

EFEITO DA GEOMETRIA DO PINO E DO FURO NA QUALIDADE DE REPARO POR ATRITO – RESULTADOS PRELIMINARES¹

Maíra Prata Jardim²
Rafael Ariza Gonçalves³
Marcelo Torres Piza Paes⁴
Ricardo Repopold Marinho⁴
Vera Lúcia D.S. Franco⁵
Sinésio Domingues Franco⁵

Resumo

Na indústria petrolífera, o processo convencional de soldagem a arco é utilizado freqüentemente para reparar defeitos da estrutura, tais como trincas. Estes reparos são realizados sob a água para reduzir riscos de explosão. Sob a água as soldas estão sujeitas à fragilização devido ao hidrogênio e à alta porosidade. Uma alternativa é oferecida pelo processo de reparo por atrito, onde um furo é preenchido com um pino consumível do mesmo material. O pino (cilíndrico ou cônico) é pressionado em alta rotação contra o furo, que através do aquecimento devido ao atrito, gera o fluxo do material ao longo dos planos de cisalhamento. Durante o processo, os planos movem-se para cima, depositando o metal no furo. Uma seleção apropriada da rotação e da força axial promove a adequada ligação metalúrgica entre as paredes do pino e do furo. Apesar da sua larga aplicação, esta técnica não foi investigada extensamente. Motivados pelos potenciais deste método, foi analisada a influencia de diferentes geometrias de pinos e furos, da velocidade de rotação e da força axial, procurando uma melhor ligação metalúrgica. A avaliação foi feita através da análise metalográfica e perfis de microdureza da junção pino/furo.

Palavras-chave: UPPA; Reparo por atrito; Geometrias do pino e furo.

Abstract

In the offshore industry, the utilization of conventional process of arcwelding processes is frequently used to repair structure defects, such as cracks. These repairs are carried out under water to reduce risks of explosion. Under water welds are subjected to hydrogen embrittlement and severe porosity. An alternative is offered by the friction hydro pillar processing (FHPP), which may be regarded as a process in which a hole is drilled and filled with a consumable rod of the same material. The rod (cylindrical or conical) is rotated and pressed against the hole, leading to frictional heating and as a consequence the material flows along the shear planes. As the process continues, the shear planes move upwards leaving the metal deposited in the hole. By an appropriate selection of rotation and axial force, a metallurgical bond is obtained between the filling metal and the surface of the hole. Despite its wide applicability, this technique has not been widely investigated. Motivated by the potentialities of this method, the influence of different geometries between the rod and the hole was analyzed, seeking a best metallurgical bond. Metallographic examinations in longitudinal sections cut through the axis of the rod were performed, as also microhardness tests across the welding region at the bottom of the hole

Key words: FHPP; Friction repair; Stud and hole geometries.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Graduada, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

³ Professor, M.Sc., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

⁴ Engenheiro da Petrobras, CENPES – RJ, Rio de Janeiro

⁵ Professora, Dr.-Ing., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

1 INTRODUÇÃO

As paredes de tanques e tubulações em geral, estão sujeitas à formação de trincas que podem levar à ruptura e acidentes. Um reparo deve a princípio recuperar a parte danificada mantendo-se a qualidade original.

O reparo mais usual é feito por solda a arco elétrico que envolve temperaturas muito altas, chegando até o ponto de fusão do material, o que gera uma região afetada pelo calor (ZAC) muito extensa e frágil.

Reparos por solda em áreas classificadas comumente encontradas na indústria petrolífera pode causar explosões. Surge então a necessidade de um processo mais seguro. Um exemplo disto seria o processo de reparo por atrito, denominado por *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP), ou Processamento de Pinos por Atrito, citado por Andrews,⁽¹⁾ Thomas and Nicholas,⁽²⁾ Thomas and Tempel-Smith⁽³⁾ e Meyer.⁽⁴⁾

Neste trabalho é abordada a técnica de reparo por atrito, que consiste em girar um pino a alta velocidade e alta pressão contra um furo. O atrito gerado pelo contato entre o pino e a superfície do furo faz com que eleve a temperatura, o que provoca a solda do pino no substrato, por difusão. O aumento da temperatura das superfícies de contato também reduz o limite de escoamento do material, favorecendo o fluxo plástico, facilitando o preenchimento do furo.⁽⁴⁾

O reparo por atrito gera menos calor e por conseqüência uma ZAC menos extensa. Em reparos de trincas, por exemplo, faz-se um furo no local da trinca, eliminando-a, e preenche-se o furo com um pino.

As altas temperaturas envolvidas podem provocar alterações microestruturais que comprometem a qualidade do reparo. O controle da microestrutura torna-se, portanto de fundamental importância para o controle da qualidade do reparo.

Outro aspecto muito importante é que o reparo preencha por completo o furo feito no metal de base. Vazios devido ao não preenchimento causam redução da resistência e funcionam também como concentradores de tensão.

Neste trabalho são estudadas as influências dos parâmetros: geometria de furos e pinos, velocidade de rotação e força aplicada ao pino. Para efeito de controle foram utilizadas a metalografia e perfis de microdureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho, os ensaios de reparo por atrito foram realizados num equipamento designado por Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA) desenvolvido por Formoso, C.M. e co-autores,⁽⁵⁾ no Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, mostrado na Figura 1. O equipamento permite aplicação de carga de até 5.000 Kgf, velocidade de rotação até 8000 rpm, torque máximo de 57 N.m e deslocamento vertical de até 45 mm com monitoramento em tempo real destes parâmetros.



Figura 1. Unidade de Processamento de Pino por Atrito – UPPA.

Os materiais utilizados foram placas de aço ASTM A36 designadas por substrato e pinos de aço ABNT 1010. As composições químicas são mostradas na Tabela 1. Os parâmetros de ensaio foram, geometria dos pinos e furos, velocidade de rotação do pino, força aplicada contra o substrato e comprimento de queima. O comprimento de queima consiste em impor um deslocamento vertical do pino contra o substrato a partir do momento que é detectado o contato da ponta do pino contra o fundo do orifício. A força de forjamento consiste na aplicação de uma força depois de cessada a rotação do pino para que haja uma deformação plástica e conseqüente preenchimento de possíveis poros e vazios.

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

	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P
Substrato	0,13	0,94	0,02	0,01	0,01	0,19	0,008	0,014
Pino	0,12	0,69	0,03	0,01	0,0	0,16	0,027	0,044

As geometrias dos pinos e dos furos são mostradas na Figura 2. Para todas as geometrias o raio R1 foi mantido com o valor de 1mm. Os parâmetros de ensaio são mostrados na Tabela 2.

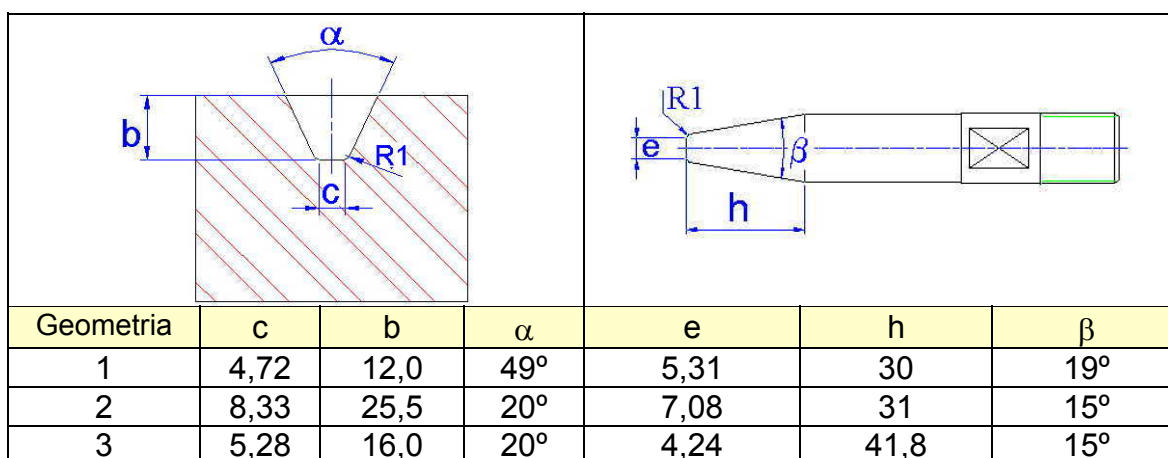


Figura 2. Representação geral das geometrias dos pinos e furos utilizados.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nos ensaios de reparo por atrito.

Ensaio	Geometria	Força [Kgf]	Rotação [rpm]	Comprimento de queima	Forjamento
1	1	2000	6000	8 mm	2000 Kgf / 5 s
2	1	2000	6000	10 mm	2000 Kgf / 5 s
3	1	2500	6000	10 mm	2500 Kgf / 5 s
4	1	3000	6000	10 mm	3000 Kgf / 5 s
5	2	1500	5000	8 mm	1500 Kgf / 5 s
6	2	2000	5000	8 mm	2000 Kgf / 5 s
7	2	2500	5000	8 mm	2500 Kgf / 5 s
8	2	3000	5000	8 mm	3000 Kgf / 5 s
9	2	3500	6000	8 mm	3500 Kgf / 5 s
10	2	3500	7000	8 mm	3500 Kgf / 5 s
11	3	1500	5000	6 mm	1500 Kgf / 5 s
12	3	1500	5000	6 mm	1500 Kgf / 5 s
13	3	2000	5000	6 mm	2000 Kgf / 5 s
14	3	2500	5000	6 mm	2500 Kgf / 5 s
15	3	2500	5000	6 mm	2500 Kgf / 5 s
16	3	3000	5000	6 mm	3000 Kgf / 5 s

Após os ensaios, foram realizados cortes longitudinais passando pelos eixos dos pinos, com intensa refrigeração para não provocar nenhuma mudança microestrutural, utilizando-se um discoton. Retificas das superfícies geradas pelos cortes e das bases, garantiram o paralelismo entre ambas.

Cada par pino/substrato foi preparado para análise macrográfica com lixamento com lixas d'água de granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1000 e ataque com Nital 2%. Após a análise macrográfica, as amostras foram novamente lixadas até a lixa 1000, polidas com pasta de diamante de granulometria $3\mu\text{m}$ e atacadas com Nital a 2% para análise micrográfica.

Foram também realizados ensaios de microdureza Vickers com carga de 50gf, conforme o mapeamento mostrado na Figura 3. Traçou-se três perfis de microdureza, sendo um vertical, a partir de três milímetros abaixo da interface inferior e dois perfis horizontais, o primeiro obtido a cinco milímetros da interface inferior e o segundo a dez milímetros.

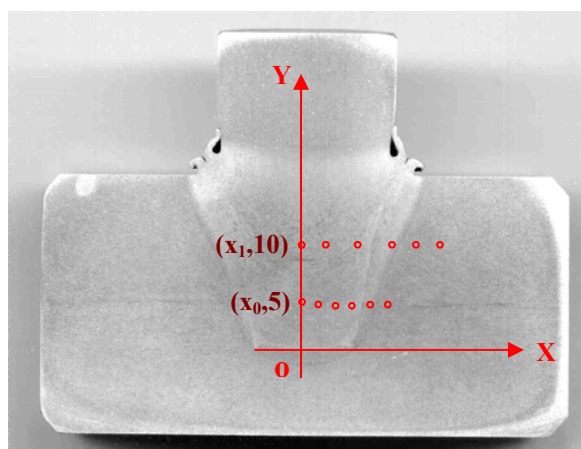


Figura 3. Esquema do mapeamento dos ensaios de microdureza.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 mostra como exemplo os parâmetros do Ensaio 2, obtidos em tempo real através dos sensores do equipamento.

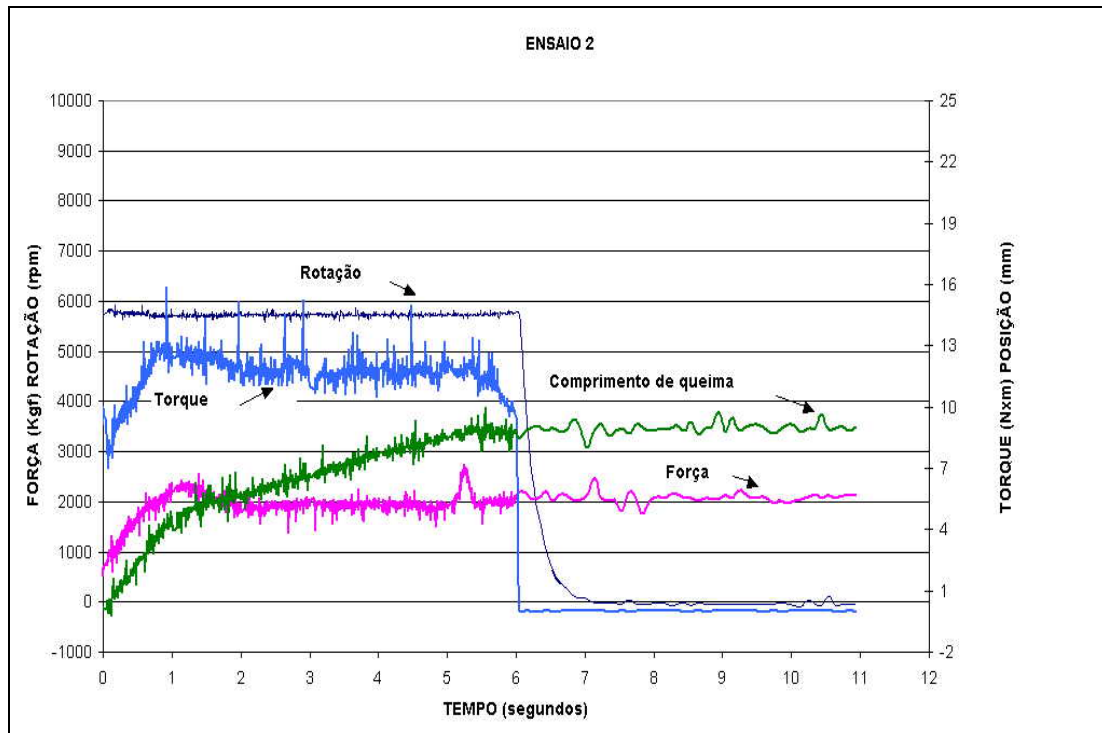


Figura 4. Parâmetros adquiridos em tempo real. Ensaio 2.

A análise da Figura 4 revela que os sensores do equipamento são sensíveis para captar as variações dos parâmetros não geométricos. Mostra também que se pode comparar os comportamentos dos diversos pares pino/substrato submetidos a diferentes condições e permite obter os valores reais da rotação, do torque, da força, do comprimento de queima, da força de forjamento, a evolução do comprimento de queima e o tempo de ensaio.

A velocidade de rotação, a profundidade de queima, a força aplicada ao pino contra a superfície do furo, a força de forjamento e o tempo de forjamento são parâmetros selecionados. O tempo de queima depende da velocidade de deslocamento do cabeçote do equipamento para atingir a profundidade de queima selecionada, ou seja, é dependente da temperatura gerada e da deformação plástica da ponta do pino.

As análises metalográficas dos cortes longitudinais revelaram falhas no preenchimento, ou seja, houve a influência da geometria dos pinos e orifícios e dos parâmetros de ensaio na qualidade dos reparos como pode ser visto na Figura 5.

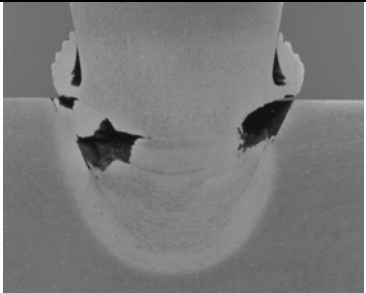
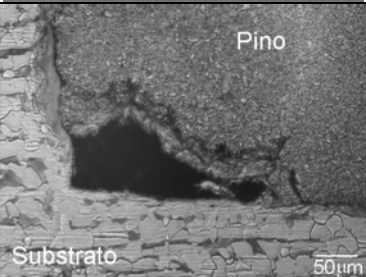
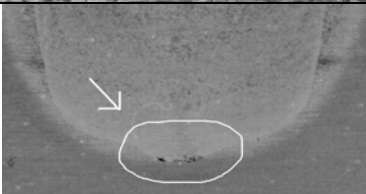
Tipo de defeito	Descrição	Exemplo
A	Falha de preenchimento, sendo visível sem necessidade de microscópio.	
B	Falta de preenchimento no raio de arredondamento inferior.	
C	Falta de preenchimento no centro da interface inferior.	

Figura 5. Tipos de defeitos encontrados.

A Tabela 3 sumariza os resultados das análises metalográficas e mostra também os tempos de queima e de forjamento obtidos dos gráficos do monitoramento dos ensaios.

Tabela 3. Tipos de defeitos e tempos de queima e forjamento

Ensaio	Tipo de Defeito	Tempo de queima(s)	Tempo de forjamento (s)
1	C	4,0	5,0
2	C	5,9	5,0
3	A	não coletado	5,0
4	A	não coletado	5,0
5	B	9,9	5,0
6	C	6,9	5,0
7	C	3,9	5,0
8	B	4,0	5,0
9	B	2,9	5,0
10	B	3,9	5,0
11	B	8,0	5,0
12	B e C	4,9	5,0
13	B	3,9	5,0
14	B	3,0	5,0
15	B	2,9	5,0
16	B e C	1,9	5,0

A Tabela 3 mostra que o tipo de defeito A apareceu somente nos corpos-de-prova de geometria 1. Este tipo de defeito se deve muito provavelmente à grande diferença entre os ângulos dos cones do pino e do furo, permitindo um grande escoamento de material para fora do furo e, conseqüentemente, falta de preenchimento. Os tipos de defeito B e C, por outro lado apareceram nas geometrias 2 e 3. O defeito tipo B é causado em decorrência do pequeno raio de concordância R_1 e o defeito tipo C devido à velocidade relativa entre os centros do pino e do substrato ser zero. Os defeitos do tipo B e C, embora relativamente pequenos também devem ser evitados por funcionarem como concentradores de tensão e nucleadores de trincas.

A Figura 6 mostra a macrografia e a micrografia da interface pino/substrato obtidas do ensaio 14. Na figura vê-se claramente que ocorreu um fluxo plástico na interface, que contribui sobremaneira para perfeito preenchimento do furo.

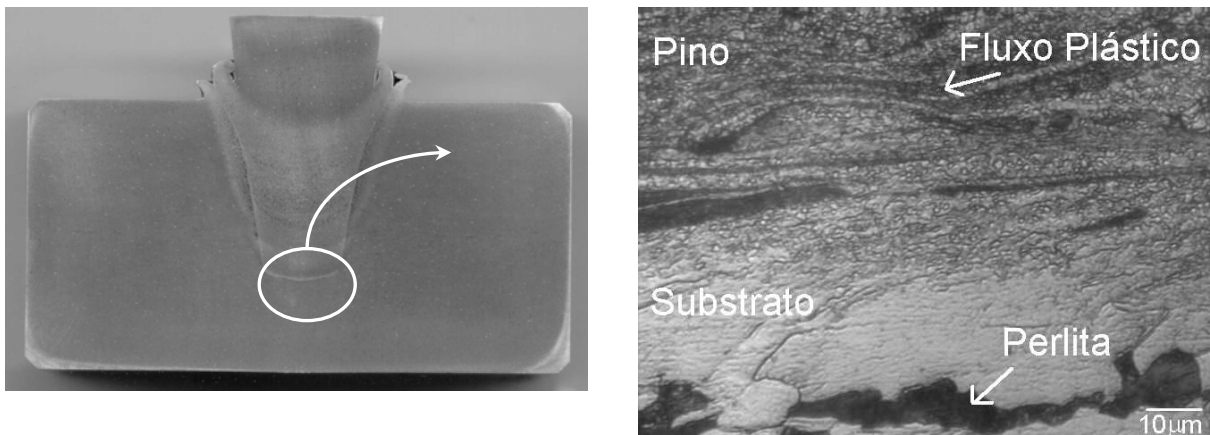


Figura 6. Evidência do Fluxo Plástico na interface e macrografia do ensaio 14

As Figuras 7, 8 e 9 mostram os perfis de microdureza Vickers ($HV_{0,05}$) obtidos no par pino/substrato submetido ao Ensaio 16. Tanto o perfil vertical quanto os perfis horizontais revelam uma transição gradual da dureza do pino para o metal de base, evidenciando uma transição suave das propriedades. A elevação da dureza na interface é uma evidência de deformação plástica ocorrida durante o ensaio.

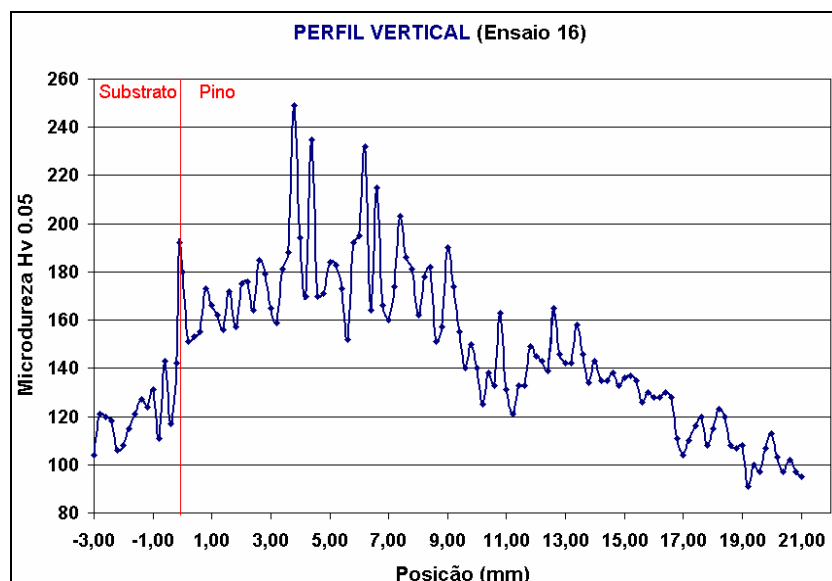


Figura 7. Perfil de microdureza vertical. Ensaio 16.

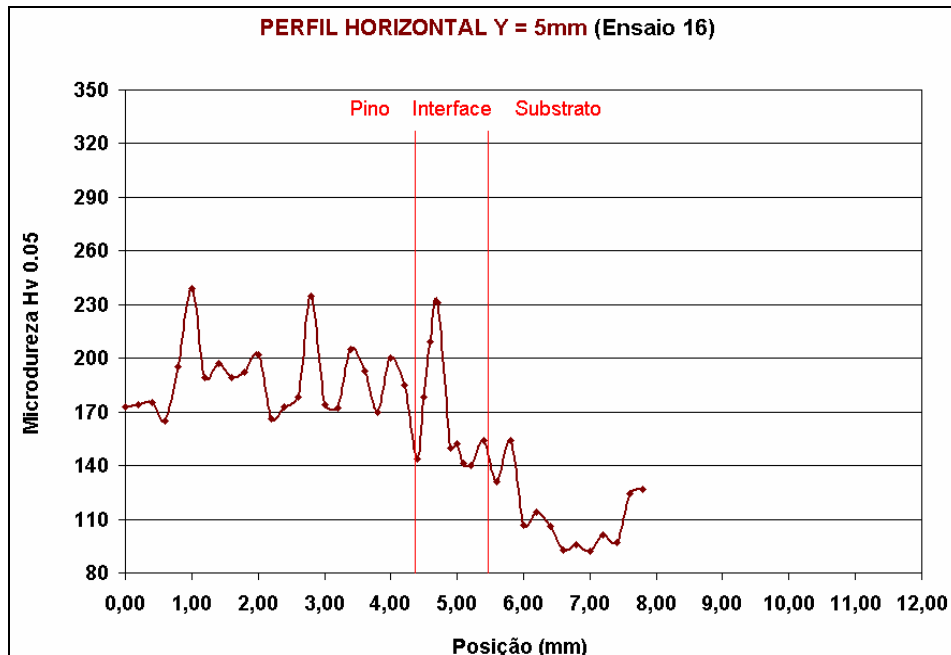


Figura 8. Perfil de microdureza horizontal a 5 mm. Ensaio 16

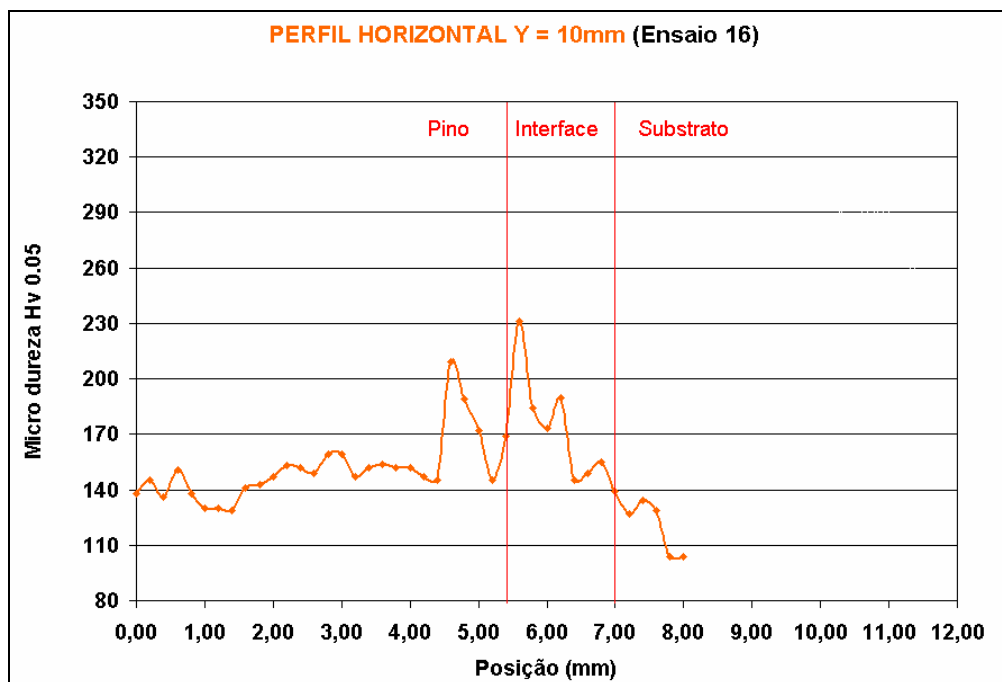


Figura 9. Perfil de microdureza horizontal a 10mm. Ensaio 16

Os altos valores de dureza atingidos no pino, mostrados na Figura 7, podem ser devido ao forjamento aplicado após cessada a queima, e a velocidade de rotação cair a zero. As Figuras 8 e 9 revelam durezas mais elevadas a 5 mm, demonstrando uma maior deformação plástica na interface pino/substrato. A Figura 10 mostra a micrografia do substrato e do pino próximo à interface. . A textura acicular produzida no pino é uma evidência das altas temperaturas geradas e justifica a grande flutuação da sua dureza.

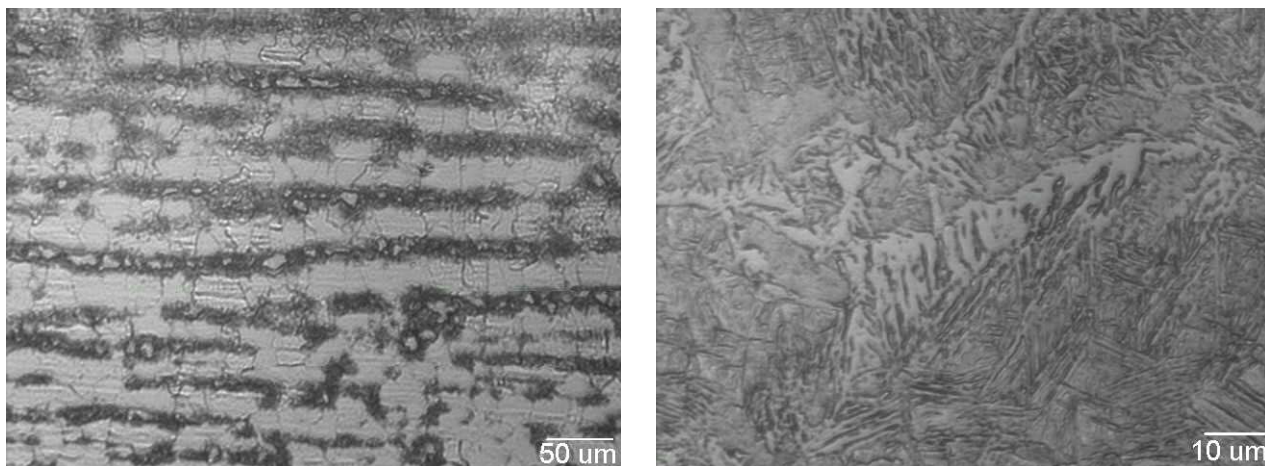


Figura 10. Micrografia do substrato e do pino respectivamente.

4 CONCLUSÕES

- A geometria do pino e furo influencia na qualidade dos reparos por atrito. As geometrias são, portanto, parâmetros que devem ser otimizados.
- Ângulos de abertura com altos valores e com grande diferença entre o pino e o substrato, facilitam o escoamento plástico do material para fora. Desta forma resulta em um preenchimento não completo. Menores valores de ângulos possibilitam uma maior retenção do material deformado dentro da cavidade, porém, causam menor atrito lateral e conseqüentemente menor temperatura e menos difusão.
- Os perfis de microdureza e a análise metalográfica se mostraram instrumentos úteis no controle da qualidade dos reparos por atrito.

Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS pelo financiamento que permitiu o desenvolvimento do projeto, aos colegas da equipe UPPA pela colaboração e companheirismo e ainda a Ângela Maria técnica do Laboratório de Tribologia e Materiais pela ajuda na preparação das amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 ANDREWS, R.E. Underwater repair by friction stich welding. *Metals and Materials*, p.796-797,1990.
- 2 THOMAS, W., Nicholas S.D., et al., Friction Forming, patent no. EP 0.602.072 B1, 1992.
- 3 THOMAS, W. and TEMPEL-SMITH, P. Friction plug extrusion, GB 2.306.365, 1997.
- 4 MEYER, A. Friction Hydro Pillar Processing. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, Germany, 2002.
- 5 FORMOSO, C. M., JARDIM, M. P., FERREIRA, T. C.,FRANCO, V. L. D. S. e FRANCO, S. D., Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Controle para uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito, Anais do 15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFU, 2005.