

UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E FCAW-S EM TUBULAÇÕES API 5L GRAU B SOLDADAS EM CAMPO

ALEXANDRE AMARAL SGOBBI¹; MAURÍCIO DAVID MARTINS DAS NEVES²
1, 2 - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - IPEN
aasgobbi@hotmail.com; mdneves@ipen.br

Resumo - Este artigo tem por objetivo comparar e demonstrar os resultados obtidos nas caracterizações mecânicas e microestruturais em dois tipos diferentes de processos para soldagem em campo de tubulações da classificação API 5L grau B. O primeiro processo de soldagem utilizado foi o manual com eletrodos revestidos (SMAW – Shielded Metal Arc Welding) e o segundo foi o processo combinado de soldagem com eletrodos revestidos para raiz e arame tubular autoprotetido semiautomático para o enchimento e acabamento (FCAW-S – Flux Cored Arc Welding Self Shielded). A possibilidade do uso deste processo combinado (SMAW + FCAW-S) foi comprovada através da qualificação de um procedimento de soldagem, demonstrando ser uma solução viável para obter maior produtividade na soldagem em campo, mantendo a mesma qualidade microestrutural da junta soldada do material de base API 5L grau B, quando comparado à soldagem manual com eletrodos revestidos.

Palavras-chave: Caracterização Microestrutural. Soldagem em Campo. SMAW. FCAW-S. Tubo API 5L Grau B.

I. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a soldagem provou ser um método eficaz de união de metais. A sua viabilidade financeira se torna ideal para instalações de dutos e tubulações soldadas em campo para o transporte de óleo, gás, derivados de petróleo e outros tantos fluidos. Com a descoberta da camada pré-sal e a entrada em operação de novas refinarias, como RNEST-PE em 2014 e 2015, COMPERJ-RJ em 2016, PREMIUM I e II-CE em 2018 e 2019, novas rotas de dutos no Brasil devem urgentemente ser construídas e as existentes devem ser ampliadas (PETROBRAS PE-2030, 2014).

Segundo o PEMAT 2022 (2014), Plano decenal de expansão da malha de transportes dutoviário do Brasil até 2022, apresentado pelo Ministério de Minas e Energia, o marco-zero de desenvolvimento da malha de gasodutos de abrangência nacional foi a conclusão do gasoduto Brasil-Bolívia e a interligação em Guararema com a malha do sudeste em 2000. Atualmente, o Brasil conta com uma malha de 9.244 km de gasodutos instalados.

Em 2013 foram ofertados ao mercado nacional 41 milhões de m³/dia de gás natural. Segundo o Plano Estratégico (PE 2030), a previsão é que a oferta de gás natural no Brasil chegue a 86 milhões de m³/dia até 2020 e 97 milhões m³/dia de 2020 a 2030. Estes números indicam que será dobrada ou quase triplicada a movimentação de gás natural na malha de dutos Brasileira nos próximos 15 anos. Estes dados sugerem uma

demanda de investimentos expressivos, tanto na rede de gasodutos como na capacidade de processamento existente, o que resultará na expansão das atividades de construção de dutos atual. No Plano Estratégico da Petrobras de 2030 foi reconhecido que a infraestrutura de escoamento e processamento da produção atualmente não é suficiente para esta demanda crescente.

Para que esta ampliação ocorra, é necessário que a tecnologia envolvida nos processos de soldagem de dutos e tubulações, bem como a produtividade desempenhada por estes processos, possa acompanhar o ritmo de crescimento. O processo de automatização na soldagem e o uso de processos mais produtivos são indispensáveis a esta ampliação e devem ganhar cada vez mais espaço.

O processo de soldagem de tubos com eletrodos revestidos (SMAW) é plenamente capaz de atender às exigências de qualidade de soldagem em campo (figura 1) e, apesar de ter sido consolidado e amplamente utilizado na malha de dutos construída até hoje no Brasil e no mundo, tem baixa produtividade se comparado a outros processos de soldagem semiautomático, como a soldagem com arames sólidos com proteção a gás (GMAW) e a soldagem com arames tubulares autoprotetidos (FCAW-S).



Figura 1 - Soldagem em campo, REX Pipeline, EUA. Fonte: Price Gregory

II. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O material de base (MB)

O material utilizado neste estudo foi o aço carbono API 5L grau B PSL 1 na forma tubular com 6" e espessura de parede de 7,11 mm, com propriedades mecânicas e

químicas especificadas pela norma americana API 5L (2004) apresentado na tabela 1. A diferença existente entre as especificações PSL1 B e PSL 1 X está basicamente na quantidade do elemento de liga manganês (API 5L, 2004). O manganês é um elemento pouco dispendioso que aumenta a resistência à tração e a temperabilidade dos aços API (FORTES, 2004b).

Tabela 1 - Valores máximos comparados ao certificado de matéria prima

| DOCUMENTO | C | Mn | P | S | Ti |
|------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Norma API 5L | 0,28 | 1,20 | 0,03 | 0,03 | 0,04 |
| Certificado de matéria prima | 0,20 | 0,89 | 0,023 | 0,003 | 0,001 |

O uso de tubos API 5L grau B possui finalidades diversas, tais como fabricação de risers em plataformas marítimas, oleodutos e gasodutos terrestres e encamisamento de outras tubulações. Entre alguns exemplos de utilização deste tipo de tubo está o oleoduto da baía de Guanabara, risers da plataforma PMNT-1 e o mineroduto de bauxita em Paragominas no estado do Pará.

2.2 Os materiais de adição (MA)

Para a soldagem das peças de teste com o processo combinado, o arame tubular autoprotetido utilizado foi o E71T-8-H16 (AWS A5.20, 2005). Este consumível foi utilizado para os passes de enchimento e acabamento. Segundo sua classificação, este arame tubular autoprotetido é apropriado para a soldagem com múltiplos passes e fora da posição plana e horizontal, inclusive para passes ascendentes.

Os arames tubulares da classificação T-8 são autoprotetidos e operam com eletrodo conectado ao polo negativo e corrente do tipo contínua. A escória produzida por estes arames possui características que permitem a soldagem fora da posição plana ou horizontal. Estes arames são aplicáveis para soldagem de estruturas que requerem boa tenacidade a baixas temperaturas, pois contém elementos para reduzir o teor de enxofre da solda (AWS WELDING HANDBOOK, 1991). Segundo o fabricante, é possível utilizar este consumível para soldagem de tubulações API 5L até a classe X60.

Com fim comparativo, foram soldadas peças de teste somente com o processo manual de eletrodos revestidos (SMAW). As soldagens foram realizadas com duas classes de consumíveis. No passe de raiz foi utilizado o eletrodo do tipo celulósico, adequado e largamente utilizado para este fim, de classificação AWS SFA-5.1 E6010 com limite de resistência de 430 MPa (AWS A5.1, 1991). Para execução dos passes de enchimento e acabamento, o eletrodo do tipo básico, com classificação AWS SFA-5.1 E7018, foi adequadamente selecionado com base na posição de soldagem, taxa de deposição e demais características deste consumível.

2.3 A preparação, a soldagem das peças de teste e os ensaios mecânicos e microestruturais

Para obtenção dos parâmetros corretos de soldagem com o processo FCAW-S, foram consultados os catálogos e a apostila disponibilizada por fabricantes, e indicações na literatura da Sociedade Americana de Soldagem (AWS WELDING HANDBOOK, 1991). A preparação e soldagem

das peças de teste foram executadas segundo recomendação das principais normas e códigos para qualificação do procedimento de soldagem, tais como ASME IX, AWS D1.1, API STD 1104 e ISO 15614-1.

Os ensaios mecânicos e microestruturais foram executados a partir de corpos de prova extraídos das peças de teste usinadas, e seguiram as orientações e recomendações dos mesmos códigos e normas.

Os ensaios de tração foram executados conforme as orientações e critérios estabelecidos no código ASME BPVC IX (2010). Segundo este código, o objetivo do ensaio é determinar o limite de resistência máximo de juntas soldadas com chanfros. Os corpos de provas foram extraídos e usinados a partir da peça de teste de acordo com o item QW-462.1 (b) do mesmo código. Neste estudo, foram utilizados os corpos de provas com seção reduzida. A velocidade utilizada nos ensaios foi de 10 mm/min.

Os ensaios de dobramento foram executados conforme as orientações e critérios estabelecidos também conforme o código ASME BPVC IX (2010). Segundo este código, o ensaio de dobramento tem o propósito de determinar se a junta soldada está em condições plenas e se possui boa ductilidade. A solda e a zona afetada pelo calor (ZAC) estavam completamente inseridas na porção dobrada do corpo de provas, conforme recomendação do código.

Com o objetivo de obter informações da dureza da microestrutura e comparar os dois processos de soldagem, o ensaio de dureza também foi executado. O ensaio foi realizado em três zonas do cordão de solda: zona fundida (ZF), ZAC e MB. Diferentemente dos ensaios de dobramento e tração, o ensaio de dureza teve o propósito de determinar, indiretamente, se a junta soldada apresentava ductilidade suficiente, segundo a dureza de sua microestrutura, em diferentes zonas. Caso esta dureza estivesse demasiadamente alta e acima dos limites estabelecidos, a junta seria frágil e suscetível a trincas a frio. O perfil de dureza utilizado neste estudo foi baseado na prática recomendada pela Norma Petrobras N-0133 (2013) visto pela figura 2.

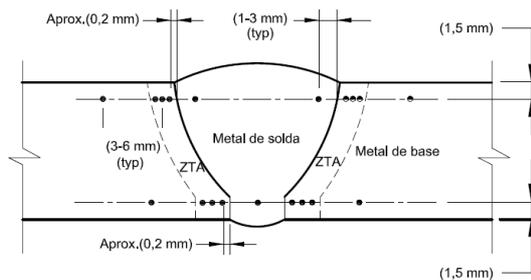


Figura 2 - Perfil para medição da dureza (PETROBRAS N-0133, 2013)

Para execução dos ensaios macrográficos, as amostras foram atacadas com solução de Nital a 10%, composta por ácido nítrico e álcool etílico. Esta solução não ataca quimicamente a ferrita, mas apenas delinea os contornos de grãos e escurece a perlita. Após o ataque a amostra foi enxaguada com álcool e secada com ar quente.

A fim de observar a microestrutura, as fases e os contornos de grãos formados na ZF, ZAC e no MB, foram realizados ensaios micrográficos. A amostra foi submetida aos processos de corte, embutimento, lixamento com lixas 220, 320, 400 e 600 e polimento com pasta de diamante de 6 µm e 1 µm com tempo suficiente para desaparecimento das

marcas dos lixamentos anteriores. Igualmente ao ataque químico do ensaio macrográfico, a amostra foi atacada com solução de Nital a 10%. Então, a amostra foi enxaguada com álcool, secada com ar quente e levada ao microscópio para início da análise.

III. RESULTADOS

3.1 Resultados dos corpos de prova do processo SMAW

O valor do limite de resistência mínimo estipulado pelo código ASME BPVC IX (2010) para qualificação do procedimento de soldagem com o material de base API 5L grau B é de 415 MPa, dado pela tabela QW/QB-422. Os corpos de prova extraídos das peças de teste soldadas somente com eletrodos revestidos obtiveram valores superiores ao determinado no código e romperam fora da ZF, assim como era esperado. Os valores do limite de resistência obtidos foram de 526 MPa e 554 MPa, acima do limite mínimo especificado pelo código ASME.

Segundo os critérios de aprovação do ensaio de dobramento, para que fosse considerado aceito, os corpos de prova ensaiado não deveriam possuir descontinuidades maiores que 3 mm (1/8") em qualquer direção. Todas as peças de teste soldadas com o processo de eletrodos revestidos, após o ensaio de dobramento, foram aprovadas, assim como também era esperado.

Os ensaios macrográficos foram executados e avaliados de acordo com as exigências da norma ISO 15614-1 (2004) e do código AWS D1.1 (2010). Considerando as dimensões do reforço de face e raiz, a fusão completa entre passes e a ausência de inclusões de escória, todas as peças de teste foram consideradas aprovadas, conforme figura 3.

Na análise microestrutural, foi possível observar a perfeita homogeneidade entre os passes e zonas em toda a solda, sem que houvesse pontos com falta de fusão ou microestruturas descontínuas, conforme visto na figura 4.

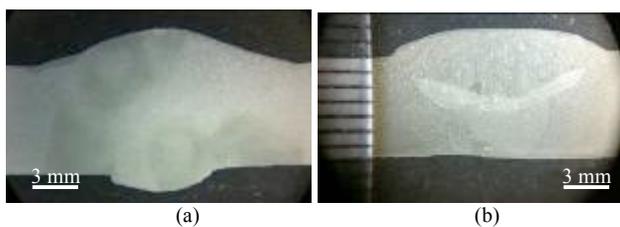


Figura 3 - Ensaio macrográfico da amostra soldada com eletrodos revestidos SMAW (a) e com o processo combinado SMAW+FCAW-S (b)

3.2 Resultados dos corpos de prova do processo combinado SMAW+FCAW-S

Os corpos de prova de tração extraídos das peças de teste soldadas com o processo de soldagem combinado SMAW e FCAW-S, também obtiveram valores superiores ao determinado no código e romperam fora da ZF. O valor médio do limite de escoamento para quatro amostras foi de 357 MPa e para o limite de resistência 534 MPa (figura 5), resultando em 29% acima do limite mínimo especificado pelo código ASME BPVC IX.

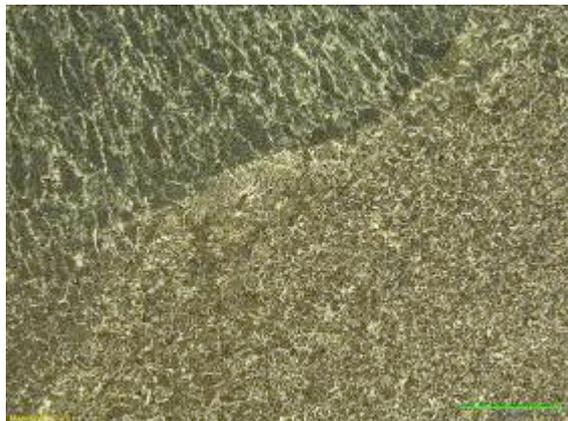


Figura 4 – Zona de ligação entre passes de enchimento e acabamento - 5x

Os quatro corpos de provas do ensaio de dobramento, com duas amostras para dobramento de raiz e duas para dobramento de face, foram considerados aprovados. Para verificação de possíveis trincas superficiais na porção dobrada, foi executado um ensaio complementar não destrutivo de líquidos penetrantes. Foram detectadas duas descontinuidades alongadas no corpo de provas dobrado na face da solda, porém assim como nos demais corpos de provas das demais peças de teste, as indicações ficaram abaixo do limite aceitável máximo de 3 mm para qualificação do procedimento de soldagem.

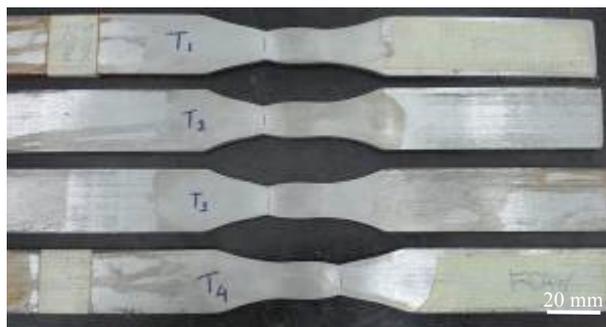


Figura 5 - Corpos de prova rompidos após o ensaio de tração

As amostras do ensaio de dureza foram analisadas com microdurômetro instrumentado, seguindo as recomendações na norma europeia ISO 14577 (2007), com força aplicada de 1 N durante 20s e profundidade média das indentações de 5 µm. As medidas coletadas nos ensaios com escala de dureza Vickers estão plotadas na figura 6 para ambos os processos para comparação dos valores. Os valores de dureza foram medidos a aproximadamente 1,5 mm de profundidade da face e raiz, conforme é orientado na norma Petrobras N-0133 (2013). É possível observar as indentações vistas através do microscópio óptico acoplado ao microdurômetro instrumentado na figura 7. Para que não houvesse algum erro de leitura e interpretação em função das pequenas indentações nas regiões selecionadas, evitando assim coletar medidas individuais de dureza dos grãos, foram feitas, no mínimo, quatro indentações por ponto de interesse para extração da média aritmética.

| PROCESSO | MB | ZAC | ZF | ZAC | MB |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>FACE</i> | | | | | |
| SMAW | 177 | 179 | 224 | 162 | 160 |
| SMAW + FCAW-S | 166 | 176 | 211 | 182 | 160 |
| <i>RAIZ</i> | | | | | |
| SMAW | 175 | 177 | 206 | 176 | 174 |
| SMAW + FCAW-S | 131 | 176 | 199 | 180 | 149 |

Figura 6 - Medidas de dureza plotadas por região

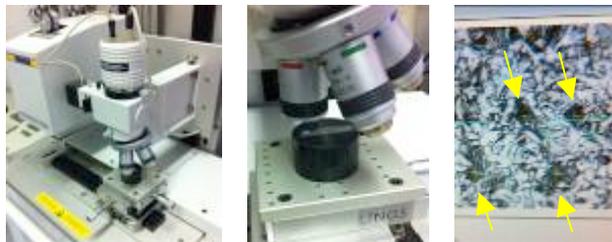


Figura 7- Microdurometro instrumentado utilizado no ensaio de dureza

A partir do ensaio macrográfico foi possível observar os diversos passes e iniciar a análise microestrutural pontual. No metal de base foi observada uma microestrutura alinhada, resultado do processo termomecânico de laminação controlada (LEITE, 2010), com tamanho médio de grão ASTM 10 e 11 (aproximadamente 8 e 11 μm), como pode ser visto na figura 8.

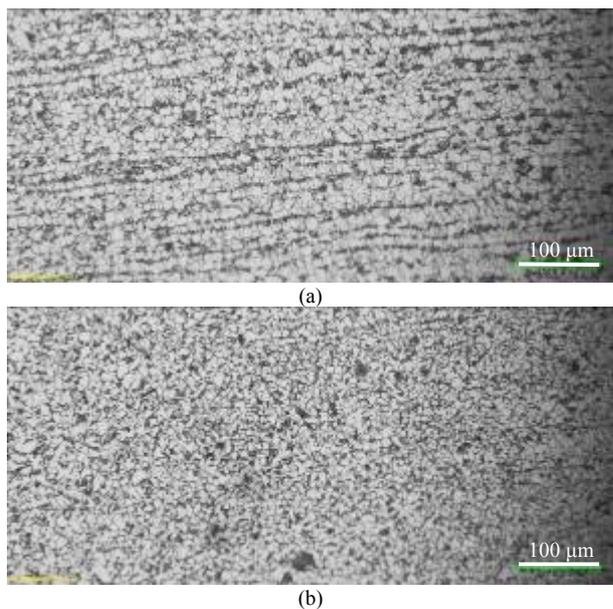


Figura 8 - Grãos alinhados do MB (a) e grãos refinados da ZAC - aumento de 20x vistos em microscópio ótico (b)

IV. CONCLUSÃO

Com base nas informações extraídas durante a soldagem das peças de teste, nas dissertações estudadas como referência, nos dados disponibilizados pelos fabricantes de consumíveis e nos ensaios executados, foi possível elaborar uma comparação técnica entre os processos de soldagem manual com eletrodo revestido (SMAW) e semiautomático com arame tubular autoprotetido (FCAW-S).

As vantagens do processo de soldagem semiautomático com arames tubulares sobre o processo

manual com eletrodos revestidos para tubulações em campo estão concentrados em quatro fatores primordiais: menor teor de hidrogênio, maior taxa de deposição, melhor controle do arco elétrico e facilidade de operação (MILLER, 2014).

Do ponto de vista técnico e metalúrgico, baseado nos ensaios mecânicos executados neste presente estudo, os dois processos de soldagem foram qualificados, seja com o processo de soldagem somente com eletrodos revestidos ou o processo de soldagem combinado SMAW e FCAW-S. Nos ensaios de tração e dobramento ambos os processos de soldagem obtiveram resultados positivos, com ausência de descontinuidades e valores acima dos mínimos estipulados pelas normas. Através dos ensaios micro e macrográficos os cordões vistos nos microscópios estavam íntegros, com penetração completa, boa fusão entre os passes e boa morfologia.

O ganho de produtividade na comparação dos dois processos de soldagem está basicamente no tempo de realização do passe de enchimento e acabamento, etapa onde o processo semiautomático foi introduzido. Com a soldagem da junta completa com eletrodos revestidos o tempo médio de soldagem do enchimento e acabamento foi de 36 minutos. A soldagem dos mesmos passes com arame tubular foi reduzido para 10 minutos. O ganho expressivo no tempo de soldagem destes passes poderia ser maior se fossem utilizadas tubulações com espessuras de parede maiores. Estes ganhos devem-se à maior taxa de deposição obtida no processo semiautomático quando comparado ao processo manual com eletrodos revestido.

Portanto, através dos ensaios mecânicos e microestruturais realizados foi possível concluir que a substituição do processo de soldagem manual SMAW para o processo combinado de soldagem SMAW e FCAW-S é viável tecnicamente. Apesar de pouco popularizado no Brasil e raramente utilizado em soldagem de tubulações de óleo e gás nacionais, o processo de soldagem semiautomático com arames tubulares autoprotetidos atende os requisitos técnicos e pode ser uma opção para aumento de produtividade e ganhos expressivos em tempo total de soldagem, com respectiva redução no tempo total da mão de obra direta.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Welding of pipeline and related facilities API Standard 1104**. Washington, 2005.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for line pipe 5L**. Washington, 2004.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section IX: Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators**. New York, 2010.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook: Welding Process**. Miami, 1991.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Structural welding code: steel D1.1**. Miami, 2010.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding A5.1**. Miami, 1991.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for carbon steel electrodes for flux cored arc welding A5.20**. Miami, 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA PEMAT 2022. **Plano decenal de expansão da malha de transporte dutoviário**, 2014.

ESAB BR, **Metalurgia da Soldagem**, São Paulo: Editora ESAB, 2004.

INTERNACIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14577**. Metallic materials: instrumented indentation test for hardness and material parameter: Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings. Genebra, 2007.

INTERNACIONAL STANDARD ORGANIZATION. **BS EN ISO 15614-1**. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials: Welding procedure test Structural welding: Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys. London, 2004.

LEITE, M.P. **Caracterização mecânica, microestrutural e avaliação da fragilização pelo hidrogênio em tubos de aço API 5L grau X65 MS PSL2**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2010.

MILLER. **Examining self-shielded flux cored welding (FCAW-S) in high-strength pipeline welding applications as an alternative to stick welding (SMAW)**. Disponível em: <<http://www.millerwelds.com/resources/articles/self-shielded-flux-cored-welding-fcaw-high-strength-pipeline-welding-alternative-to-stick-welding-smaw>>. Acesso em: 24 de Julho de 2014.

PETROLEO BRASILEIRO S/A, N-0133. **Soldagem**. 2013.

PETROLEO BRASILEIRO S/A, PE-2030: **plano estratégico Petrobras 2030**, 2014.

VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.