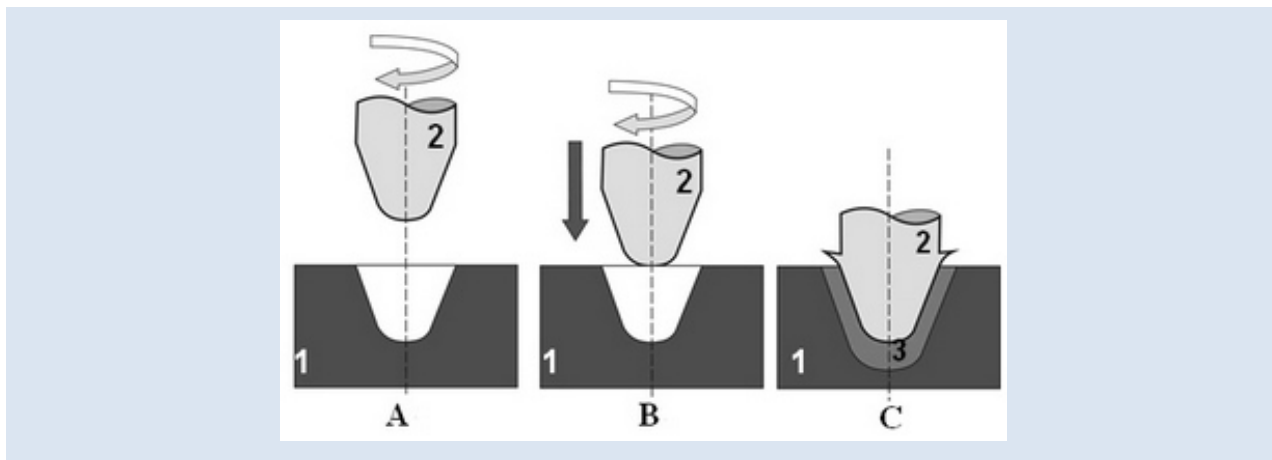


## INFLUÊNCIA DA FORÇA APLICADA NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL EM AÇOS

Mariane Chludzinski\*, Fabiano Mattei, Telmo R. Strohaecker

Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

\* e-mail: marianec@demet.ufrgs.br



### RESUMO

Os processos de união por soldagem entre peças e componentes metálicos são indispensáveis para nossa realidade tecnológica. Alguns desses métodos apresentam defeitos inerentes aos processos, incentivando assim a pesquisa por novas técnicas. Entre elas está a soldagem por fricção com pino consumível. Objetivando as análises das variações no processo de soldagem por fricção com pino consumível em aço, através de modificações na carga axial aplicada, as soldas foram realizadas com diferentes cargas axiais aplicadas no pino. Para a avaliação do processo realizaram-se testes de dobramento, perfis de microdureza e análise visual com ataque químico. Os resultados esperados são variabilidade nas ligações entre material do pino e metal de base, resultando em alterações na zona termicamente afetada, juntamente com modificações nas propriedades mecânicas na área soldada.

**Palabras Claves:** Soldagem por fricção com pino consumível, aço especial, ensaio de dobramento

## INFLUENCE OF THE AXIAL FORCE APPLIED IN STEELS FRICTION HYDRO-PILLAR WELDED JOINTS

### ABSTRACT

The welding processes of metal joints are essential for our technological reality. Some of these methods have defects inherent in the process, encouraging the search for new techniques. Among them is the Friction Hydro-Pillar Processing (FHPP). Aiming the analysis of variations in the FHPP welds in low alloy steels, through changes in axial load applied in the rod. For the evaluation of the process, bending tests were performed, as well profiles of microhardness and visual analysis with chemical attack. The results expected are variability in the bonding between material of rod and metal base resulting in changes in the heat affected zone and in the mechanical properties of the welded region.

**Keywords:** Friction Hydro-Pillar Processing, low alloy steel, bend test

## 1. INTRODUÇÃO

A união de peças metálicas tem sido motivo de estudos ao longo de décadas. A busca pelo melhoramento dessa união gerou o desenvolvimento de diversos processos, dentre eles a soldagem por fricção com pino consumível (Friction Hydro-Pillar Processing). Esta técnica foi desenvolvida na década de 1990 pelo The Welding Institute, na Inglaterra e é executada de tal maneira que o processo ocorre no estado sólido [1].

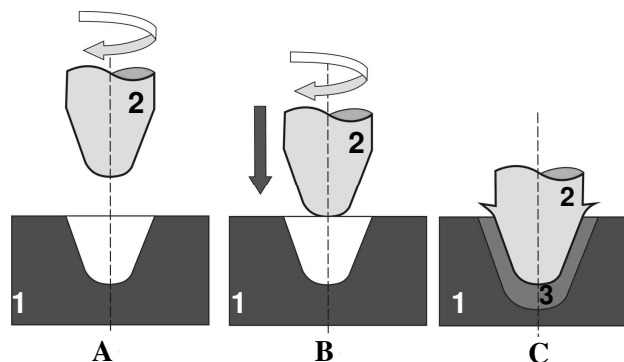
Diferente da maioria dos processos convencionais de soldagem, que promove a fusão dos materiais envolvidos, a soldagem por fricção une as partes sem que a fusão ocorra, minimizando defeitos tais como fragilização por hidrogênio e problemas ligados à solidificação [2].

O processo é realizado através do atrito entre um pino e um furo (cilíndrico ou cônico) em uma base. O pino é rotacionado e em seguida é aplicada uma força axial empurrando o pino contra o material da base. A base por sua vez possui um furo previamente usinado com dimensões cilíndricas ou cônicas. Primeiramente o material do pino é plastificado na interface de rotação entre o pino e o furo, onde é mantido em uma condição sólido-viscosa suficiente para permitir ligações metalúrgicas pelas forças hidrostáticas envolvidas [3]. O pino vai sendo consumido e plastificado no furo, enquanto que a região de soldagem avança para fora do mesmo. Após o processamento a cavidade fica totalmente preenchida com material do pino plastificado. A Figura 1 ilustra de forma esquemática o processo de deposição do material.

O atrito decorrente do movimento relativo entre a superfície do pino (consumível) contra o metal base é a fonte geradora de calor. A elevação da temperatura promove a redução do limite de escoamento do material, permitindo a existência e manutenção de um fluxo plástico, o qual se desenvolve axialmente em relação ao consumível, e se une por difusão ao substrato, promovendo uma união metalúrgica na interface.

As juntas soldadas a partir deste processo não apresentam os problemas relacionados à solidificação, o que amplia muito o campo de aplicação do mesmo. O principal interesse neste processo é a sua aplicação como reparo de estruturas de aço, especialmente na indústria petrolífera. Apesar da gama de aplicações a metalurgia do

processo ainda é pouco conhecida.



**Figura 1.** Soldagem por fricção de pinos consumíveis identificando (1) chapa base e (2) pino consumível e (3) junção. A sequência de processamento: (A) Início com a aplicação de velocidade rotacional no pino. (B) Força axial no pino girando e aproximação dele à chapa base e (C) formação da união permanente com a geração da zona afetada termicamente e a deformação [4].

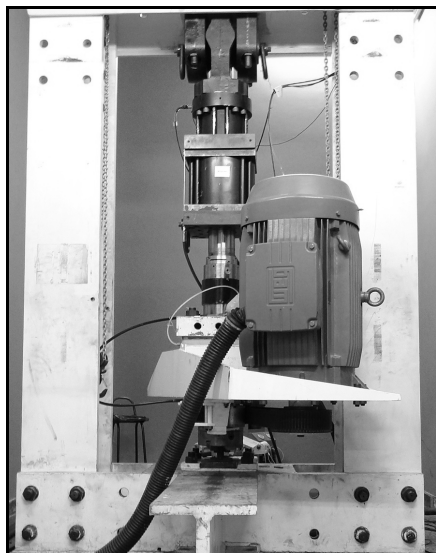
Publicações recentes [3-6] vêm demonstrando que esse tipo de solda sofre forte influência em sua qualidade quando parâmetros de carga axial são alterados, modificando a microestrutura, a zona afetada pelo calor e consequentemente a qualidade da união entre as peças.

O objetivo deste trabalho é obter um maior conhecimento acerca do efeito da aplicação de diferentes cargas axiais nas propriedades da solda através de análises visuais, perfis de microdureza e ensaios de dobramento.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em um equipamento (Figura 2) denominado MPF 1000 (Máquina de Processos por Fricção) desenvolvida no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para a potência do sistema de deslocamento é utilizada uma unidade hidráulica conectada a um sistema de válvulas solenóides (Manifold) que permite por segurança interromper instantaneamente o fluxo de óleo hidráulico e cessar a força aplicada na solda pelo atuador. Para o sistema de potência de rotação foi utilizado um motor elétrico com potência de 132 kW. As soldas podem ser realizadas aplicando uma velocidade rotacional máxima de até 1500 rpm. O atuador tem capacidade para tração e compressão para até 1000 kN e velocidade máxima de deslocamento de 15 mm/s. O software de controle

permite a programação e o monitoramento em tempo real dos parâmetros de soldagem.



**Figura 2.** Imagem da máquina de soldagem.

No processo de soldagem foram utilizados aços de construção mecânica de ampla aplicabilidade: aço SAE 1020 para a base e SAE 8620 para o pino consumível. Suas composições químicas são descritas na Tabela 1. Os pinos foram confeccionados a partir de barras cilíndricas de aço com diâmetro de 38,1 mm (1,5 in). Para a base foram utilizadas chapas de aço com espessura também de 38,1 mm. Os parâmetros geométricos do pino e da base foram iguais em todos os ensaios (Figura 3).

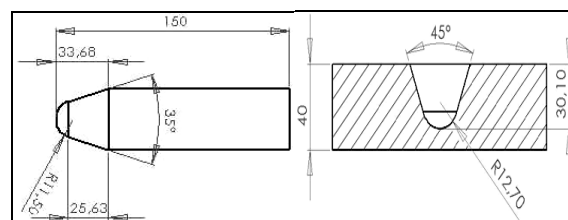
As soldas foram realizadas aplicando uma velocidade rotacional de 1500 rpm, comprimento de queima (burn-off) de 21 mm e diferentes cargas axiais. Foi aplicado recalque em todos os níveis de cargas ensaiadas, ou seja, após o término da rotação do pino aplicou-se uma carga de forjamento e esta foi mantida durante 5 s. Para as soldas em que não se utilizou o recalque, a mesma carga de soldagem foi mantida também por 5 s. A Tabela 2 mostra os dados sobre as condições de carga axial aplicada e o recalque.

Após a soldagem dos corpos de prova, amostras para realização de imagens macroscópicas e realização de perfil de microdureza foram obtidas através de cortes paralelos ao eixo de aplicação da carga axial. Em seguida as amostras foram submetidas à lixamento com granulometria de 150, 320, 400, 600 mesh. Depois desta etapa as amostras

foram submetidas a ataque químico com nital 3%, obtendo desta maneira uma seção completa que representa a visualização do material do pino, da base e zona afetada pelo calor e atrito durante a soldagem.

**Tabela 1.** Composição química dos materiais (% em peso).

| Elemento | SAE1020 | SAE 8620 |
|----------|---------|----------|
| C        | 0,15    | 0,22     |
| Si       | 0,22    | 0,27     |
| Mn       | 1,42    | 0,86     |
| P        | 0,019   | 0,013    |
| S        | 0,01    | 0,01     |
| Cr       | 0,01    | 0,51     |
| Ni       | 0,01    | 0,42     |
| Mo       | <0,005  | 0,19     |
| Cu       | <0,01   | 0,109    |



**Figura 3.** Geometria do pino e da chapa de base.

**Tabela 2.** Parâmetros utilizados nos ensaios.

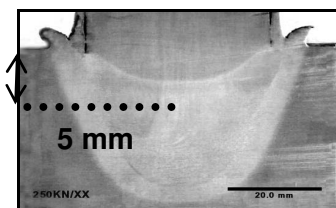
| Força Axial (kN) | Força de Recalque (kN) |
|------------------|------------------------|
| 50               | N/A                    |
| 100              | N/A                    |
| 250              | N/A                    |
| 450              | N/A                    |
| 50               | 100                    |
| 100              | 200                    |
| 250              | 450                    |
| 450              | 900                    |

N/A : Não aplicado

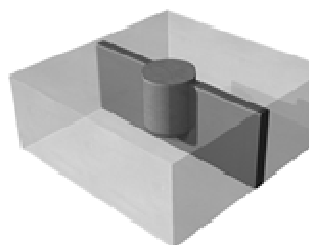
Os perfis de microdureza foram realizados com indentador Vickers, com carga de 200 gf e distância de 0,3 mm entre as indentações. Foi efetuado um perfil horizontal a 5 mm da face superior (Figura 4).

Para os testes de dobramento convencional foi utilizado dispositivo acoplado a um atuador hidráulico, utilizando uma taxa de deslocamento de

10 mm/min, resultando em um tempo médio de teste de 1,5 min. Os corpos de prova do tipo transversal lateral foram cortados na parte central da solda, no sentido paralelo ao de aplicação da carga (Figura 5). Esses corpos de prova foram devidamente preparados e retificados para se adequarem à geometria de acordo com a norma ASTM E 190-92 [7], sendo um mínimo de três para cada condição avaliada. Após cada ensaio media-se o ângulo de dobramento, onde os maiores os valores estão relacionadas à maior tenacidade.



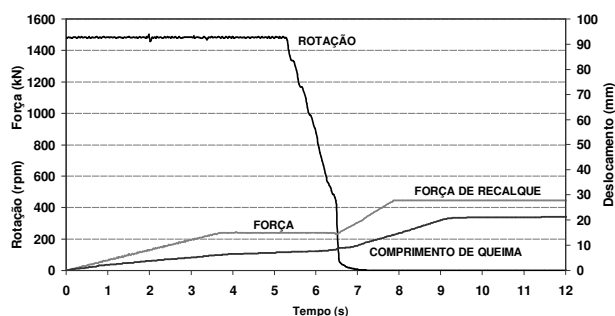
**Figura 4.** Perfil de microdureza.



**Figura 5.** Localização da extração dos corpos de prova para dobramento.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

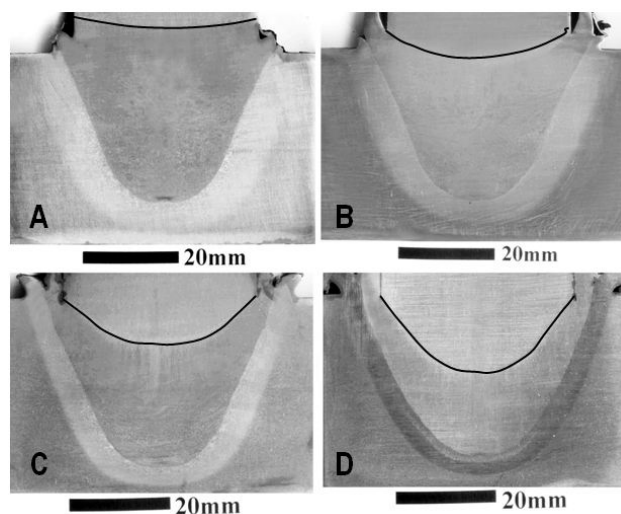
Em cada ensaio os parâmetros de soldagem foram monitorados de maneira a permitir a visualização dos mesmos graficamente, além de garantir a repetitibilidade dos ensaios como ilustra a Figura 6.



**Figura 6.** Parâmetros monitorados em tempo real no ensaio de 250 kN com recalque de 450 kN.

Nos testes para produção de soldas com carga de 450 kN e posterior recalque de 900 kN verificou-se que a etapa de aplicação de recalque não se mostrou viável devido às grandes deformações impostas ao pino consumível. Dessa forma optou-se por tornar inconclusivo os dados resultantes da solda com essa modalidade de carga e de recalque.

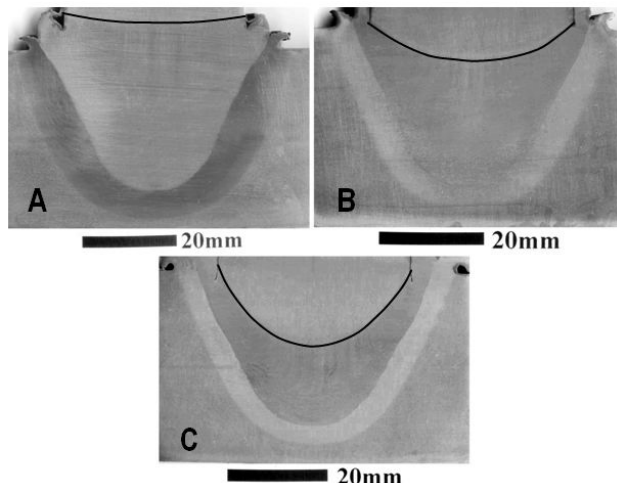
As análises macroscópicas realizadas na posição central da solda (Figuras 7 e 8) não evidenciaram defeitos ou falhas no preenchimento em nenhuma condição. Observou-se também que as diferentes cargas axiais aplicadas resultaram em diferentes regiões afetadas termicamente. Quando a solda foi executada com carga de 50 kN, a zona termicamente afetada (ZTA) apresentou-se com maior extensão, englobando todo o comprimento do pino. Mas ao aumentarmos a carga verificou-se que a ela diminui sua abrangência. Nas soldas com cargas menores, o tempo de soldagem é superior que as soldas realizadas com altas cargas, isto resulta em um maior aporte térmico aplicado aos materiais, promovendo uma maior extensão da ZTA [6].



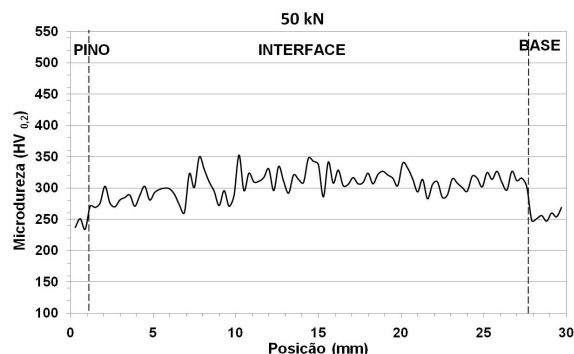
**Figura 7.** Imagens macroscópicas das amostras obtidas com o processo de soldagem sem utilização da carga de recalque. Em (A) 50 kN, (B) 100 kN, (C) 250 kN e (D) 450 kN. A linha corresponde ao início ZTA.

Os perfis de microdureza mostraram uma elevação nos valores de dureza entre a região do pino e o material da base, como pode ser observado nas figuras 9 à 12. O acréscimo da carga axial aplicada resultou em uma elevação dos níveis de dureza observados. O perfil da carga de 450 kN foi o que apresentou os maiores valores, onde o pico de

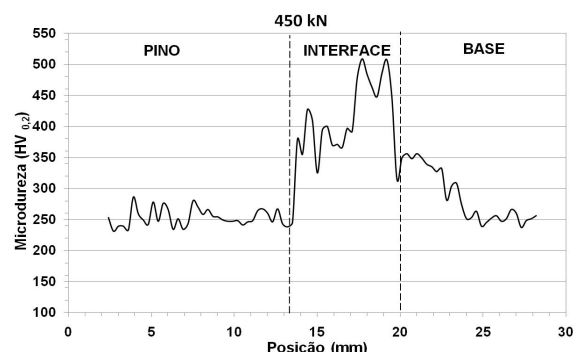
microdureza atingiu 500 HV.



**Figura 8.** Imagens macroscópicas das amostras obtidas com o processo de soldagem com utilização da carga de recalque. Em (A) 50 kN/100 kN, (B) 100 kN/200 kN e (C) 250 kN /450 kN. A linha corresponde ao início ZTA.



**Figura 9.** Perfil horizontal das soldas com carga de 50 kN sem recalque.

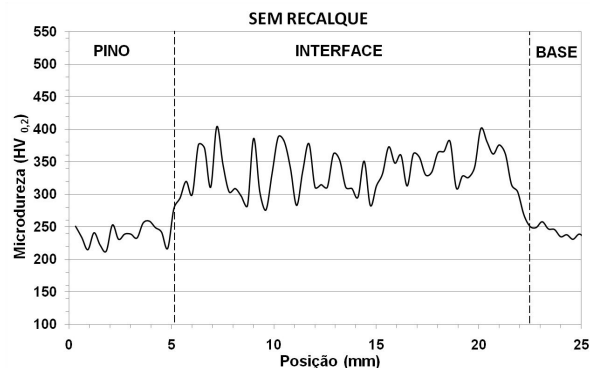


**Figura 10.** Perfil horizontal das soldas com carga de 450 kN sem recalque.

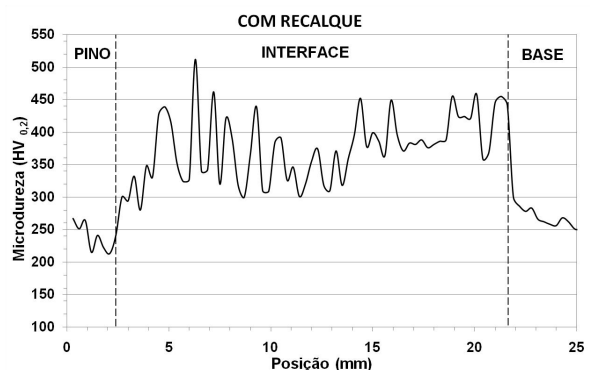
A etapa de recalque de 200 kN aplicado nos ensaios de carga de 100 kN foi a condição que apresentou a maior elevação nos valores de dureza.

As elevações nos valores de microdureza estão

relacionadas às alterações microestruturais resultantes do trabalho termomecânico aos quais os materiais do pino e da base foram submetidos durante o processo de soldagem [8]. Os altos valores observados somente quando aplicou-se uma carga de 450 kN indicam que o ciclo térmico desta condição de soldagem possibilitou a formação de microestrutura do tipo martensita, caracterizada por sua dureza elevada. O mesmo não ocorreu nos menores níveis de cargas axiais pois o acréscimo no aporte térmico reduziu a possibilidade de ocorrer transformações martensíticas.



**Figura 11.** Perfil horizontal das soldas com carga de 100 kN sem recalque de 200 kN.

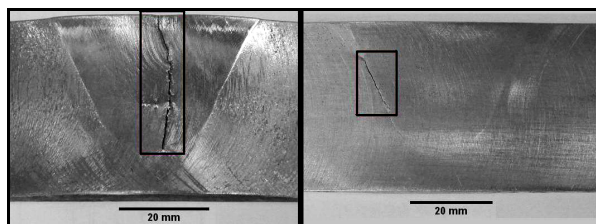


**Figura 12.** Perfil horizontal das soldas com carga de 100 kN com recalque.

Os testes de dobramento resultaram em dois posicionamentos distintos de ruptura (Figura 13). Os corpos de prova que tiveram a nucleação e propagação da trinca na parte central da solda apresentaram uma maior tenacidade visualizada pelo ângulo de dobramento. A segunda localidade de trinca ocorreu na interface superior entre as regiões mecanicamente transformadas do material do pino e o material da base. Esta diferença de localização das fraturas observada ocorreu em provavelmente em função do tamanho da ZTA, onde a área efetiva de

material de base do pino não afetada pelo processo de soldagem apresentou-se maior.

De todas as condições soldadas a carga de 250 kN com recalque foi a que apresentou maior ângulo de dobramento. Das amostras que romperam na interface, a maioria foi soldada sem o recalque, o que mostra o efeito do mesmo nas propriedades das juntas soldadas.



**Figura 13.** Imagens macroscópicas dos modelos de trinca que apareceram nos testes de dobramento.

## 4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados concluiu-se que:

Com a variação de carregamento testada e parâmetros utilizados não foi observado nenhum tipo de defeito relativo à falta de preenchimento de material com a geometria de pino e da base selecionada.

A elevação dos valores da carga axial aplicados na soldagem promoveu a diminuição no tamanho da ZTA e o aumento de dureza.

Os ensaios de dobramento com carga axial de 250 kN e com recalque de 450 kN mostraram os melhores resultados.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro proporcionado pelo CNPq e FINEP.

## 6. REFERENCIAS

- [1]. Wayne M. T., Peter T. S. "Friction Plug Extrusion". *Patent Application GB 2306365A*
- [2]. Andrews R.E., Mitchell J.S. *Met. Mater.* 1990; **6** (12): 796-797.
- [3]. Meyer A. *Friction Hydro-Pillar Processing*, Tese de Doutorado. Hamburgo (Alemanha): Technischen Universität Braunschweig, 2002.
- [4]. Unfried J, Hermenegildo T.F., Piza Paes M.T., Pope A., Ramirez A.J. *Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo*, 2009; **6** (2), p. 73-79

- [5]. Pires R. R. *Efeito da geometria da força axial e da rotação no reparo por atrito*, Dissertação de Mestrado. Uberlândia (Brasil): Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [6]. Meyer A. "Friction Hydro Pillar Processing. Bonding Mechanism and Properties" *Relatório GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH*. Geesthacht. 2003.
- [7]. Norma ASTM E190 – 92, *Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*, Vol. 03.01, (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2008.
- [8]. Jardim, M. P., Gonçalves, R. A., Piza Paes, M. T., Rezende Pires, R., Franco V.L.D.S., Franco, S. D. *Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo*, 2007; **4** (2): 27-32