

## Desenvolvimento de Procedimentos de soldagem TIG e Análise de Diferentes Parâmetros para a Soldagem de Raiz em Tubos de Aço API 5L Grau A

### (Development of TIG Welding Procedure and Analysis of Different Parameters for Root Welding Steel Pipe API 5L Grade A)

Júlio César Bento Ribeiro<sup>1</sup>, Regis Gonçalves da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal Sul Rio-grandense, DDET/ Curso de Mecânica, Pelotas, RS, Brasil,  
julio@pelotas.ifsul.edu.br.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, regis@labsolda.ufsc.br

#### Resumo

Devido ao grande emprego dos dutos, como meio de transporte de materiais em variados segmentos produtivos, como as indústrias de geração termoeletrica e as do petróleo e gás, procedimentos de soldagem mais produtivos são buscados, e a soldagem de raiz apresenta dificuldades de controle quando precisa ser praticada em variadas posições como é o caso da soldagem de topo em tubos. Neste sentido foi testada a variante do processo TIG conhecida por "cold wire", ou seja, com alimentação automática do arame frio, podendo o mesmo ser introduzido radialmente ou tangencialmente, o que caracterizou duas técnicas distintas. Este estudo exigiu a adaptação de tochas, e o desenvolvimento de bancada para realizar a soldagem nas posições 1G, 5G e 6G. Com o objetivo de compreender o comportamento das variáveis processuais de mercado e obter parâmetros mais produtivos, foram realizadas soldas nas posições 1G, 5G e 6G, considerando maneiras diferentes de determinar a raiz da solda. Como resultados, destacamos que a melhoria da produtividade foi evidente quando, se utilizou a mistura de gás argônio com 5% de hidrogênio, porque possibilitou incrementar a velocidade de soldagem, quatro vezes a mais que o gás argônio de pureza comercial. Outro caminho adotado foi o de aumentar a face da raiz em o dobro da espessura de referência, reduzindo custos globais do procedimento. Constatamos ainda o bom acabamento na face da solda e na raiz da solda empregando-se frequências de 0,24 até 5 Hz para a corrente pulsada. Procurou-se mostrar uma explicação para o transporte de metal através do arco TIG observado durante a soldagem, e atribuímos a ambos os métodos de introdução de arame condições e parâmetros para seu uso.

**Palavras-chave:** Procedimentos de Soldagem TIG; Soldagem de Raiz Orbital; Injeção Tangencial de Arame; Injeção Radial de Arame.

**Abstract:** Due to the large use of pipelines for transportation of materials in various production sectors such as thermoelectric power generation industries and oil and gas, welding procedures are sought more productive, and weld root control presents difficulties when it needs to be practiced in various positions such as the welding of the top tubes. In this sense we tested the variant of the TIG process known as "cold wire", i.e., with automatic feeding of the cold wire, the same can be introduced radially or tangentially, which featured two different techniques. This study required the adaptation of torches, and the development of bench to perform welding in positions 1G, 5G and 6G. In order to understand the behavior of the procedural parameters of the market and get more productive, welds were made at positions 1G, 5G and 6G, considering different ways to determine the root of the weld. As a result, we highlight the improvement in productivity was evident when we used a mixture of argon with 5% hydrogen, because it allowed me to increase the welding speed, four times longer than with pure argon. Another way was by the increase of the root in the face twice the thickness of reference, reducing overall costs of the procedure. We have also shown a good finish on the face of the weld root and weld employing frequencies of 0.24 to 5 Hz for the pulsed current. It is shown an explanation for the transport of metal across the arc observed during TIG welding, and assigned to both input methods and aspects of wire parameters for its use.

**Keywords:** TIG Welding Procedures, Root Orbital Welding, Tangential Wire Injection, Radial Wire Injection.

## 1. Introdução

O processo TIG produz soldas de alta qualidade com baixo índice de defeitos, mas devido a que é aplicado geralmente de forma manual, resulta em baixa produtividade e elevados custos associados ao consumo de gás e mão de obra, além de incidir elevada habilidade manual do soldador.

Técnicas de soldagem TIG compreendem desde o emprego conveniente das misturas de gases que elevam a potência do arco, bem como o uso da corrente pulsada com frequência focada ao efeito desejado, ora para controle da escoabilidade da poça de fusão na soldagem fora de posição, ora desejado o incremento da qualidade da solda pelo refino de grãos, ou um pulsado de alta frequência que possibilite o aumento da densidade de energia do arco e a conseqüente diminuição do tempo de soldagem, distorções e tensões induzidas na junta, são controles possíveis com este processo [7].

Muitos processos e procedimentos podem ser aplicados a soldagem de tubulações de campo, como a soldagem praticada manualmente com eletrodos celulósicos, e aos mecanizados procedimentos com processos MIG/MAG na variante STT (Surface Tension Transfer), variantes do processo TIG como duplo eletrodo alinhado dito Tandem ou transverso a linha de solda como o Twin e ainda os processos híbridos como LASER MAG e Plasma MIG, e todos os citados devem atender a razões econômicas e técnicas na ordenação de seu uso. O processo TIG arame frio na sua versão mais simples com único eletrodo teve sua produtividade reavaliada devido ao emprego do gás argônio com hidrogênio, cujo custo é bem inferior ao gás hélio, o que possibilitou comparações de produtividade com MIG/MAG e LASER em artigos recentemente publicados [7,8].

É devido à possibilidade de compactação da tocha TIG em ser montada em dispositivos de trajetória como, por exemplo, em cabeçotes orbitais aplicados principalmente na união de tubos de até oito polegadas de diâmetro, associado ao bom controle da energia que o processo disponibiliza na soldagem de raiz, que procedimentos TIG são empregados [3]. Porém para ter respaldo técnico e econômico, dependerá da análise da parametrização processual e dos resultados obtidos.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Caracterização do material e da junta a soldar.

A composição química do tubo e os ensaios de resistência a tração e de alongamento permitiram o enquadramento do material dos tubos como API 5L GRAU A (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química e propriedades do material do tubo comparado a norma API 5L [4].

GRANDEZAS	%C máx.	%Mn máx.	%P máx.	%S máx.	Tubo Ensaiado		Norma API 5L GRAU A	
API 5L GRAU A	0,22	0,9	0,030	0,030	MPa	lb/pol <sup>2</sup>	MPa (min)	lb/pol <sup>2</sup> (min)
Tubo ensaiado	0,20	0,8	0,028	0,028				
Limite de Resistência					462,5	67.070	331,0	48.000
Limite de Escoamento					311,4	45.150	206,0	30.000
Alongamento mínimo (%)					38,6		28	

A preparação do chanfro teve para a face da raiz (nariz da junta) original em 2,0 mm, em soldas com o "GAP=0", ou seja, sem fresta entre as juntas para facilitar o alinhamento da junta. O ângulo de abertura do chanfro em 45°, diferentemente do tradicional 75° [6]. Os tubos ensaiados variam em espessura entre 6,35 e 7,93 mm e diâmetros entre 89 e 114 mm com uma configuração de junta conforme a Figura 1.

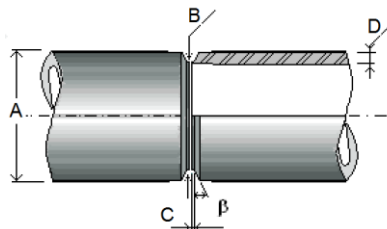


Figura 1. Desenho do tubo preparado para os ensaios de soldagem.

As dimensões de referência (padrão para comparação): A=89, B=77,4 mm, C=2, D=7,93 mm,  $\beta=22,5^\circ$ .

## 2.2. Alterações na bancada de ensaios e posições de soldagem.

A bancada inicialmente analógica, com motor DC tinha a regulagem da velocidade de soldagem ( $V_s$ ) através de um potenciômetro de resistência variável, que permitia que o motor alterasse a sua velocidade proporcionalmente a tensão em malha aberta, mas exigia calibrações constantes na bancada para determinar a  $V_s$  de forma confiável. Uma melhoria na motorização foi obtida pela instalação de um drive de controle de movimento, STEP/DIR, e de um motor de passo com encoder operando em malha fechada, cuja interface com o usuário passou a ser o programa “Mach3 CNC” em ambiente “Windows” o qual aumentou as possibilidades de ajustes de velocidades para a soldagem. Como o eixo árvore da bancada pode ser articulado em até  $45^\circ$  foi possível realizar soldas nas posições 6G, que permitiram a comparação da robustez dos parâmetros das soldas praticadas na posição 5G. Além disto, a soldagem 6G possibilita a qualificação de procedimentos com validade em todas as posições de soldagem (Figura 2).

1G – O tubo gira com o eixo na horizontal e a tocha fica parada	5G - A tocha gira em torno do tubo com o eixo na horizontal	6G – A tocha gira em torno do tubo parado com o eixo a $45^\circ$
		

Figura 2. Posições da soldagem de topo em tubulações

## 2.3. Variantes do processo TIG arame frio.

Na técnica do arame frio, o mesmo é introduzido no arco de soldagem a temperatura ambiente, sendo esta variante a mais comumente utilizada. Quanto ao modo de alimentação do arame pode ser injetado radialmente (pelo topo) ou tangencialmente (pela ponta), em relação ao eletrodo não consumível (Figura 3. a).

Estas duas possibilidades de introdução se revelaram bem distintas. O arame quando injetado radialmente poderá passar em uma região mais quente da coluna de plasma gerada no arco elétrico [7]. Para que isto aconteça o arame deverá passar tão próximo a superfície lateral do cone formado pelo apontamento do eletrodo o que favorece a soldagem “puxando” (Figura 3. b), porque no modo “empurrando” o arame fica susceptível a flexionar e a tocar no eletrodo podendo interromper o processo por contaminação ou desvio de arco. Ainda a soldagem “puxando” favorece a penetração, devido à ação do arco de soldagem agir diretamente no material de base.

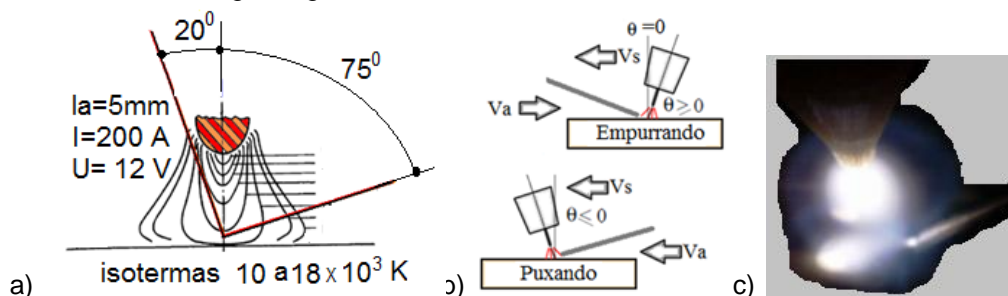


Figura 3. (a) Isotermas do arco TIG, empregando o gás argônio, e adaptado ao desenho a representação do arame sendo introduzido radialmente e tangencialmente [1]. (b) sentido de  $V_a=V_s$  (puxando) e sentido de  $V_a \neq V_s$  (empurrando). (c) ponte sólida do arame com a poça.

O modo de introdução clássico o qual injeta o arame de forma mais tangencial à linha de solda, é empregado principalmente no modo empurrando, e é muito usado em cabeçotes orbitais para soldagem de tubos e dutos. A ponte estabelecida pelo crescimento da poça de fusão e a ponta do arame possibilita uma transferência metálica (Figura 3. c), que caracteriza o estado de maior taxa de deposição para este modo de alimentação. Este fenômeno favorece a sustentação da poça, ao escorrimento na soldagem fora de posição, e evita a falta de reforço na raiz como se verifica na soldagem autógena vertical descendente. A velocidade de alimentação de arame esta condicionada

à corrente de soldagem e há certa linearidade da capacidade do arco em fundir o arame até próximo a 300 A de corrente [2], após isto não há tempo para a fusão e o arame atravessa o arco. Quando se solda “puxando” estando o arame tangente a poça riscará o reforço na face da solda ou irá emaranhar-se, devido ao bloqueio de seu movimento, podendo atingir o eletrodo e interromper o processo, já o método de injeção radial com elevada velocidade tenderá a atravessar a poça e a raiz da solda.

## 2.4. Soldagem de tubo na posição 5G, com parâmetros setoriais de procedimento usual industrial.

Os parâmetros fixados no ensaio foram o Eletrodo EWTh-2 de diâmetro 3,2 mm apontado em 30°, o gás de proteção (argônio a 12,0 l/min. de vazão), sendo o arame ER70-S6 com 1,0 mm de diâmetro. Observa-se no diagrama da Figura 4, construído a partir da Tabela 2, que a execução do passe de raiz teve início em 10 horas e o sentido de soldagem foi horário, havendo pequenas variações nos parâmetros de soldagem para cada setor, num total de cinco.

Tabela 2. Os parâmetros empregados na execução do passe de raiz.

Graus	Im (A)	Ip (A)	lb (A)	tp (ms)	tb (ms)	U (V)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	f Hz
Setor 1 (0° - 3°)	104	170	80	110	300	9,6	5,0	0,4	2,4
Setor 2 (3° - 100°)	115	170	95	110	300	9,3	5,0	1,0	2,4
Setor 3 (100° - 300°)	104	166	82	110	300	9,1	5,0	1,0	2,4
Setor 4 (300° - 358°)	104	166	82	110	300	9,5	5,0	1,0	2,4
Setor 5 (358° - 3°)	103	166	80	110	300	9,8	5,0	0,6	2,4

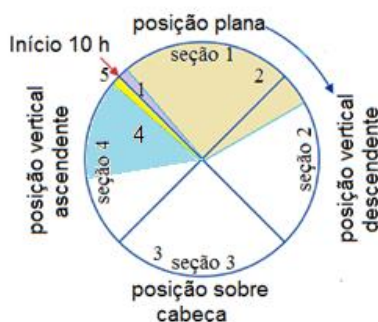


Figura 4. As posições de soldagem 5G, e os setores empregados na parametrização da solda.

As seções mostradas na Figura 4 são referentes às posições de soldagem “5G”, as quais contemplam todas as posições exceto a horizontal. Chamaremos de setor a região compreendida na circunferência que se refere aos parâmetros empregados na soldagem. Note que o zero grau esta posicionado em 10 h (em analogia ao posicionamento das horas de um relógio) e indica o início da solda que coincide com o início da seção 1 a qual corresponde à posição plana. Os números indicam de acordo com a Tabela 2, os setores em que foi desenvolvida a solda para o passe de raiz.

## 3. Resultados e discussões

### 3.1. Soldagem na posição 1G mantendo-se os parâmetros de referência e adicionando 5% de hidrogênio ao argônio

Com o objetivo de comparar a geometria do cordão de raiz em relação aos parâmetros qualificado com o gás argônio puro, foram realizados ensaios com o gás argônio com 5% de hidrogênio na posição mais elemental 1G (Figura 5), situação de soldagem em que o tubo gira e a tocha permanece parada na posição equivalente a plana. Foram utilizados os mesmos parâmetros para estes ensaios como os descritos na Tabela 2, para o setor 3, porém o nariz da junta originalmente em 2,0 mm passou para 2,5 mm, buscando minimizar custos de preparação da junta e menor tempo de execução.



Figura 5. Bancada para soldagem orbital com injeção tangencial de arame.

A velocidade de soldagem foi progressivamente aumentada para visualizar o comportamento da raiz da solda, porque no primeiro ensaio do cordão de raiz, a razão da largura da raiz ( $L_r$ ) pela largura da face ( $L_f$ ) apresentou um fator de forma (FF) que tendeu inicialmente a valores acima de 1, ou seja, excedendo até mesmo a forma retangular que é característico quando há aporte de calor excessivo na raiz da junta, porque resulta geralmente em um reforço ( $r$ ) excessivo na raiz da solda. A Figura 6 mostra que na medida em que se aumentava a velocidade de soldagem a área total ( $A_t$ ) que compreende a área fundida no metal de base ( $A_f$ ) somada à área de metal depositada ( $A_d$ ) foi diminuindo devido à penetração e a taxa de deposição de arame ser grandezas inversas a velocidade de soldagem.

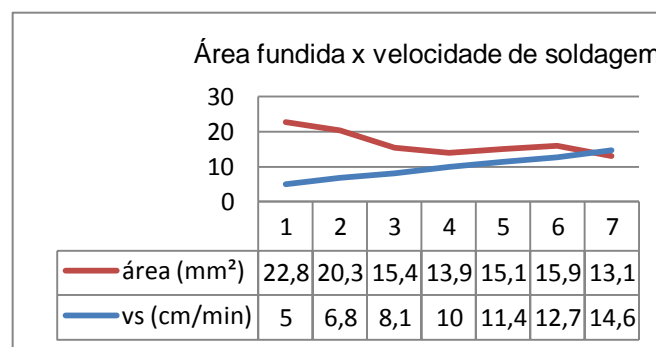


Figura 6. Comportamento da área com variação na Vs.

Os cordões 1 e 2 apresentaram raiz excessiva, e o cordão 3 com boa raiz e 4 com raiz com pouco reforço, 5 com a raiz segmentada e os cordões 6 e 7 com falta de penetração, determinando desta forma parâmetros para soldagem de raiz.

### 3.2. Soldagem orbital com TIG alimentado e as variáveis de estudo.

O processo TIG arame frio, com relação ao modo de introdução de arame na soldagem, pode variar com o ângulo o qual é injetado em relação ao eletrodo de tungstênio não consumível caracterizando as variantes comerciais TOP TIG (alimentação pelo topo) e TIP TIG (alimentação pela ponta do eletrodo). Ainda podemos soldar puxando e empurrando e seria razoável experimentar estas técnicas na soldagem de tubos conforme sugere a Figura 7, que questiona ângulo de posicionamento da tocha, ângulo de introdução de arame e sentido de progressão da solda.

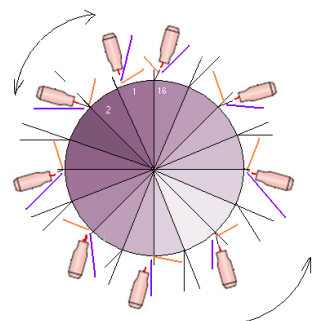


Figura 7. Possibilidades de posicionamento de tocha; ângulo de introdução de arame; progressão da solda e parametrização setorial.



### 3.3. Ensaios na bancada plana com modos diferentes de introdução de arame.

Um estudo com simples deposição em chapa de aço baixo carbono ABNT 1008 com 8 mm de espessura, eletrodo EWTh-2 com 3,2 mm de diâmetro e afiado em 60°, 150 A de corrente (DCEN) e 2 m/min de velocidade de alimentação de arame (Va) cujo diâmetro foi de 0,8 mm e 15 cm/min velocidade de soldagem (Vs) com ângulo de ataque (posicionamento da tocha) em zero e o gás Ar+5%H<sub>2</sub> com vazão de 10 l/min. Com estes parâmetros analisou-se a molhabilidade do cordão e então o parâmetro foi adotado para os ensaios com ambos os modos de introdução em 20° e 60° (graus) em relação ao eixo eletrodo (0°) e o sentido de progressão puxando e empurrando, com objetivo de estudo processual pois, podem influenciar a estabilidade e o rendimento do processo.

A configuração da distância eletrodo arame (DEA) por estar no referencial da tocha deve ser cuidadosamente determinada para que possa haver o domínio do modo de transferência (além da velocidade de arame) e da posição que o arame é introduzido na poça (mais ao centro ou mais afastado deste visto de cima). A seqüência de quadros da Figura 8 mostra combinações possíveis de introdução de arame no arco. Uma seqüência de quadros será ilustrada abaixo perfazendo as condições possíveis de ajuste processual para o TIG alimentado. Para tal um arranjo combinatório fatorial completo foi montado para testar ambas as tochas e seus respectivos modos de alimentação em dois níveis, de acordo com a equação:

$$NC = N^F = 2^4 = 16 \text{ combinações} \quad (1)$$

Onde o número de combinações (NC) é igual ao nível do fator de controle (N) elevado a potência do número de fatores (F). São fatores de controle o modo de alimentação e seus níveis, Tangencial (TIP representado pelo numero 2) e radial (TOP representado pelo numero 1); O modo de progressão, puxando e empurrando; O DEP (distância eletrodo peça), 3 mm e 5 mm; O DEA terá um valor alto e um valor baixo indexado ao modo de alimentação e de progressão. A Tabela 3 mostra a matriz combinatória dos ensaios, e a Figura 8 o desenho esquemático do ambiente processual com as variáveis de ensaio.

Tabela 3. Ensaio fatorial completo com TIG alimentado

NC	Fatores e níveis (TIP=1)				NC.	Fatores e níveis (TOP=2)			
1.	TIP	Pux.	DEP=3 mm	DEA= 1,8 mm	9.	TOP	Pux.	DEP=3 mm	DEA=1,0 mm
2.	TIP	Pux.	DEP=3 mm	DEA= 2,4 mm	10.	TOP	Pux.	DEP=3 mm	DEA=1,4 mm
3.	TIP	Pux.	DEP=5 mm	DEA= 1,8 mm	11.	TOP	Pux.	DEP=5 mm	DEA=1,0 mm
4.	TIP	Pux.	DEP=5 mm	DEA= 2,4 mm	12.	TOP	Pux.	DEP=5 mm	DEA=1,4 mm
5.	TIP	Emp.	DEP=3 mm	DEA= 1,8 mm	13.	TOP	Emp.	DEP=3 mm	DEA=1,0 mm
6.	TIP	Emp.	DEP=3 mm	DEA= 2,4 mm	14.	TOP	Emp.	DEP=3 mm	DEA=1,4 mm
7.	TIP	Emp.	DEP=5 mm	DEA= 1,8 mm	15.	TOP	Emp.	DEP=5 mm	DEA=1,0 mm
8.	TIP	Emp.	DEP=5 mm	DEA= 2,4 mm	16.	TOP	Emp.	DEP=5 mm	DEA=1,4 mm

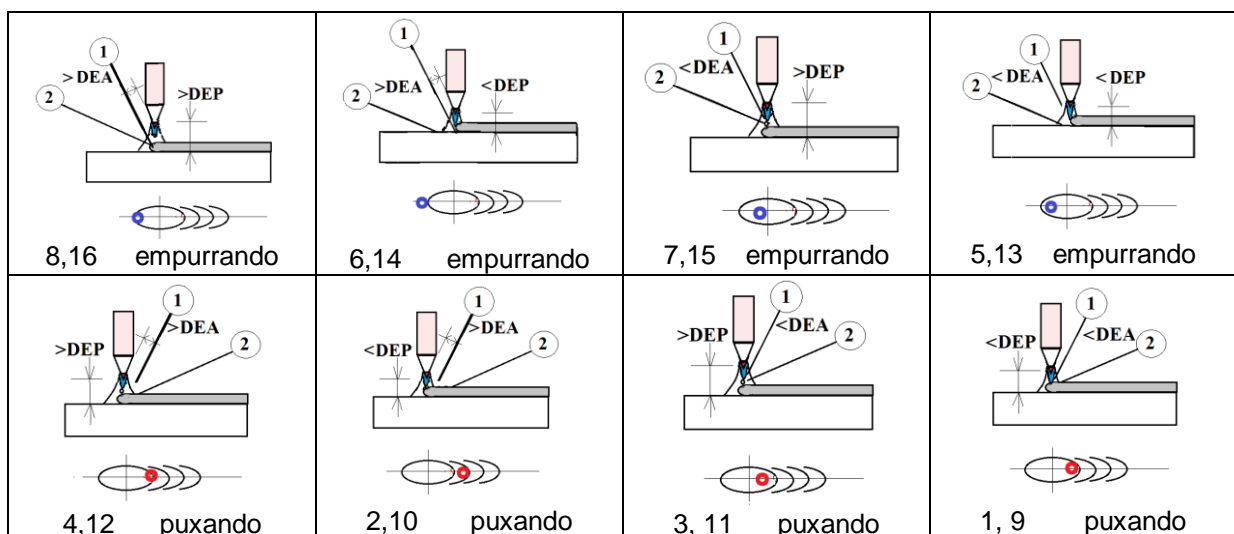


Figura 8. Situação de ensaio devido à combinação das variáveis.

As macrografias (Figura 9) mostraram que os parâmetros escolhidos resultaram em cordões de aparência aceitável na sua maioria, revelando ao leitor uma referência de ajuste processual com dois

métodos de alimentação distintos, em condições de ensaios operacionalmente viável a ambos os modos de introdução de arame. Notou-se uma similaridade dos resultados com os pares 1-9, 3-11, 4-12, 5-13, 6-14, 7-15, 8-16 com exceção do cordão 2 que comparado ao cordão 10, vê-se claramente o melhor aspecto geométrico deste último, porque o arame não riscou o cordão de solda.

Observa-se que o contorno da linha de fusão para a série de 9 a 16 (TOP), foi mais uniforme do ponto de vista geométrico que a série de 1 a 8. Uma possível explicação deve-se a distribuição de calor mais simétrica do que com a o método convencional de introdução de arame e este fator pode ser de interesse no controle do perfil geométrico adequado da raiz da solda. Apesar de a molhabilidade ter um parâmetro de medição para ser expressa, decidimos apenas considerar que os cordões da série de 9 a 16 se apresentam pouco mais convexos se comparados a série de 1 a 8.

Notamos que os cordões com o DEP em 5 mm são menos convexos e de melhor molhabilidade, quando comparados com os cordões com DEP 3 mm. Ainda com o DEP maior e DEA menor o arame pode ser introduzido mais ao centro do sistema arco/poça.

Estes ensaios podem ser repetidos levando em consideração a cadeia metrológica envolvida na medição e assim expressar diferenças entre os métodos de alimentação distintos, quanto à área total fundida, penetração e ângulo de molhamento, o qual não foi o intuito neste trabalho, mas o de verificar aspectos que antecedem a isto tudo como a viabilidade processual.

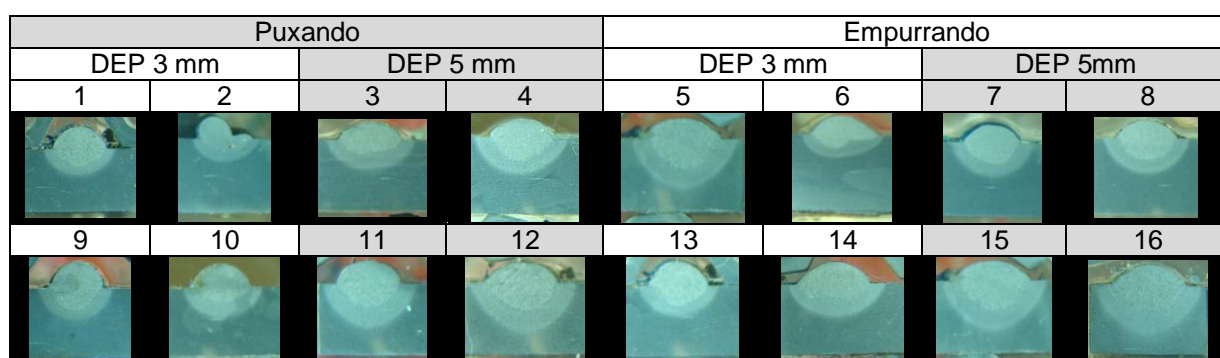


Figura 9. Macrografias dos ensaios realizados em bancada plana da série alimentada pela ponta do eletrodo (TIP) e da série alimentada pelo topo do eletrodo (TOP).

Nos ensaios realizados não se variou a velocidade de alimentação de arame. Um estudo mais aprofundado sobre transferência metálica e estabilidade do arco pode ser feito empregando-se a técnica da filmagem de alta velocidade.

### 3.4. Ensaios TIG na posição 1G, com alimentação tangencial para comparação da raiz da solda variando gás de proteção, tensão (comprimento de arco ou DEP) e face da raiz.

Verificou-se que a influência da tensão de soldagem é fator de grande importância no estabelecimento da transferência metálica, como o arame encontra-se no referencial da tocha, de forma que ao elevar-se a tensão de soldagem, este pode perder o contato físico com a poça alterando a transferência por ponte para gotas, e com isto perdem-se também os benefícios da tensão superficial a qual é geralmente desejada à soldagem fora de posição, porque minimiza a possibilidade de escoamento da poça de fusão, tornando menos instável o procedimento.

A Figura 10 mostra que a DEP varia com a composição do gás e a tensão de trabalho. Como empregamos um AVC que mantém a tensão constante a DEP se ajustou automaticamente. Na Figura 10.a a DEP possibilitou uma transferência por ponte e em 10.b com a elevação da tensão houve um ganho de potência o arco fazendo com que houvesse o surgimento da raiz, porém a ponte com a poça de fusão foi rompida e a transferência de metal foi em gotas que se depositaram com certa assimetria. Em 10.c devido à troca do gás manteve-se a mesma corrente e tensão de soldagem, portanto mesma potência, porém devido aos mecanismos de variação do potencial de energia do hidrogênio molecular para atômico ao passar pelo arco e a liberação de energia na poça para voltar à forma mais estável, conferem um efeito de aumento da região fundida, que segundo a metodologia do fator de forma que julga a energia na raiz da solda de forma prática, verificamos o perfil da raiz que era triangular e excedeu a forma retangular passando a trapezoidal, perfil que na posição plana representa o limiar em romper a raiz (vazar a junta).

Outra forma de customizar o procedimento sugere o aumento do nariz da solda para 4,4 mm que mostramos na Figura 10.d. Repara-se que praticamente toda a cavidade a ser preenchida é tomada pela solda e que pouco falta para o surgimento da raiz. Foi aumentada a tensão de soldagem de 12

para 14 V e verificamos o surgimento da raiz da solda conforme 10.e, que representa um ganho de 4 vezes menos tempo de arco aberto, além da economia no arame e na preparação do chanfro.

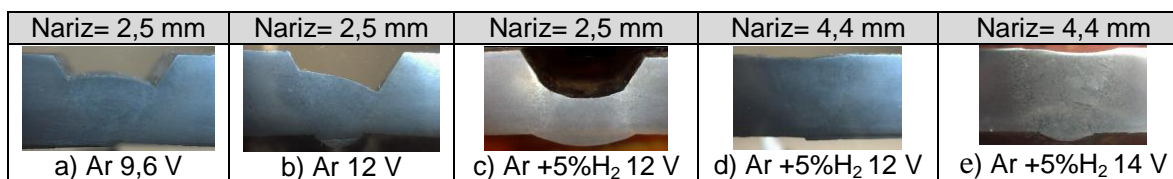


Figura 10. Macrografias de soldas obtidas com parâmetros do setor 2 da Tabela 2,  $V_s = 5$  cm/min e variando a tensão, nariz da solda e o gás de proteção em um tubo de 7,9 mm de espessura.

### 3.5. Soldagem 6G na bancada com injeção tangencial de arame.

Os parâmetros fixos desta série foram gás (Ar+5% $H_2$ ), eletrodo (EWTh-2) de 3,2 mm de diâmetro, comprimento de arco 3 mm, tensão eficaz média  $U = 12,5$  V e injeção tangencial de arame 1,0 mm.

Foram realizadas 5 soldas de raiz em tubo API 5L grau A de 89 mm de diâmetro, na posição 6G, conforme os parâmetros da Tabela 4. Na soldagem dos cordões 1 e 2 adotou-se os parâmetros da solda realizada com o cabeçote orbital, porém o valor da  $V_s$  foi aumentado de 5 para 7 cm/min e o nariz da junta de 1,8 para 2,8 mm, devido ao uso do gás (Ar+5% $H_2$ ) que apresenta um poder de fundir material bem superior ao argônio puro, sendo este um ingrediente que está colocando o processo TIG no caminho da competitividade, em relação ao TIG com argônio puro e a outros processos, porém verificou-se a raiz excessiva no cordão 1. Para o cordão 2 novamente elevamos o valor de  $V_s$ , e a raiz foi julgada por sua geometria através do fator de forma, medido em 0,57 e o reforço da raiz em 0,6 mm sendo os mesmos considerados como aceitáveis.

Tabela 4. Ensaio na posição 6G na bancada de estudo orbital.

Cordões	Face		Raiz		T	f	Im	base	pulso	media	$V_s$	Nariz	Aporte térmico
	lb	tb	lp	tp				m/min	m/min	m/min			
1	82	0,3	170	0,1	0,4	2,4	104	0,5	1	0,63	0,07	2,8	8,74
2	82	0,3	170	0,1	0,4	2,4	104	0,5	1	0,63	0,08	2,8	7,28
3	125	0,3	225	0,1	0,4	2,4	150	0,8	1,5	0,98	0,15	2,5	5,65
4	125	0,3	225	0,1	0,4	2,4	150	0,8	1,6	1	0,18	2,5	4,74
5	125	0,3	225	0,1	0,4	2,4	150	0,9	1,8	1,12	0,17	2,5	5,0

Com o interesse em aumentar a produtividade, na execução do cordão 3, a corrente média foi elevada de 104 A para 150 A e foi mantida a frequência do pulsado em 2,4 Hz, sendo analisada a raiz da solda que apresentou a forma côncava com um fator de forma em 0,9, tendendo a forma retangular que é característica de energia excessiva. Então se aumentou  $V_a$  e  $V_s$  obtendo com isto um efeito de esfriamento da poça visto no cordão 5 que apresentou boa raiz.

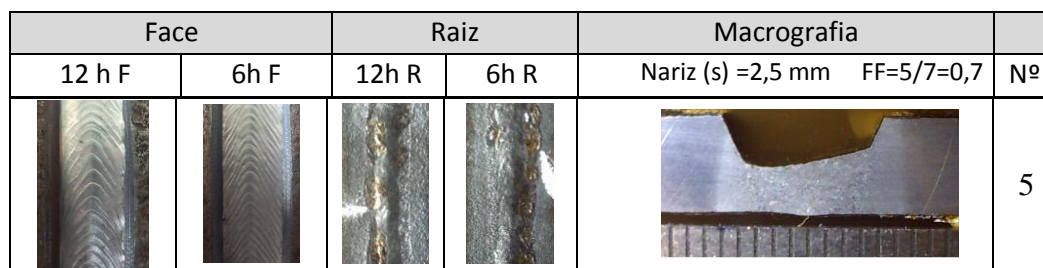


Figura 11. Cordão 5 face raiz e macrografia da seção da solda 6G.

### 3.6. Soldagem 6G com injeção radial de arame.

A tocha (Figura 12) tornou possível a injeção do arame radialmente ao eixo do tubo. Verificou-se que força do arco foi suficiente para garantir a deposição na posição sobre cabeça (6h), sem que houvesse a ponte entre o arame e a poça, ou seja, a transferência metálica foi em gotas.



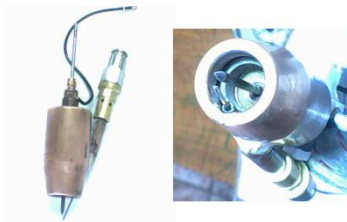
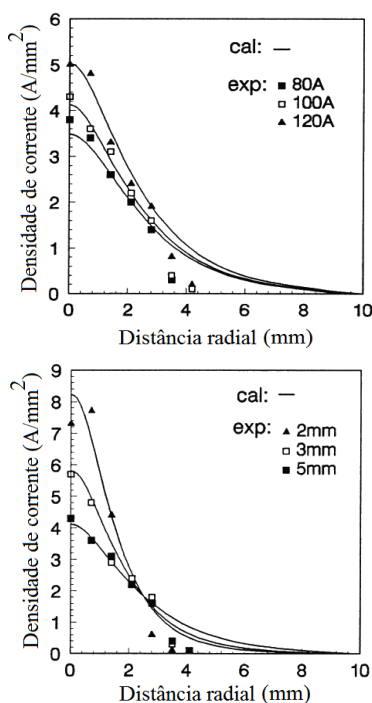


Figura 12. Tocha TIG com lente de gás adaptada a injeção radial de arame.

Mostraremos teoricamente a partir dos estudos de Fan e Cho [5,9] que é possível o transporte de massa através do arco TIG na soldagem fora de posição, mesmo considerando o tamanho da gota para o dobro do diâmetro do arame (0,6 mm) empregado. Os cálculos de densidade de corrente realizados utilizando os parâmetros de soldagem, 80 A (DEP=5 mm) e 3 mm de comprimento de arco (I=100 A), são mostrados na coluna central, e demonstraram estar de acordo com os resultados obtidos por Fan [5], mostrados nos gráficos da Figura 13, cujo pico da densidade de corrente é máximo no centro do arco e decai com o afastamento radial. Ao comparar os cálculos do peso da gota metálica (coluna da direita) e da força do arco (coluna central) conclui-se que a ação do campo de forças acelera a gota em direção a poça. Modenesi [1] define o raio anódico como raio máximo do arco localizado perto do anôdo (peça).



Cálculo da força do arco:

Raio anódico  $r \cong 0,0025m$

Área (2)

$$A = \pi \cdot r^2 = 1,96 \cdot 10^{-5} m^2$$

A densidade de corrente (3)

$$j = I \div A = 4,07 A / mm^2$$

Coefficiente Permeab. Magnética

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$$

A pressão do arco (4)

$$P_{arc} = [\mu_0 \div 4\pi] \cdot j \cdot j = 32,6 N \cdot m^{-2}$$

A força do arco (5)

$$F_{arc} = P \cdot A = 0,00064 N$$

Cálculo do peso da gota metálica:

$$r_{m\acute{a}x} = 2 \cdot r_{arame} = 0,0006m \quad (6)$$

Volume da gota metálica (7)

$$Vol_{gota} = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = 2,9 \cdot 10^{-10} m^3$$

Com  $\rho_{a\grave{c}o} = 7800 kg \cdot m^{-3}$  e

$$g = 9,8 m \cdot s^{-2}$$

A massa da gota (8)

$$m = \rho_{a\grave{c}o} \cdot Vol_{gota} = 7,06 \cdot 10^{-6} kg$$

O peso da gota (9)

$$P_{gota} = m \cdot g = 0,000069 N$$

Conclusão:

$$F_{a\grave{c}o} > P_{gota}$$

A gota é acelerada em direção a poça.

Figura 13. Efeito da corrente e do comprimento de arco na densidade de corrente no arco TIG [5].

A raiz e a face da solda e macrografia do cordão de raiz são mostradas na Figura 14.

I= 80 A; arame 0,6 mm; Va =1,4 m/min; Vs =14 cm/min; EWTh-2 de 2,4 mm (30°); nariz=2,2 mm		
Face - 6h	Raiz - 6h	Macrografia do cordão

Figura 14. Tocha com injeção de arame radial na soldagem de raiz empregando gás Ar+5%H<sub>2</sub>, em tubo de 114 mm de diâmetro API 5L grau A.

### 3.7. Considerações sobre a frequência de pulsação na soldagem orbital 5G.

Para melhor comparar a variação da frequência de pulsação foram realizadas 3 soldas de raiz em tubos de 114 mm de diâmetro (cordões A, C e D), com a mesma configuração de chanfro empregando os parâmetros do tubo de 89 mm de diâmetro (cordão C). As macrografias revelaram

soldas com bom acabamento na face e na raiz das soldas, e para cada solda variou-se a frequência de pulsação. A Tabela 5 mostra para o cordão C, que uma solda de 5 mm de diâmetro de poça, para  $V_s = 6$  cm/min, apresenta uma sobreposição que tende a 100 %, embora a frequência do pulsado considerada como baixa (2,4 Hz), avança 0,42 mm por pulso, e que para percorrer o caminho igual ao diâmetro da poça a corrente terá dado mais de 12 pulsos sobre a mesma, evidenciando um primeiro esboço da mecânica do pulsado, que depende da pressão do arco no pico de corrente para avaliar o impulso mecânico deferido pelo arco à poça e seus efeitos.

Tabela 5. Sobreposição do cordão e número de pulsos sobre a poça

Variáveis	f	T	L	Vs	NPSP	X	Sobreposição
Unidades	Hz	s	mm	cm/min	pulsos/s	mm	%
Cordão A	0,24	4,17	5	5,00	1,4	3,47	30,58
Cordão *B	2,4	0,42	5	5,00	12,0	0,42	91,67
Cordão C	1	1,00	5	5,00	6,0	0,83	83,34
Cordão D	5	0,20	5	6,00	25,0	0,20	96,00

Os parâmetros de soldagem são mostrados na Tabela 6, tiveram a face da raiz em 2,0 mm, e as Figuras de 15 a 17 mostram os respectivos cordões de solda. \* Solda realizada com cabeçote orbital.

Tabela 6. Ensaio na posição 5G na bancada orbital.

Cordões	lb	tb	lp	tp	T	f	lm	Va	Va	Va	VS	Ad	Aporte térmico
								base	pulso	media			
	A	s	A	s	s	Hz	A	m/min	m/min	m/min	m/min	mm <sup>2</sup>	kJ/cm
A	82	3	170	1,1	4,1	0,24	105	0,5	1	0,6	0,05	9,9	11
*B	82	0,3	170	0,1	0,4	2,5	104	0,5	1	0,6	0,05	9,8	10,9
C	61	0,5	145	0,5	1	1	103	0,5	0,7	0,6	0,05	9,4	10,8
D	82	0,1	170	0,1	0,2	5	126	0,5	1	0,7	0,06	9,8	11

Na Figura 15, foi empregada uma frequência de pulsação dez vezes menor que a do parâmetro de comparação (cordão B) e obteve-se uma solda com a raiz regular em toda a extensão e praticamente sem reforço, com a face do cordão de solda escamada, porém de boa aparência, típica de um pulsado de baixa frequência e de pequena sobreposição.



Figura 15. Soldagem 5G em bancada, cordão A, com pulsado de 0,24 Hz.

A solda mostrada na Figura 16 mantém a mesma energia da solda do cordão B, apesar dos parâmetros serem diferentes, porém observa-se a razão cíclica de 0,5, ou seja, tempos iguais entre o pulso e a base. Esta mecânica de pulsação pode ser percebida pelo operador através da visão e da audição, e deixa evidente que na fase de pulso da corrente ocorre a fusão intensa de material e no tempo de base a contração da poça devido à diferença de temperatura entre o pulso e a base da corrente. A solda de raiz mostra também uma boa aparência com pouco reforço na raiz e excelente acabamento na face da solda, reproduzindo-se por toda a extensão de forma regular.



Figura 16. Soldagem 5G, cordão C, em bancada, com pulsado de 1 Hz.

Na Figura 17 a solda realizada com frequência de pulsação em 5 Hz e razão cíclica de 0,5, ou seja, com o dobro da frequência de pulsação da corrente da solda do cordão B. A solda foi reproduzida de forma eficiente, mostrando que o material ensaiado mostrou ser de boa soldabilidade, pois foi possível realizar a solda com único parâmetro. Nota-se que a corrente média subiu de 103 A para 126 A devido à diminuição do tempo de base e o mesmo ocorreu para a taxa de deposição que se elevou em 20%, e que resultou em uma solda de boa aparência e com pouco reforço na raiz muito parecida com a solda do cordão B. O aumento de energia foi compensado pelo aumento da taxa de deposição do arame frio, mantendo o balanço térmico, porém com uma maior área fundida. Segundo Rampaul [6], um cordão de raiz bom é aquele que não há poros, fusão incompleta, falta de penetração ou excesso deste, a ausência de defeitos deste tipo qualifica o procedimento como correto à soldagem de raiz.



Figura 17. Soldagem 5G em bancada, cordão D, com pulsado de 5 Hz

#### 4. Conclusões

Foi mostrado que o emprego do gás argônio com 5% de hidrogênio é viável a soldagem orbital de aços API 5L grau A, pois que não houve casos de poros nas soldas realizadas e ficou evidente ser uma alternativa que pode aumentar significativamente a produtividade TIG, sempre que efeitos metalúrgicos indesejáveis não ocorrerem. Ficou claro que uma espessura de 2 mm a soldar pode ter a velocidade de soldagem quadruplicada pela simples troca de gás ou se aumentada a espessura para o dobro (4 mm) e mantida a velocidade de soldagem em ambos os casos incidirá em ganho de produtividade. A frequência com que a corrente pulsa é um ajuste processual que deve estar associado ao efeito que se deseja, e neste caso focamos em manter a energia na raiz da solda, e estabelecer certo controle da poça devido à diferença de temperatura, estabelecida entre a fase de pulso e de base da corrente pulsada. Foram mostrados vários aspectos e resultados da alimentação de arame a frio e da soldagem de raiz neste trabalho.

#### 5. Agradecimentos

Ao LABSOLDA UFSC, pela orientação e realização dos ensaios e a Poly Soude pelo “open case” na soldagem de tubos com cabeçote orbital de câmara aberta. Ao IFE Sul-Riograndense pela concessão funcional. A CAPES programa PIQDTEC e FAPUEU pelo apoio financeiro.

#### 6. Referências Bibliográficas

- [1] MODENESI, P. J. Introdução à Física do Arco Elétrico e Sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte : UFMG, 2007.
- [2] DELGADO, O. A., DUTRA, J. C. e OLIVEIRA, M. A. Estudo e Análise do Inter-Relacionamento de Variáveis em Soldagem TIG Pulsada com alimentação automática de arame. 2000.
- [3] www.polysoude.com. [Online] Polysoude.com. [Citado em: 10 de julho de 2011.]
- [4] American Petroleum Institute. Specification for Line Pipe - API SPECIFICATION 5L. Washington, D.C : s.n., 2004, pp. 47-48.
- [5] FAN, H. G., NA, S- J e SHI, Y. W. *Numerical simulation of current density in gas*. Part B, s.l. : Sage, 1997, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 211, pp. 321-327.
- [6] RAMPAL, Hoobasar. *Pipe Weld Procedures*. 2nd. New York : Industrial Press Inc., 2003.
- [7] FORTAIN, J., RIMANO, L. e VAIDYA, V. *Innovative Process Improves Welding of Sheet Metal Parts*. January 2008, Welding Journal, pp. pp. 38-s–46-s.
- [8] LABSOLDA. Ensaio com Diferentes Gases e Tipos de Corrente com o Processo TIG. Florianópolis : Relatório Interno, 2008.
- [9] OH, D. -S, KIM, Y. -S e CHO, S. -M. *Derivation of current density distribution by arc pressure measurement in GTA welding*. 2005, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, pp. 442-446. 4.