

## EFEITOS DO TEOR DE ENXOFRE E DE ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS POR FTPW DE AÇOS DA LINHA API

Raphael Rezende Pires, Materiais e Processos de Fabricação, [raphaelpires@yahoo.com.br](mailto:raphaelpires@yahoo.com.br)  
Sinésio Domingues Franco, Materiais e Processos de Fabricação, [sdfranco@ufu.br](mailto:sdfranco@ufu.br)

**Resumo.** Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia que será utilizada na identificação do efeito da composição química, mais precisamente do enxofre e de alguns elementos de liga, nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por atrito através do processo FTPW (Friction Tapered Plug Welding) de aços C-Mn da linha API. Para tanto, serão realizados ensaios mecânicos de tração, dobramento, indentação instrumentada e microdureza Vickers para a avaliação das propriedades mecânicas das juntas soldadas. Técnicas metalográficas serão utilizadas para exame da macro e microestrutura e quantificação das inclusões de MnS.

**Palavras chave:** Solda por atrito FTPW, Inclusões de MnS, ZTMA, Aço C-Mn, Reparo por atrito.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o intuito desenvolver novos processos para a realização de reparos em áreas classificadas, os quais ofereçam um menor custo operacional e melhorias na qualidade da solda, a soldagem por atrito surge com forte potencialidade de aplicação.

A técnica de reparo por atrito de estruturas de aço, também conhecida como costura por atrito (*Stitch Welding*) foi desenvolvida pelo TWI (*The Welding Institute*) e patenteada por Thomas e outros (1995). O reparo consiste na remoção da trinca ou descontinuidade através da abertura de cavidades ao longo do comprimento da trinca e, subsequente preenchimento da cavidade pelo processamento termomecânico de um pino. O processamento termomecânico de pino por atrito é classificado segundo a AWS (1991) uma variação não convencional do método de soldagem por atrito contínuo (*continuous drive*), sendo designado de FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*) quando do processamento de pinos cilíndricos ou FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*) para pinos cônicos. O processamento termomecânico FHPP/FTPW consiste no preenchimento de uma cavidade previamente aberta e com geometria característica por intermédio da introdução coaxial de um pino (consumível), estando este submetido simultaneamente a uma velocidade de rotação e a esforços de compressão contra a superfície da cavidade, conforme ilustrado na Fig. (1). Devido ao calor gerado pela interação entre as superfícies em contato o material do pino é mantido em uma condição viscoplástica, permitindo a existência de um fluxo de material que se desenvolve ao longo da direção axial do consumível, promovendo-se, assim, o completo preenchimento do furo.

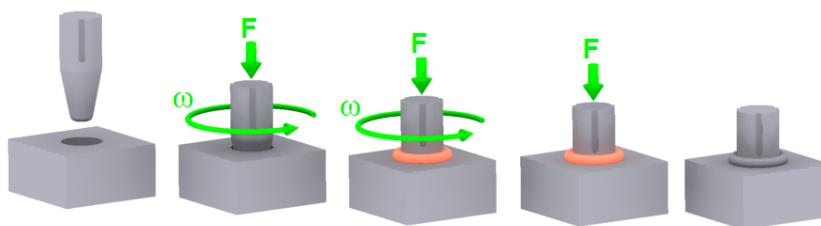


Figura (1): Croqui do processo de soldagem por atrito FTPW (Freitas, 2014)

Paes (2013) avaliou o comportamento mecânico e metalúrgico de juntas soldadas realizadas por processamento termomecânico, via soldagem por atrito de pinos cilíndricos de aço no interior de cavidades de chapas de aço C-Mn. Os resultados obtidos por ele demonstram que a junta soldada é mais resistente mecanicamente que o metal de base, caracterizando o efeito de *overmatching*. Paes (2013) também constatou que a qualidade da junta soldada é influenciada pela presença de inclusões (MnS) no aço do pino. Um consumível de aço com alto teor de enxofre afetou negativamente a tenacidade à fratura da interface da junta soldada, pela ocorrência do fenômeno de *overheating* (presença de microcavidades associadas a pequenas inclusões esféricas de MnS na superfície da fase austenítica), sem afetar, entretanto, o excelente comportamento em fadiga da junta.

Deste modo, pode-se afirmar que a composição química do metal consumível bem como a presença de inclusões não metálicas têm forte relevância na qualidade final da solda, tanto na microestrutura quanto nas propriedades mecânicas. Os resultados de tenacidade à fratura das juntas soldadas apresentados por Paes (2013), sugerem o estudo da soldagem FTPW em chapas de aço C-Mn a partir de aços ferríticos de elevada tenacidade e baixo teor de enxofre e carbono.

Neste trabalho serão verificados os efeitos da composição química, mais precisamente do enxofre e de alguns elementos de liga, nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por atrito através do processo FTPW de aços C-Mn da linha API.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

### 2.1. Descrição dos materiais que serão utilizados nas juntas FTPW

Para a avaliação da influência do teor de enxofre e de elementos de liga nas propriedades mecânicas das juntas soldadas FTPW serão utilizados dois tipos de aço para a fabricação dos pinos consumíveis: API 5L X65 e o ABNT 1010. Como substrato para a realização de todas as juntas soldadas será utilizado o ASTM A36. A composição química desses aços foi obtida através de espectroscopia por emissão óptica e os valores mensurados são apresentados na Tab. (1).

A microestrutura dos materiais será revelada através de preparações e análises metalográficas em superfícies de amostras polidas, sem e com ataque químico. As análises serão realizadas através de microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As propriedades mecânicas das amostras antes da realização das soldas por atrito serão obtidas através de ensaios de tração conforme as normas ASTM E466 e ASTM E8/E8M, dureza Vickers e indentação instrumentada.

Tabela (1): Composição química dos pinos e dos metais de base (% em peso).

| DESCRIÇÃO                     | C     | Mn    | Cr    | Ni    | Mo    | V     | Si    | S     | P     |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Pino API 5L X65</b>        | 0,084 | 1,472 | 0,041 | 0,000 | 0,048 | 0,038 | 0,254 | 0,011 | 0,011 |
| <b>Pino ABNT 1010</b>         | 0,148 | 0,664 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,149 | 0,018 | 0,025 |
| <b>Metal de Base ASTM A36</b> | 0,180 | 0,920 | 0,520 | 0,030 | 0,150 | 0,000 | 0,310 | 0,009 | 0,026 |

As geometrias do furo no metal de base e dos pinos de preenchimento são apresentadas na Fig. (2). Estas geometrias correspondem às geometrias que foram otimizadas em trabalhos anteriores (Pires, 2007).

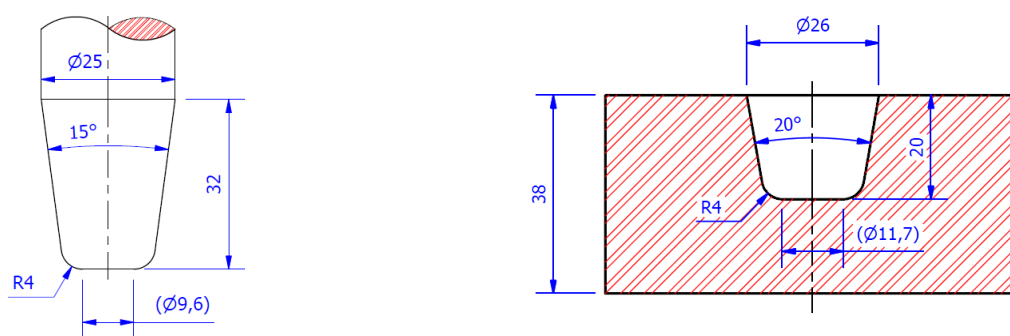


Figura (2): Geometria do pino consumível e do furo no metal de base

### 2.2. Descrição do equipamento e dos parâmetros de soldagem para a realização das soldas por atrito FTPW

A unidade de processamento de pinos por atrito utilizada nesse trabalho é apresentada na Fig. (3). Todo o sistema é controlado e permite a aquisição em tempo real dos parâmetros de ensaio, quais sejam: força axial, velocidade de rotação do pino consumível, comprimento de queima, força e tempo de forjamento (Borges, 2011). Esta unidade possui capacidade para aplicação de força axial máxima de 500 kN.

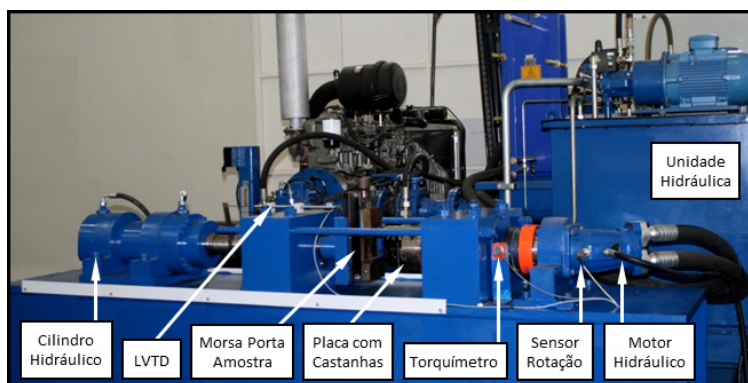


Figura (3): Ilustração da unidade de processamento de pinos por atrito

A matriz de ensaios com os parâmetros de processamento para a realização das soldas é apresentada na Tab. (2).

Tabela (2): Matriz de ensaios experimentais; metal base: ASTM A36; Pino: API 5L X65 e ABNT 1010.

| Matrix de Ensaios Experimentais   |                                               |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Força (kN)</b>                 | 60, 100, 200 e 300                            |
| <b>Rotação (rpm)</b>              | 1.700                                         |
| <b>Comprimento de Queima (mm)</b> | 6 mm                                          |
| <b>Força de Forjamento (kN)</b>   | Utilizar a mesma força da fase de aquecimento |
| <b>Tempo de Forjamento (s)</b>    | 10 s                                          |

## 2.2. Ensaios e procedimentos para avaliação das soldas por atrito FTPW

Para a avaliação da ductilidade das juntas soldadas serão realizados ensaios de dobramento conforme as normas ASTM E 190-92 (2003) e ANSI/AWS B 4.0-98 (1997). Neste ensaio será mensurado o ângulo de dobramento crítico, ou seja, o ângulo máximo entre 0 e 180° em que a amostra pode ser dobrada sem apresentar a formação de trincas.

Ensaio de tração das juntas soldadas também serão realizados para cada condição de amostras produzidas. Estes ensaios serão realizados conforme as normas ASTM E466 e ASTM E8/E8M.

Com a intenção de verificar a influência das inclusões não metálicas nas propriedades mecânicas, ensaios de tenacidade à fratura da junta soldada bem como de Charpy instrumentado deverão ser efetuados para os pinos consumíveis com diferentes teores de enxofre. Adiciona-se ainda a execução de ensaios de fadiga de baixo ciclo do tipo tração-tração da junta soldada através da fabricação de corpos de prova em escala reduzida e também a execução de ensaios de fadiga através da flexão da estrutura soldada em escala real.

Ensaio de macroindentação instrumentada também serão realizados para avaliação da macrodureza, limite de escoamento e limite de resistência na interface da junta soldada e na ZTMA. Além da macroindentação serão executados perfis de microdureza Vickers. Estes perfis serão executados em posições distintas ao longo da profundidade da junta soldada.

Todas as juntas soldadas terão a suas macroestruturas e microestruturas avaliadas através de técnicas metalográficas. Para a realização destas análises as soldas serão seccionadas longitudinalmente em relação à seção transversal do pino consumível. As macroestruturas e microestruturas serão reveladas através de ataque químico com Nital a 6 e 2% respectivamente e, analisadas através de microscopia óptica e MEV.

Deverá ser analisada a concentração, forma e distribuição das inclusões não metálicas (MnS) ao longo da interface pino e metal de base, para assim melhor compreender o efeito dessas inclusões nas propriedades mecânicas avaliadas neste trabalho. As distribuições das inclusões e suas estatísticas serão analisadas com base na norma ASTM E1245 e através de metalografia quantitativa.

## 4. CONCLUSÕES

A abordagem experimental adotada neste trabalho permitirá de forma sistemática e abrangente avaliar o teor de enxofre e de elementos de liga nas propriedades mecânicas de juntas soldadas obtidas pela soldagem por atrito FTPW de aços da linha API.

## 5. REFERÊNCIAS

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook. 8. ed. Miami, 1991. v. 2, (0-87171-354-3).

Borges, B. M., Instrumentação, controle e Operacionalização de uma Unidade de Reparo por Atrito com Capacidade de Carga Axial de 500 kN. 2011, 97 p., Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Freitas, D. S. Controle de Força e Rotação de uma Unidade de Reparo Por Atrito Usando Controlador PID e Inteligência Artificial. 2014. 192 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Paes, M. T. P., Processamento termomecânico de Pinos de Aço no Interior de Cavidades de Aço C-Mn através de Soldagem por Atrito Rotacional. 2013, 318 p., Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ.

Pires, R. R., Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito. 2007.131 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Thomas, W.; Nicholas, D.; Jones, S. B.; Lilly, R. H.; Dawes, C. J.; Dolby, R. E. Friction Forming. TWI, Cambridge, Patent N°. EP 0 602 072 B1, 1995.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica/UFU e à Petrobras pelo apoio financeiro.