

EFEITO DA GEOMETRIA DO PINO E DO FURO NO REPARO POR ATRITO – RESULTADOS PRELIMINARES

Maíra Prata Jardim ¹
 Rafael Ariza Gonçalves ²
 Marcelo Torres Piza Paes ³
 Raphael Rezende Pires ³
 Vera Lúcia D.S. Franco ⁴
 Sinésio Domingues Franco ⁵

Resumo

Na indústria petrolífera, o processo convencional de soldagem a arco elétrico é utilizado freqüentemente no reparo de trincas em estruturas. Estes reparos são realizados de forma submersa para reduzir riscos de explosão. Nessas condições, as soldas a arco elétrico estão sujeitas a 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, esses planos se movem 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. Face às potenciais aplicabilidades deste método, apresentam-se resultados preliminares da influência de diferentes geometrias de pinos e furos, da velocidade de rotação e da força axial, buscando-se uma melhor ligação metalúrgica entre o material do pino e o do substrato. A avaliação foi feita por meio de análise metalográfica e perfis de microdureza da junção pino/furo. Os ensaios preliminares permitem identificar parâmetros que conduzem a reparos sem defeitos.

Palavras-chave: Reparo por atrito; Geometria; Pino.

EFFECT OF PIN AND HOLE GEOMETRY ON THE FRICTION HYDRO PILLAR PROCESSING – PRELIMINARY RESULTS

Abstract

In the offshore industry, arc welding processes are frequently used to repair structure defects. These repairs are carried out under water to reduce risks of explosion. Under water welds are prone 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 well as microhardness tests.

Key words: Friction hydro pillar processing; Geometry; Stud.

¹ Graduanda, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Campus Santa Mônica. Av. João Naves de Ávila, 2121. - 38400-902 – Uberlândia - MG.

² Professor, M.C., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Campus Santa Mônica. Av. João Naves de Ávila, 2121. - 38400-902 – Uberlândia - MG.

³ Engenheiro da Petrobras, CENPES – RJ, Rio de Janeiro

⁴ Profa., Dr.-Ing., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Campus Santa Mônica. Av. João Naves de Ávila, 2121. - 38400-902 – Uberlândia - MG.

⁵ Prof., Dr.-Ing., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Campus Santa Mônica. Av. João Naves de Ávila, 2121. - 38400-902 – Uberlândia - MG. sdf franco@ufu.br

I INTRODUÇÃO

Paredes de tanques e tubulações de plataformas de petróleo estão sujeitas à formação de trincas, que podem levar a rupturas e acidentes. O reparo desses defeitos é usualmente realizado com solda a arco elétrico e, por se tratar de áreas classificadas com probabilidade de atmosfera explosiva, esses reparos são realizados de forma submersa, reduzindo, dessa forma, riscos de explosão. Todavia, esses reparos trazem consigo alguns inconvenientes importantes, quais sejam: fragilização pelo hidrogênio e porosidade.

Como alternativa a esse processo, apresenta-se o reparo por atrito, conhecido na literatura inglesa como *friction hydro pillar processing* (FHPP), ou processamento de pinos por atrito.⁽¹⁻⁴⁾

O processo de reparo de trincas por atrito consiste em fazer a abertura de um furo cônico ou cilíndrico, perpendicular à superfície a ser reparada, e ao longo de todo o comprimento de uma trinca ou defeito. Após a execução do furo, ele é preenchido por meio de um pino também cônico ou cilíndrico. Nesse processo, o pino é submetido a elevadas cargas axiais, mediante elevada rotação, o que provoca, devido ao calor gerado pelo atrito, um aumento da temperatura do pino e da superfície do furo. Com o aumento de temperatura, há uma diminuição no valor do limite de escoamento do pino, facilitando-se, assim, o fluxo plástico do mesmo. Garante-se, dessa forma, que haja um íntimo contato entre as superfícies do furo e do pino, fazendo com que ocorra, não só o preenchimento do furo pelo material do pino, mas também uma ligação metalúrgica entre as superfícies do furo e do pino após o término do movimento relativo. Devido ao atrito e às deformações a que o material é submetido, a união acontece entre as paredes da cavidade e o consumível (pino de queima), em um intervalo de tempo de 5 segundos a 20 segundos, sendo esse valor função do material, da velocidade relativa, da pressão axial e da profundidade da cavidade.⁽⁴⁾

Apesar da grande potencialidade da técnica de reparo de trincas por atrito, poucos estudos foram realizados a respeito do processo, sendo que, até o ano de 2002, o número de publicações a respeito desse assunto limitava-se a menos de uma dezena.⁽⁴⁾ Assim, foi desenvolvida, projetada e construída uma infra-estrutura capaz de viabilizar ensaios dessa natureza na Faculdade de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Uberlândia.⁽⁵⁾

O presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados preliminares do estudo dos efeitos da influência de parâmetros de processamento, tais como: geometria de furos e pinos, velocidade de rotação e força aplicada ao pino. Para efeito de controle foram utilizados metalografia e perfis de microdureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de reparo por atrito foram realizados num equipamento denominado Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA) desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia e apresentado na Figura 1. O equipamento permite aplicação de carga axial de até 50 kN, velocidade de rotação de até 8.000

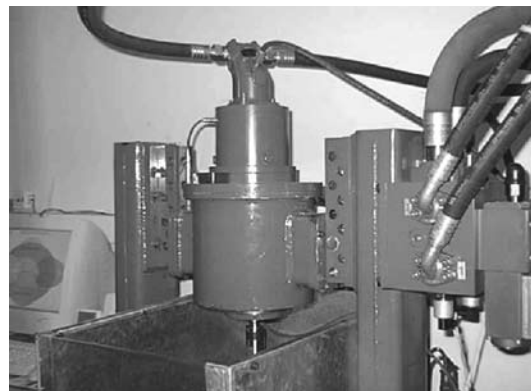


Figura 1. Unidade de processamento de pino por atrito – UPPA.

rpm, torque máximo de 57 N.m e deslocamento vertical de até 45 mm, com monitoramento em tempo real destes parâmetros.

Os materiais utilizados foram: chapas de aço ASTM A36, designadas por substrato, e pinos de aço ABNT 1010. As composições químicas desses materiais são apresentadas na Tabela 1.

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

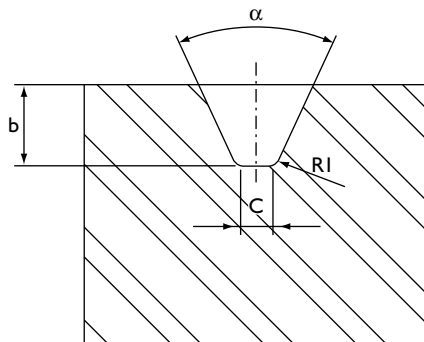
Os parâmetros de ensaio foram os seguintes: i) geometria dos pinos e furos; ii) velocidade de rotação do pino; iii) força aplicada sobre o pino; e iv) comprimento-de-queima, que representa o avanço ou deslocamento do pino em direção ao substrato, medido a partir do ponto de contato entre a ponta do pino e o fundo do furo de preenchimento. A força aplicada sobre o pino durante o processamento foi mantida constante por 5 segundos, após cessar a rotação do pino. Essa força é conhecida como força de forjamento. As geometrias dos pinos e dos furos são mostradas na Figura 2. Para todas as geometrias de teste, o raio R1 foi mantido com o valor de 1 mm. Os parâmetros de ensaio são mostrados na Tabela 2.

Após os ensaios, foram realizados cortes longitudinais passando pelos eixos dos pinos, mediante intensa refrigeração, de tal forma a não provocar nenhuma mudança microestrutural. Para garantir o paralelismo entre as superfícies geradas pelos cortes e as bases, essas superfícies foram retificadas.

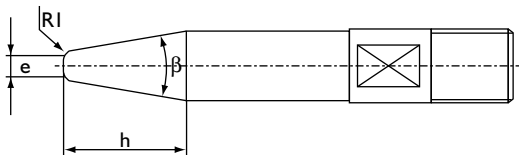
Os pares pino/substrato foram preparados para análise macrográfica, incluindo: lixamento com lixas d'água de granulometrias 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh e 1.000 mesh e

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

Ensaio	Geometria	Força (kN)	Rotação (rpm)	Comprimento de queima (mm)	Forjamento (kN), por 5 s
1	1	20	6000	8	20
2	1	20	6000	10	20
3	1	25	6000	10	25
4	1	30	6000	10	30
5	2	15	5000	8	15
6	2	20	5000	8	20
7	2	25	5000	8	25
8	2	30	5000	8	30
9	2	35	6000	8	35
10	2	35	7000	8	35
11	3	15	5000	6	15
12	3	15	5000	6	15
13	3	20	5000	6	20
14	3	25	5000	6	25
15	3	25	5000	6	25
16	3	30	5000	6	30



Geometria	c (mm)	b (mm)	α (°)
1	4,7	12,0	49
2	8,3	25,5	20
3	5,3	16,0	20



Geometria	e (mm)	H (mm)	β (°)
1	5,3	30,0	19
2	7,1	31,0	15
3	4,2	41,8	15

Figura 2. Geometrias dos pinos e furos utilizados nos ensaios de reparo por atrito.

ataque com nital 2%. Após a análise macrográfica, as amostras foram novamente lixadas até 1.000 mesh, depois polidas com pasta de diamante de granulometria 3 μm e atacadas com nital 2% para análise micrográfica.

As propriedades mecânicas da região de preenchimento foram avaliadas através ensaios de microdureza Vickers com carga de 50 gf, como indicado na Figura 3. Foram traçados assim três perfis de microdureza, sendo um vertical, a partir de três milímetros abaixo da interface inferior e dois perfis horizontais, sendo o primeiro obtido a cinco milímetros da interface inferior, e o segundo obtido a dez milímetros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 é representativa da evolução dos parâmetros de teste nos ensaios de reparo por atrito. Essa figura mostra que a rotação permaneceu praticamente constante durante toda a fase de preenchimento, mesmo nos momentos em que o torque era máximo. Da

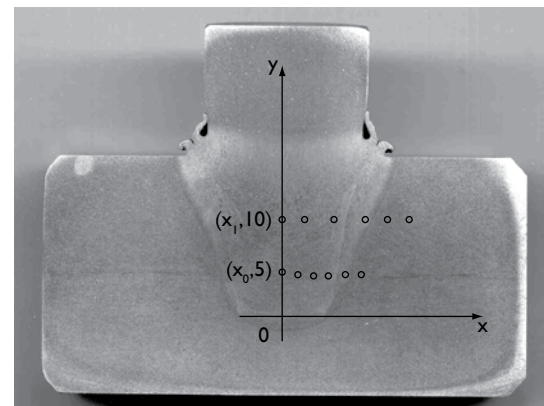


Figura 3. Localização dos perfis de microdureza.

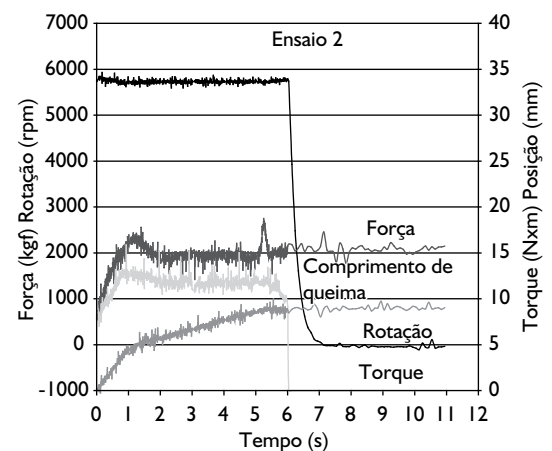


Figura 4. Parâmetros adquiridos em tempo real, ensaio 2.

mesma forma, pode-se afirmar que após ter-se atingido a força de teste, esse parâmetro permanece praticamente constante durante todo o ensaio. Comportamentos idênticos foram observados para os demais ensaios. Com relação ao comprimento-de-queima, nenhuma alteração significativa nesse valor foi observada durante a fase de forjamento.

A Figura 5 apresenta os resultados relativos às análises metalográficas dos cortes longitudinais, destacando-se os tipos de defeitos observados no preenchimento. Basicamente, três tipos de defeitos foram identificados na medida em que se variaram os parâmetros de reparo, quais sejam:

- falha de preenchimento com grandes vazios;
- falta de preenchimento no raio de concordância do furo; e
- falta de ligação metalúrgica no fundo (raiz).

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. Nessa tabela nota-se que o tipo de defeito A apareceu somente nos corpos-de-prova de geometria I. 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 sua vez, apareceram nas geometrias 2 e 3. O defeito tipo B se deve ao pequeno raio de

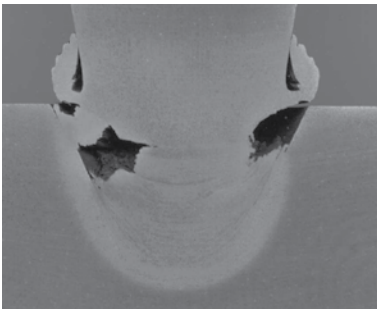
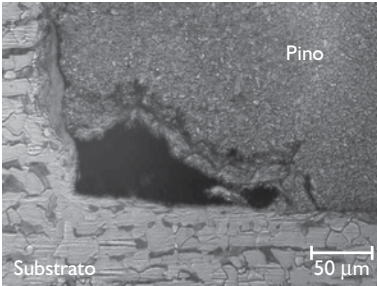
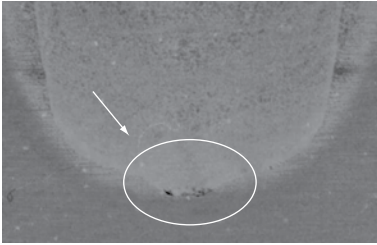
Tipo de defeito	Descrição	Exemplo
A	Falha de preenchimento, sendo visível sem necessidade de microscópio.	
B	Falta de preenchimento no raio de arredondamento inferior.	
C	Falta de preenchimento no centro da interface inferior.	

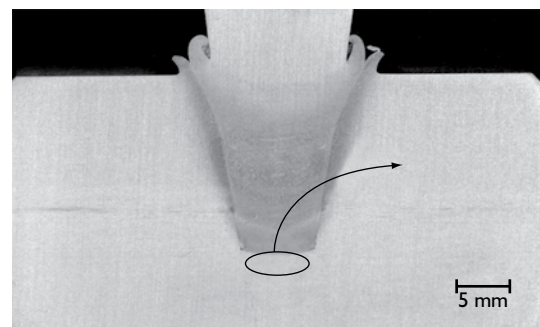
Figura 5. Tipos de defeitos encontrados nos ensaios de reparo por atrito.

concordância RI adotado, e o defeito tipo C devido à baixa velocidade relativa entre os centros do pino e do substrato. Os defeitos do tipo B e C, embora relativamente pequenos, também devem ser evitados por atuarem como concentradores de tensão e nucleadores de trincas.

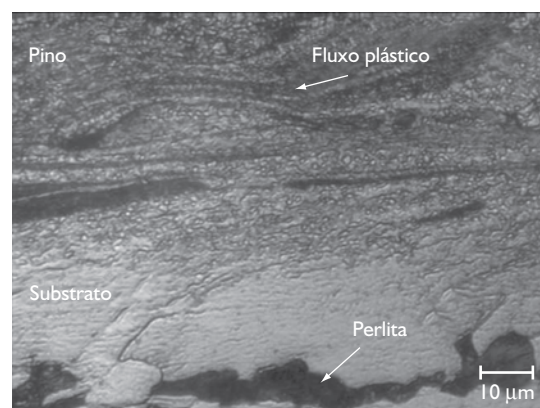
A Figura 6 apresenta a macrografia e a micrografia da interface pino/substrato obtidas

Tabela 3. Tipos de defeitos e tempos de queima (tempo de forjamento de 5s).

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



(a)



(b)

Figura 6. Seção longitudinal relativa ao ensaio de número 14, a) macrografia; e b) micrografia óptica, detalhe de (a) na interface inferior central.

do ensaio 14. Nessas figuras não são observadas falta de ligação metalúrgica na parte inferior do furo. Neste caso, a carga aplicada 25 KN no ensaio levou, aparentemente, à formação de uma ligação metalúrgica na interface inferior (Figura 6b). Apesar do intenso fluxo plástico nessa região, os cantos não foram preenchidos totalmente, requerendo, portanto, otimizações.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os perfis de microdureza ($HV_{0,05}$), obtidos no par pino/substrato, correspondente ao ensaio

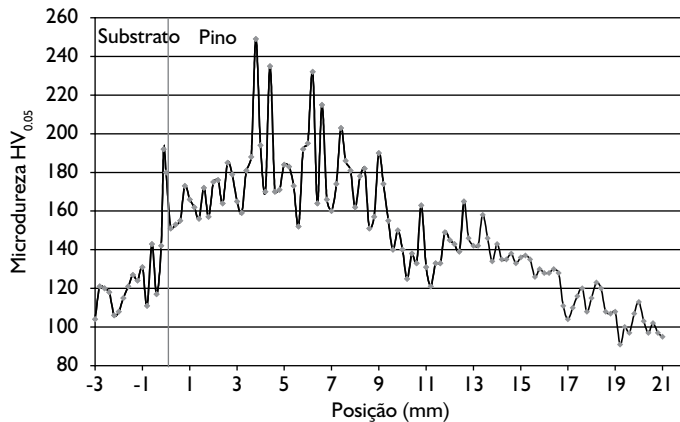


Figura 7. Perfil vertical de microdureza, ensaio 16.

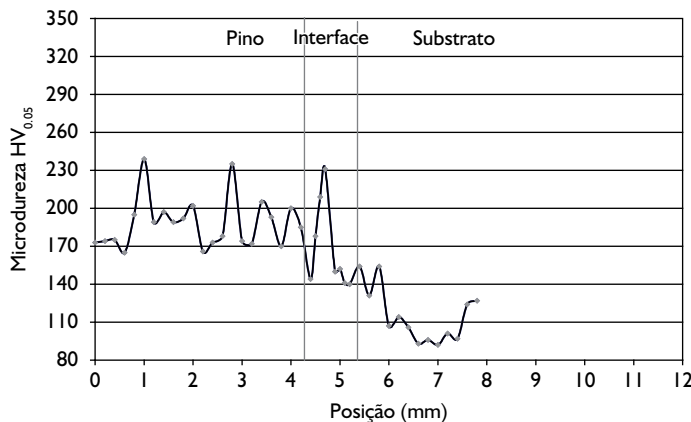


Figura 8. Perfil horizontal de microdureza a 5 mm, ensaio 16.

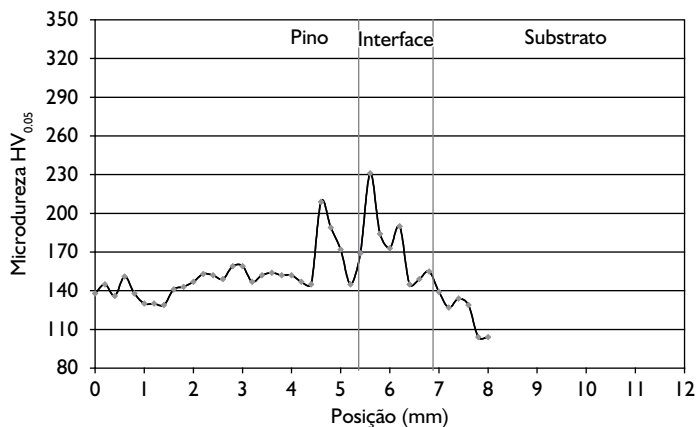
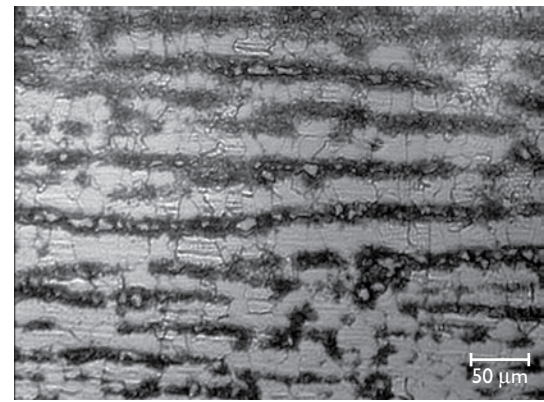


Figura 9. Perfil horizontal de microdureza a 10 mm, ensaio 16.

de número 16. Tanto o perfil vertical quanto os perfis horizontais apresentaram uma transição gradual da dureza do pino para o substrato. A elevação da dureza na região interfacial, bem como no material do pino, está associada às modificações microestruturais, decorrentes do trabalho termomecânico, resultando em uma estrutura refinada e acicular, como foi observado por Pires.⁽⁶⁾ A real constituição dessa microestrutura não foi avaliada, devendo ser objeto de estudo posterior.

A Figura 10 apresenta micrografias do substrato e do pino próximo à interface inferior central (fundo do furo). Desta figura pode-se notar a estrutura típica do substrato, composta por ferrita e perlita bandeada, resultante de um processo de laminação. A formação de uma textura acicular, bem como de uma ferrita de Widmanstätten, pode ser observada no material do pino, que foi termomecanicamente processado.



(a)



(b)

Figura 10. Microestrutura próxima à interface inferior central pino/bloco. a) Região do substrato, abaixo da interface inferior, a qual foi termicamente afetada; e b) material do pino processado.

4 CONCLUSÕES

As geometrias do pino e do furo influenciam de forma considerável na qualidade dos reparos por atrito, devendo merecer especial atenção no momento da operação de preenchimento;

Ângulos de abertura com altos valores e com grande diferença entre o pino e o substrato, facilitam o escoamento plástico do material para fora, resultando num preenchimento incompleto. Menores valores de ângulos possibilitam uma maior retenção do material deformado dentro da cavidade, e, portanto melhores resultados;

Baixos ângulos de concordância resultam em dificuldades de preenchimento;

As durezas na interface e no material do pino são consideravelmente aumentadas devido às modificações microestruturais, decorrentes do trabalho termomecânico ao qual o material foi submetido.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 ANDREWS, R.E., Underwater repair by friction stitch welding. **Metals and Materials**, p. 796-797, 1990.
- 2 THOMAS, W.; NICHOLAS, S.D.; JONES, S. B.; Lilly, R.H.; Dawes, C.J.; Dolby, R.E. **Friction forming**. patent no. EP 0.602.072 B1, 1992.
- 3 THOMAS, W.; TEMPEL-SMITH, P. **Friction plug extrusion**. GB 2.306.365, 1997. MEYER, A. **Friction hydro pillar processing**. 2002. 123 S. Dissertation –Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, Germany, 2002.
- 4 SOUZA, R.J., **Desenvolvimento, projeto, construção e validação de um equipamento de reparo de trincas por atrito**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- 5 PIRES, R. R. **Efeitos da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito**. 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

Recebido em: 26/12/06

Aceito em: 27/11/07

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro, RJ. São Paulo: ABM, 2006.