

**SOLDAGEM MIG/MAG COM ELETRODO ROTATIVO
DESTINADO A TUBULAÇÕES****SANTOS.A.G.M¹, BRITO.H.O¹, DIRENE.H.F², OKUYAMA.M.P³,
SCHWEDERSKY.M.B⁴, SILVA.R.H.G⁵.****Copyright 2018, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na Rio Oil & Gas Expo and Conference 2018, realizada no período de 24 a 27 de setembro de 2018, na cidade do Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetido pelo(s) autor(es). Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference 2018.

Resumo

Inerte em um mundo moderno, no qual diversas tecnologias de soldagem são disponibilizadas a cada ano, as tochas do processo MIG/MAG são os periféricos de soldagem que mais tem sido investigadas. Presente nesse contexto, esse trabalho tem como cunho investigar as os fenômenos do processo da recém tecnologia disponibilizada a eletrodo rotativo titulada Spinarc operando em comando de corrente pulsada em chanfros *narrow gap*. Foram analisados dados de tensão e corrente de soldagem concatenados com filmagem de alta velocidade, avaliação metalográfica de amostras. Os resultados evidenciam que ao alterar a frequência de rotação do eletrodo modifica-se tanto o perfil de penetração da junta, fato esse de extremo interesse para o passe subsequente, quanto acarreta em uma maior taxa de fusão, entretanto altas frequências podem causar turbulência no gás de proteção. De modo geral, a caracterização do processo coopera para um melhor entendimento dos fenômenos físicos decorrente da tecnologia a eletrodo rotativo.

Palavras-chave: Eletrodo rotativo, Frequência de rotação, Narrow gap, Perfil de penetração,

Abstract

Inert in a modern world, where several welding technologies are made available each year, the MIG / MAG process torches are the most researched welder's peripherals. The data of welding current and voltage were analyzed in sync with high-speed filming, macroscopic analyzes of samples the results show that changing the frequency of rotation of the electrode changes both the deep penetration profile of the joint, which has extreme interest for the subsequent pass, as it results in a higher melting rate, however high frequencies can cause turbulence in the gas protection. In general, the characterization of the process cooperates to a better understanding of the physical phenomena resulting from rotary electrode technology.

Keywords: Rotary arc welding, rotation frequency, Narrow gap, depth penetration.

1 Mechanical Engineer, Master Student in Mechanical Engineering, LABSOLDA, Santa Catarina Federal University.

2 Master in Mechanical Engineering, Doctor Student in Mechanical Engineering, LABSOLDA, Santa Catarina Federal University.

3 Master in Mechanical Engineering, LABSOLDA, Santa Catarina Federal University.

4 Dr. Prof, in Mechanical Engineering, LABSOLDA, Santa Catarina Federal University.

5 Dr. Prof, in Mechanical Engineering, LABSOLDA, Santa Catarina Federal University.

1. Introdução

De modo recente, tornou-se quase irrefutável a necessidade de energia tanto para a sobrevivência humana quanto para o desenvolvimento do setor industrial. Após a descoberta do pré-sal em 2006, tal fato proporcionou o Brasil a se posicionar entre o topo dos maiores produtores de petróleo mundial de acordo com Braga (2016). Atualmente grande parte do petróleo extraído é transportado em dutovias, e devido ao fato do setor energético se encontrar em fase de desenvolvimento, sabe-se que haverá necessidade não somente da ampliação dos dutos pré existentes mais também da criação de novas rotas de transporte afim de suprir a demanda do setor que está em ascensão.

No que diz respeito a fabricação dos pipelines, o processo de soldagem certamente representa uma grande parcela no processo de fabricação do mesmo, sendo o passe de raiz uma etapa crítica do mesmo, entretanto os passes de preenchimento demandam uma maior tempo pra sua execução. Presentemente o processo a eletrodo revestido ainda é o mais utilizado pelos soldadores, fato esse justificável pela menor complexidade do equipamento e menor custo, quando comparado a outros processos de soldagem. Entretendo tal processo é caracterizado por propiciar baixa produtividade e alta susceptibilidade a defeitos, contudo a principal problemática é a necessidade de profissionais altamente qualificados de modo a compensar as variações na junta mediante a manipulação do eletrodo. Uma alternativa para sanar algumas dessas problemáticas levantadas, seria a utilização do processo MIG/MAG devido o mesmo ser capaz de propiciar alta taxa de deposição, elevado fator de trabalho e por ter uma certa facilidade no que diz respeito a sua automação, aumentando de forma direta o valor agregado do produto final, e com modernos processos MIG/MAG com controle de corrente as vantagens são ainda mais evidentes, Silva (2005). Com o intuito tanto de aumentar a produtividade e qualidade como não ficar refém de tais profissionais, recentemente foram desenvolvidas modernas metodologias com tal cunho a exemplo dos estudos desenvolvidos por Direne Filho (2014), Kindermann (2016) e Sartori (2016), por exemplo. No entanto os passes da preenchimento e acabamento ainda necessitam ser investigados cuidadosamente.

Devido ao fato do processo MIG/MAG ser o mais consolidado em ambiente industrial, o mesmo há décadas tem sido o processo no qual foram desenvolvidas o maior número de modernas variantes. É no presente contexto que tal estudo corrobora aos objetivos do LABSOLDA, tanto com cunho exploratório no que diz respeito a modernas variantes do processo MIG/MAG, como na quebra dos paradigmas no que tange a soldagem de chanfros estreitos. O vigente trabalho tem como objetivo precípua a investigação da influência da frequência de rotação do eletrodo tanto em aspectos geométricos do cordão como na transferência metálica, quando o mesmo é empreendido mediante a técnicas *narrow gap*, contribuindo desta maneira tato para um melhor entendimento sobre a tecnologia, quanto explanando os possíveis ganhos de produtividade.

2. Contextualização

Recém desenvolvida pela empresa WeldRevolution, a tocha de soldagem MIG/MAG titulada *Spinarc*, prove uma rotação cônica do bico de contato que é transmita para o eletrodo, de modo que o mesmo é rotacionado 360 ° continuamente. Perante a tal ocorrência, o eletrodo posiciona-se em distintas regiões do chanfro, fato esse não possível em um processo convencional. De acordo com seus desenvolvedores Revolution (2015) e Funderburk (2016), tais características podem contribuir para sanar algumas problemáticas da soldagem de chapas de espessas, que se trata da falta de fusão nos flancos laterais. A figura 1 representa o comportamento da mesma em alta frequência de rotação.



Figura 1 – Tocha Spinarc em alta frequência de rotação.

De acordo com Malin (1983) a técnica narrow gap tem como peculiaridade a redução da quantidade de material a ser aportado, redução do tempo total de operação, baixo aporte térmico, redução das tensões residuais causadas pelos processos multipasses, menor tempo de preparação dos chanfros e também auxilia no menor consumo do gás de proteção (ocorrência essa que há algumas décadas vem despertando um grande fascínio em pesquisadores do Japão, devido ao elevado custo do gás de proteção na região).

Entretanto alguns pesquisados depararam-se com algumas problemáticas mediante a manipulação de técnicas narrow gap. Shi (2006) em suas pesquisas percebendo o ancoramento do arco elétrico nos flancos laterais operando em modo de comando de tensão, pode perceber que o arco elétrico tende a ficar em seu menor estado enérgico (menor distância entre a gota formada na ponta do eletrodo e alguma superfície), ou seja as paredes do chanfro. Face a isso o mesmo utilizou uma metodologia de acrescer a velocidade de alimentação de modo a forçar os curtos circuitos com cunho de que o comprimento do arco se torna-se baixo o bastante de modo a não ocorrer o ancoramento.

Quando o processo é realizado mediante o comando de corrente pulsada, outros fatores devem ser levados em consideração de acordo com Lancaster (1993) e Gosh (2017). Os mesmos ressaltam que o problema do ancoramento do arco elétrico nas paredes laterais do chanfro está relacionado com a baixa pressão do arco e consequentemente sua baixa rigidez, onde a adoção de ondas com maiores frequência de pulsação, ou seja gotas com diâmetro menor do que o diâmetro do eletrodo, tendem a resultar em um processo onde tal problemática seja minimizada. Esse fato pode estar atrelado a lógica de que para um mesmo período analisado, ondas com menores valores de diâmetro de gota tendem a pulsar mais vezes, aumentando tanto a pressão quanto a rigidez do mesmo.

3. Materiais, Equipamentos e Metodologia

3.1 Bancada Experimental

Foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multiprocessos, transistorizada, chaveada no secundário do transformador, controlada remotamente via microprocessador, modelo *Digiplus A7*, com capacidade máxima de operação de até 450 A. O cabeçote tracionador de arame utilizado, modelo STA com velocidade de alimentação entre 0,2 a 20 m/min, ambos equipamentos fabricados pela empresa IMC Soldagem.

A tocha titulada *SpinArc*, do fabricante *WeldRevolution*, modelo MA - 400, possui capacidade máxima de operação de até 300 A, sendo esta refrigerada a ar. A mesma permite alterar a frequência de rotação, variando entre 500 a 5500 rpm, admite também modificar o diâmetro no qual o eletrodo irá rotacionar, podendo variar de 1 a 8 mm, tendo incremento em 1 mm e também há a possibilidade de alterar o sentido de rotação do eletrodo.

Para a programação da trajetória, utilizou-se um manipulador robótico cartesiano Tartílope V2, do fabricante SPS, sendo o mesmo posicionado sobre um trilho. O sistema possui 2 graus de liberdade (x e y).

Para aquisição de dados foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados Portátil – SAP, do fabricante SPS – Sistemas e Processos de Soldagem, que permite a aquisição de sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame em uma frequência de 5 kHz. Os dados aquisitados são apresentados em forma de gráficos permitindo uma análise detalhada das variáveis no processo.

Com desígnio de compreender os fenômenos físicos decorrente do processo, filmagens de alta velocidade se fez necessário, utilizou-se uma câmera modelo IDT Motion Pro Y4-S2 que possui um módulo para aquisição de dados de tensão e corrente similar ao sistema de aquisição de dados utilizado, porém com uma taxa de 25 kHz. A figura 2 exhibe a configuração da banca utilizada.



Figura 2 - Bancada Experimental: (A) Fonte de energia, (B) Cabeçote alimentador de arame, (C) Tocha *Spinarc*, (D) Gás de proteção.

3.2 Materiais

O metal base se constitui de chapas de aço carbono SAE 1020 com as respectivas dimensões 9,525 mm (3/8 in) de espessura, 50 mm de largura e 200 mm de comprimento, conforme é demonstrado na Figura 3. A geometria da junta foi adotada de modo a reduzir a quantidade de material a ser depositada, tendo em vista que atualmente, dutos de parede espessas são empreendidos com 20°. O metal de adição utilizado foi de aço carbono com designação AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. O gás de processo utilizado foi a denominado C8, composto por uma mistura de 92% de Ar e 8% de CO₂, com uma vazão de 25 l/min. Medidos na ponta da tocha com um fluxímetro. Previamente a realização dos testes todas as chapas foram lixadas com o intuito de remover os óxidos superficiais.

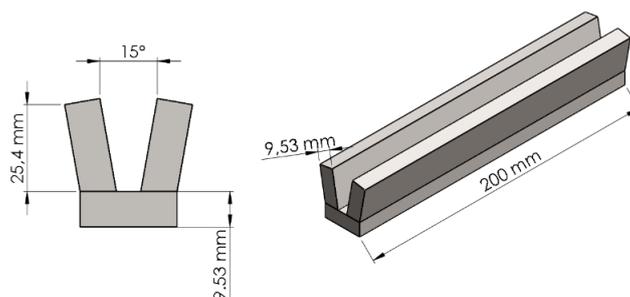


Figura 3. Geometria da junta utilizada, com técnica narrow gap com ângulo reduzido de 15°.

3.3 Metodologia

Inicialmente, com o intuito tanto de explorar os aspectos físicos do processo como também de confrontar os poucos dados obtidos mediante a escassa literatura a respeito de tal temática, foi proposto uma metodologia de investigar a influência da frequência de rotação do eletrodo no que diz respeito a variação do perfil geométrico do cordão. A Tabela 1 exibe os parâmetros de rotação utilizados para a confecção dos testes iniciais, enquanto a Tabela 2 exibe os parâmetros elétricos adotados para a criação da onda pulsada.

Tabela 1 – Parâmetros selecionados na tocha *Spinarc*.

Sentido de rotação	Ø Rotação mm	Frequência de rotação (rpm)
Ante horário	3	500
		1000
		1500
		2000

Para o desenvolvimento do formato de onda pulsada, adotou-se a metodologia proposta por Wang et al. (2007) no que diz respeito ao destacamento de apenas uma gota por período e com valor médio de corrente abaixo do valor da corrente de transição.

Tabela 2 – Parâmetros elétricos adotados na onda pulsada.

Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Im (A)	V.a (m/min)	V.s (cm/min)	Fp (Hz)
450	1,8	25	3,8	160	5,8	31,0	179

Para medição das características geométricas do cordão, cada corpo de prova soldado foi cortado transversalmente. Em seguida, preparou-se metalograficamente as amostras com lixas de granulação 80, 320, 400, 600 e 1200, além de alumina 1,0 μ para polimento. O ataque químico empregado consistiu em Nital 2% (90% álcool etílico absoluto e 2% ácido nítrico). Após ataque, as amostras foram fotografadas mediante a utilização de um estereoscópio OPTON com ampliação de 10x. Posteriormente foram avaliadas as características geométricas dos cordões mediante a utilização de software de análise de imagens “Photoshop”. Para mensurar as características geométricas, utilizou-se como parâmetro de referencia a espessura de cada chapa. Cabe ressaltar que cada parâmetro foi mensurado três vezes, realizando assim um média dos valores obtidos.

4. Resultados e Discussões

A partir da filmagem de alta velocidade concatenado com oscilogramas de tensão e corrente, pode-se analisar o comportamento da transferência metálica em distintas regiões do chanfro. A Figura 4 demonstra o comportamento da mesma quando o eletrodo é rotacionado a 1500 rotações por minuto.

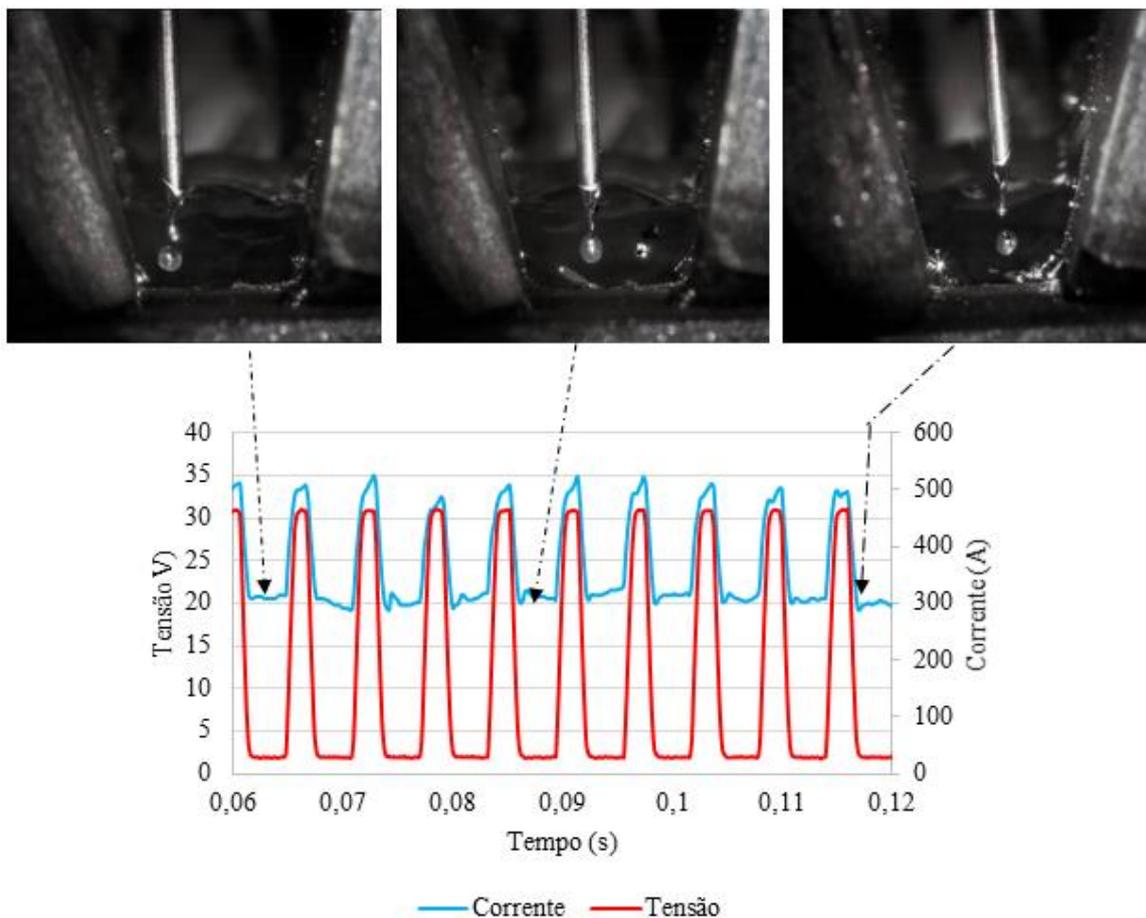


Figura 4 – Imagens obtidas via filmagem de alta velocidade juntamente com oscilogramas adquiridos pelo SAP, demonstrando a transferência metálica com eletrodo rotativo.

Mediante a análise da Figura 4, é possível perceber que a tal tecnologia é capaz de realizar a transferência metálica em distintas regiões do chanfro, ocorrência essa somente possível devido a peculiar característica de rotacionar o metal de adição. Pôde-se observar também que a adoção de gotas com menores diâmetros e consequentemente maiores frequência de pulsação da corrente de soldagem se mostrou bastante eficiente para a realização da soldagem, não ocorrendo ancoramento nos flancos, o que inviabilizaria o processo.

A Figura 5, exibe a seção transversal do cordão. Percebeu-se que a adoção de maiores frequências de rotação do eletrodo, tendem a aumentar a área fundida, decrescendo assim reforço e penetração, corroborando desta maneira com os resultados obtidos por Gu (2007), no que diz respeito que tal tecnologia é capaz de prover variações no perfil de penetração.

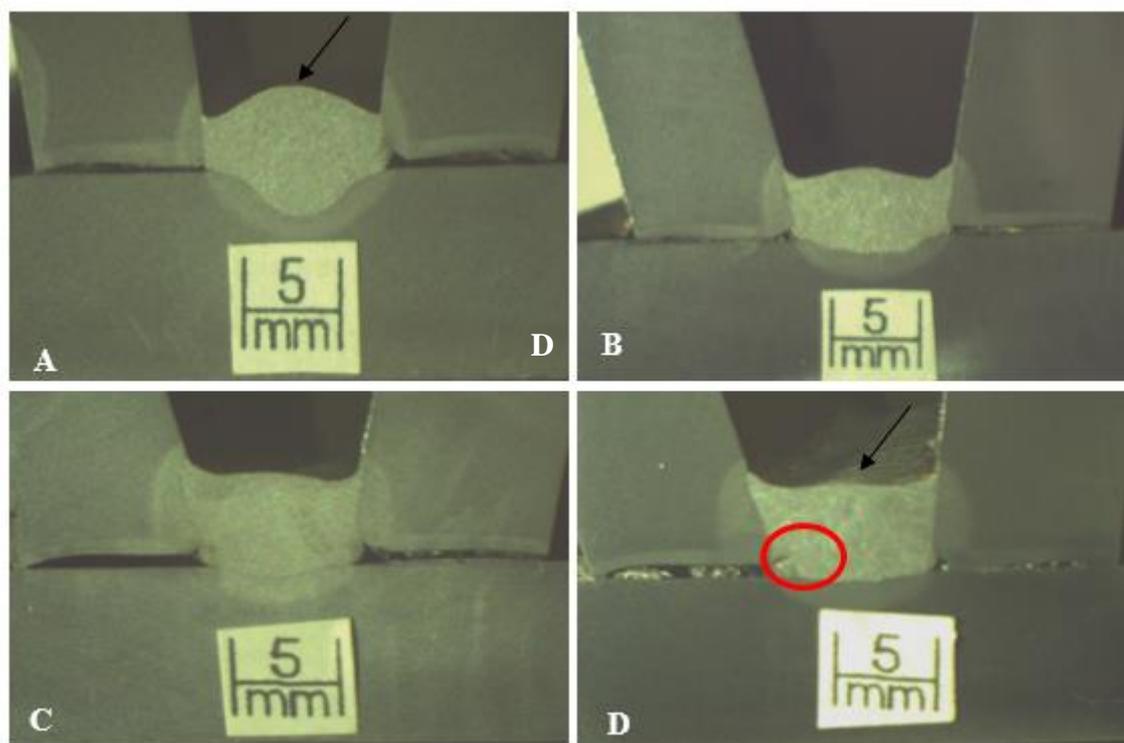


Figura 5 – Macrografais dos ensaios com cunho exploratório.

Entretanto, ao observar na Figura 5.A, é perceptível a convexidade do cordão, ocorrência essa que tende a apresentar problemas de falta de fusão lateral no flanco no passe subsequente. A presença de poros como é exibido na Figura 5.D, está relacionado a altas frequências de rotação que tendem a propiciar um regime turbulento no gás de proteção, acarretando desta maneira na contaminação do gás de proteção pelo ar atmosférico. A Figura 7 exibe os parâmetros mensurados para cada situação.

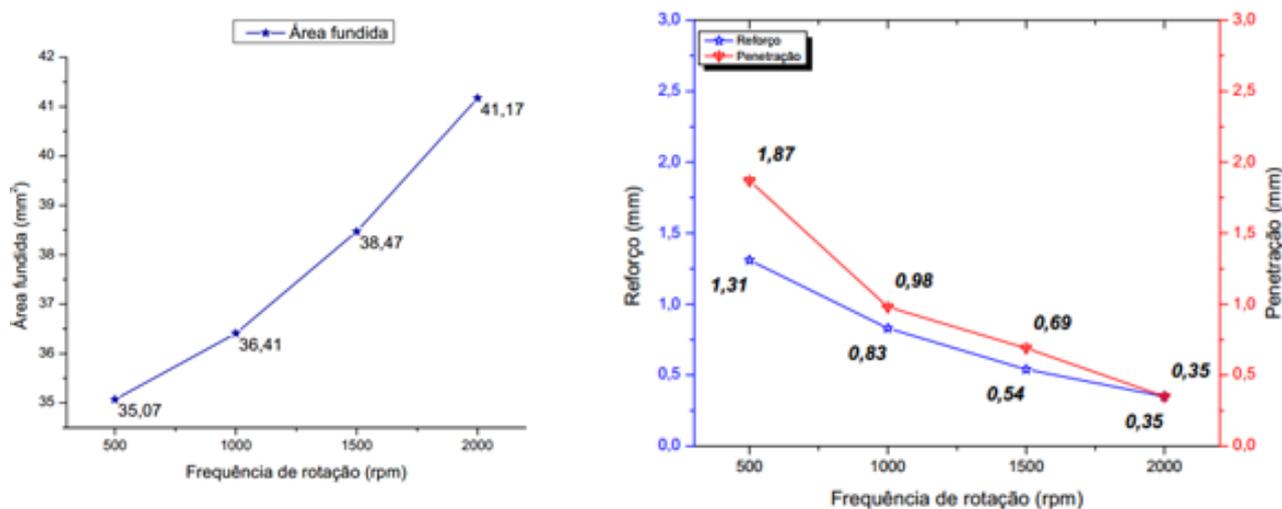


Figura 6. Representação gráfica entre área fundida (esquerda), penetração e reforço (direita).

Ao decorrer dos experimentos, pôde-se perceber que a frequência de rotação possui uma forte influência no fenômeno de transferência metálica. A medida que aumentava-se a frequência de rotação do eletrodo, como por exemplo de 500 rpm para 1000 rpm, era necessário acrescentar a

velocidade de alimentação de modo que o comprimento do arco se mantivesse constante, com comprimento de aproximadamente 5 mm. Ao analisar o ocorrido, entende-se que a adoção de aumentar a frequência de rotação, induz ao aumento da força centrífuga que está atuando na gota metálica de modo a tender reduzir o diâmetro da mesma e por consequência aumentando a frequência de destacamento.

Uma ocorrência que despertou um certo anseio, foi a variação da taxa de fusão mediante ao aumento da frequência de rotação, quando comparado a depósitos realizados sobre chapa. Todavia ao realizar os testes em chanfro tipo *narrow gap*, percebeu-se que a variação da velocidade de alimentação no chanfro foi bem maior. Esse fato está conectado a diferença do regime térmico presente em cada situação. Quando a soldagem acontece em chanfro, as paredes laterais retêm grande parte do calor gerado pelo processo, isto é, o gradiente térmico é menor, propiciando desta maneira uma maior fusão do eletrodo, e, conseqüentemente, acrescendo a taxa de fusão do mesmo, a Figura 7.A expõe o comportamento da tensão ao crescer a frequência de rotação com e sem a correção da tensão, enquanto a Figura 7.B exibe a variação na velocidade de alimentação do eletrodo, que acarrete em um aumento na taxa de fusão.

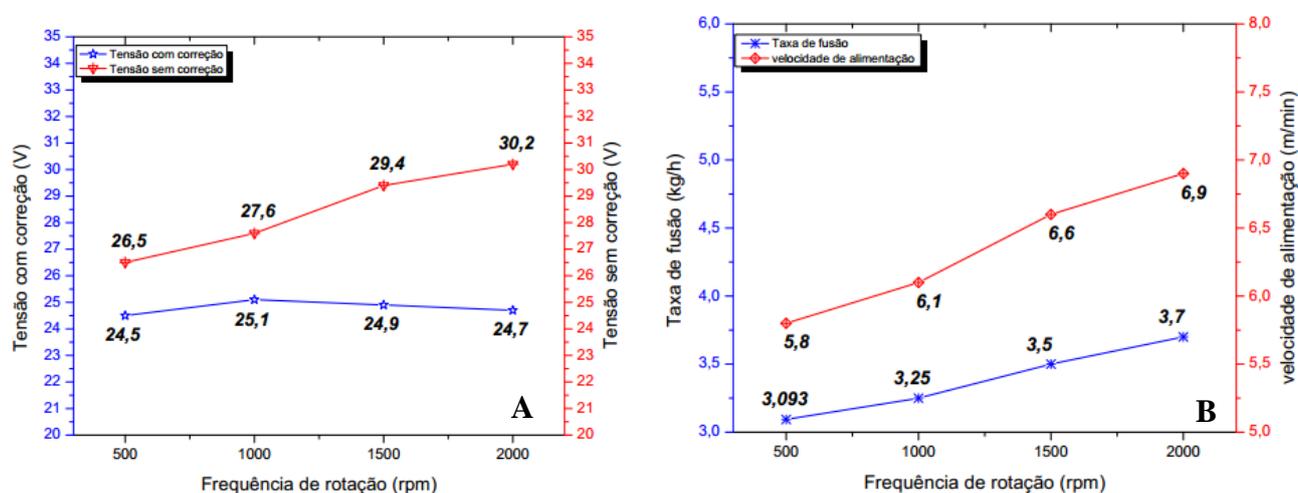


Figura 7 – Representação gráfica da variação do comportamento da tensão –A; e taxa de fusão em função da frequência de rotação B.

Ao analisar a Figura 7, pode-se perceber que tal processo se torna atraente aos olhos industriais não somente pela possibilidade de aportar uma maior quantidade de arame para o mesmo valor médio de corrente, mas também pelo fato da possibilidade de se trabalhar com ângulos mais estreitos. A Figura 8 exibe a seção transversal do chanfro. É mister ressaltar que a quantidade de poros presente na macrografia está dentro da tolerância permitida pela norma API STD 1104, onde a mesma tolera uma porosidade arredondada de até 2% do valor da espessura do material, não consentindo de forma alguma tanto falta de fusão como falta de penetração. Em outras palavras a mesma tolera uma porosidade com diâmetro de até 1,0 mm, e mediante a análises da macrografia o maior diâmetro do poro encontrado foi de 0,7 mm. Não obstante, a incessante busca pela confecção de resultados onde os mesmos apresentam um menor nível de porosidade ainda deve continuar.

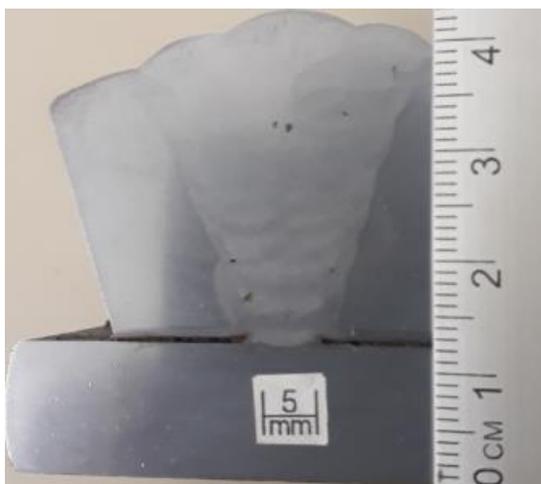


Figura 8 – Seção transversal da junta soldada.

Aplicando o que foi exposto, ao universo de dutovias destinada a transporte de petróleo e seus derivados, pode-se fazer a seguinte comparação: Um duto de 558,8 mm de diâmetro (22") com chanfro do tipo U, atualmente é confeccionados com chanfros de 20°, necessitando de aproximadamente 6,00 kg de material de adição, quando empreendido pelo processo convencional. A tecnologia Spinarc demonstrou plena robustez ao operar com chanfros de 15°, fato esse que além de propiciar uma economia no que diz respeito a quantidade de massa a ser adicionada, reduz o tempo total de operação, aumentando de forma direta o valor agregado do produto final.

5. CONCLUSÃO

Mediante os ensaios realizados, é possível retirar as seguintes conclusões:

- A metodologia adotada de onda com altas frequência de pulsação se mostrou robusta, de modo a não ocorrer ancoramento do arco elétrico nos flancos, impossibilitando desta maneira o processo de soldagem.
- Com a utilização da tecnologia a eletrodo rotativo, foi possível realizar a transferência metálica em distintas regiões do chanfro, modificando o perfil de penetração, contribuindo, desta maneira, para sanar a falta de fusão nos flancos laterais.
- Quanto maior a frequência de rotação, maior será a área fundida, entretanto altas frequências tendem a propiciar um regime turbulento no gás de proteção.
- Ao aumentar a frequência de rotação, consegue-se aumentar a taxa de fusão do eletrodo, mantendo o mesmo valor médio de corrente.
- Tal tecnologia favorece a utilização de técnicas narrow gap, contribuindo desta maneira para uma expressiva redução de custos, reduzindo não somente a quantidade de material a ser depositado, mas, também, contribui para uma expressiva redução do tempo total de operação.
- Devido ao aumento da taxa de fusão do eletrodo, identificou-se que o *Spinarc* é capaz de prover uma maior produtividade.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem á UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, ao POSMEC – Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica e em especial ao LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica por tornar factível a realização deste trabalho, tornando possível o crescimento tanto pessoal como profissional.

6. REFERÊNCIAS

BRAGA, B. **O mundo do petróleo e o petróleo do mundo**. Macaé Offshore, Macaé – RJ, v.84, n. XIV, p.14 a 16, 2016.

SILVA, R.H.G., **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto - Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**. Florianópolis SC: Dissertação de Mestrado – UFSC, 2005.

DIRENE FILHO, H., **MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz**. Florianópolis SC: Dissertação de Mestrado – UFSC, 2014.

KINDERMANN, R. M., **Soldagem Orbital do Passe de Raiz – Algoritmos para Controle Adaptativo por meio de Sensoriamento LASER**. Florianópolis SC: Dissertação de Mestrado – UFSC, 2016.

SARTORI, F., **Tecnologias e técnicas modernas do processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos**. Florianópolis SC: Dissertação de Mestrado – UFSC, 2016.

REVOLUTIONS, W. **High-speed rotating arc welding increases productivity and quality**. Welding Productivity, p. 5, 2015.

FUNDERBURK.S. **SpinArc™ Welding System Explained** - WELDING JOURNAL / JUNE 2015.

MALIN, V. Y. **The State-of-the-Art of Narrow Gap Welding**. *Welding Journal*, v. 62, n. 6, p. 37 - 46, Jun. 1983.

LANCASTER.J.F. **Physical Aspects of Arc Welding**. p. 43 – 50. 1993.

GOSH P.K. **Materials Forming, Machining and Tribology**. p. 52-70. 2017.

SCOTTI, A. and V. PONOMAREV, **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 2008: Artliber.

J. Y. Wang, Y. S. Ren, F. Yang & H. B. Guo. **Novel rotation arc system for narrow gap MAG welding**, *Science and Technology of Welding and Joining*, 12:6, p. 505-507.2007.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Welding of Pipelines and Related Facilities – API Standard 1104**. 21. ed. Washington, Sep. 2013. 118 p.