

## **OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TECIMENTO PARA CONFEÇÃO DE AMANTEIGAMENTO DE CHAPAS DE AÇO PELO PROCESSO TIG COM ARAME AWS ER 309L**

M.Sc. Rômulo Queiroz Fratari, [eng\\_romulo05@hotmail.com](mailto:eng_romulo05@hotmail.com)<sup>1</sup>

Dra. Mônica M. A. M. Schwartzman, [monicas@cdtn.br](mailto:monicas@cdtn.br)<sup>2</sup>

Dr. Américo Scotti, [ascotti@mecanica.ufu.br](mailto:ascotti@mecanica.ufu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia, MG – Brasil

<sup>2</sup>Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Serviço de Integridade Estrutural, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Bairro Pampulha, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG - Brasil

**Resumo:** *Revestimento por soldagem é amplamente utilizado para aumento de resistência à corrosão e/ou desgaste através da modificação de propriedades superficiais. Um caso especial é o amanteigamento, utilizado como camada de transição para a união de materiais dissimilares. O amanteigamento pode, por exemplo, eliminar a necessidade de realizar alívio de tensões após a soldagem, por produzir uma almofada de alta ductilidade para acomodar as tensões de origem térmicas. Sendo assim, tratamento térmico após soldagem não é realizado, o que evita a exposição dos materiais a elevadas temperaturas. Uma menor diluição com garantia de alta produção é sempre desejável nestes casos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos dos parâmetros de tecimento e da velocidade de alimentação sobre a formação de uma camada de amanteigamento otimizada. Os experimentos foram realizados pelo processo TIG com alimentação de arame AWS ER309L, variando-se sistematicamente, e garantindo-se a ortogonalidade do planejamento experimental, a amplitude, o tempo de parada lateral e a velocidade de alimentação, permitindo se encontrar equações estocásticas de previsões da geometria resultante do depósito. Através de um programa de otimização, procurou-se os parâmetros de regulação que levassem a maior relação da área depositada pela área fundida. Escolheu-se como restritor a relação reforço por largura, evitando-se revestimentos com alta convexidade e possibilidade de formação de sobreposição lateral de cordão. Resultados satisfatórios foram obtidos e confirmados por soldagens de validação.*

**Palavras-chave:** soldagem, TIG, revestimentos, amanteigamento, aço inoxidável

### **1. INTRODUÇÃO**

A soldagem de revestimento pode ser definida como a deposição de um material de adição dissimilar sobre uma superfície metálica para se obter propriedades que não são encontradas no material de base (Filho, 2007). Essa soldagem tem por objetivo, geralmente, um aumento na resistência à abrasão e/ou corrosão do metal base. As razões para se efetuar um revestimento de superfície por soldagem podem ser resumidas da seguinte maneira (Linnert, 1995):

- (A) Reconstrução do material de base para reparar a forma e ajustar as dimensões de uma peça;
- (B) Amanteigamento de uma superfície de um metal de base com camadas de um material dissimilar, que servirá como camada de transição quando a junta subsequente for executada sobre a camada amanteigada;
- (C) Endurecimento superficial com uma camada de composição dissimilar que, por si só, propicia aumento na resistência ao desgaste;
- (D) Revestimento do metal de base com a deposição de uma camada com composição química dissimilar, que proporcionará ao metal de base diferentes propriedades químicas, físicas e/ou metalúrgicas, tais como resistência à corrosão, propriedades magnéticas e elétricas;

Assim, um caso particular de revestimentos por soldagem é a técnica de amanteigamento, que pode ser realizada por várias razões. Por exemplo, alguns ferros fundidos, em soldagem pela técnica a frio, muitas vezes exigem uma camada de ferro quase puro (como um aço ABNT 1005) antes de depositar níquel, devido ao grafite impedir a adesão

do níquel diretamente (Scotti e Ferraresi, 1993). Outra razão seria a possibilidade de acomodar tensões que seriam geradas na interface sobreposta por um material de alta resistência e baixa ductilidade, como, por exemplo, revestimentos duros. Dessa forma, o material de deposição e a operação de amanteigamento devem possuir algumas características em relação ao substrato:

- a) Compatibilidade química com o substrato (por exemplo, não se consegue amanteigar aço com alumínio ou mesmo sobre cobre puro);
- b) Composição que combinada com a do substrato não resulte em soldas com susceptibilidades a trincas;
- c) Alta ductilidade (no caso de se procurar reduzir as tensões geradas pelos passes de união entre os dois componentes);
- d) Baixa diluição, através da seleção de parâmetros (considerando que muitas vezes os custos dos materiais de amanteigamento são superiores ao do substrato);
- e) ZAC no substrato não susceptível a trincas (conseguida pelo controle dos parâmetros, como, por exemplo, fazendo pré-aquecimento, ou conseguindo o revenimento da região grosseira – “o tempering bead”).

Os fatores que podem influenciar as características de um cordão de amanteigamento (diluição, penetração central, penetração lateral e altura de reforço) são variáveis correlacionadas de forma dependente com o processo (nível de corrente, tipo de gás de proteção, diâmetro do eletrodo, comprimento do arco, distância tocha-peça, posição de soldagem, configuração da junta, velocidade de soldagem, taxa de deposição do material de adição, etc.). Em especial, sabe-se o tecimento ou oscilação da fonte de calor tem ação preponderante sobre o amanteigamento. O tecimento é normalmente caracterizado por parâmetros de regulagem, sendo os principais a frequência e amplitude de oscilação e os tempos de parada central e lateral.

A velocidade de deslocamento transversal da fonte de calor ( $V_{tr}$ ), apesar de não regulada no processo de tecimento, é uma variável de grande importância, pois é ela que determina a real distribuição do calor imposto. Como ilustrado pela Figura 1,  $V_{tr}$  é a resultante vetorial da velocidade de soldagem ( $V_{sold}$ ) e da velocidade de oscilação ( $V_{osc}$ ). Esta última, por sua vez, é dependente dos parâmetros de oscilação (amplitude (A), frequência (f) e tempo de parada lateral ( $t_{pl}$ )), conforme a Eq. 1. A Eq. 2 quantifica a relação entre as três velocidades envolvidas.

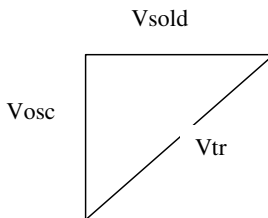


Figura 1: Relação vetorial entre as velocidades de deslocamento longitudinal ( $V_{sold}$ ) e de oscilação ( $V_{osc}$ ), resultando na velocidade transversal ( $V_{tr}$ ) com que a tocha se desloca de um lado para o outro na junta

$$V_{osc} = \frac{2fA}{1-2ft_{pl}} \quad (1)$$

$$V_{tr}^2 = \left(\frac{2fA}{1-2ft_{pl}}\right)^2 + V_{sold}^2 \quad (2)$$

Outra variável do tecimento que pode influenciar o amanteigamento é o volume depositado de material por unidade de comprimento da solda. Este volume é representado pela razão entre a velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem. Para variar o volume depositado de material por unidade de comprimento da solda, deve-se variar a velocidade de alimentação ( $V_{alim}$ ) para uma dada velocidade de soldagem caso não se queira que o volume do amanteigamento seja menor.

Assim, todos parâmetros de regulagem da técnica de tecimento influem na  $V_{tr}$ . Além disto, existe correlação entre os próprios parâmetros de tecimento. Por exemplo, um aumento da frequência altera a relação entre  $t_{pl}$  e o tempo de oscilação, da mesma forma que faz o aumento da amplitude para uma mesma frequência. Fica difícil, então, estudar o efeito de cada parâmetro de tecimento sobre a formação do cordão, já que não há ortogonalidade entre eles (independência). Desta forma, neste trabalho vai se procurar estudar o efeito das variáveis de regulagem da técnica de tecimento sobre a formação do cordão de amanteigamento, mas procurando uma forma de isolar os parâmetros dependentes entre si.

Um outro aspecto importante na operação do amanteigamento é a necessidade de se minimizar a diluição, pois além ser normalmente de maior valor econômico, o material de adição do tecimento tem as propriedades desejadas melhores do que do substrato. Não há sentido, então, misturá-los. Por outro lado, é necessário ter uma alta produção, para tornar a operação viável economicamente. Porém, normalmente produção está relacionada com aumento da energia de soldagem, que leva à maior diluição. Desta forma, um segundo objetivo deste trabalho é também otimizar a regulagem dos parâmetros de tecimento para se conseguir uma relação máxima da área de reforço pela área fundida (quanto maior

a área de reforço, maior a produção e, quanto menor a área fundida, menor a diluição), mas sempre garantido que os cordões não apresentem defeitos geométricos, como convexidade excessiva e sobreposição lateral de cordão (conhecido também por “overlap”).

## 2. METODOLOGIA

Para simular a operação de amanteigamento, se propôs depositar cordões sobre chapa de aço carbono na posição plana, pelo processo TIG com alimentação de arame. Os parâmetros de interesse para a análise da influência do tecimento sobre as características do cordão de amanteigamento foram definidos de modo a possuir a maior independência possível entre si, como será explicado adiante. Uma vez definidos, através de um planejamento experimental por fatorial completo ( $3^3$ ), e após a realização das soldagens e das medições e cálculos necessários, equações preditivas foram obtidas (pelo método de regressão linear) para os parâmetros de saída desejados (definidos também a seguir). Finalmente, de posse dessas equações, uma otimização do processo (em função dos parâmetros de entrada tomados) foi realizada, objetivando a maximização da equação preditiva objetiva, desde que as restrições fossem obedecidas. Para confirmar a metodologia, validação da otimização foi feita pela realização de novas soldas e medições e cálculos de fatores.

### 2.1. Definição dos fatores de entrada

A velocidade de alimentação do arame é um fator totalmente independente no processo TIG. Pode-se variar, dentro de uma faixa operacional, sem alterar qualquer outro parâmetro. Já se a frequência, o tempo de parada lateral e a amplitude são eleitos fatores ao mesmo tempo, ao se variar a amplitude para uma dada frequência e tempo de parada lateral, a velocidade transversal mudaria, o que mascararia os resultados (o efeito não seria da amplitude e/ou da frequência, por exemplo, mas sim deles conjuntamente com a da velocidade transversal). Desta forma, decidiu-se manter as velocidades de soldagem e transversal constantes (permitindo que o calor fornecido ao cordão durante o deslocamento de um lado ao outro seja o mesmo) e usar como fatores a amplitude e o tempo de parada lateral, deixando que a frequência fosse uma variável regulável que me permitisse alcançar a velocidade transversal desejada, para cada regulagem de amplitude e/ou tempo lateral. Adotou-se então, a amplitude de oscilação ( $A$ ), o tempo de parada lateral ( $t_{pl}$ ) e a velocidade de alimentação do arame ( $V_{alim}$ ) como parâmetros para a análise da influência sobre as características do cordão de amanteigamento.

Visto que as velocidades de deslocamento transversal ( $V_{tr}$ ) e de soldagem ( $V_{sold}$ ) foram mantidas constantes, a velocidade de oscilação ( $V_{osc}$ ) também permaneceu constante. A Eq. 3 estabelece a relação entre duas situações diferentes (variando a amplitude e/ou o tempo de parada lateral).

$$V_{osc1} = V_{osc2} \quad (3)$$

$$2f_1 A_1 / (1 - 2f_1 t_{pl1}) = 2f_2 A_2 / (1 - 2f_2 t_{pl2})$$

### 2.2. Especificação dos fatores de saída (respostas)

O objetivo é obtenção de revestimentos com baixa diluição (baixo  $af$ ) e alta deposição (alto  $ar$ ). Por isto deve-se otimizar a relação  $ar/af$ , onde,  $ar$  é a área de reforço e  $af$  a área fundida. Entretanto algumas restrições devem ser levadas em consideração:

- a) Convexidade (quanto menor, melhor):

Uma das formas de se medir a convexidade é através do ângulo de concordância entre metal depósito e o substrato, conhecido como ângulo de molhabilidade. Em função dos cordões apresentarem perfis irregulares e variáveis ao longo de seu comprimento, uma medição da convexidade pelo ângulo se torna difícil. Outra forma seria utilizar as dimensões lineares de  $r$  e  $l$  (reforço e largura), pois, de uma forma geral, pode-se esperar que quanto menor a relação  $r/l$ , menor será a convexidade do cordão. Por outro lado, pode haver situações em que essa relação não se aplicaria. Nesse caso, devido à amplitude de tecimento, pode acontecer do reforço aumentar quando a área depositada for maior (maior relação  $r/l$ ) sem corresponder a uma variação na convexidade. Entretanto, essas situações só ocorreriam para valores muito altos de convexidade (quando o aumento do volume não conseguiria mais alterar o ângulo de molhabilidade), fato não incidente no presente trabalho.

- b) Formação de “sobreposição lateral do cordão” (quanto menor, melhor)

A “sobreposição lateral do cordão” consiste na formação de cordões com ângulos de concordância entre depósito e substrato menores que 90°. Cordões com a formação de “sobreposição lateral do cordão” são indesejáveis por impedirem a ligação do cordão que seria depositado ao lado. Observou-se que há uma relação também entre  $r/l$  e a “sobreposição lateral do cordão”, ou seja, a “sobreposição lateral do cordão” sempre ocorre quando a molhabilidade do cordão no substrato é baixa. Desta forma, para se prevenir deste problema pode-se usar o mesmo parâmetro para evitar alta convexidade.

### 2.3. Especificação dos parâmetros de soldagem fixos

As variáveis dependentes do processo (nível de corrente, tipo de gás de proteção, diâmetro do eletrodo, comprimento do arco, distância tocha-peça, posição de soldagem, configuração da junta e velocidade de soldagem) foram fixadas objetivando o estudo isolado do efeito das variáveis de tecimento (amplitude e tempo de paradas lateral) e da velocidade de alimentação sobre as características do cordão de amanteigamento (área de reforço, área fundida, reforço e largura).

Tabela 1: Parâmetros de regulação do processo cujos níveis foram fixos durante a execução do planejamento

Fatores fixos	Valores
Velocidade transversal	24 mm/s
Velocidade de soldagem	2,0 mm/s
Intensidade de corrente	180 A
Junta	Cordão sobre a chapa na posição plana
Ângulo de ataque da tocha	Ângulo = 10 <sup>0</sup> empurrando
Gás de Proteção	Argônio comercial (99,995%)
Vazão	13 L/min
Tipo de material de base	Aço ABNT 1020
Tipo do material de adição	AWS ER309L
Diâmetro dos arames de adição	1,0 mm
Eletrodo TIG	AWS EWTh-2 / 3,2 mm
Ângulo de entrada da alimentação	70 <sup>0</sup>

## 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Foram usados para se fazer cordões barras de aço carbono ABNT 1020, com dimensões de 200 mm de comprimento, 50 mm de largura e espessura de 6.4 mm. O processo TIG foi utilizado na forma convencional, com alimentação automatizada de arame, corrente contínua e polaridade direta (CC-). A fonte de soldagem foi uma transistorizada com chaveamento no secundário, trabalhando no modo característica estática de corrente constante. Utilizou-se um alimentador de arame adaptado para as baixas velocidades de alimentação demandadas. Para a movimentação do sistema tocha, utilizou-se uma mesa de coordenadas para soldagem SOLDAMATIC XYZ-T, que possibilitou a realização de depósitos lineares com oscilações, por meio de uma interface na qual se estabelece os valores de amplitude, frequência, tempo de parada lateral, velocidade de soldagem e trajetória a ser percorrida

O ângulo de ataque (10° empurrando) foi escolhido para propiciar menores penetrações e condições satisfatórias de proteção gasosa. A entrada do arame (pela frente do arco através da poça), assim como o ângulo de entrada do arame (70° em relação à tocha), foram selecionados para que o arame se fundisse no momento em que tocasse a poça de fusão, diminuindo a quantidade de calor que seria fornecida para a fusão do metal base.

Após a obtenção dos cordões, seções transversais para análise macrográfica foram retiradas a um terço do cordão, a partir do início. Foram, então, embutidas e lixadas até a lixa #600 e atacadas com NITAL 2%. As características geométricas do depósito, como as áreas de reforço e fundida foram medidas através de 1 seção transversal dos cordões, com o auxílio de uma câmera Hitachi KP-110 acoplada a um sistema de aquisição de imagens Global Lab Acquire e através do software de análise de imagens Global Lab Image. Os valores de reforço e largura foram medidos por um paquímetro, 7 medidas tiradas sobre o cordão.

### 3.1. Determinação exploratória dos limites dos fatores

#### 3.1.1. Velocidade de alimentação

Foram realizados ensaios preliminares objetivando a determinação do valor máximo de velocidade de alimentação que possibilitasse a soldagem de forma operacional (evitando o toque do arame com a poça, o que poderia resultar na extinção do arco). Observou-se que para valores de velocidade de alimentação acima de 55 mm/s o calor fornecido pelo arco não foi suficiente para fundir o arame antes que ele alcançasse a chapa, resultando no contato do arame com a poça e conseqüente extinção do arco. Dessa forma, adotou-se o valor de 52,5 mm/s como valor máximo de velocidade de

alimentação do arame. Devido à necessidade de se utilizar três valores de velocidade de alimentação normalizados, utilizou-se o limite superior como ponto de partida (52,5 mm/s real) e os valores de 23,5 mm/s e 38 mm/s como os demais valores. O valor mínimo (23,5 mm/s) foi adotado por ser aquele que propiciou a obtenção de cordões com volume aceitável, a partir de ensaios preliminares.

### 3.1.2. Frequência, amplitude e tempo de parada lateral

Inicialmente, foram realizados ensaios com uma amplitude de 6 mm e  $t_{pl}$  de 0,15 s. Valores de frequências muito baixos (menores que 1 Hz) resultaram em cordões de alta convexidade. Já para uma amplitude de 12 mm, valores de frequência abaixo de 0,75 Hz resultaram em cordões muito irregulares com regiões não fundidas. Dessa forma, adotou-se a frequência de 1 Hz para amplitude de 12 mm e  $t_{pl}$  nulo. Os valores de frequência para as demais situações foram calculados a partir da Eq. 3, visto que o objetivo foi o de manter constante a velocidade de deslocamento transversal e, conseqüentemente, a velocidade de oscilação (pois a velocidade de soldagem também é mantida constante). Como o equipamento aceita valores de frequência de 0 a 5 Hz, a menor amplitude adotada, em função dos valores de frequências, foi de 3 mm. Valores abaixo de 3 mm resultariam em frequências que ultrapassariam o limite de 5 Hz.

Outro ponto importante diz respeito ao tempo de parada lateral ( $t_{pl}$ ) não exceder o limite de 40 % do período total de oscilação ( $T=1/f$ ). Dessa forma, para um  $t_{pl}$  de 0,15s a frequência não pode exceder o valor de 2,66 Hz enquanto para um  $t_{pl}$  de 0,30s a frequência não pode ultrapassar 1,33 Hz. A Tabela 2 mostra os valores de amplitude e de tempo de parada lateral que foram adotados, com suas respectivas frequências.

Tabela 2: Valores de amplitude e tempo de parada lateral adotados e suas respectivas frequências

A (mm)	$t_{pl}$ (s)	f (Hz)
12,0	-	1,0
7,5	-	1,6
3,0	-	4,0
12,0	0,15	0,77
7,5	0,15	1,08
3,0	0,15	1,82
12,0	0,30	0,625
7,5	0,30	0,82
3,0	0,30	1,18

### 3.2. Planejamento experimental

O planejamento experimental adotado foi um planejamento fatorial completo de três variáveis e três níveis ( $3^3$ ). A Tabela 3 mostra as variáveis independentes envolvidas neste estudo e respectivos níveis. As análises estatísticas dos resultados foram feitas com o auxílio do software Estatística 6.0, possibilitando a escolha do planejamento, das variáveis independentes (e possíveis interações), da variável dependente em questão e após a utilização do método de regressão linear evidenciou os coeficientes de cada termo da equação preditiva desejada (usando os fatores na forma normalizada, de -1 a + 1).

Tabela 3: Fatores e níveis utilizados propostos para o planejamento experimental

	-1	0	1
Amplitude (mm)	3	7,5	12
Tempo de parada lateral (s)	0	0,15	0,30
Velocidade de alimentação (mm/s)	23,5	38,0	52,5

Foram obtidas equações preditivas (objetiva e restritiva) para ar, af, r e l em separado e depois as equações foram arranjadas de modo a se obter ar/af (objetiva) e r/l (restritiva). Adquiriram-se também equações preditivas a partir dos valores de ar/af e r/l. As análises estatísticas puderam comprovar quais as melhores equações preditivas a serem adotadas, se as equações de r, l, ar e af obtidas em separado ou as equações obtidas para as relações r/l e ar/af, em função de valores tais como, desvio padrão, tendências estatísticas, coerência das equações com o esperado pela teoria.

### 3.3. Otimização dos parâmetros

A otimização da equação objetiva (ar/af) respeitando a equação restritiva (r/l) foi feita por meio de um comando de otimização do software Matlab®, chamado "fminimax", que calcula o mínimo ou o máximo de uma função

de multivariáveis por meio de uma estimativa inicial. Para tal, criaram-se dois comandos com extensão “m”, um onde se insere a função que se queira fazer a otimização (fminimax) e outro onde se estabelece a função da restrição necessária (restineq). O programa faz a minimização de um fator, sendo, assim, necessário que a equação objetiva seja elevada a -1. Já o programa propriamente dito de otimização é composto pelo valor da estimativa inicial, dos limites de cada variável e de opções da otimização, tais como número máximo de iterações, tolerância e o tipo de otimização.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 mostra a identificação das amostras (N) com as correspondentes variáveis independentes (amplitude, A, tempo de parada lateral,  $t_{pl}$ , e velocidade de alimentação,  $V_{alim}$ ) e os valores obtidos para área de reforço (ar), área fundida (af), reforço (r), largura (l) e as relações r/l e ar/af.

Tabela 4: Características geométricas relativas aos ensaios para determinação da influência dos parâmetros de oscilação

N	A (mm)	$t_{pl}$ (s)	$V_{ali}$ (mm/s)	ar (mm <sup>2</sup> )	af (mm <sup>2</sup> )	ar/af	r (mm)	l (mm)	r/l
1	3	0	23,5	8,16	14,39	0,567	1,56	7,14	0,218
2	3	0	38,0	3,41	7,57	1,772	2,70	6,39	0,423
3	3	0	52,5	19,36	5,14	3,767	3,64	6,11	0,596
4	3	0,15	23,5	7,96	13,24	0,601	1,31	7,66	0,171
5	3	0,15	38	11,20	3,24	3,457	2,59	6,14	0,422
6	3	0,15	52,5	15,58	3,80	4,100	3,29	6,18	0,532
7	3	0,3	23,5	8,26	11,46	0,721	1,63	7,83	0,208
8	3	0,3	38	12,58	6,33	1,987	2,35	7,09	0,332
9	3	0,3	52,5	18,43	4,00	4,608	3,49	6,49	0,539
10	7,5	0	23,5	8,99	11,81	0,761	1,36	9,56	0,142
11	7,5	0	38	12,46	7,75	1,608	2,04	9,27	0,220
12	7,5	0	52,5	17,24	5,76	2,993	2,47	8,89	0,278
13	7,5	0,15	23,5	8,80	12,66	0,695	1,07	11,10	0,097
14	7,5	0,15	38	12,22	8,46	1,444	1,76	10,52	0,167
15	7,5	0,15	52,5	17,52	4,25	3,995	2,51	10,02	0,250
16	7,5	0,3	23,5	7,91	14,29	0,554	1,10	11,62	0,095
17	7,5	0,3	38	13,36	8,73	1,530	1,65	10,82	0,152
18	7,5	0,3	52,5	17,73	6,17	2,842	2,39	10,27	0,233
19	12	0	23,5	13,45	7,41	1,815	1,41	12,17	0,116
20	12	0	38	15,83	6,44	2,459	1,79	11,97	0,150
21	12	0	52,5	17,92	6,92	2,589	2,09	12,33	0,169
22	12	0,15	23,5	8,28	11,75	0,705	0,79	14,85	0,053
23	12	0,15	38	13,25	8,40	1,578	1,14	15,72	0,072
24	12	0,15	52,5	19,42	5,03	3,861	1,76	14,46	0,122
25	12	0,3	23,5	9,12	14,36	0,635	0,88	17,10	0,051
26	12	0,3	38	14,14	8,19	1,727	1,18	15,63	0,075
27	12	0,3	52,5	16,59	5,87	2,826	1,87	15,05	0,124

#### 3.1. Determinação da equação preditiva para a relação restritiva r/l

Foram obtidas equações para o reforço, a largura em relação r/l. A análise dos resíduos estatísticos para as equações obtidas a partir das medições realizadas pelo programa mostrou distribuição aleatória, sem tendências e os valores observados possuíram boa concordância com os valores preditos. Pela comparação entre as equações obtidas em separado e a equação obtida para a relação r/l, observou-se que o comportamento em ambas situações foi similar ao esperado pela teoria, onde um aumento na amplitude resultou em aumento na largura e queda no reforço e, por conseguinte, queda na relação r/l. Da mesma forma, um aumento no  $t_{pl}$  causou queda no reforço e aumento na largura, diminuindo a relação r/l enquanto um aumento na velocidade de alimentação resultou em aumento na relação r/l. Entretanto, uma análise dos gráficos de valores preditos x observados evidenciou que a equação obtida para a relação r/l foi menos tendenciosa que as equações obtidas para r e l em separado.

Adotou-se, portanto, como equação preditiva para relação restritiva r/l, aquela obtida a partir das medições realizadas para os valores de r/l, conforme a Eq. 4.

$$\frac{r}{L} = 0,0475 - 0,034 A + 0,003 A^2 - 0,1857 t_{pl} + 0,0149 V_{al} - 0,0011 A V_{al} \quad (4)$$



### 3.2. Definição da restrição (r/l)

A relação r/l obtida variou de valores em torno de 0,05 (Figura 2a) a 0,60 (figura 2b). Para definir um valor limite de r/l para ser adotado como restritor, tanto para alta convexidade como para ocorrência de “sobreposição lateral do cordão”, visualizou-se as imagens das seções transversais dos cordões e definiu-se subjetivamente geometrias como aceitáveis e não aceitáveis. Assim, como o objetivo da restrição é minimizar a convexidade do cordão, bem como anular a possibilidade de ocorrência de “sobreposição lateral do cordão”, escolheu-se arbitrariamente (pela visualização) como condição restritiva, situações onde a relação r/l não atingisse valores maiores ou iguais a 0,15.

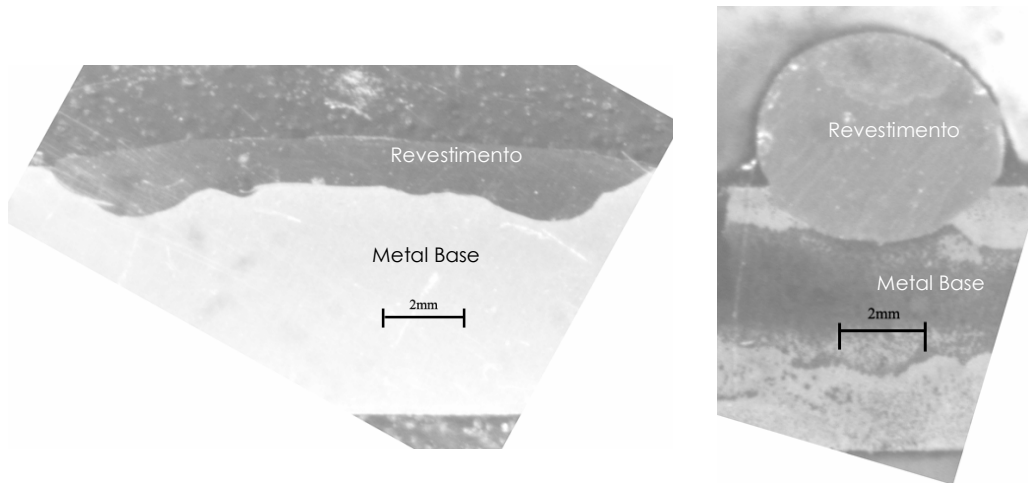


Figura 2: Seções transversais de dois cordões. À esquerda ( $A=12$  mm;  $t_{pi}=0,15$  s;  $V_{ali}=23,5$  mm/s), com  $r/l=0,05$  (baixíssima convexidade e inexistência de “sobreposição lateral do cordão”); À direita ( $A=3$  mm;  $t_{pi}=0$  s;  $V_{ali}=52,5$  mm/s), com  $r/l=0,6$  (alta convexidade e início da ocorrência de “sobreposição lateral do cordão”)

### 3.3. Obtenção da equação preditiva objetiva de ar/af

Obtiveram-se equações para os valores de ar, af e para a relação ar/af. Essas equações apresentaram razoável ajuste ( $R^2 > 0,81$ ) e boa representabilidade pela análise de resíduo. Optou-se pelo uso do preditor de ar/af, pois esta relação representa melhor o objetivo da maximização do que os valores preditos de ar e af em separado. A Figura 3 evidencia os valores observados x preditos e análise de resíduo para a relação ar/af.

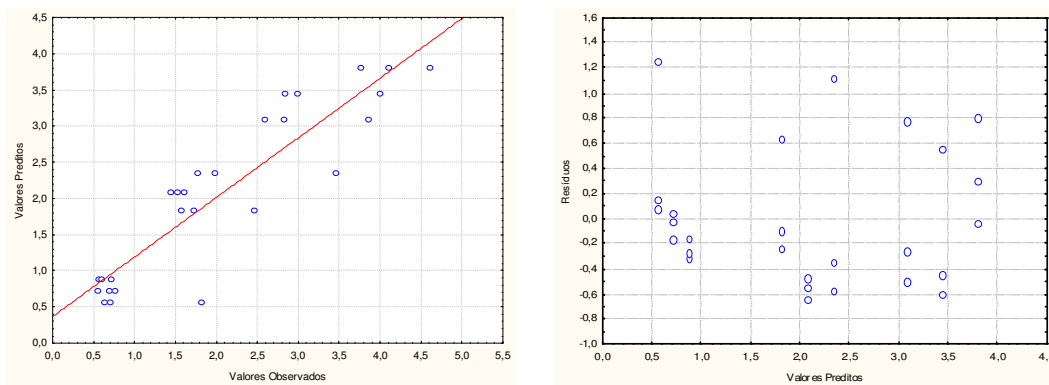


Figura 3: Valores Observados x valores preditos e resíduos para a relação ar/af

Dessa forma, a equação preditiva objetiva obtida para os valores de ar/af foi adotada (Eq. 5) e utilizada para a otimização do processo.

$$\frac{ar}{af} = -1,4897 + 0,1053V_{al} - 0,0015AV_{al} \quad (5)$$

Por esta equação, pode-se verificar que com o aumento na velocidade de alimentação, a relação ar/af aumentou visto que houve um aumento na quantidade de material depositado e, conseqüentemente, parte do calor que seria fornecido

para fundir a chapa foi retirada para fundir essa maior quantidade de material adicionado (aumentou ar e diminuiu af). Com relação à amplitude, ao se elevar seus valores, como consequência do aumento na largura e da pequena queda no reforço e na penetração, houve um aumento tanto nos valores de área de reforço quanto nos valores de área fundida. Entretanto, a área fundida aumentou mais que a área de reforço e, por conseguinte, houve decréscimo na relação ar/af. Quanto ao tempo de parada lateral, um aumento em seus valores não deve alterar a relação ar/af, uma vez que, há um maior espalhamento da poça fundida, aumentando a largura e diminuindo tanto a penetração quanto o reforço.

### 3.4. Otimização

De posse das equações preditivas (restritiva e objetiva), pôde-se enunciar uma relação otimizada, na qual se tem a maximização da relação ar/af (alta produção e baixa diluição), mas garantindo que a restrição  $r/l < 0,15$  fosse respeitada (atendendo o efeito de convexidade e “sobreposição lateral de cordão”).

O valor da estimativa inicial foi escolhido como os valores de limites inferiores dos fatores, ou seja, 3,0 mm (A), 0 s ( $t_{pl}$ ) e 23,5 mm/s ( $V_{alim}$ ). Já o limite superior foi de 12,0 mm (A), 0,3 s ( $t_{pl}$ ) e 52,5 mm/s ( $V_{alim}$ ), pois não se desejava extrapolar ao envelope estudado. O número de iterações foi limitado pela equação restritiva ( $r/l < 0,15$ ), não sendo necessária sua definição. Optou-se por uma tolerância de 95% de confiabilidade, enquanto o tipo de otimização foi o de minimax. Após rodar o programa, obtiveram-se os valores de amplitude, tempo de parada lateral e velocidade de alimentação que maximizaram a relação ar/af. A  $V_{alim}$  ótima foi o valor máximo adotado no planejamento (52,5 mm/s), enquanto o  $t_{pl}$  ótimo foi o valor mínimo adotado (nulo). Já a amplitude ótima foi um valor intermediário. A Figura 4 mostra uma imagem da amostra 12 (A=7,5 mm) e outra da amostra 21 (A=12 mm). A partir desta figura, pode-se observar que o cordão obtido para A=7,5 mm (amostra 12), apesar de possuir uma boa relação ar/af, apresentava convexidade além da desejada. Por outro lado, o cordão obtido para A=12 mm satisfaz a restrição imposta ( $r/l < 0,15$ ), mas com baixo valor para a relação ar/af. Ilustra-se, assim, que a amplitude ótima calculada (9,1 mm) se encontra entre esse intervalo de amplitude (7,5 – 12 mm).

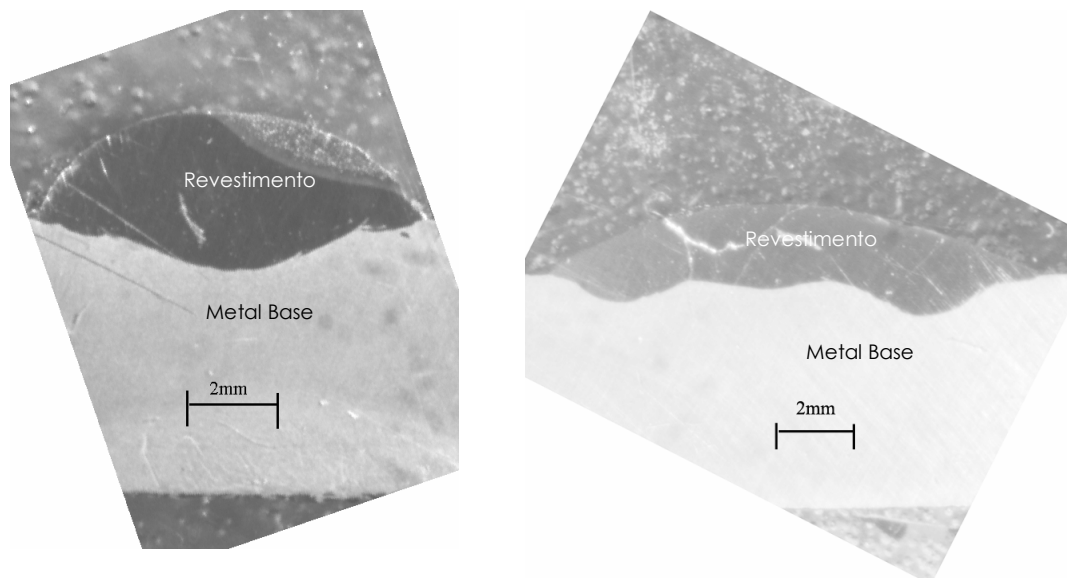


Figura 4: Seção transversal de soldagens feitas para otimização de parâmetros de tecimento. À esquerda, A = 7,5 mm (ar/af = 2,99 e  $r/l = 0,28$ ); À direita, A = 12 mm (ar/af = 2,59 e  $r/l = 0,17$ )

### 4.5. Validação dos parâmetros otimizados

Para avaliação da repetibilidade experimental, procurou-se realizar soldagens de replicagem de duas soldagens iniciais, procurando condições paramétricas que levassem à alta convexidade (A = 3 mm;  $t_{pl} = 0$  s;  $V_{alim} = 52,5$  mm/s) e à baixa relação ar/af (A = 12 mm;  $t_{pl} = 0,3$  s;  $V_{alim} = 23,5$  mm/s), as quais foram tratadas como AC e BAR, respectivamente. Pôde-se observar em ambos os casos perfis de cordão bem similares, demonstrando a repetibilidade. Mas, por outro lado, a não concordância exata dos valores de ar/af e  $r/l$  indicam ser esperado erros aleatórios. Também foi feita uma soldagem na condição encontrada otimizada (A = 9,1 mm;  $t_{pl} = 0$  s;  $V_{alim} = 52,5$  mm/s), tratada como OT, para validação do método de otimização dos parâmetros de tecimento. A seção transversal desta soldagem é mostrada na Figura 5. Pode-se observar que a diluição foi baixa (pequena área fundida) enquanto a área de reforço foi alta (alta produção) sem, no entanto, ultrapassar os limites de convexidade.

A Tabela 5 mostra a quantificação da avaliação geométrica dos cordões das soldagens. Conforme esperado, apesar da amostra AC apresentar um valor elevado para a relação ar/af (> 3), o valor de  $r/l$  foi muito alto (0,43) o que comprova a alta convexidade. Com relação à amostra BAR, apesar da baixa convexidade ( $r/l = 0,06$ ), o valor de ar/af



foi muito baixo ( $\approx 0,7$ ) em função da alta diluição. Já a amostra OT apresentou um alto valor para a relação  $ar/af$  ( $\approx 3,2$ ), sendo muito próximo do valor esperado (conforme a otimização) que era de aproximadamente 3,3. Já o valor da relação  $r/l$  para a amostra OT foi de 0,19, que, apesar de acima do valor restritivo (0,15), não apresentou alta convexidade nem “sobreposição lateral do cordão”.

Tabela 5: Valores de regulagem dos parâmetros de tecimento e valores obtidos das características geométricas dos revestimentos

Amostra	Regulagem			Medidos				Calculados	
	A (mm)	$t_{pl}$ (s)	Vali (mm/s)	ar (mm <sup>2</sup> )	af (mm <sup>2</sup> )	r (mm)	l (mm)	(r/l)	ar/af
AC	3	0	52,5	21,31	7,60	3,13	7,34	0,43	3,10
Am. 03	3	0	52,5	19,36	5,14	3,64	6,11	0,60	3,80
BAR	12	0,3	23,5	11,34	15,49	1,04	16,26	0,06	0,73
Am. 25	12	0,3	23,5	9,12	14,36	0,88	17,10	0,05	0,64
OT	9,1	0	52,5	20,69	6,09	2,12	11,02	0,19	3,23

Pode-se dizer, então, que a repetibilidade experimental na obtenção dos cordões de amanteigamento foi comprovada e os valores otimizados de amplitude, tempo de parada lateral e velocidade de alimentação foram validados, obtendo-se cordões com alta relação  $ar/af$  (alta produção e baixa diluição) e convexidade satisfatória.

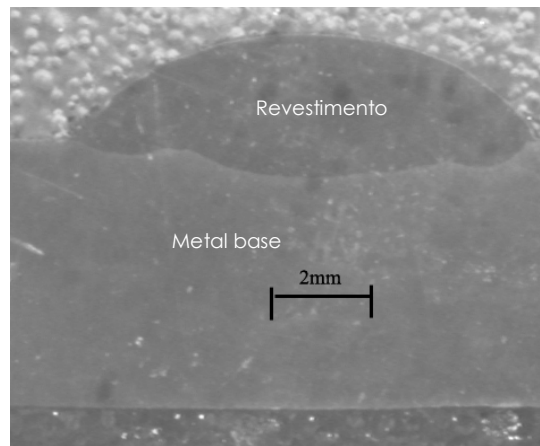


Figura 5: Amostra com regulagem de parâmetros que levassem à condição otimizada (OT), com  $ar/af = 3,23$  e  $r/l = 0,19$

Conforme esperado, apesar da amostra AC apresentar um valor elevado para a relação  $ar/af$  ( $> 3$ ), o valor de  $r/l$  foi muito alto (0,43) o que comprova a alta convexidade. Com relação à amostra BAR, apesar da baixa convexidade ( $r/l = 0,06$ ), o valor de  $ar/af$  foi muito baixo ( $\approx 0,7$ ) em função da alta diluição. Já a amostra OT apresentou um alto valor para a relação  $ar/af$  ( $\approx 3,2$ ), sendo muito próximo do valor esperado (conforme a otimização) que era de aproximadamente 3,3. Já o valor da relação  $r/l$  para a amostra OT foi de 0,19, que, apesar de acima do valor restritivo (0,15), não apresentou alta convexidade nem sobreposição lateral de cordão.

Pode-se dizer, então, que a repetibilidade experimental na obtenção dos cordões de amanteigamento foi comprovada e os valores otimizados de amplitude, tempo de parada lateral e velocidade de alimentação foram validados, obtendo-se cordões com alta relação  $ar/af$  (alta produção e baixa diluição) e convexidade satisfatória.

#### 4. CONCLUSÕES

As equações obtidas para  $ar/af$  e  $r/l$  a partir do planejamento experimental adotado possuem concordância com o esperado previamente. Naturalmente  $ar$  é governado apenas pela velocidade de alimentação (diretamente proporcional). Foi observada uma tendência do aumento da velocidade de alimentação diminuir  $af$ , mostrando-se seu aumento ser favorável para a obtenção do cordão otimizado. Já o aumento do tempo de parada lateral tende a aumentar  $af$ , devido ao crescimento de  $l$ , por isto seu valor deve ser mantido ao mínimo em amanteigamentos. Finalmente, o aumento da amplitude diminui a relação  $ar/af$ , mas por outro lado amplitudes baixas favorecem cordões com alta convexidade e com possibilidade de sobreposição lateral de cordão.

Portanto, os valores de regulagem de parâmetros ( $A=9,0$  mm;  $t_{pl}=0$  s e  $V_{alim}=52,5$  mm/s) obtidos a partir da otimização da relação  $ar/af$ , respeitando a restrição de  $r/l < 0,15$ , é uma balanceamento favorável dos 3 fatores. Conclui-

se, pois, que a metodologia adotada de isolar os fatores de entrada de forma a só usar parâmetros independentes foi capaz de identificar o efeito de cada parâmetro livre de tecimento e que, pela otimização, os parâmetros obtidos podem ser adotados para deposições futuras onde se deseja amanteigar com aço inoxidável ER 309L de forma otimizada.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ pelo fornecimento de bolsas de estudo para doutoramento e bolsa de pesquisa. Ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda) da UFU pelo oferecimento de toda infra-estrutura laboratorial para realização dos experimentos. À SANDVIK pela doação do rolo de arame AWS ER 309L e à White Martins Gases Industriais pelo fornecimento do gás de proteção.

## 6. REFERÊNCIAS

- FILHO, I. G. S.; Estudo da influência dos parâmetros de soldagem de revestimento resistente à corrosão na diluição pelo processo TIG modalidade arame-quente, Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- LINNERT, G. E.; Welding Metallurgy – Carbon e Alloy Steels. Miami: American Welding Society, 4ª edição, p. 628, 1995.
- SCOTTI, A. & FERRARESI, V.A., Recuperação de uma engrenagem de ferro fundido em indústria de couro. Manutenção, no. 45, Nov/Dez 1993, ABRAMAN, pp. 36-39

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

# WEAVING PARAMETER OPTIMIZATION FOR THE BUTTERING OF STEEL PLATES BY TIG PROCESS WITH AWS ER309L WIRE

M.Sc. Rômulo Queiroz Fratari, [eng\\_romulo05@hotmail.com](mailto:eng_romulo05@hotmail.com)<sup>1</sup>

Dra. Mônica M. A. M. Schwartzman, [monicas@cdtn.br](mailto:monicas@cdtn.br)<sup>2</sup>

Dr. Américo Scotti, [ascotti@mecanica.ufu.br](mailto:ascotti@mecanica.ufu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Uberlândia, Faculty of Mechanical Engineering, 38400-902, Uberlândia, MG – Brazil

<sup>2</sup>Center for Development of Nuclear Technology, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Bairro Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, MG - Brasil

**Abstract:** Surfacing carried out by welding is widely used for increasing corrosion and/or wear resistance through modification of the material superficial properties. A special case of welding surfacing is the technique called “buttering”, used as a transition layer at the union of dissimilar materials. Buttering can, for instance, eliminate the need to accomplish stress relief treatment after welding due to a high ductility cushion that accommodates stress from thermal origin. A no use of thermal treatment avoids material exposure to high temperatures. A smaller dilution with warranty of high production is always desirable in these cases. The objective of the present work was to evaluate the effects of the weaving parameters and the wire feed speed on the formation of an optimized buttering layer. The experiments were accomplished by the TIG process with wire feeding. Weaving amplitude, lateral dwell time and wire feed speed were systematically varied, through an orthogonal experimental planning, allowing finding stochastic predictive equations of the geometry resulting from the deposit. Through an optimization program, it was sought the tuning parameters to take the largest relationship between deposited and melted areas. It was chosen as restrictor the relationship bead reinforcement by bead width, avoiding deposits with high convexity and possibility of overlay formation. Satisfactory results were obtained and confirmed by validation weldings.

**Keywords:** Coatings, buttering, TIG welding.