

tubo & cia matéria de capa

# Soldagem de tubos de aço pelo processo de fricção linear

ORIGINALMENTE O PROCESSO FOI DESENVOLVIDO PARA A CONFECÇÃO DE UNIÕES NO ESTADO SÓLIDO EM LIGAS NÃO-FERROSAS. MAS A ALTA QUALIDADE DAS JUNTAS OBTIDAS SOB ALTA VELOCIDADE VEM ATRAINDO A ATENÇÃO DOS PROCESSADORES DE TUBOS DE AÇO

(\*) ANTONIO AUGUSTO GORNI

O processo de soldagem por fricção linear foi patenteado em 1991 pelo The Welding Institute (TWI), situado em Cambridge (Reino Unido), para uso em ligas metálicas com baixo ponto de fusão, tais como alumínio, latão e cobre. Trata-se de um processo no estado sólido, no qual uma ferramenta não-consumível gira ao longo da interface entre os dois materiais a serem soldados, conforme mostrado na figura 1. A ferramenta consiste de um pino protuberante que “mergulha” no interior das peças que estão sendo unidas, possuindo ainda um “ombro” concêntrico com maior tamanho, que se mantém sobre a superfície da junta. A superfície côncava do ombro gera uma mistura de calor de fricção e de pressão de forjamento. O aquecimento por fricção gerado pelo ombro e a rotação do pino em contato com o material-base produz uma região localmente plastificada ao redor da ferramenta, conforme mostrado na **figura 2**. O material plastificado é deslocado à medida que a ferramenta se move ao longo da junta soldada. É produzida uma união metalúrgica plenamente consolidada em decorrência do calor e pressão de forjamento proporcionados pela ferramenta [DeFalco 2009].

Este novo processo possui diversas vantagens em relação às técnicas convencionais de soldagem. Uma vez que não ocorre fusão dos materiais envolvidos, pode-se obter uma união soldada com qualidade muito alta em função de aporte térmico muito baixo, o qual também é muito eficiente, uma vez que todo o aquecimento ocorre apenas na interface ferramenta/peças sob união. Isso também faz com que a distorção dos componentes seja mínima e que não haja geração de salpicos.

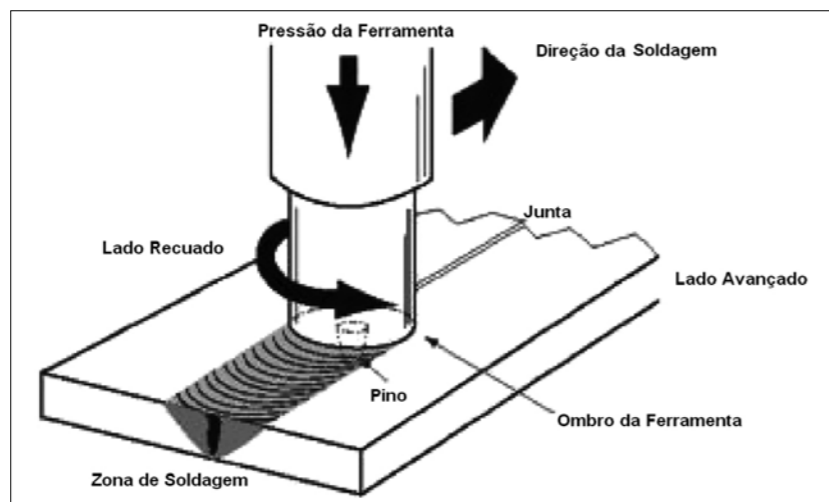


Figura 1 - Processo de união entre duas chapas usando-se a soldagem por fricção linear [Raj, 2010]

O processo também se caracteriza pela ausência de material de adição, proporcionando significativa redução de custos. Também não há geração de fumos, dispensando o uso de máscaras pelos trabalhadores. Tudo isso torna a soldagem por fricção linear altamente eficiente e ecologicamente amigável, facilitando sua plena automação. O menor aporte de energia faz com que a união obtida apresente melhores propriedades mecânicas e resistência

à fadiga em relação às confeccionadas pelos processos convencionais, além de acabamento superficial muito liso, com pouca ou nenhuma geração de rebarbas, minimizando a necessidade de inspeção posterior. O processo ainda possui potencial para unir materiais diferentes que não podem ser soldados pelos processos convencionais. Ele é completado em poucos segundos e apresenta alto grau de reprodutibilidade [DeFalco 2009, Raj 2010].

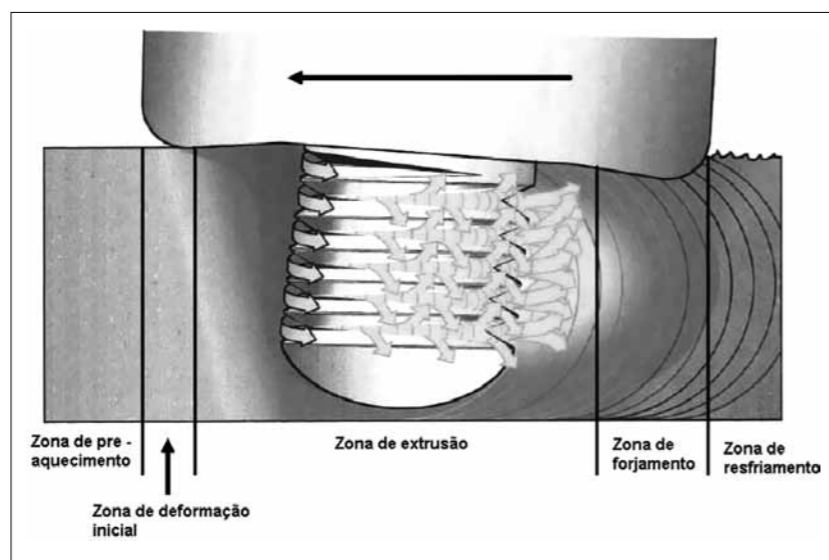


Figura 2 - Representação do fluxo de material durante a soldagem por fricção linear. [Paiva 2009]

Os parâmetros de processo para a soldagem por fricção linear são a velocidade de deslocamento da ferramenta com respeito ao material base, sua velocidade rotacional, seu ângulo em relação à superfície do material e a pressão de forjamento aplicada por ela. Estes parâmetros são governados pela sua geometria (ou seja, diâmetros do ombro e do pino), propriedades mecânicas do material a ser unido (ou seja, resistência à deformação) e sua espessura.

O lado do cordão produzido pela soldagem por fricção linear no qual a rotação da ferramenta e a direção de deslocamento encontram-se na mesma direção é o chamado lado de avanço, enquanto que o outro é o lado de recuo. As diferentes condições de processamento produzem microestruturas ligeiramente diferentes desses dois lados, dependendo do material que está sendo processado, da geometria da ferramenta e dos parâmetros específicos da soldagem por fricção linear.

A soldagem por fricção linear foi inicialmente limitada a ligas metálicas com baixo ponto de fusão porque os primeiros materiais usados na confecção da ferramenta não conseguiam suportar as tensões necessárias para “agitar” ligas com maiores pontos de fusão, tais como aços em geral. Posteriormente este problema começou a ser resolvido com a introdução de novos materiais com dureza muito alta para a confecção das ferramentas, tais como o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) e tungstênio-rênio (W-Re). O uso de suportes de ferramenta refrigerados com líquidos e de sistemas de telemetria refinou ainda mais o processo e sua capacidade. Isso abriu a possibilidade do uso da fricção por soldagem linear em praticamente todos os campos industriais onde se aplica a soldagem convencional de aços. Os primeiros a serem explorados de forma consistente foram a construção naval e a instalação de tubos com grande diâmetro [DeFalco 2009].

Contudo, ainda há outros problemas a serem vencidos para que a soldagem por fricção linear seja amplamente utilizada na soldagem dos aços. Em primeiro lugar, é necessário considerar as numerosas variantes dos processos convencionais que permitem a confecção de uniões soldadas satisfatórias e confiáveis para esse material, o que não estimula o emprego de processos ainda não dominados plenamente. É o caso da tecnologia dos novos materiais para a ferramenta, que ainda é incipiente. É necessário melhorar ainda mais sua resistência ao desgaste e caracterizar plenamente a eventual contaminação do material-base por seus resíduos. As consequências das transformações de fase que acompanham a soldagem por fricção linear ainda não foram estudadas com profundidade suficiente no caso dos aços. Finalmente, a enorme variedade de aços já disponível – e que continua a se expandir – exige considerável número de experimentos para otimização do processo de soldagem em cada caso específico [Raj 2010, Fairchild 2008].

**ALTA PRECISÃO E QUALIDADE  
TECNOLÓGICA EM TREFILADOS**

**TUBOS TREFILADOS QUALIFICADOS**

**ALUMÍNIO, COBRE E LATÃO**

- TUBOS em todos os formatos e medidas
- PEÇAS tubulares acabadas ou semi-acabadas, cortadas e usinadas
- PERFIS personalizados e formatos irregulares

- Diâmetros especiais conforme especificações
- Qualidade presente em todos os segmentos do mercado
- Competitividade e versatilidade na prestação dos serviços

**SERVIÇOS DE MÃO DE OBRA:**

- Trefilação em barras e em rolos • Corte sob medida
- Usinagem de precisão • Recozimento e endireitamento

Fones/Fax: (11) 4227-5570 / 4226-6968 / 4226-7150 / 4226-7162 - info@extretec.com.br  
 Rua Senador Vergueiro, n°s 110, 124 e 130 - CEP: 09521-320 - São Caetano do Sul - SP - [www.extretec.com.br](http://www.extretec.com.br)

**APLICAÇÃO A TUBOS DE AÇO COM GRANDE DIÂMETRO**

O desenvolvimento recente de equipamentos portáteis para a soldagem orbital através de fricção linear já permite a confecção de soldas circunferenciais em tubos com grande diâmetro sob condições de campo ou em outras posições complexas. No momento o processo já se encontra consolidado para a soldagem circunferencial de tubos com até 12,7 mm de espessura e estão sendo feitos desenvolvimentos para aumentar esse valor para 19 mm [DeFalco 2009].

O novo processo é potencialmente vantajoso para a instalação de tubos de grande diâmetro, principalmente em termos de eficiência energética, pois consome de 60% a 80% menos energia do que processos convencionais de soldagem por fusão a arco ou laser, o que proporciona significativas reduções de custo. Além disso, a soldagem por fricção linear efetua a união em um único passe, aumentando bastante a produtividade do processo; dessa forma, é necessário dispor de menor número de estações de soldagem. A maior simplicidade do processo e menor quantidade de parâmetros a serem controlados facilita sua adoção na soldagem sob condições difíceis. A qualidade da junta soldada pelo novo processo é imune a defeitos de soldagem decorrentes da solidificação, já que o novo processo não envolve a fusão do metal nem a incorporação de materiais de adição.

Um problema inerente à soldagem por fricção linear é a presença de um orifício decorrente da extração da ferramenta após a união soldada ter sido confeccionada. A solução

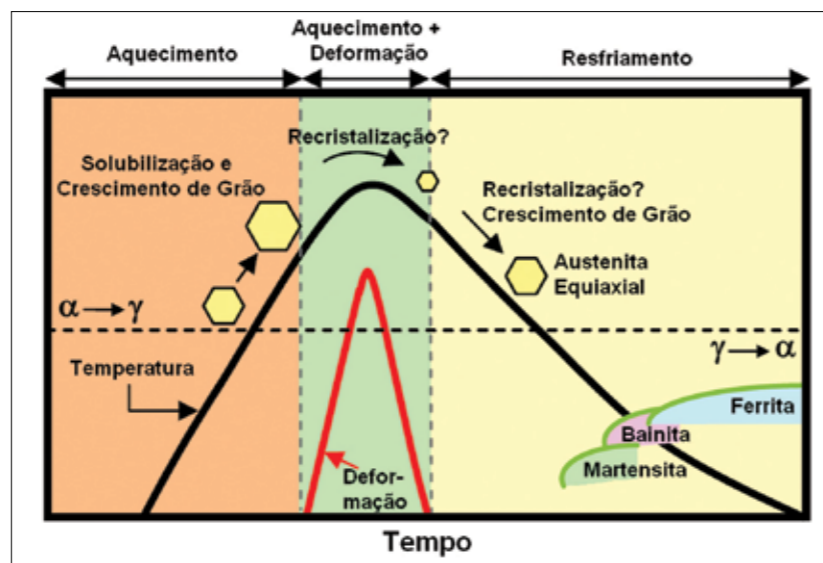
para esse problema em juntas lineares consiste no uso de uma lingueta para escape, a qual é removida assim que a união tiver sido completada. No caso de uniões soldadas totalmente circunferenciais, essa lingueta é montada sobre uma porção já unida do tubo, perto do ponto inicial da solda, após ela já se ter iniciado. Ao final do processo, a junta consistirá de um cordão de soldagem sobreposto no ponto inicial, o qual se move para fora do eixo sobre a lingueta de escape para se completar o processo. Após a união ter sido feita, o conjunto é desencaixado e removido.

**PROCESSO DE FRICÇÃO LINEAR**

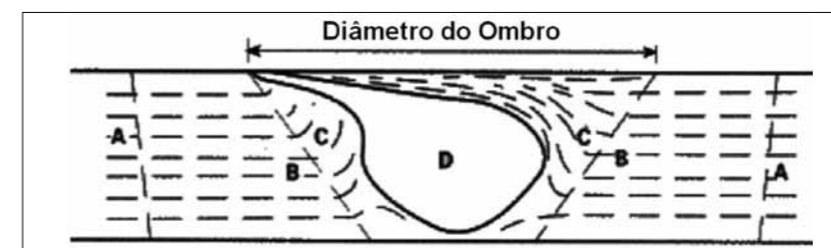
O grande desafio associado à aplicação da soldagem por fricção linear em tubos de grande diâmetro usados na indústria petrolífera está em conciliar resistência mecânica e tenacidade nas uniões soldadas. Na soldagem convencional envolvendo fusão isso pode ser controlado através da com-

posição química da união, a qual pode ser definida pelo material de adição, e do procedimento de soldagem. Já na soldagem por fricção linear, onde não há incorporação de material de adição, as propriedades da união somente podem ser conseguidas pelo processamento termomecânico do material-base [Fairchild 2008].

A **figura 3** mostra as alterações metalúrgicas que ocorrem no aço na união produzida pelo processo de soldagem por fricção linear. À medida que a ferramenta passa pelo local, o ponto considerado passa por três estágios termomecânicos: aquecimento, aquecimento mais deformação e resfriamento. No estágio de aquecimento, a temperatura começa a aumentar antes da chegada da ferramenta devido à condução térmica do calor que viaja à frente dela. O aumento na temperatura resulta na austenitização desse local e crescimento dos grãos austeníticos. Contudo, as primeiras experiências indicam que a temperatura máxima alcança-



**Figura 3** - Diagrama esquemático da evolução da temperatura e deformação durante o processo de soldagem por fricção linear, juntamente com os mecanismos microestruturais que deverão estar atuando simultaneamente [Fairchild 2008]



**Figura 4** - Esquema da seção transversal de uma típica união produzida pela soldagem por fricção linear, mostrando suas quatro zonas típicas: (a) metal-base; (b) zona afetada termicamente; (c) zona afetada termomecanicamente; (d) zona de agitação (botão de soldagem) [Nandan 2008]

da é inferior a 1.200°C. No segundo estágio, quando a ferramenta chega até o ponto considerado, os grãos se deformam plasticamente, sendo refinados pela recristalização dinâmica. No terceiro estágio, os grãos recristalizados dinamicamente passam por recuperação e recristalização estáticas, e pela subsequente fase de crescimento. No momento, o grau e número de vezes em que a recristalização ocorre são desconhecidos, situação que é denotada pelos pontos de interrogação vistos na **figura 3**. É bastante provável que a evolução da recristalização seja função do procedimento específico de soldagem adotado. Os grãos recristalizados

finalmente se transformam durante o resfriamento que ocorre depois da passagem da ferramenta, formando a microestrutura final constituída de ferrita, bainita e/ou martensita. Ela dependerá da composição química do aço, do tamanho de grão e da taxa de resfriamento. Os primeiros resultados experimentais indicam que o tempo necessário para resfriamento entre 800°C e 500°C é da ordem de 11 segundos. Esse intervalo de tempo é comparável ao obtido durante a soldagem convencional manual a arco com aposte térmico de 1,3 kJ/mm. Logo, as transformações metalúrgicas esperadas na soldagem por fricção linear não deverão ser muito

diferentes das observadas nos processos convencionais. Essa microestrutura afinal definirá as propriedades mecânicas da união, em particular a sua tenacidade, propriedade crítica no caso dos tubos de aço com grande diâmetro que são usados para a condução de gás e óleo [Fairchild 2008, Nandan 2008].

Os mecanismos metalúrgicos que acabaram de ser citados geram a seção transversal esquemática da união soldada por fricção linear vista na **figura 4**. Como se pode observar, essa seção transversal está dividida em quatro zonas. A zona afetada termicamente é similar às presentes nas uniões soldadas por processos convencionais, embora o valor máximo de temperatura que ocorre na soldagem por fricção linear é significativamente menor do que a temperatura solidus, e a fonte de calor é muito difusa. Isto pode levar a microestruturas ligeiramente diferentes em comparação com as obtidas nos processos de soldagem que envolvem fusão. A região central do botão de soldagem, com formato similar a um “anel de

**Prestação de serviços em**

# corte de tubos

- Corte a laser
- Chapas e tubos
- Excelente prazo de entrega
- Atendimento a pequenos lotes
- Desenvolvimento de peças personalizadas
- Grande estoque de matéria prima



**Qualinox**  
afabricadofuturo.com.br

Tel.: 55 (11) 3621-3396 / 3625-0281  
vendas@qualinox.com.br - laser@qualinox.com.br

cebola”, sofreu o grau mais severo de deformação, em função da deposição de material promovida pela ferramenta rosqueada, desde a região frontal da solda para a pos-posterior. A região termomecanicamente afetada encontra-se entre a região termicamente afetada e o botão; os grãos da microestrutura original são retidos nessa região, mas frequentemente em estado deformado [Nandan 2008].

No novo processo, uma vez que os picos de temperatura alcançados são muito menores do que os observados durante as soldagens a arco, a parcela da zona termicamente afetada que se torna plenamente austenítica apresentará menores dimensões e possuirá menor tamanho de grão. Isto leva à redução da temperabilidade do aço e evita a formação de martensita não-revenida, uma transformação indesejável neste caso. Este fato sinaliza a possibilidade do processo de soldagem por fricção linear poder processar aços com maiores valores de carbono equivalente.

De toda forma, a microestrutura na região da união obtida através da soldagem por fricção linear em aços ferríticos ainda não está plenamente caracterizada, o que ainda leva a resultados inconsistentes. Há registros de resultados excelentes de tenacidade das juntas feitas por esse processo para aços para tubos API graus X65, X80 e X100, e também L80, mas o contrário também foi observado em outras ocasiões. Portanto, ainda há muito trabalho a ser feito para correlacionar as condições do processo de soldagem por fricção linear e a composição química do aço com as propriedades mecânicas das juntas obtidas, especialmente em termos de tenacidade [Fairchild 2008, DeFalco 2009].

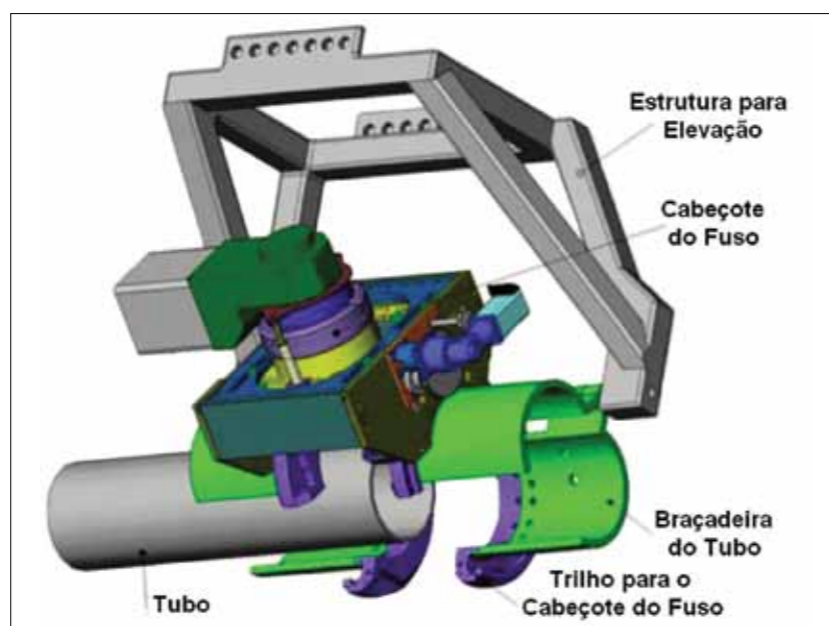
### EXPERIÊNCIAS PRÁTICAS

A empresa MegaStir Technologies, em associação com o Laboratório Nacional de Oak Ridge, do Departamento de Energia do governo americano, efetuou uma experiência em escala industrial envolvendo a soldagem circunferencial de tubos do tipo API X65 usando o processo de fricção linear. Esses tubos foram feitos com aço microligado ao nióbio, tendo limite de escoamento de 460 MPa, limite de resistência de 530 MPa e alongamento total de 33%. Ele tinha diâmetro externo era igual a 324 mm e espessura de parede de 6,35 mm [Feng 2005].

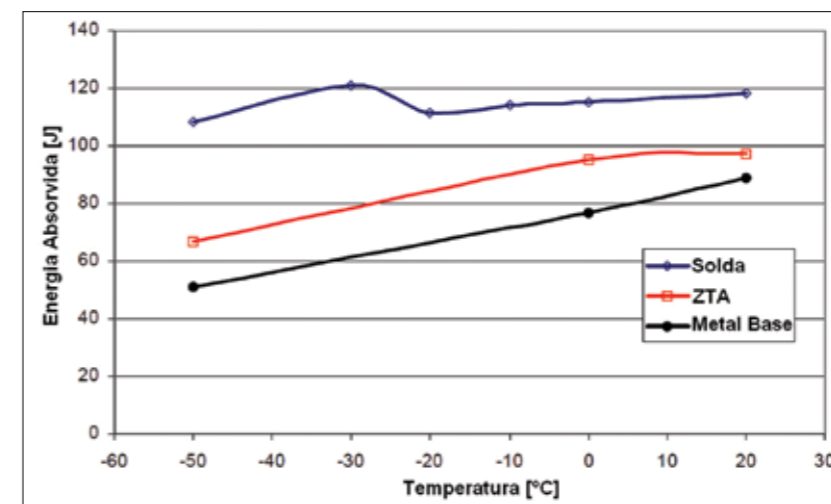
A soldagem circunferencial por fricção linear foi feita usando-se uma ferramenta feita com nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN), com diâmetro de ombro de 25,4 mm e pino com comprimento de 5,6 mm. A junta foi de

topo e quadrada, sem preparação especial da ranhura, cuja superfície foi retificada antes da soldagem. Foi aplicado um único passe com penetração plena a partir da superfície externa. A velocidade de rotação da ferramenta variou entre 500 e 600 r.p.m., a velocidade de avanço oscilou entre 100 a 150 mm/min e a força de forjamento foi igual a 2950 kgf. Foi usada uma lingüeta de saída para se eliminar o orifício de saída do tubo. Providenciouse a liberação de argônio nas proximidades da ferramenta durante o procedimento de soldagem para evitar a oxidação da união soldada.

A **figura 5** mostra o equipamento usado para executar a soldagem circunferencial, originalmente concebido para uso em campo. Ensaio de tração cruzada efetuados no cordão de soldagem, de acordo com a norma API 1104, apresentaram um valor médio de limite de resistência de 538 MPa; a fratura, do tipo dúc-



**Figura 5** - Equipamento para execução de soldagem circunferencial de tubos pelo processo de fricção linear [Feng 2005]



**Figura 6** - Curvas de transição dúctil-frágil determinadas para o metal base, zona termicamente afetada e união soldada do tubo grau X65 submetido à soldagem circunferencial por fricção linear [Feng 2005]

til, sempre ocorreu no metal-base, fora portanto da união soldada e da zona termicamente afetada. As curvas de transição dúctil-frágil, determinadas para o metal-base, zona termicamente afetada e união soldada, podem ser vistas na **figura 6**. Elas foram levantadas a partir de resultados de energia absorvida durante o ensaio de resistência ao impacto Charpy, de acordo com a norma ASTM E23. Foram usados corpos de prova sub-size (10 x 5 x 50 mm) em função da pequena espessura de parede do tubo. Como se pode observar, neste caso específico a tenacidade da união soldada e da zona termicamente afetada foi maior do que a obtida no metal base ao longo de toda a faixa de temperaturas pesquisada. Todas as fraturas observadas foram do tipo dúctil.

Apesar de o trabalho mostrar evidências de falha na face raiz do cordão de soldagem, com dimensões relativamente pequenas (0,15 mm) e com a presença de camada de óxido, as conclusões finais desse trabalho foram muito favorá-

veis, indicando que o processo de fricção linear podia produzir união circunferencial plenamente consolidada em tubos grau API X65, com boa produtividade e propriedades mecânicas adequadas [Feng 2005]. Por outro lado, um trabalho similar, envolvendo a soldagem circunferencial de um tubo API grau X80, apresentou resultados promissores, ainda que não totalmente adequados do ponto de vista da tenacidade e da presença de defeitos na junta [Fairchild 2008].

### PERSPECTIVAS FUTURAS

O processo de soldagem por fricção linear não envolve a fusão localizada das peças a serem unidas, criando uniões no estado sólido. Ele é especialmente adequado para ligas não-ferrosas, que apresentam menor resistência mecânica, pois requer intenso trabalho de conformação mecânica. Contudo, suas vantagens em termos de qualidade metalúrgica das juntas, alta produtividade e baixa distorção

tem incentivado o desenvolvimento de aplicações envolvendo aços, especialmente nas áreas naval e dos tubos de grande diâmetro. Embora os primeiros resultados tenham sido promissores, ainda há um longo caminho para a consolidação industrial plena do processo, particularmente em aplicações que requerem níveis de tenacidade excepcionais e obtidos de forma consistente, como é o caso dos tubos de grande diâmetro para a indústria petrolífera.

As ferramentas ainda precisam ser aperfeiçoadas, uma vez que elas são extremamente solicitadas durante a soldagem de aço, mas precisam assegurar altos níveis de produtividade e qualidade na junta obtida. Até o momento não foram desenvolvidas ferramentas que possam ser reutilizadas e apresentarem desempenho consistente. Foram propostos processos híbridos de soldagem por fricção linear, com aquecimento auxiliar externo. Isto alivia as solicitações sobre a ferramenta, mas aumenta os custos do processo. Outra possível saída seriam ferramentas, consumidas de forma lenta e com o material liberado participando de forma ativa no processo de soldagem. Também ainda está por ser realizado um trabalho pleno de caracterização metalúrgica para se entender plenamente o efeito do processo sobre a formação da microestrutura da junta e as consequentes propriedades mecânicas [Bhadeshia 2009].

(\*) Antonio Augusto Gorni é doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas e mestre em Engenharia Metalúrgica pela Escola Politécnica da USP. agorni@iron.com.br (www.gorni.eng.br)