostram que os modelos para a penetração e o reforço dos cordões de solda obtidos com o processo GMAW foram mais representativos, maior Razão-F e R<sup>2</sup> e menor Valor-P e EP. Já para a largura dos cordões os índices estatísticos mostraram que o modelo matemático foi mais representativo para o processo FCAW.

### 3.4. Otimização dos Modelos Matemáticos pelo Método da Transformação da Resposta

A análise de melhoria (otimização) dos modelos matemáticos foi realizada pelo método da transformação da potência para a resposta  $Y^\lambda$  (Montgomery e Peck<sup>(10)</sup>). Y representa a resposta estudada (penetração, largura e reforço dos cordões de solda) e  $\lambda$  é o parâmetro a ser determinado de modo que se otimize os modelos, ou seja, os modelos representem melhor o fenômeno estudado.

Ao se usar  $\lambda = -1$ , significa usar  $\frac{1}{Y}$  como resposta e para  $\lambda = 0$ , usa-se a transformação logarítmica  $\ln(Y)$ . O valor ótimo de  $\lambda$  foi obtido ajustando-se o modelo  $Y^\lambda$  para vários valores de  $\lambda$ , e em seguida analisando-se o valor de  $\lambda$  que maximize o índice Razão-F e  $R^2$ , e minimize o índice Valor-P e EP. Neste trabalho  $\lambda$  variou de -2 a 2 em intervalos de 0,25 (Montgomery e Peck<sup>(10)</sup>), o que resultou em 17 valores analisados. Para o processo GMAW o valor  $\lambda$  que melhor representa a penetração, a largura e o reforço são  $\lambda = -2$ ,  $\lambda = 2$  e  $\lambda = -0,5$ , respectivamente, conforme apresentado nas Equações 7, 8 e 9. Já para o processo FCAW os valores foram:  $\lambda = 2$  para a penetração,  $\lambda = 0$  para a largura (transformação  $\ln(b)$ ) e  $\lambda = -2$  para o reforço, como apresentados, respectivamente, nas Equação 10, Equação 11 e Equação 12.

Os modelos matemáticos otimizados para prever as características geométricas dos cordões de solda para o processo GMAW estão apresentados a seguir:

$$p^{-2} = 0,115294 - 0,056006 \cdot I \quad (7)$$

$$b^2 = 147,0738 + 58,2160 \cdot I + 12,3990 \cdot G \quad (8)$$

$$r^{-0,5} = 0,54159 - 0,044027 \cdot I + 0,016583 \cdot G \quad (9)$$

Para o processo FCAW os modelos matemáticos otimizados são:

$$p^2 = 1,902862 + 0,6282 \cdot I - 0,176446 \cdot G \quad (10)$$

$$LN(b) = 2,478311 + 0,259584 \cdot I \quad (11)$$

$$r^{-2} = 0,19463 - 0,015899 \cdot I + 0,01216 \cdot G \quad (12)$$

A Tabela 6 apresenta os índices estatísticos para os modelos matemáticos otimizados para prever as características econômicas para os processos GMAW e FCAW.

Tabela 6. Índices estatísticos dos modelos otimizados

Processo GMAW			
Índices estatísticos	$p^{-2}$	$b^2$	$r^{-0,5}$
Razão-F	21,43669	63,83124	15,89931
Valor-P	0,00981	0,003479	0,025313
$R^2$	0,84275	0,97704	0,913789
EP	0,024193	0,31658	0,01069
Processo FCAW			
Índices estatísticos	$p^2$	$\ln(b)$	$r^{-1}$
Razão-F	6,05964	241,7496	8,296094
Valor-P	0,08839	0,0001	0,059918
$R^2$	0,80157	0,983723	0,8468777
EP	0,0989	0,03339	0,017196

A análise dos índices estatísticos apresentados nas Tabelas 5 e 6 mostram que todos os modelos matemáticos para as características geométricas dos cordões de solda foram otimizados, pois pode ser observado que o índice Razão-F aumentou para todos os modelos, enquanto o índice Valor-P diminuiu, também para todos os modelos. Pode ser observado nas Tabelas 5 e 6 que o índice  $R^2$ , que

indica o quanto o modelo se adequou aos pontos com que ele foi gerado, aumentou para todos os modelos e o índice erro padrão (EP), que dar a idéia do desvio esperado entre os valores experimentais e os valores preditos pelos modelos, diminuiu, também para todos os modelos. Assim, foi possível observar através dos índices estatísticos apresentados que foi possível otimizar os modelos matemáticos aplicando-se o método da transformação da resposta e que os novos modelos tornaram-se mais representativo do fenômeno estudado ou seja das características geométricas dos cordões de solda, nas condições estudadas. Pode ser observado na Tabela 6 que a representatividade dos modelos matemáticos otimizados pelo método da transformação da resposta apresentou o mesmo comportamento dos modelos antes desenvolvidos, ou seja, mostrou-se independente da estabilidade dos processos de soldagem. Os índices estatísticos da Tabela 6 mostram que os modelos para a penetração e o reforço foram mais representativos para o processo GMAW e o modelo para a largura dos cordões para o processo FCAW.

Os resultados dos modelos matemáticos desenvolvidos e otimizados mostram que a representatividade dos mesmos para as características geométricas dos cordões de solda não é influenciada pelo tipo de transferência metálica quando o arco elétrico possui boa estabilidade, para nas condições de ensaio deste trabalho.

#### **4. CONCLUSÕES**

Em função dos objetivos propostos, da metodologia experimental utilizada e dos resultados obtidos e discutidos nesta pesquisa, concluí-se que:

- 1 a análise de variância dos resultados mostrou que a penetração e a largura dos cordões de solda foram fortemente influenciadas pela corrente de soldagem, independentemente do processo de soldagem e tipo de gás de proteção utilizado;
- 2 o reforço foi influenciado pela corrente de soldagem e pelo gás de proteção no processo GMAW, no entanto esse parâmetro não sofreu nenhuma influência das condições de soldagem para o processo FCAW;
- 3 a representatividade dos modelos matemáticos independe da estabilidade do arco nos processos FCAW e GMAW para as condições analisadas no trabalho;
- 4 os modelos matemáticos foram otimizados pelo método da transformação da resposta e tornaram-se mais representativos das características geométricas dos cordões de solda versus corrente de soldagem e gás de proteção.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FINEP e à Petrobras pelo auxílio financeiro que foi importante para a realização do trabalho; à UFPA e ao CEFETPA pela infra-estrutura de seus laboratórios.

#### **6. REFERÊNCIAS**

1. SOLANA P. & OCAÑA, J. L. A mathematical model for penetration laser welding as a free-boundary problem. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30 (1997) 1300–1313.
2. KAPADIA, P., SOLANA, P. & DOWDEN, J. Stochastic model of the deep penetration laser welding of metals. *Journal of Laser Applications*, Volume 10, Issue 4, pp. 170-173, August 1998.
3. WU, P.; ZHANG, W. & BAY, N. Characterization of dynamic mechanical properties of resistance welding machines. *Welding Journal*, 17s – 20s, January, 2005.
4. KI, H., MOHANTY, P. S. & MAZUMDER, J. Modeling of laser keyhole welding: part i. mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 33a, 1817, June, 2002.

5. ZHOU et al. Modeling of hybrid laser-MIG keyhole welding process. ICALOE'03, Jacksonville, Florida, USA. October 13-16, Sec. A, pp. 135-141, 2003.
6. DOWDEN, J. et al. Plasma arc welding: a mathematical model of the arc. J. Phys. D: Appl. Phys. 27 902-910, 1994.
7. WANG, Y & TSAI, H. L. "Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process." International Journal Heat Mass Transfer 44, pp. 2067-2080, 2001.
8. SILVA, José H. F. & ALFARO, Sadek C. Comparison between multiple regression analyze and network techniques on welding geometry mathematical models using synergic pulsed MIG process. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia – SP, 1999.
9. NORRISH, J. "Advanced Welding Processes", Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia and New York - USA. Cap. 4 – Filler Materials for Arc Welding, pp. 57 – 74, 1992.
10. MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. Applied statistics and probability for engineers. New Yory, John Wiley & Sons, 1996.

## **OPTIMIZATION AND COMPARISON OF MATHEMATICAL MODELS FOR THE GEOMETRY OF WELD GMAW AND FCAW**

**José Hilton Ferreira da Silva<sup>1</sup>**

E-mail - [jose.hilton@cefetpa.br](mailto:jose.hilton@cefetpa.br)

**Hélio Antônio Lameira deAlmeida<sup>1</sup>**

E-mail - [almeidahelio@yahoo.com.br](mailto:almeidahelio@yahoo.com.br)

**Carlos Alberto Mendes da Mota<sup>1,2</sup>**

E-mail - [cmota@ufpa.br](mailto:cmota@ufpa.br)

**Eduardo de Magalhães Braga<sup>2</sup>**

E-mail - [edbraga@ufpa.br](mailto:edbraga@ufpa.br)

<sup>1</sup>Federal Center of Technologic Education of the Para, Mechanical Coordination. Belem, Pa, Brazil

<sup>2</sup>Federer University of the Para, Technological Center, Department of Mechanical Engineering.

**Abstract.** *This paper compares mathematical models developed by multiple regression analysis and optimized for the transformation of the power for the reply method ( $Y^2$ ), for the GMAW and FCAW welding processes, and to correlate the representation of the models with the electric arc stability for each processes. The experiment was developed using a factorial planning  $3^1 \times 2^1$ . The influence variable had been the electric current and the kind of gas shield ( $CO_2$  pure and mixture 75% Argon + 25%  $CO_2$ ), and the how these results variables were analyzed the weld filet geometric parameter (weld penetration, width and face reinforcement). The weld filets analyzed were deposited on ABNT 1020 steel sheets. Two reproductions were accomplished to each test condition and the results were analyzed to the trust of 95%. The results showed that mathematical models obtained from multiple regression analysis were optimized; the representatives of mathematical models are independent of the stability of electric arc conditions.*

**Keywords.** *FCAW process; GMAW process; mathematical models, welding parameters.*