

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO E VAZÃO DE GÁS PLASMA NA DEPOSIÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32760 PELO PROCESSO PLASMA PÓ

CON-2016-1078

¹Instituto Federal do Ceará, R. Pedro Bezerra de Menezes, nº 387, Manoel Costa Moraes, Jaguaribe-CE.

²Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Laboratório de Tecnologia em Soldagem, Bloco 1080, Fortaleza-CE.

Resumo: Em diversas aplicações (risers, tubulações), seja na fabricação ou na manutenção dos equipamentos ou componentes, a soldagem é utilizada, sendo de suma importância a utilização de processo e procedimento adequados, de modo a minimizar alterações nas propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais. Dentro deste cenário, a degradação de superfícies expostas a ambientes agressivos em termos de corrosão, desgaste e/ou temperatura impõe um desafio a engenheiros e pesquisadores no que concerne a um aumento da vida útil de componentes/equipamentos, com consequente redução de gastos. Devido ao elevado custo para a fabricação de equipamentos com materiais maciços de ligas especiais, diversos equipamentos são normalmente construídos com materiais menos nobres e são revestidos por materiais de excelente resistência à corrosão e propriedades mecânicas. A soldagem de revestimento com aços inoxidáveis superduplex (AISD) pode ser uma boa opção, permitindo alcançar características desejadas, aliando boa resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas. Nos últimos anos, a utilização do processo Plasma pó vem se destacando por apresentar boa estabilidade, menor distorção e boa contrabilidade da diluição. Devido à complexidade do processo é de suma importância o estudo dos parâmetros de soldagem, de modo que o gás de proteção e vazão de gás plasma são um dos mais primordiais nas características geométricas do cordão de solda. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência do tipo e vazão de gás de proteção e vazão de gás plasma em soldagens de revestimento de dutos com deposição de AISD nas características geométricas e teor de ferrita do metal de solda pelo processo Plasma pó. As soldagens foram realizadas em simples depósito em tubos API 5L X65 (12" X 21,44 mm) para avaliação das características geométricas (reforço, largura, ângulo de molhamento), diluição e teor de ferrita. Foram utilizadas duas vazões de gás de proteção (15 e 20 l/min), três tipos de gás de proteção (Argônio, Ar+25%He e Ar+2,5%N₂) e duas vazões de gás plasma (1 e 3 l/min). Em relação à vazão de gás de proteção, a mais adequada foi a menor e em relação ao tipo de gás de proteção, foi selecionada a mistura Ar+25%He. A escolha deste tipo de gás contribuiu para o aumento do reforço, redução do ângulo de molhamento, melhor acabamento superficial e maior largura. A vazão de gás plasma que trouxe os melhores resultados, em termos de largura e ângulo de molhamento, foi a vazão intermediária que corresponde a 3 l/min, justificando sua utilização. Os resultados mostraram que a deposição de AISD pode ser uma boa opção para soldagem de revestimento, com baixos níveis de diluição e com características favoráveis para garantir boas características aos revestimentos.

Palavras-chave: Revestimento, Superduplex, Pó, Plasma, Geometria

1. INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo no pré-sal é um dos grandes desafios tecnológicos das empresas petrolíferas, principalmente por se encontrar em regiões ultra profundas, não exploradas anteriormente. Este aspecto faz com que grande parte dos materiais utilizados na fabricação de equipamentos deva possuir dentre outras características, uma elevada resistência à corrosão.

Dentro deste cenário, a degradação de superfícies expostas a ambientes agressivos em termos de corrosão, desgaste e/ou temperatura impõe um desafio a engenheiros e pesquisadores no que concerne a um aumento da vida útil de

componentes/equipamentos, com consequente redução de gastos de manutenção e sucata industrial, segurança operacional, confiabilidade de abastecimento e segurança ambiental. As diversas técnicas de processamento de superfícies disponíveis para a melhoria do desempenho de componentes vão desde a modificação por tratamentos termoquímicos à deposição de revestimentos finos (filmes) ou espessos (camadas aspergidas ou soldadas) (D'oliveira, 2006).

O revestimento pode ser aplicado com objetivo de aumento de resistência ao desgaste abrasivo, resistência à corrosão, resistência à elevadas temperaturas e suporte a pressões provenientes da ação de fluidos no metal base (Wang *et al.*, 2003; Lakshminarayanan *et al.*, 2008 e Liyanage *et al.*, 2010). No entanto, existem muitos problemas na soldagem de revestimento advindos da aplicação de materiais dissimilares (trincas, 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 (Nelson *et al.*, 1998). 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 de arame e mais recentemente pelo processo Plasma. Em particular, a técnica de deposição por plasma com arco transferido, utilizando material de adição na forma de pó (Plasma pó), tem apresentado resultados muito atrativos para a deposição de superligas, contudo é pouco aplicado, necessitando de estudos para explorar a viabilidade de aplicação na indústria do petróleo, resultando principalmente na redução dos custos e na preservação do meio ambiente devido à baixa emissão de óxidos (D'oliveira *et al.*, 2006; Graf & D'oliveira, 2003 e Gatto *et al.*, 2004).

Existem poucos trabalhos sobre revestimentos investigando a deposição de aço inoxidável superduplex (AISD) sobre materiais menos nobres, porém já foram obtidos bons resultados em relação às propriedades mecânicas e resistência à corrosão (Kannan & Murugan, 2006 e Barnhouse & Lippold, 1998), o que justifica a realização de um trabalho científico sobre o assunto. Atualmente, é comum a deposição de superduplex em tubos já cladeados com aço inoxidável austenítico, de modo a evitar a deposição direta de AISD sobre o substrato que iria alterar as características do metal de solda, principalmente perto da zona de ligação (Scott, 2010; Rajeev *et al.*, 2000). Sendo assim, torna-se relevante o controle adequado da diluição e balanço de fases, nas soldagens de revestimento com AISD que justifiquem sua aplicação.

Há anos o grupo de pesquisadores do LPTS-UFC desenvolve trabalhos nesta linha, que surgiu a partir de demandas das indústrias de diversos setores, mas principalmente da Indústria de Petróleo e Gás Natural. Diversos artigos e dissertações foram publicados ratificando a experiência que o grupo adquiriu com estes temas e que certamente são de interesse para as indústrias e comunidade científica, principalmente para aquelas que se preocupam com a manutenção de seus equipamentos ou que buscam técnicas mais adequadas para a fabricação por soldagem de seus produtos. O processo plasma pó possui como grande vantagem o controle da diluição, dependendo de um criterioso trabalho de ajuste de parâmetros (procedimento) que envolve, além de parâmetros elétricos e de movimento, também geométricos. Vale salientar que existe uma grande carência na exploração do processo plasma pó, principalmente na utilização de metal de adição na forma de pó de AISD. O controle adequado dos parâmetros de soldagem pode acarretar um balanço de fases (ferrita e austenita) adequado, aliando boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. A carência de informação a respeito do comportamento de revestimentos depositados com AISD, utilizando processo Plasma pó é um grande fator motivacional para a realização desta pesquisa, que pretende expandir conhecimentos técnicos, operacionais e metalúrgicos das soldagens com estes materiais.

Em relação aos aspectos metalúrgicos, a necessidade da compreensão dos fenômenos na soldagem é ainda maior, pois apesar do entendimento de aços inoxidáveis superduplex serem vastos, trabalhos em soldagens dissimilares são escassos, sendo ainda mais raras soldagens de deposição de AISD. Desta forma, a contribuição deste trabalho é trazer subsídios para verificar a viabilidade de deposição destes materiais nobres, contribuindo para novos campos de aplicação, de modo a poder expandir novos estudos na área. Logo, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da vazão de gás plasma, da vazão de gás de proteção, com deposição de pó superduplex em dutos API 5L X65, nas características geométricas (reforço, largura, penetração, ângulo de molhamento), na diluição, nos defeitos e no teor de ferrita do metal de solda.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material a ser aplicado neste trabalho como metal base é o tubo API 5L X65 com dimensões de 304,8x21,44 mm, sendo este material disponibilizado pela REPLAN/PETROBRAS. Os aços X65 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 as mesmas condições operacionais (Ogata *et al.*, 2008; Ogata, 2009). Este material também é utilizado na fabricação de *risers* rígidos usados na elevação de petróleo e gás em águas profundas e ultraprofundas para a superfície, sendo um dos grandes desafios atualmente devido à elevada pressão (Filho & Bastian, 2003).

O AISD utilizado foi fornecido pelo fabricante CARPENTER com classificação Micro Melt 100, compatível com o UNS S32760, conhecido também como ZERON 100 (nome comercial). Neste material, o tungstênio tem papel similar ao molibdênio na cinética de repassivação na camada superficial, protegendo contra a corrosão à temperatura ambiente, e a adição de cobre aumenta a resistência à corrosão em ambientes ácidos não oxidantes (Francis, 2008). O tamanho de partículas do AISD está na faixa de 45 a 105 μm , informação fornecida pelo fabricante. Na Tabela 1 são mostradas as composições químicas do metal de base e do metal de adição em forma de pó.

Tabela 1. Composição química utilizados do metal de base e do metal de adição (%massa).

Material	C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si	Al	W	Cu	Fe
API 5L X65	0,118	0,064	1,365	0,134	0,29	6,75	0,011	-	0,303	0,045			Bal.
AISD UNS S32760	0,024	27,05	0,79	4,28	-	7,35	0,06	0,002	0,51	-	0,7	0,89	Bal.

Na soldagem dos tubos realizadas com CCEN (Corrente Contínua Eletrodo Negativo) foi utilizado eletrodo de tungstênio dopado com óxido de tório, com diâmetro de 4,0 mm, 67 mm de comprimento e ângulo de afiação de 20 graus. Os gases de proteção que foram utilizados foram: o argônio comercialmente puro, argônio com adição de 25% de hélio e argônio com adição de 2,5% de nitrogênio. Para o gás plasma e de arraste foi utilizado o argônio comercialmente puro.

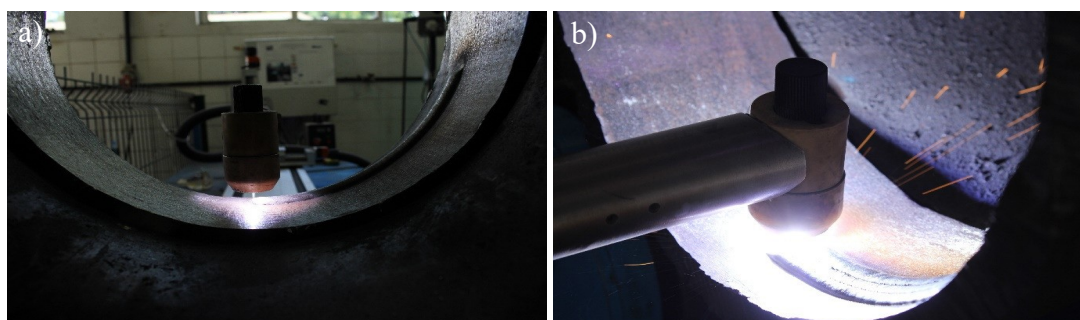
Foram utilizadas três vazões de gás de proteção, de modo que o fabricante da tocha (Tbi Industries) recomenda uma faixa operacional satisfatória de 6 a 13 l/min, porém estes valores são recomendados na utilização de argônio ou mistura de argônio com hidrogênio. Desta forma, foi observado a necessidade de extrapolar um pouco o valor máximo de vazão para verificar o comportamento com a aplicação de outros tipos de gases de proteção. Segundo a literatura, a vazão do gás de proteção pode variar de 10 a 30 l/min (Bracarense, 2000; Balasubramanian *et al.*, 2009). A vazão de gás plasma pode variar de 0,25 a 5 l/min (Bracarense, 2000). Segundo Oliveira (2001), 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 a 2,2 l/min, porém o fabricante recomenda de 0,5 a 5 l/min. Neste trabalho, foram utilizados dois níveis de vazões de gás plasma (1 e 3 l/min), de modo a avaliar o efeito deste parâmetro nos fatores resposta.

O argônio comercialmente puro (99,99%) é um dos mais utilizados no processo Plasma pó, pois promove cordões de boa qualidade, além de ser mais barato que outros gases no Brasil e é facilmente adquirível, motivando a sua utilização nesta pesquisa. O gás com adição de hélio apresenta maior potencial de ionização e tem como principal objetivo para sua aplicação a melhor fluidez, menor tensão superficial, o que melhora a molhabilidade, resultado verificado por Oliveira (2001). A mistura de argônio e hélio poderia ser uma boa alternativa para agregar o baixo custo e as características de abertura de arco e estabilidade do argônio. Outro gás que foi utilizado como gás de proteção é o argônio com adição de nitrogênio para verificar influência nas características geométricas e metalúrgicas. Na Tabela 2 são mostrados os ensaios realizados neste trabalho com as respectivas variáveis. Vale salientar que este planejamento de ensaios teve como base trabalhos anteriores, de modo a otimizar as condições que obtivessem elevado teor de ferrita, bom ângulo de molhamento, baixa diluição, reforço e largura satisfatórios (Nunes *et al.*, 2013).

Tabela 2. Parâmetros utilizados na soldagem Plasma pó.

Ensaio	Vazão de Gás de Proteção (l/min)	Tipo de Gás de Proteção	Vazão de Gás Plasma (l/min)
1	20	Argônio	1
2	20	Argônio+2,5%N ₂	1
3	20	Argônio+25%He	1
4	15	Argônio+25%He	3
5	15	Argônio	3

Em relação à Distância Bico-peça (DBP), o fabricante (Tbi Industries) recomenda uma faixa operacional de 8 a 12 mm, sendo que foi estipulado para um maior nível de DBP igual a 16 mm, de modo a resultar em cordões com baixo nível de diluição. Outros trabalhos já foram realizados utilizando DBP mais elevada, sendo importante esse tipo de estudo (Deuis *et al.*, 1998; Ribeiro, 2007; Silva, 2010).

**Figura 1. Soldagem com simples depósito. a) Abertura de arco piloto; b) Arco principal.**

Vale salientar que foram utilizados como parâmetros fixos: corrente de soldagem de 100 A; vazão de gás de arraste de 4 l/min; velocidade de soldagem de 9 cm/min; recuo do eletrodo de 1 mm e taxa de alimentação do pó de 22 g/min. As alterações das características do arco são influenciadas pelo recuo do eletrodo, o qual define juntamente com o diâmetro e comprimento do bico constritor, o grau de constrição e a rigidez do jato plasma (Díaz *et al.*, 2009). O argônio comercialmente puro (99,99%) é um dos mais utilizados no gás de plasma, sendo que uma mistura de argônio com hidrogênio pode ser utilizada para promover um arco voltaico de maior energia e promover penetração (Oliveira, 2001). A utilização de argônio apresenta uma menor taxa de erosão do eletrodo e do bico (Yaedu, 2003). O gás de arraste ou de transporte, geralmente o argônio, é utilizado para guiar o material consumível até o bico constritor permitindo a entrada no arco plasma, além de influenciar a forma do arco. Posteriormente, as amostras foram cortadas na direção transversal com lixamento até 1500 *mesh* e ataque realizado com Nital 5% durante 15 a 20 s para análise macrográfica (Figura 2). A quantificação do teor de ferrita do metal de solda foi realizado pelo ferritoscópio com 30 medições.

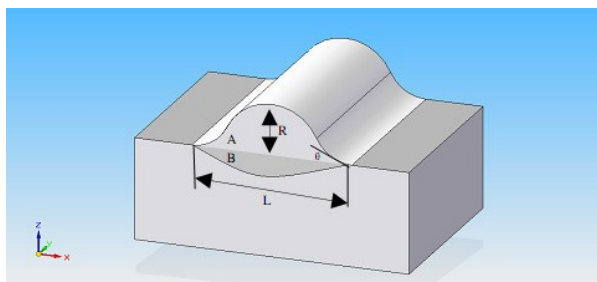


Figura 2. Perfil geométrico ilustrativo de um cordão soldado. R- reforço; L- largura; θ- ângulo de molhamento.

A diluição (D) foi determinada através da análise transversal do cordão de solda, segundo a Equação 1, onde A é a área adicionada pela deposição da solda e B é a área do metal de base que fundiu e passou a compor a zona fundida total.

$$D(\%) = (B / A + B) \times 100 \quad (1)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foi realizada a caracterização do tubo API X65 e metal de adição em forma de pó, como mostrado na Figura 3. A estrutura do aço API 5L X65 é composta de uma mistura de ferrita acicular de grãos finos, ferrita poligonal e perlita, justificada pela presença de elementos de liga, pois o material estudado é um aço microligado com cromo, vanádio, titânio, nióbio.

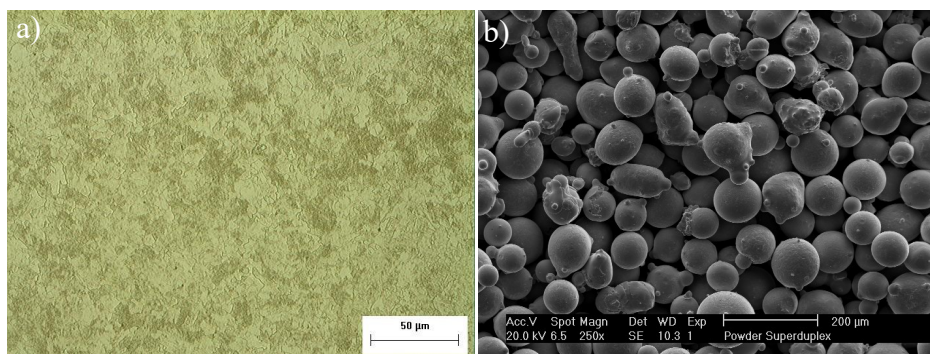


Figura 3. Caracterização dos materiais como recebido. a) Microestrutura do metal base API 5L X65 (Ataque com Nital 2% com aumento de 500 X feito por microscopia ótica; b) Morfologia dos pós de AISD feito por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com aumento de 250X.

Em relação ao pó, foram observadas partículas em sua maioria de forma esférica que são benéficas por possuírem maior capacidade de arraste, alimentação eficiente e redução de absorção de umidade em relação a partículas que possuem formas irregulares (Deuis *et al.*, 1998; Plasma team, 2011). Vale ressaltar que esta morfologia é característica de pós obtidos por atomização a gás. A morfologia do pó também tem um efeito primordial no surgimento de defeitos nos cordões de solda, de modo que o formato esférico obtido nesta pesquisa reduz a probabilidade no surgimento de porosidades. No contexto do trabalho de Matsuda *et al.* (1991), que aplicou substrato de alumínio, foi investigado o efeito da morfologia do pó (cromo, cobre e níquel) na geração de porosidade.

Em relação ao acabamento superficial e defeitos algumas importantes considerações foram observadas. Foram verificados pós não fundidos no final do cordão de solda em todas as condições. Balasubramanian *et al.* (2009)

verificaram que para distâncias do bico à peça maiores que 12 mm foram observados afastamentos do arco, além de instabilidade devido ao aumento do comprimento do arco. Devis *et al.* (1998) e Ribeiro (2007) relatam que para poder obter um bom rendimento de deposição, a distância bico-peça não deve ser maior do que 10 a 15 mm, sendo uma possível razão da maior quantidade de pó não fundido sobre a superfície do cordão soldado na maioria das condições soldadas. A menor vazão de gás plasma (1 l/min) ocasionou grande instabilidade no arco, sendo observada grande deflexão durante a soldagem, tornando o arco pouco rígido. A Figura 4 mostra a condição 2 que apresentou defeitos, como falta de fusão, poros e pós não fundidos ocasionados pela menor vazão de gás plasma e maior DBP que ocasionam menor diluição, evidenciando estes defeitos.

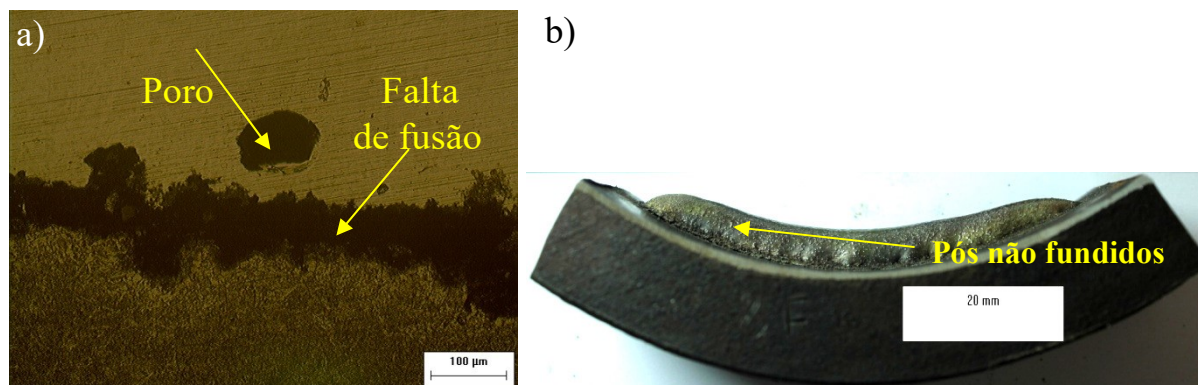


Figura 4 - Defeitos na interface e vista lateral na condição 2 (VGPR – 20 l/min; gás de proteção argônio + 2,5% de nitrogênio; vazão de plasma de 1 l/min e DBP de 16 mm). a) Poros e falta de fusão. Ataque com Nital 5% com Aumento de 200X. b) Pós não fundidos sobre o metal de solda.

Na Figura 5 são mostrados os gráficos do reforço e ângulo de molhamento para as condições soldadas dos ensaios realizados.

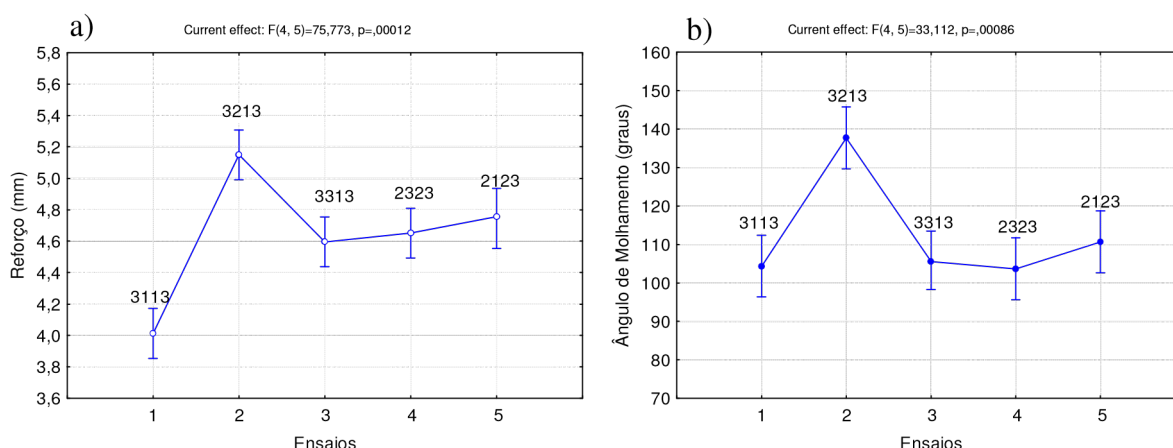


Figura 4. Influência dos parâmetros dos ensaios complementares nas características geométricas. a) reforço; b) ângulo de molhamento.

Primeiramente, é importante ressaltar que é necessário um reforço superior a 3 mm para deposição de aços inoxidáveis com o objetivo de revestimento, logo todas as condições foram satisfeitas. Em relação ao gráfico obtido do reforço, foi verificado que o ensaio 3113 (vazão de gás de proteção de 20 l/min, argônio como gás de proteção, vazão de gás plasma de 1 l/min e DBP de 16 mm) proporcionou menores níveis de reforço em comparação aos outros ensaios, principalmente devido à utilização de argônio como gás de proteção. O maior nível de reforço do ensaio 3213 foi devido a utilização da baixa vazão de gás plasma e maior DBP que são os fatores que mais influenciaram no reforço. O aumento da DBP pode acarretar a redução da densidade de corrente, causando uma redução da temperatura desta região, o que reduz a quantidade de calor para fundir o substrato, e resultando também em maior reforço (Takano *et al.*, 2007). DBP elevada (16 mm) resulta também em maior tensão do arco (24 V em média), influenciando na potência, aumentando a capacidade de fusão do pó.

No ângulo de molhamento, os ensaios realizados, com exceção do ensaio 3213, proporcionaram níveis de ângulo de molhamento similares, porém todos resultaram em cordões convexas, sendo um dos fatores críticos a serem melhorados nos trabalhos futuros. O ensaio 3213 foi o que ocasionou cordões bastante convexas (ângulos entre 130 e 140 graus), principalmente devido à utilização de argônio e 2,5% de nitrogênio como gás de proteção e menor vazão de gás plasma que são os fatores que mais influenciam no ângulo de molhamento.

O aumento da vazão de gás plasma provoca maior molhamento do cordão, pois torna a poça mais fluida, ocasionando redução do reforço. Vazões de gás plasma muito baixas (1 l/min) ocasionaram cordões muito convexas, com elevado reforço. Neste caso, o aumento da potência do arco não foi preponderante no aumento do reforço. Em alguns casos, como no trabalho de Bharath *et al.* (2008), quando os cordões soldados possuem um bom ângulo de molhamento, pode ocorrer o aumento do reforço com o aumento da vazão de gás plasma. A utilização de maiores vazões de gás plasma também acarretam em maior aporte térmico na poça de fusão. Som (1999) verificou que o aumento da vazão de gás plasma acarretou em maior calor transferido à peça (atribuído à maior concentração de energia, à redução de perdas de bico constritor e maior convecção de ânodo) e maior eficiência térmica.

O uso de argônio puro proporcionou 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 (Oliveira, 2001). 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, de forma que este aumento da potência também acarreta na maior eficiência de fusão devido ao maior reforço obtido.

Na Figura 5 são mostrados os gráficos da largura e diluição para as condições soldadas.

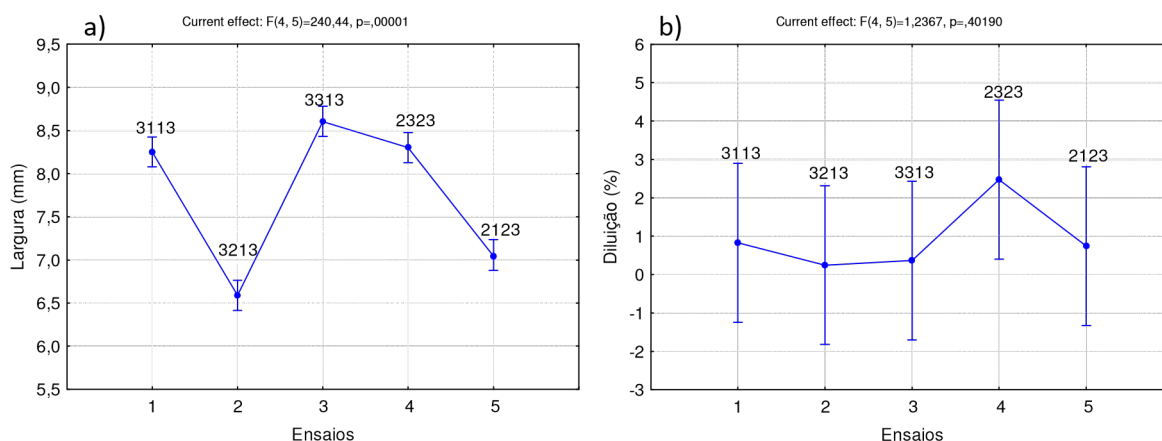


Figura 5. Influência dos ensaios nas características geométricas. a) largura; b) diluição.

Em relação à largura, os ensaios 3213 e 2123 ocasionaram cordões com menor largura, sendo ruim para soldagem de revestimento, que quanto maior, melhor. A condição 3213 é soldada com os parâmetros que ocasionam a pior largura possível, dentre os parâmetros estudados. A utilização da mistura argônio e hélio resultou em cordões de solda com maior largura, sendo que a utilização do argônio e nitrogênio acarretou na obtenção de cordões mais estreitos. A utilização da mistura argônio e hélio acarreta no melhor molhamento, além de arcos mais largos, ocasionando maior largura dos cordões soldados.

Em relação à diluição, todos os ensaios proporcionaram baixos níveis de diluição, não ocorrendo diferença significativa em relação à seleção de tipo de gás de proteção, vazão de gás plasma e de proteção. É importante obter cordões com baixa diluição, de modo a preservar as propriedades da liga depositada, em relação aos efeitos metalúrgicos. Esse resultado, possivelmente, ocorreu devido às soldagens serem realizadas com DBP elevada de 16 mm. O estudo da influência da DBP é de suma importância, pois existem estudos divergentes em relação ao efeito da DBP na diluição. Srimath & Murugan (2011) verificaram na deposição de pó de aço inoxidável que o aumento da DBP (6 para 10 mm com incremento de 1 mm) proporcionou aumento da penetração. No entanto, foi verificado que o aumento da DBP de 6 para 7 mm proporcionou redução da diluição, havendo aumento da diluição somente quando ocorreu acréscimo da DBP de 8 para 10 mm. Silva (2010) verificou que para baixo nível de corrente (75 A) ocorreu aumento da diluição com o acréscimo da DBP que é atribuído à maior potência do arco. Porém, é importante também a verificação do ponto focal, sendo que quando se dá acima do substrato, promove bons resultados na soldagem de revestimento. Como nesta pesquisa o ponto focal foi de 8,8 mm, todas as DBP's estudadas evitaram que a injeção do pó ocorresse diretamente na poça de fusão.

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 reduzindo pressão exercida pelo arco sobre a poça. Além disso, há maior barreira entre o arco e o substrato, devido ao maior reforço, reduzindo o nível de diluição. Vale salientar que foi verificada a dificuldade na abertura do arco para DBP de 16 mm, verificado também na literatura (Díaz, 2005). 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 na base do arco, irá se propagar em regiões mais extensas, em vez de concentrar em uma região estreita (Balasubramanian *et al.*, 2009; Díaz, 2005). No trabalho da referência (Hallen *et al.*, 1991) são mostrados os resultados em relação à distância bico-peça para dois níveis: 15 e 20 mm. O estudo mostra que a medida que aumenta a distância bico-peça o grau de diluição diminui. Os autores justificam pelo afastamento da peça das isotermais de maior temperatura do arco plasma, provenientes do eletrodo.

Na Figura 6 são mostrados os gráficos do teor de ferrita para as condições soldadas do ensaio de confirmação e soldagens complementares. Foi verificado que todas as condições apresentaram valores próximos de ferrita (níveis satisfatórios), não sendo significativo o efeito das condições soldadas nesta variável. Como na soldagem de revestimento serão realizados reaquescimentos consecutivos, é necessário um maior teor de ferrita possível na deposição de cordão simples.

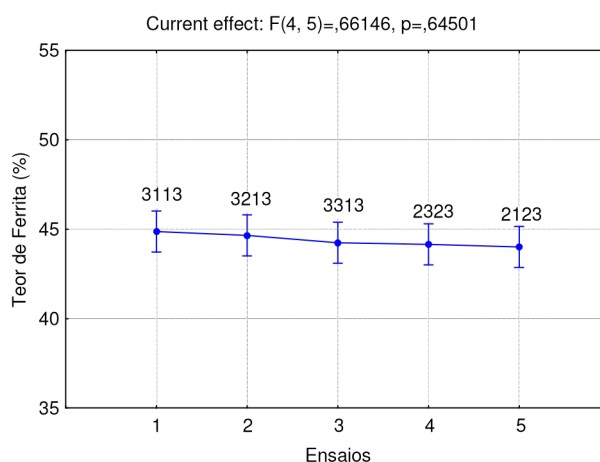


Figura 6 – Influência dos ensaios no teor de ferrita.

A faixa recomendada de ferrita ainda não é bem definida, dependendo de cada aplicação. Na soldagem de materiais utilizando o processo TIG é aceitável uma faixa de 22 a 70% de ferrita, porém em outros processos e sendo submetidos à exposição de meios corrosivos e possibilidade de trinca por hidrogênio é recomendada uma faixa mais restrita de 22 a 60% (Nassau *et al.*, 1993). Porém, geralmente, na prática é estipulada uma faixa de 30 a 70% (Tavares *et al.*, 2007) ou 35 a 65% (Eckenrod & Pinnow, 1984; Norsok M-630, 1997), de modo a aliar boas propriedades mecânicas e boa resistência à corrosão. Teores excessivamente altos de ferrita causam fragilidade, enquanto ausência dessa fase causa perda de resistência à fissuração por corrosão sob tensão. No entanto, manter o equilíbrio é difícil devido à soldagem que acarreta em reaquescimentos que alteram muitas vezes de modo significativo o balanço de fases.

De acordo com as condições soldadas, os ensaios que apresentaram os melhores resultados, considerando uma melhor combinação para obtenção de maior largura, maior reforço, menor ângulo de molhamento, menor diluição e maior teor de ferrita, foram 3 e 4. A Tabela 3 mostra os valores obtidos nas soldagens em relação à característica geométrica e teor de ferrita.

Tabela 3 – Características geométricas e teor de ferrita em valores médios para as condições 3 e 4.

Ensaio	Reforço (mm)	Largura (mm)	Ângulo de molhamento (graus)	Diluição (%)	Teor de ferrita (%)
3	4,59 ±0,06	8,6±0,1	105,5±5,3	0,36±0,4	44,2±1,9
4	4,65±0,05	8,3±0,06	103,6±9,2	2,4±2,4	44,1±0,7

Foram verificados que os valores obtidos foram bem próximos, analisando as duas condições soldadas, porém o nível de diluição da ordem de 0,36% da condição 3 pode proporcionar maior quantidade de defeitos na interface. A escolha da menor vazão de gás de proteção e maior vazão de gás plasma foi responsável pelo maior nível de diluição do ensaio 4 em relação ao ensaio 3.

Em relação aos ensaios, foi verificado que o reforço variou de 4,0 a 5,15 mm; largura de 6,6 a 8,6 mm; diluição de 0,24 a 2,5%; ângulo de molhamento de 103,6 a 138 graus e teor de ferrita de 43,5 a 45%, todos valores médios. 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 menor vazão de gás de proteção (15 l/min) apresentou bons resultados, além de representar menor custo. 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. Por fim, a vazão de gás de proteção não influenciou no reforço, desta forma não se justifica empregar maiores vazões, pois acarretam em maior custo, turbulência, defeitos e pior acabamento superficial.

A vazão de gás plasma influenciou de forma mais significativa o ângulo de molhamento e largura, sendo que a vazão maior (3 l/min) proporcionou os melhores resultados e um arco mais rígido. Ribeiro (2007) também utilizou as seguintes vazões de gás plasma: 1,5; 2,0 e 2,4 l/min, e na menor vazão observou-se a formação de poros/cavidades no

cordão de solda, bem como uma grande instabilidade do arco plasma. Também foi verificado um maior desgaste do bico constritor nas soldagens com menor vazão de gás plasma (1 l/min), queimando a superfície externa do bico constritor, comportamento já registrado na literatura (Díaz *et al.*, 2009).

A diluição é um dos fatores mais importantes na soldagem de revestimento, e o fator que a mais influenciou foi a DBP. Desta forma, foi selecionada a DBP de 16 mm. Além disso, a maior DBP expõe menos a tocha à vapores metálicos. A utilização de elevada DPB (16 mm) proporcionou bons resultados em relação à soldagem de revestimento.

Em relação ao tipo de gás de proteção, foi selecionada a mistura de gás argônio e 25% de hélio. A escolha deste tipo de gás contribui para o aumento do reforço, redução do ângulo de molhamento, melhor acabamento superficial. Outro fator que contribuiu para a escolha desta mistura é o seu efeito significativo no aumento da largura dos cordões. Apesar deste gás não contribuir para o aumento do teor de ferrita e redução da diluição, os fatores citados justificam a sua aplicação.

Logo, o ensaio definido como melhor foi soldado 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. Desta forma, foi verificado que a característica dimensional mais crítica para a soldagem desta liga foi o ângulo de molhamento, obtendo cordões convexos, sendo o fator mais crucial para ser melhorado nas etapas posteriores do referido trabalho.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e apresentados no trabalho, foi possível concluir que:

- Em relação às características geométricas, foram obtidos cordões de solda satisfatórios em relação ao reforço, largura, diluição;
- Dentre as condições estudadas, não foram obtidos cordões com bom ângulo de molhamento;
- Todas as condições soldadas apresentaram um bom balanço de fases ferrita/austenita no metal de solda;
- A utilização do gás de proteção com mistura argônio e 25% de hélio foi a variável que influenciou mais nas características geométricas, acarretando em menor ângulo de molhamento e maior largura dos cordões depositados;
- Os resultados mostraram ser promissores, porém deve haver maior exploração de outros parâmetros para obter revestimento de boa qualidade em relação principalmente à molhabilidade do cordão de solda.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Engenharia de Soldagem pelo apoio laboratorial, ao Instituto Federal de Educação do Ceará/Jaguaribe e aos órgãos de fomento: CAPES e FINEP, pela concessão da bolsa e apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Balasubramanian, V., Lakshiminarayanan, V., Varahamoorthy, R. and Babu, S., 2009, "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), p. 44-53.
- Barnhouse, J. and Lippold, J. C., 1998, "Microstructure/Property Relationships in Dissimilar Welds Between Duplex Stainless Steels and Carbon Steels", *American Welding Society*, v. 77, n. 12, 1998, p. 477-487.
- Bracarense, A. Q., 2000, "Soldagem a Plasma – PAW", Belo Horizonte.
- Bharath, R. R. *et al.*, 2008, "Optimization of Process Parameters for Deposition of Stellite on X45CrSi93 Steel by Plasma Transferred Arc Technique". *Materials and Design*, v. 29, p. 1725-1731.
- Deuis, R. L., Yellup, J. M. and Subramanian, C., 1998, "Metal-matrix Composite Coatings by PTA Surfacing", *Composites Science and Technology*, 58, p. 299-309.
- Díaz, V. M. V., 2005, "Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) para Soldagem fora de Posição", Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 174p.
- Díaz, V. V., Dutra, J. C. e D'oliveira, A. S. C., 2009, "Uma Contribuição ao Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido com Adição de Pó (PTA) para Posições Forçadas", XXXV Consolda – Congresso Nacional de Soldagem, Piracicaba-SP.
- D'oliveira, A. S. C., 2006, "Customização de Superfícies Soldadas por Plasma com Arco Transferido", 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR.
- D'oliveira, A. S. C. M., Paredes, R. S. C. e Santos, R. L. C., 2006, "Pulsed Current Plasma Transferred Arc Hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology*", 171, p. 167–174.
- Eckenrod, J. J. and Pinnow, K. E., 1984, "Effects of Chemical Composition and Thermal History on the Properties of Alloy 2205 Duplex Stainless Steel". In: *New Developments in Stainless Steel Technology*. p. 77-87.
- Filho, F. M. e Bastian, F. L., 2003, "Adequabilidade da Equação de Paris para a Previsão de Vida em Fadiga em Risers Rígidos", 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás.
- Francis, R., 2008, "Marine Corrosion Resistance of Zeron 100 Superduplex Stainless Steel", Rolled Alloys Company.

- Gatto, A., Bassoli, E. and Fornari, M., 2004, "Plasma Transferred Arc deposition of Powdered High Performances Alloys: Process Parameters Optimization as a Function of Alloy and Geometrical Configuration", *Surfacing & Coatings Technology*, 187, p. 265-271.
- Graf, K. and D'oliveira, A. S. C. M., 2003, "Microstructural Stability and Wear Performance of a Ni Based Alloy PTA Coating", In: *International Conference on Mechanical Engineering*, São Paulo.
- Hallen, H., Lugscheider, E. and Ait-mekideche, A., 1992, "Plasma Transferred Arc Surfacing with High Deposition Rates. In: *Proceedings of conference on thermal spray coatings: properties. processes and applications*", Pittsburgh, USA, 4-10 May, ASM International; p. 537-9.
- Kannan, T. and Murugan, N., 2006, "Prediction of Ferrite Number of Duplex Stainless Steel Clad Metals Using RSM", *Welding Journal*, p.91-100.
- Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V., Varahamoorthy, R. and Babu, S., 2008, "Predicting the Dilution of Plasma Transferred Arc Hardfacing of Stellite on Carbon Steel Using Response Surface Methodology", *Metals and Materials International*, vol. 14, No. 6, p. 779-789.
- Liyanage, T., Fisher, G. and Gerlich, A. P., 2010, "Influence of Alloy Chemistry on Microstructure and Properties in NiCrBSi Overlay Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc Welding (PTAW)", *Surface & Coatings Technology* 205, p. 759-765.
- Nelson, T. W., Lippold, J. C. and Mills, M. J., 1998, "Investigation of Boundaries and Structures in Dissimilar Metals Welds", *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 13, n. 5, p. 249-255.
- Norsok. 1997, "NORSOK STANDARD M-630: Material Data Sheets for Piping", Edition 2.
- Nunes, E. B., Barreto, A. S., Santos, D. M., Miranda, E. C., Motta, M. F., 2013, "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", In: *68º Congresso ABM - Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração*, Belo Horizonte.
- Ogata, P. H., 2009, "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*, 105p.
- Ogata, P. H., Ramírez, M. G., Goldenstein, H., Gorni, A. A. and Landgraf, F. J. G., 2008, "Caracterização Microestrutural de Aço API 5L X65, Austenitizado e Resfriado a Diferentes Taxas de Resfriamento", *18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais – CBECiMat*, Porto de Galinhas (PE).
- Oliveira, M. A., 2001, "Estudo do Processo Plasma com Alimentação Automática de Arame", *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis*, 78p.
- Rajeev, R., Smajdar, I., Raman, R., Harendranathan, C. S. and Kale, G. B., 2001, "Origin of Hard and Soft Zone Formation during Cladding of Austenitic/Duplex Stainless Steel on Plain Carbon Steel", *Materials Science and Technology*, v. 17, p. 1005-1011.
- Ribeiro, H. O., 2007, "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*, 145p.
- Scott, P., 2010, "Sunrise Lng Development – Review of Mechanical and Corrosion Testing of CRA Flowlines", *Woodside*.
- Silva, R. H. G., 2010, "Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-pó (PTA-P)". *Tese (doutorado) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 265p.
- Som, A. I., 1999, "New Plasma Torches for PTA-surfacing", *The Paton Welding Journal*, nº 7, pp. 44-48. Artigo disponível em <www.plasma-master.com.ua>. Acessado em novembro de 2011.
- Srimath, N. and Murugan, N., 2011, "Prediction and Optimisation of Weld Bead Geometry of Plasma Transferred Arc Hardfaced Valve Seat Rings", *European Journal of Scientific Research*, v.51, n: 2, p. 285-298.
- Takano, E. H., Queiroz, D. e D'oliveira, A. S. C. M., 2007, "Avaliação dos Parâmetros de Processamento por PTA nas Superfícies Processadas", *4º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, São Pedro-SP.
- Wang, H., Jiang, W., Valant, M. and Kovacevic, R., 2003, "Microplasma Powder Deposition as a New Solid Freeform Fabrication Process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, p. 217-1647.
- Yaedu, A. E., 2003, "Influência do Substrato na Deposição de Stellite 1 com Plasma de Arco Transferido", *Dissertação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba*.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF SHIELDING GAS AND PLASMA GAS FLOW ON DEPOSITION OF SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32760 BY PLASMA POWDER PROCESS

Everton Barbosa Nunes, everton.nunes@ifce.edu.br¹
Alexandre Sousa Barreto, abs.engmec@gmail.com²
Nathália Escóssio Cavalcante, nathalia.escossio@gmail.com²
Igor Paulino Fernandes, igor.engmet@outlook.com²
João Cairo Pereira Alcântara, cairoalcantara@hotmail.com²
Marcelo Ferreira Motta, marcelof@ufc.br²

¹Instituto Federal do Ceará, R. Pedro Bezerra de Menezes, nº 387, Manoel Costa Moraes, Jaguaribe-CE.

²Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Laboratório de Tecnologia em Soldagem, Bloco 1080, Fortaleza-CE.

Abstract. *In several applications (risers, pipes), whether in manufacturing or in the maintenance of equipment or components, welding is used, being of the most importance the use of correct process and procedure, in order to minimize changes in metallurgical and mechanical properties of the materials. In this scenario, the degradation of surfaces exposed to aggressive environments in terms of corrosion, wear and/or temperature imposes a challenge to engineers and researchers with regard to an increase in the useful life of components and equipment, with consequent cost reduction. Due to the high cost of manufacturing equipment with solid special alloy materials, several equipment is usually built with less noble materials and it is coated with materials of excellent corrosion resistance and mechanical properties. Welding of superduplex stainless steels (SDSS) coating can be a good option, allowing to achieve desired characteristics, combining good corrosion resistance and good mechanical properties. In recent years, the use of Plasma powder process has been excelling for presenting good stability, lower distortion and good control of dilution. Due to the complexity of the process is important to the study of the welding parameters, so that the shielding gas and plasma gas flow are one of the most essential in the geometric characteristics of the weld bead. The purpose of this study was to evaluate the influence of the type and flow of shielding gas and plasma gas flow in weldments of pipeline coating with deposition of SDSS in the geometric characteristics and ferrite content of weld metal by Plasma powder process. The welds were held in simple deposit in pipes API 5L X 65 (12 X 21.44 mm) for evaluation of geometric characteristics (reinforcement, width, angle of wetting), dilution and content ferrite. Two were used shielding gas flows (15 and 20 l/min), three types of shielding gas (Argon, Ar+2%5He and Ar%2,5N₂) and two plasma gas flow rates (1 and 3 l/min). In relation to the flow of shielding gas, the most appropriate was the smallest and in relation to the type of shielding gas, it was selected the Ar+25%He mixture. The choice of this type of gas contributed to the increase, reducing the angle of wetting, better surface finish and large wide. The plasma gas flow that brought the best results in terms of width and angle of wetting, it was the intermediate flow that corresponds to 3 l/min, justifying its use. The results showed that the deposition of SDSS can be a good option for coating, welding with low levels of dilution and with favorable characteristics to ensure good characteristics to coatings.*

Keywords: *Weld overlay, Superduplex, Powder, Plasma, Geometry*