

# EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO PROCESSO PTA NAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E NO TEOR DE FERRITA DO METAL DE SOLDA NA DEPOSIÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX<sup>1</sup>

*Everton Barbosa Nunes<sup>2</sup>*  
*Alexandre Sousa Barreto<sup>3</sup>*  
*Davi Marinho dos Santos<sup>3</sup>*  
*Edvan Cordeiro de Miranda<sup>2</sup>*  
*Marcelo Ferreira Motta<sup>4</sup>*

## Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar as características geométricas e o teor de ferrita no metal de solda em soldagens de revestimentos de dutos de aço C-Mn, com deposição de AISD UNS S32760 pelo processo PTA. Empregou-se o Método Estatístico Taguchi para planejamento experimental e avaliação das variáveis do processo: vazão de gás plasma (1 l/min, 3 l/min e 5 l/min.); vazão de gás de proteção (10 l/min, 15 l/min e 20 l/min); tipo de gás de proteção (Ar, Ar + 2,5%N<sub>2</sub> e Ar + 25%He) e DBP (8 mm, 12 mm e 16 mm). Foram realizadas soldagens de cordões simples e foi feita a preparação de amostras por metalografia, quantificação do teor de ferrita e avaliação das características geométricas nas seções transversais das amostras cortadas. A condição de soldagem empregando DBP de 16 mm, Ar + 25%He como gás de proteção (15 l/min) e vazão gás plasma (3 l/min) resultou em melhores características para revestimentos. Os cordões de solda apresentaram reforços acima de 3 mm, maior largura, menor ângulo de molhamento, baixo nível de diluição e teor de ferrita satisfatório.

**Palavras-chave:** PTA; Revestimento; Superduplex; Geometria.

## EFFECT OF WELDING PARAMETERS OF PTA PROCESS ON GEOMETRICAL FEATURES AN WELD METAL FERRITE CONTENT IN DEPOSITION OF SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL

### Abstract

The aim this work is to evaluate the influence the geometric characteristics and ferrite content in the weld metal in weld overlay on C-Mn steel pipes with SDSS UNS S32760 deposition by PTA process. Taguchi method had been used for experimental arrangement and evaluation of process variables: plasma gas flow rate (1 l/min, 3 l/min and 5 l/min), shielding gas flow rate (10 l/min, 15 l/min and 20 l/min), kind of shielding gas (Ar, Ar + 2,5%N<sub>2</sub> and Ar + 25%He) and torch work distance (8 mm, 12 mm and 16 mm). Welding has been performed with only one bead deposited. Later, it had carried geometry analysis and quantification of ferrite content in the weld metal. In relation to the reinforcement, width, wetting, dilution and content ferrite, the SDSS powder was successfully deposited using the PTA welding process: torch work distance – 16 mm; shielding gas – Ar + 25%He; shielding gas flow rate – 15 l/min and plasma gas flow rate – 3 l/min.

**Key words:** PTA; Weld overlay; Superduplex; Geometry.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutorando, Programa Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.*

<sup>3</sup> *Graduando, curso de Engenharia Mecânica, UFC, Fortaleza, CE, Brasil.*

<sup>4</sup> *Professor e Doutor, Depto, de Engenharia Metalúrgica, UFC, Fortaleza, CE, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário atual, é cada vez mais importante a seleção adequada de materiais, de modo a suportarem de forma eficiente ambientes mais agressivos e não explorados anteriormente. Por exemplo, a descoberta do pré-sal que está em recente exploração é um dos grandes desafios tecnológicos das empresas petrolíferas, principalmente por se encontrarem em regiões ultra profundas. Este aspecto faz com que grande parte dos materiais utilizados na fabricação de equipamentos, deva possuir dentre outras características, uma elevada resistência à corrosão e mecânica. Equipamentos, tais como: *risers*, tubulações, dentre outros, estão submetidos às condições severas de operação devido à conjunção de fatores, tais como temperaturas elevadas, desgastes, ambientes agressivos e alta pressão nas diferentes etapas de processamento de petróleo, o que resulta na degradação dos materiais dos equipamentos, levando às dispendiosas operações de manutenção. Nessas aplicações citadas, seja na fabricação ou na manutenção dos equipamentos ou componentes, a soldagem é utilizada, sendo de suma importância a utilização de procedimento adequado, de modo a não afetar as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais.

Em se tratando diretamente de exploração e produção de Petróleo e Gás, também se nota um horizonte em expansão. A Petrobras revela uma meta de crescimento na produção, além da duplicação de utilização de dutos no Brasil que ainda está defasada em relação a outros países, como a Argentina.<sup>(1)</sup> Dentro deste cenário, a degradação de superfícies expostas a ambientes agressivos em termos de corrosão, desgaste e/ou temperatura impõem um desafio a engenheiros e pesquisadores visando um aumento da vida útil de componentes/equipamentos, com consequente redução de gastos de manutenção e sucata industrial.

Devido ao elevado custo para a fabricação de equipamentos maciços constituídos por ligas de alta resistência à corrosão e/ou mecânica, diversos equipamentos são normalmente construídos com materiais menos nobres, como aços C-Mn e baixa liga, e são revestidos por materiais de excelente resistência à corrosão e propriedades mecânicas. A aplicação de revestimento (*overlay*) é realizada através da deposição de uma camada de material (vários passes) com características desejáveis em relação às propriedades mecânicas e microestrutura sobre um substrato, sendo um dos métodos de maior versatilidade e com obtenção de bons resultados.<sup>(2)</sup> O revestimento pode ser aplicado com objetivo de aumento de resistência ao desgaste, resistência à corrosão, resistência à elevadas temperaturas e carregamentos em relação ao metal base.<sup>(3-5)</sup> No entanto, existem muitos problemas na soldagem de revestimento por utilizar materiais dissimilares, sendo que as falhas acarretam prejuízos de milhões de reais, sendo essencial a seleção adequada de materiais e processo de soldagem, além de ajuste adequado de parâmetros.<sup>(6)</sup> Em geral, esta deposição é feita por processos de soldagem como MIG/MAG, gás acetilênico, arame tubular, arco submerso (altos níveis de diluição), eletrodo revestido, TIG com alimentação e mais recentemente pelo processo Plasma Transferred Arc (PTA). Em particular, a técnica de deposição por plasma com arco transferido, utilizando material de adição na forma de pó (PTA-P), tem apresentado resultados muito atrativos para a deposição de superligas.<sup>(7)</sup>

O processo PTA-P, em especial, apresenta uma maior eficiência de deposição, boa homogeneidade, baixa distorção em revestimentos, estruturas mais refinadas e menor nível de diluição, quando comparado aos processos mais tradicionais, contudo, ainda é muito pouco aplicado, necessitando de estudos para explorar a

viabilidade de aplicação na indústria do petróleo, resultando principalmente na redução dos custos e da preservação do meio ambiente.<sup>(8)</sup>

A seleção da liga a ser depositada depende de diversos fatores, como: condições de operação, características do metal base, relação custo/benefício do componente a ser revestido, custo de processamento, dentre outros.<sup>(9)</sup> Dentre os materiais existentes comercialmente que possuem excelente combinação entre resistência à corrosão e propriedades mecânicas destacam-se os aços inoxidáveis duplex (AID) e superduplex (AISD). Estes materiais possuem em sua microestrutura original as fases ferrita e austenita, de modo a aliar boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão. Esta combinação de propriedades tem popularizado o seu uso em ambientes altamente agressivos.<sup>(10)</sup>

Existem poucos trabalhos de revestimento investigando a deposição de AID/AISD em materiais menos nobres, porém já são obtidos bons resultados em relação às propriedades mecânicas e resistência à corrosão, o que justifica a realização de um trabalho científico no assunto.<sup>(11,12)</sup>

Vale salientar que existe uma grande carência na exploração do processo PTA-P, principalmente na utilização de metal de adição na forma de pó de AID/AISD, não existindo trabalhos referentes na literatura quanto à utilização destes materiais para soldagem de revestimentos. Logo, espera-se obter revestimentos com baixo nível de diluição, bom acabamento e sem presença de defeitos. O controle adequado dos parâmetros de soldagem pode acarretar um balanço de fases adequado (razão  $\delta/\gamma$ ), aliando boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Logo, este trabalho tem como objetivo avaliar as características geométricas e o teor de ferrita no metal de solda em soldagens de revestimentos de dutos de aço C-Mn com deposição de aço inoxidável superduplex (UNS S32760) depositadas pelo processo PTA-P.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados como metal base tubos API 5L Grau B, com dimensões de 5" x 12,7 mm. Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) são muito utilizados nos sistemas de transporte de gás natural e petróleo, pois aliam resistência mecânica e boa tenacidade a baixas temperaturas, contribuindo para a redução de custos, mantendo-se a mesma pressão de trabalho.<sup>(13)</sup> O material de adição utilizado foi o AISD UNS S32760, conhecido também como Zeron 100 (nome comercial). O tungstênio tem papel similar ao molibdênio na cinética de repassivação e a adição de cobre aumenta a resistência à corrosão em ambientes ácidos não oxidantes.<sup>(14)</sup> A distribuição do tamanho de partículas do AISD fornecida pelo fabricante é na faixa de 45  $\mu\text{m}$  a 105  $\mu\text{m}$ . A composição química dos materiais utilizados é mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do metal base e metal de adição

Material	Composição Química (%)											
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	N	W	Fe
Metal base	0,19	0,7	0,018	0,018	0,24	-	-	-	-	-	-	Bal.
Metal de adição	0,024	0,58	0,02	0,001	0,49	25,7	6,75	0,77	3,49	0,29	0,61	Bal.

Primeiramente, foi realizada a caracterização do pó com análise microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Na soldagem dos tubos foi utilizado um dispositivo de movimento da tocha e movimento do tubo (Figura 1). O eletrodo de tungstênio utilizado foi o dopado com óxido de tório, com diâmetro de 4,0 mm e as soldagens realizadas com CCEN (Corrente Contínua Eletrodo Negativo). Os gases de proteção utilizados foram: o argônio comercialmente puro, argônio com adição de 25% de hélio e argônio com adição de 2,5% de nitrogênio. O gás plasma e de arraste utilizado foi o argônio comercialmente puro.



Figura 1. Soldagem PTA.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da vazão do gás plasma (VGP); vazão do gás do gás de proteção (VGPR); tipo de gás de proteção (TGPR) e distância bico-peça (DBP) nas características geométricas (reforço, largura, diluição, ângulo de molhamento), acabamento superficial, presença de defeitos e percentual de ferrita no metal de solda. Foi montada uma matriz de experimentos L9, utilizando o Método Taguchi (Tabela 2), sendo utilizada a variação de 3 níveis.

Tabela 2. Ensaios realizados com a Matriz L9

Ensaio	VGPR	TGPR	VGP	DBP
01	1	1	1	1
02	1	2	2	2
03	1	3	3	3
04	2	1	2	3
05	2	2	3	1
06	2	3	1	2
07	3	1	3	2
08	3	2	1	3
09	3	3	2	1

O Taguchi tem como objetivo proporcionar a análise estatística dos resultados e o levantamento do efeito de cada fator de controle sobre as respostas analisadas com um reduzido número de experimentos a serem realizados, considerando um número elevado de fatores de controle e seus níveis.<sup>(15)</sup> Também é possível a identificação da condição ótima de ajuste de parâmetros, sendo que neste trabalho é recomendado um reforço de pelo menos 3 mm, largura maior possível, menor ângulo de molhamento, teor de ferrita elevado no metal de solda (acima de 35%) e menor nível de diluição.<sup>(16)</sup>

Os resultados são otimizados de acordo com a categoria que se melhor adéqua, podendo ser menor-melhor ou maior-melhor, como verificado nas Equações 1 e 2. Onde  $n$  é o número de observações e  $y_i$  é o valor do dado observado para a  $i$ -ésima característica de qualidade.

$$\eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

$$\eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

Na Tabela 3 são mostradas as designações dos fatores de controle e seus níveis empregados no ensaio. A vazão de gás plasma pode variar de 0,25 a 5 l/min.<sup>(17)</sup> Segundo Oliveira,<sup>(18)</sup> os valores usuais da vazão de gás de plasma, no caso do argônio, para aplicações de soldagem e deposição, estão na faixa de 0,25 l/min a 2,2 l/min.

Neste trabalho, foram utilizados três níveis de vazões, de modo a avaliar de forma mais abrangente o efeito deste parâmetro nos fatores resposta. Foram utilizados três gases de proteção : argônio puro (99,99%), argônio com adição de 25% de hélio e argônio com adição de nitrogênio. A vazão do gás de proteção pode variar de 10 l/min a 30 l/min, segundo a literatura.<sup>(17,19)</sup>

**Tabela 3.** Parâmetros dos fatores de controle referente ao Taguchi da matriz L9

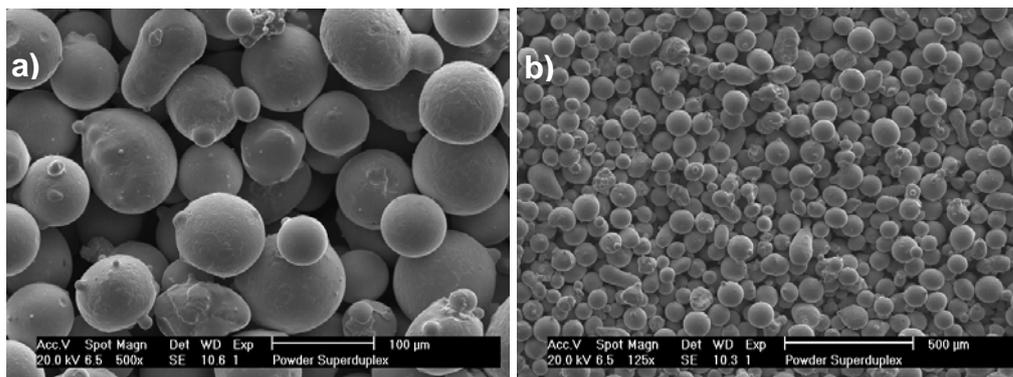
Fatores de Controle	Níveis		
	1	2	3
<b>VGPR (l/min)</b>	10	15	20
<b>TGASPR</b>	Ar	Ar + 2,5%N <sub>2</sub>	Ar + 25%He
<b>VGP (l/min)</b>	1	3	5
<b>DBP (mm)</b>	8	12	16

Vale salientar que foram utilizados como parâmetros fixos: corrente de soldagem – 100 A; vazão de gás de arraste – 4 l/min; velocidade de soldagem – 9 cm/min; recuo do eletrodo – 1 mm; taxa de alimentação do pó – 22 g/min.

As amostras foram analisadas de forma superficial para avaliar o acabamento superficial e presença de pós não fundidos ao longo do cordão de solda. Posteriormente, as amostras foram cortadas na direção transversal com lixamento até 1.500 *mesh* e ataque realizado com Nital 5% durante 15 s para análise macrográfica. As análises foram feitas no início e final do cordão de solda de cada condição soldada, de modo que foram realizadas as medidas da geometria do cordão de solda através do software *Image Pro Plus*. Foram realizadas quantificações do teor de ferrita no metal de solda utilizando o ferritoscópio FISCHER M-30P com 30 medições em cada cordão de solda.

### 3 RESULTADOS

A caracterização da morfologia do pó de AISD UNS S32760 foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), como mostrada na Figura 2. São observadas partículas em sua maioria de forma esférica que são benéficas por possuírem maior capacidade de arraste.<sup>(20)</sup> Esta morfologia é característica de pós obtidos por atomização.



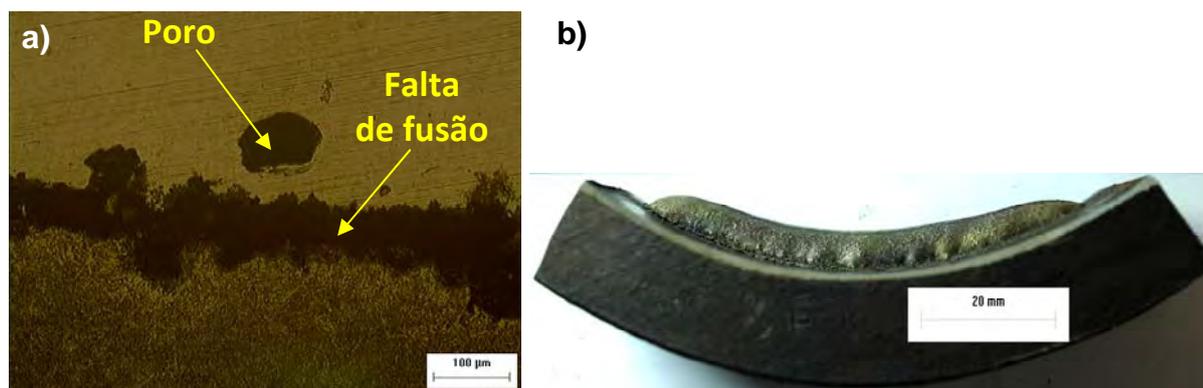
**Figura 2.** Morfologia dos pós de AID/AISD feito por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (a) Liga AISD – aumento de 250X; (b) Liga AISD – aumento de 500X.

Foram verificados pós não fundidos no final do cordão de solda em todas as condições (Figura 3a), sendo que alguns cordões não apresentaram boa linearidade ao longo do cordão de solda, além da presença de pequenas mordeduras. As condições que apresentaram melhor acabamento superficial foram os cordões soldados com menor vazão de gás de proteção (Figura 3b).



**Figura 3.** (a) Pós não fundidos no final do cordão de solda; (b) Vista superior do cordão soldado da condição 3 (VGPR – 10 l/min, mistura de argônio e hélio, VGP – 5 l/min e DBP – 16 mm).

O ensaio 8 apresentou maior quantidade de defeitos (falta de fusão e poros) ao longo da interface substrato/metal de solda e maior quantidade de pós na superfície do cordão soldado devido à maior DBP (Figura 4).



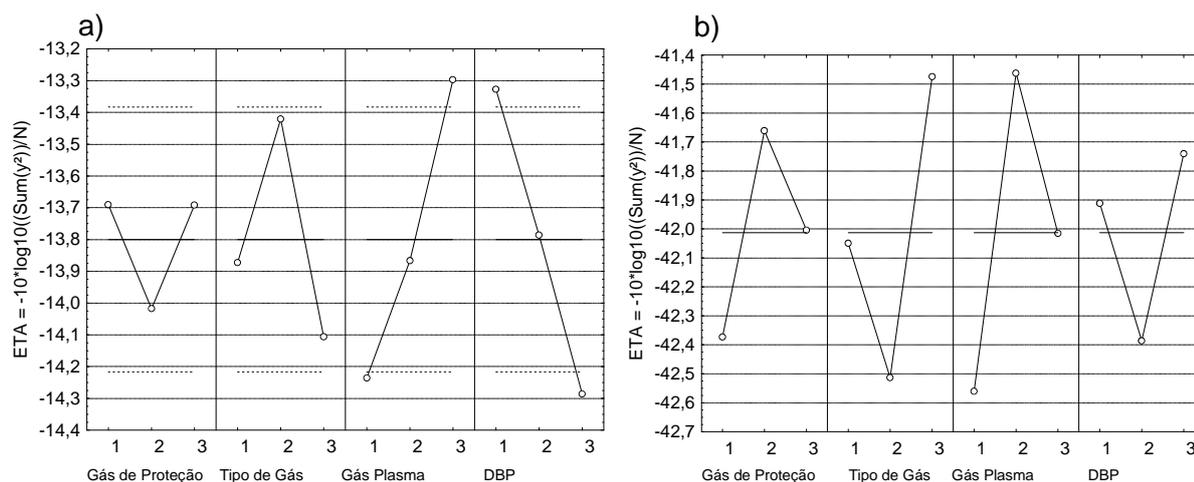
**Figura 4.** Defeitos na interface e vista lateral na condição 8 (VGPR – 20 l/min; gás de proteção argônio + 2,5% de nitrogênio; vazão de plasma de 1 l/min e DBP de 16 mm).

No método Taguchi, a característica de qualidade que se pretende analisar é medida através da determinação da razão sinal/ruído, também denominada  $\eta$ . Os resultados são otimizados de acordo com a categoria na qual a característica da qualidade melhor se adequa, podendo ser: menor-melhor, maior-melhor e nominal-melhor.

Para as características largura e teor de ferrita foi escolhida a condição maior-melhor. Para a característica ângulo de molhamento, reforço e diluição foi escolhida a condição menor-melhor. Vale salientar que não é possível otimizar todas as características de qualidade, sendo necessário avaliar quais são as características primordiais.

Na Figura 5a é mostrado o gráfico para a característica do reforço, de modo que o fator que mais influencia é a DBP e vazão de gás plasma, sendo que a menor vazão de gás plasma e maior DBP acarretou no maior reforço. A utilização da mistura argônio e nitrogênio apresentou menores níveis de reforço, porém a adição de gás hélio acarretou no maior reforço. A vazão do gás de proteção não influenciou de forma significativa no reforço.

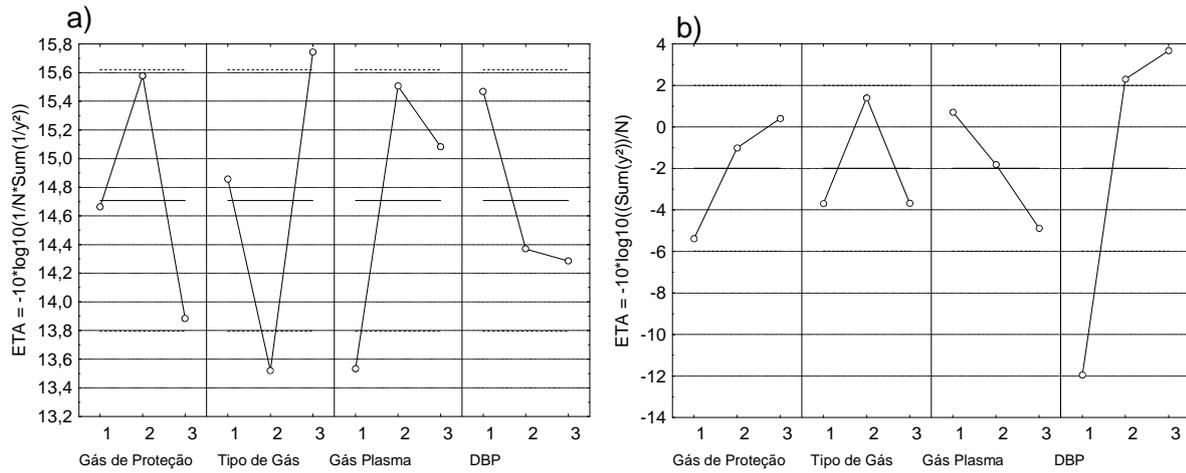
Na Figura 5b é mostrado o gráfico obtido pelo Taguchi em relação ao ângulo de molhamento, de modo que o tipo de gás e vazão de gás plasma são os fatores que mais influenciam no ângulo de molhamento. A vazão de gás de proteção também influencia de forma significativa no ângulo de molhamento. Vale salientar que maiores vazões de gás de proteção, principalmente 15 l/min, a utilização da mistura argônio e hélio como gás de proteção e maiores vazões de gás plasma, principalmente 3 l/min, acarretaram na redução do ângulo de molhamento.



**Figura 5.** Influência dos fatores de controle. (a) sobre o reforço; (b) sobre o ângulo de molhamento.

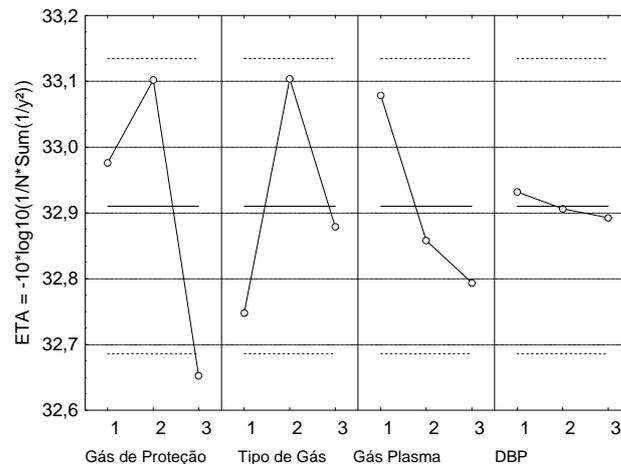
Na Figura 6a é mostrado o gráfico obtido pelo Taguchi em relação à largura, de modo que o tipo de gás de proteção e vazão de gás plasma são os fatores que mais influenciam na largura. A utilização da mistura argônio e hélio apresentou maior largura, sendo que a utilização do argônio e nitrogênio acarretou na obtenção de cordões mais estreitos. A maior vazão de gás de proteção (20 l/min) e DBP (16 mm) acarretou em cordões de menor largura.

Na Figura 6b é mostrado o gráfico obtido pelo Taguchi em relação à diluição, de modo que o fator que mais influencia é a DBP, sendo que quanto maior a DBP, menor a diluição. Também foi observado que a maior vazão de gás de proteção, menor vazão de gás plasma e utilização de gás argônio + 2,5% de N<sub>2</sub> proporcionou menores níveis de diluição.



**Figura 6.** Influência dos fatores de controle. (a) sobre a largura; (b) sobre a diluição.

Em relação ao teor de ferrita foi verificado que a variação da DBP não influenciou de forma significativa no percentual de ferrita no metal de solda (Figura 7). O fator que influenciou de forma mais significativa foi a vazão do gás de proteção, sendo que o maior vazão (20 l/min) acarreta no menor teor de ferrita. Em relação ao tipo de gás de proteção, a mistura argônio e nitrogênio proporciona maiores percentuais de ferrita. A menor vazão de gás plasma (1 l/min) acarretou no maior teor de ferrita no metal de solda.



**Figura 7.** Influência dos fatores de controle sobre o teor de ferrita.

Em relação aos ensaios, foi verificado que o reforço variou de 4,2 a 5,0 mm; largura de 4,8 a 7,0 mm; diluição de 0 a 5,3%; ângulo de molhamento de 106 a 145° e teor de ferrita de 40 a 46%. Desta forma, foi verificado que todos os cordões soldados obtiveram reforços satisfatórios, podendo ser mais flexível a seleção de qualquer nível para cada fator. A vazão de gás de proteção intermediária (15 l/min) apresentou melhores resultados para obtenção do menor ângulo de molhamento e maior largura, além de ser o fator que influenciou de forma mais significativa no teor de ferrita. A mistura argônio e hélio influenciou de forma mais significativa na redução do reforço e ângulo de molhamento, além do aumento da largura, sendo esta a mistura escolhida para o ensaio de confirmação. A vazão de gás plasma influenciou de forma mais significativa o ângulo de molhamento e largura, sendo que a vazão de gás plasma intermediária direciona para melhores resultados, além de proporcionar um arco mais rígido. A diluição é um dos fatores mais importantes na

soldagem de revestimento, sendo que o fator que mais influenciou foi a DBP, de modo que foi selecionada a DBP de 16 mm.

Logo, a sequência escolhida para o ensaio de confirmação foi 2323 com vazão de gás de proteção de 15 l/min, mistura de argônio e hélio, vazão de gás plasma de 3 l/min e DBP de 16 mm. O cordão soldado obteve reforço de 4,65 mm, largura de 8,3 mm, ângulo de molhamento de 103,6°, diluição de 2,4% e teor de ferrita de 44,1%. Desta forma, foi verificado que a condição mais crítica para a soldagem desta liga foi o ângulo de molhamento, obtendo cordões convexos.

#### 4 DISCUSSÃO

Maiores vazões de gás de proteção proporcionaram cordões com pior acabamento superficial (ensaio 8), além da presença de poros e ocasionar desperdício de gás. Vale ressaltar que estes resultados já foram verificados na literatura.<sup>(21)</sup> Esta condição também foi soldada com menor vazão de gás plasma, proporcionando grande instabilidade no arco. Ribeiro<sup>(22)</sup> também utilizou as seguintes vazões de gás plasma: 1,5; 2,0 e 2,4 l/min. Na menor vazão observou-se a formação de poros/cavidades no cordão de solda, bem como uma grande instabilidade do arco plasma.

Os autores da referência relatam que para poder obter um bom rendimento de deposição, a distância bico-peça não deve ser maior do que 10 a 15 mm,<sup>(20,22)</sup> sendo uma possível razão da maior quantidade de pó não fundido sobre a superfície do cordão soldado. O aumento da DBP determina a temperatura que cada uma das partículas da liga atomizada pode atingir no arco voltaico. A entrada do fluxo de material atomizado é feita através do bico constritor que, além de produzir a constrição do arco, permite a entrada do material de adição de forma convergente na coluna do plasma. Se o material atomizado é alimentado numa DBP maior (16 mm), as partículas ficam sujeitas a temperaturas e tempos de permanência diferentes quando comparadas com a de menor DBP (8 mm).

Em relação ao reforço foi verificado que a utilização da mistura argônio e hélio proporcionou maior quantidade de material fundido devido ao maior calor do arco. O aumento da DBP pode acarretar na redução da densidade de corrente, causando uma redução da temperatura desta região, fazendo com que haja uma menor quantidade de calor para fundir o substrato, havendo também maior reforço.<sup>(23)</sup> O aumento da vazão de gás plasma provoca maior molhamento do cordão ocasionando redução do reforço.

Em relação ao ângulo de molhamento, o uso de argônio puro apresenta pouca fluidez da poça fundida, o que acarreta na deposição de cordões com menor molhabilidade que apresentam uma série de desvantagens, tais como concentração de tensões e dificuldades na deposição de cordões sucessivos, devido a geometria desfavorável do depósito.<sup>(18)</sup> A mistura Argônio e hélio apresenta maior potencial de ionização, aumentando o calor no arco e resultando num metal líquido mais quente, com melhor fluidez, menor tensão superficial, o que melhora a molhabilidade. Menor DBP produz um metal líquido mais fluido, podendo ocasionar um melhor espalhamento do metal líquido sobre o substrato.

Em relação à largura foi observado que maiores vazões de gás de proteção acarretaram na menor largura, observado também por Triguinho.<sup>(24)</sup> A maior vazão de gás plasma, acarreta em maior fluxo do jato plasma, sendo que o metal da região mais quente da poça é deslocado para a borda, removendo razoável quantidade de calor do centro da poça e transferido para os lados, sendo que esta

forte convecção causa maior largura. Oliveira<sup>(18)</sup> também observou que o aumento da vazão de gás plasma acarreta em zonas fundidas mais largas.

De forma geral, o aumento da DBP acarreta em maiores perdas das características do arco que se torna cônico, além do aumento da tensão, ocasionando no aumento da largura do cordão de solda.<sup>(25,26)</sup> Porém, devido ao reforço relativamente elevado quando ocorreu acréscimo da DBP, pode ter ocorrido uma maior barreira, contribuindo para a redução da largura. A utilização da mistura argônio e hélio acarreta no melhor molhamento, ocasionando maior largura dos cordões soldados.

Outro autor também verificou redução da largura com o aumento da DBP.<sup>(18)</sup> O aumento da largura da zona fundida devido ao acréscimo da potência do arco não ocorre, sugerindo a ocorrência de mudanças no rendimento térmico do arco ou no rendimento de fusão à medida que se aumenta a DBP. A radiação e convecção formam uma das parcelas de perda de energia para o meio, sendo que quanto maior o comprimento do arco, maior a fração de radiação emitida para o meio, o que provocaria uma redução da eficiência do arco plasma.<sup>(27)</sup>

Em relação à diluição, foi verificado mesmo nível comparando gás argônio e a mistura argônio e hélio. O argônio possui pressão do arco similar ao gás argônio com adição de hélio, porém o argônio com adição de nitrogênio possui maior pressão que gás hélio puro. A utilização de gás hélio não é muito comum, apesar do arco voltaico nesta atmosfera apresentar maior energia e proporcionar maior penetração. O alto custo do hélio pode ser uma das possíveis razões para sua baixa utilização, sendo selecionado quando for primordial a sua aplicação. Outro motivo é na maior tensão do arco nesta atmosfera, o que dificulta sua abertura e estabilização.<sup>(18)</sup> Uma vazão de proteção maior proporcionou uma menor diluição, comportamento também observado por Santos.<sup>(21)</sup> Este comportamento ocorre porque a poça de fusão resfria mais lentamente, além que altas vazões encarecem e geram turbulência no depósito.

Em relação à vazão de gás plasma, o aumento desta vazão acarretou em maiores níveis de diluição. Díaz<sup>(26)</sup> também verificou aumento da diluição em aproximadamente 4,0% com o acréscimo de vazão de gás plasma de 2,2 para 3,0 l/min devido, talvez, à maior pressão do jato plasma. O aumento da DBP promove aumento do diâmetro do arco e da área de contato deste com o substrato, melhorando a distribuição do fluxo de calor e reduz pressão exercida pelo arco sobre a poça, além da maior barreira, devido ao maior reforço, reduzindo o nível de diluição. Vale salientar que foi verificado dificuldade na abertura do arco para DBP de 16 mm, verificado também na literatura.<sup>(26)</sup>

DBP mais elevada proporciona aumento do comprimento de arco, de modo que a constrição do arco se torna levemente divergente. Consequentemente, a quantidade de calor fornecida ao substrato irá se propagar em regiões mais extensas, em vez de concentrar em uma região estreita.<sup>(19,26)</sup> Em relação ao teor de ferrita foi verificado que a utilização de argônio obteve níveis maiores de austenita no metal de solda. O uso de argônio resulta em menor perda de elementos de liga no depósito, como nitrogênio, acarretando em maior teor de austenita.<sup>(22)</sup> Possivelmente, a utilização da mistura argônio e nitrogênio que proporcionou menores níveis de diluição acarretaram em maior teor de ferrita, pois o metal base possui mais elementos gamagênicos, como por exemplo o carbono e manganês.

## 5 CONCLUSÃO

A vazão de gás plasma e de proteção, tipo de gás de proteção e DBP influenciam nas características geométricas, acabamento e defeitos nos cordões soldados; Foram obtidas condições satisfatórias nas características geométricas, como: no reforço, largura, diluição e teor de ferrita, porém em relação ao ângulo de molhamento não teve condições satisfatórias; De forma geral, a utilização de vazão de gás de proteção de 15 l/min, mistura de argônio e hélio, vazão de gás plasma de 3 l/min e DBP de 16 mm obteve bons resultados.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Engenharia de Soldagem da Universidade Federal do Ceará pela realização dos experimentos, além da Agência Nacional do Petróleo –Prh31, FUNCAP e CNPq pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 PLANO DE NEGÓCIOS. Plano de Negócios 2009-2013. Petrobras, 2009.
- 2 BROWN, A. Weld Overlay Cladding – The solution to Pump Corrosion?. World Pumps, 2005.
- 3 WANG, H.; JIANG, W.; VALANT, M.; KOVACEVIC, R. Solid Freeform Fabrication Based on Micro-plasma Powder Deposition. Research Center for Advanced Manufacturing, 2003, p. 301-312.
- 4 LAKSHMINARAYANAN, A. K.; BALASUBRAMANIAN, V.; VARAHAMOORTHY, R.; BABU, S. Predicting the Dilution of Plasma Transferred Arc Hardfacing of Stellite on Carbon Steel Using Response Surface Methodology. Metals and Materials International, v. 14, n. 6, 2008, p. 779-789.
- 5 LIYANAGE, T.; FISHER, G.; GERLICH, A. P. Influence of Alloy Chemistry on Microstructure and Properties in NiCrBSi Overlay Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc Welding (PTAW). Surface & Coatings Technology 205, 2010, p. 759-765.
- 6 NELSON, T. W.; LIPPOLD, J. C.; MILLS, M. J. Investigation of Boundaries and Structures in Dissimilar Metals Welds. Science and Technology of Welding and Joining, v. 13, n. 5, 1998, p. 249-255.
- 7 D'OLIVEIRA, A. S. C. M.; PAREDES, R. S. C.; SANTOS, R. L. C. Pulsed Current Plasma Transferred Arc Hardfacing. Journal of Materials Processing Technology, 171, 2006, p. 167-174.
- 8 GRAF, K.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Microstructural Stability and Wear Performance of a Ni Based Alloy PTA Coating. In: International Conference on Mechanical Engineering, São Paulo, 2003.
- 9 GRAF, K. Estabilidade a Alta Temperatura de Revestimentos de Hastelloy C Depositados por PTA. Dissertação de Mestrado de Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004, 89p.
- 10 RAMÍREZ, A. J. Precipitação de Fases Intermetálicas e Austenita Secundária na ZAC de Soldagens Multipasse de Aços Inoxidáveis Duplex. Tese (Doutorado)- Departamento de Eng. Metalúrgica, Escola Politécnica, U. de São Paulo, São Paulo, 2001, 240p.
- 11 BARNHOUSE, J.; LIPPOLD, J. C. Microstructure/Property Relationships in Dissimilar Welds Between Duplex Stainless Steels and Carbon Steels. American Welding Society, v. 77, n. 12, 1998, p. 477-487.
- 12 KANNAN, T.; MURUGAN, N. Prediction of Ferrite Number of Duplex Stainless Steel Clad Metals Using RSM. Welding Journal, 2006, p.91-100.

- 13 OGATA, P. H. Caracterização Microestrutural do Aço para Tubo API 5L-X65 em Diferentes Regiões da Chapa como Laminada e Após Austenização e Resfriamento sob Diversas Taxas de Resfriamento. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009, 105p.
- 14 FRANCIS, R. Marine Corrosion Resistance of Zeron 100 Superduplex Stainless Steel. Rolled Alloys Company, 2008.
- 15 PHADKE, M. S. Quality Engineering Using Robust Design. New York, USA: Prentice Hall, 1989.
- 16 PETROBRAS N-1707. Projeto de vaso de pressão com revestimento. 1999.
- 17 BRACARENSE, A. Q. Soldagem a Plasma – PAW. 2000, Belo Horizonte.
- 18 OLIVEIRA, M. A. Estudo do Processo Plasma com Alimentação Automática de Arame. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2001, 78p.
- 19 BALASUBRAMANIAN, V. LAKSHIMINARAYANAN, VARAHAMOORTHY, R.; BABU, S. Application of Response Surface Methodology to Prediction of Dilution in Plasma Transferred Arc Hardfacing of Stainless Steel on Carbon Steel. Journal of Iron and Steel Research, International, 16(1), 2009, p. 44-53.
- 20 DEUIS, R. L.; YELLUP, J. M.; SUBRAMANIAN, C. Metal-matrix Composite Coatings by PTA Surfacing. Composites Science and Technology, 58, 1998, p. 299-309.
- 21 SANTOS, R. L. C. dos. Deposição por Plasma de Arco Transferido com Corrente Contínua Pulsada. Dissertação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- 22 RIBEIRO, H. O. Desenvolvimento de Ligas para Revestimentos por PTA Resistentes à Cavitação. Tese (Doutorado) do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- 23 TANAKA, M.; TASHIRO, S.; LOWKE, J. J. Predictions of Weld Formation Using Gas Tungsten Arcs for Various Arc Lengths from Unified Arc-electrode Model. Science and Technology of Welding and Joining. v. 12, n. 1, pp. 2-9, 2007.
- 24 TRIGUINHO, J. J. Superfícies Enriquecidas Por Carbonetos de Tungstênio Depositados a Plasma Por Arco Transferido. Dissertação de Mestrado de Engenharia e Ciências dos Materiais – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- 25 DÍAZ, V. M. V. Influência de Parâmetros e Variáveis da Soldagem Plasma sobre as Características da solda com Ênfase na Análise da Abertura e no Fechamento do KEYHOLE – Dissertação de mestrado, Florianópolis, 1999.
- 26 DÍAZ, V. M. V. Inovação do equipamento e avaliação do processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para soldagem fora de posição: 2005. 174p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.
- 27 AWS. Welding Handbook – Welding Process. v.2, eighth edition, 1991.