

INFLUÊNCIA DA FORÇA AXIAL, DA ROTAÇÃO E DAS GEOMETRIAS DO PINO E DO FURO, NA QUALIDADE DO REPARO DE TRINCAS POR ATRITO

Raphael Rezende Pires

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, Uberlândia - MG
rrpires@mecanica.ufu.br

Lucas Antônio Caixeta

Universidade Federal de Uberlândia
[lucasp01@hotmail](mailto:lucasp01@hotmail.com)

Marcelo Torres Piza Paes

Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ.
mtp@petrobras.com.br

Sinésio Domingues Franco

Universidade Federal de Uberlândia
ltm-sdfranco@ufu.br

Resumo: *As intervenções realizadas no processo produtivo da indústria do petróleo, visando o reparo de estruturas e dispositivos mecânicos, são em sua grande maioria operações onerosas e de extrema complexidade. Mais especificamente, tratando-se do reparo ou preenchimento de trincas em áreas classificadas com riscos de explosão, bem como sob influências do ambiente externo, tornando-se, na maioria dos casos, difícil o emprego da técnica de soldagem a arco voltaico. É neste contexto, que o processo de reparo de trincas por atrito apresenta-se como uma prática extremamente viável e vantajosa, já que ela é um processo que ocorre sem fusão do material, e é menos susceptível ao meio externo, evidenciando-se o seu emprego em áreas submersas e sob ação de elevadas pressões hidrostáticas. Por ser uma técnica recente, pouco ainda se compreende sob a completa fenomenologia física envolvida, bem como a real influência e relevância dos parâmetros do processo. É com o intuito de melhor compreender esta técnica que este trabalho objetiva-se em avaliar a influência da força axial, da velocidade de rotação e geometrias do pino e do furo, na qualidade final do reparo por atrito. Tal avaliação se procedeu via análise metalográfica, pela realização de perfis de microdureza Vickers e testes de dobramento. Pode-se verificar que a geometria apresenta função primordial no completo preenchimento do reparo e menor relevância da força e da rotação dentro dos limites investigados.*

Palavras-chave: *reparo por atrito, geometrias do pino e do furo, força axial, rotação.*

1. INTRODUÇÃO

Os componentes mecânicos quando em operação, e sujeitos aos mais diversos esforços, podem vir a apresentar falhas estruturais decorrentes da nucleação e propagação de trincas. O reparo destas, em sua grande maioria, é realizado via seu preenchimento através da soldagem a arco elétrico (Meyer, 2002). Esta prática acarreta tanto a fusão do material de base a ser reparado, quanto do material de adição, os quais estarão assim, submetidos aos inconvenientes metalúrgicos ligados à solidificação e geração de uma extensa zona termicamente afetada (ZTA).

Este tipo de reparo em áreas classificadas (com riscos de incêndio), como na indústria petrolífera, torna-se uma prática difícil de ser aplicada, além de que a mesma sofre forte influência do meio externo, principalmente quando realizada em ambientes submersos, a altas pressões.

Como alternativa a estes inconvenientes, o reparo por atrito surge como uma técnica altamente atrativa, já que a mesma ocorre no estado sólido, sem fusão do material, e sofre pouca ou quase nenhuma influência do ambiente externo, tornando-se extremamente vantajoso nos reparos de estruturas localizadas sob atmosfera aquática.

O reparo por atrito é obtido através de uma técnica denominada FHPP, “*Friction Hydro Pillar Processing*”, ou, processamento de pinos por atrito, a qual consiste no preenchimento de um furo cego previamente aberto, pela introdução co-axial de um pino ou consumível, em rotação e submetendo-o a um esforço de compressão contra a superfície do furo (Thomas and Nicholas, 1992; Andrews, 1990; Nicholas, 1995 e Meyer, 2002).

O processo possui como fonte geradora de calor o atrito, decorrente do movimento relativo entre a superfície do pino (consumível) contra o substrato. 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 difusionalmente ao substrato, promovendo uma união metalúrgica na interface.

O reparo de trincas é então conseguido pela sobreposição de uma série de preenchimentos do tipo FHPP ao longo do comprimento do defeito (Andrews, 1990; Meyer, 2002). Esta técnica é conhecida como “*Stitch Welding*” ou reparo por costura.

O bom êxito do reparo consiste na obtenção do completo preenchimento do furo, bem como de uma união metalúrgica na interface. A ausência de um fluxo plástico adequado pode vir a levar a falta de preenchimento do consumível no interior do furo, ocasionando a presença de defeitos na execução do reparo.

Estes defeitos são em geral caracterizados por vazios no interior do furo, com forte ocorrência na região interfacial. Estes vazios podem vir a se comportarem como concentradores de tensões ou mesmo como núcleos para a geração de propagação de trincas.

A obtenção de um reparo consistente e livre de defeitos está intimamente ligado ao par de materiais a ser processado, bem como aos parâmetros do processo, destacando-se a configuração geométrica do pino e do furo, a força normal e da rotação empregada.

Este trabalho então, tem por objetivo verificar a influência dos parâmetros geométricos, da força axial e da rotação, na qualidade final do reparo obtido, visando uma interface estável e livre de defeitos. Para tanto, serão realizadas análises metalográficas e perfis de microdureza.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de preenchimento foram realizados em um equipamento denominado Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA), ver figura 1.

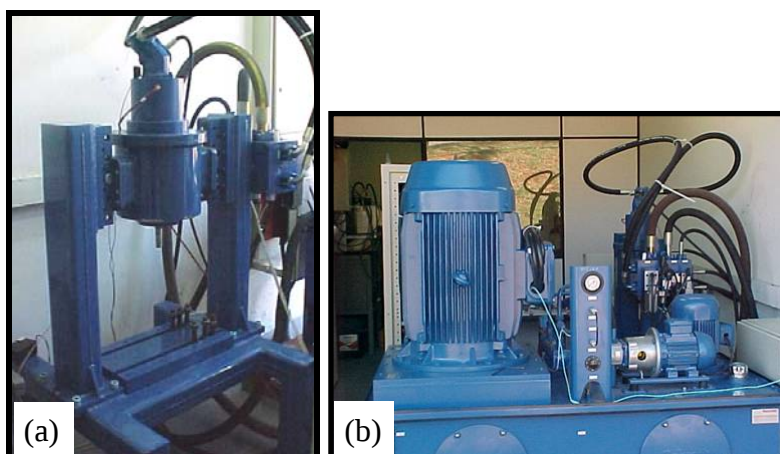


Figura 1: (a) Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA); (b) Unidade Hidráulica

O equipamento foi desenvolvido por Souza (2006), no Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Este equipamento permite a aplicação máxima de 50 KN de carga normal, rotação de até 8.000 rpm, torque máximo de 57 N.m e deslocamento vertical limite de 0,045 m, com monitoramento em tempo real destes parâmetros, via interface implementada em Labview (Souza, 2006).

Os blocos de reparo (substrato) foram confeccionados a partir de chapas de aço ASTM A36, e os pinos (consumível), através de barras em aço ABNT 1010. A tabela 1 apresenta a análise de composição química para estes dois materiais.

Tabela 1: Análise de Composição Química (% em peso)

Elementos	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P
Substrato ASTM A36	0,13	0,94	0,02	0,01	0,01	0,19	0,008	0,014
Pino ABNT 1010	0,12	0,69	0,03	0,01	0,00	0,16	0,027	0,044

Os parâmetros avaliados foram: geometria do pino e do furo, a força axial e a rotação. O comprimento de queima, definido como o deslocamento axial total do pino, contado a partir do seu contato inicial com a superfície do furo, é determinado de modo a ser apenas o necessário para haver o completo preenchimento do furo. Na etapa final de forjamento, onde não mais existe rotação do eixo da máquina, a força normal utilizada no ensaio é mantida por um período de 3 segundos, visando-se assim uma melhor união na região superior do reparo, além de possibilitar um possível refino microestrutural e melhoria das propriedades mecânicas de limite de escoamento e dureza.

Cinco geometrias distintas para usinagem dos pinos e furos foram avaliadas. Os respectivos parâmetros geométricos em questão são apresentados na figura 2.

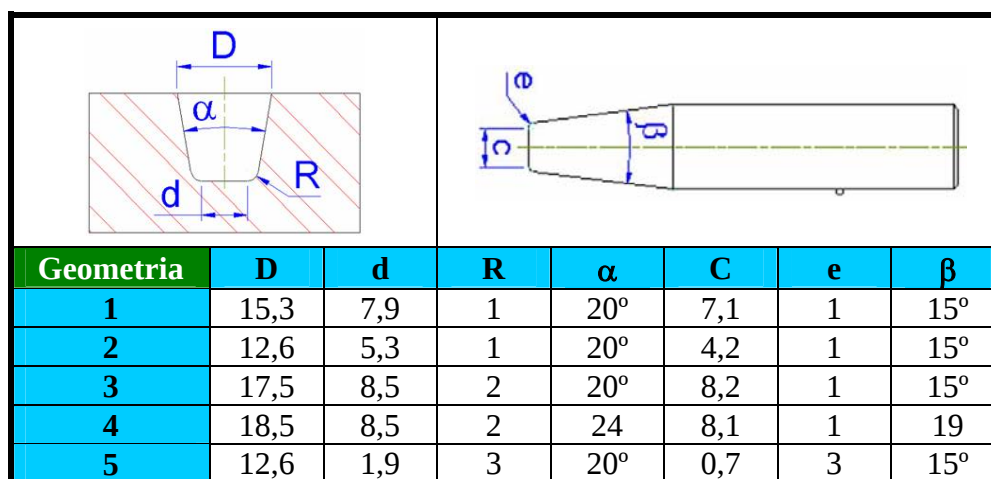


Figura 2: Descrição dos Parâmetros Geométricos.

Os valores de força de normal e velocidade de rotação, bem como os demais parâmetros empregados para a realização dos ensaios de reparo estão dispostos na tabela 3.

Após concluído os ensaios de reparo, as amostras foram seccionadas longitudinalmente em relação ao eixo do pino. O corte foi refrigerado e executado com disco abrasivo.

Posteriormente, as amostras foram preparadas metalograficamente para análise macrográfica. As amostras foram lixadas com lixas d'água de granulometrias 220, 320, 400, 600 e atacadas com Nital 6%. Em seguida, as amostras foram novamente lixadas até a lixa 1000, polidas com pasta de diamante de granulometria 3 μ m, e atacadas com Nital a 2% para análise micrográfica.

Tabela 3: Parâmetros Utilizados nos Ensaios de Reparo por Atrito.

Nº Ensaio	Geometria	Força [KN]	Rotação [rpm]	Comprimento de Queima [m]	Forjamento [KN]
1	1	20	5000	0,008	20
2	1	35	6000	0,008	35
3	1	35	7000	0,008	35
4	2	25	5000	0,006	25
5	2	30	5000	0,006	30
6	3	20	4000	0,007	20
7	3	20	7000	0,007	20
8	3	35	4000	0,007	35
9	3	35	7000	0,007	35
10	4	20	4000	0,007	20
11	4	20	7000	0,007	20
12	4	35	4000	0,007	35
13	4	35	7000	0,007	35
14	5	20	4000	0,006	20
15	5	20	7000	0,006	20
16	5	35	4000	0,006	35
17	5	35	7000	0,006	35

Nas superfícies preparadas metalograficamente, foram executados ensaios de microdureza Vickers com carga de 0,5 N, através de um microdurômetro Shimadzu. Foram traçados três perfis de microdureza, sendo um vertical, iniciando-se a três milímetros abaixo da interface inferior e dois perfis horizontais, um a cinco milímetros e outro a dez milímetros da interface inferior, conforme ilustrado na figura 3.

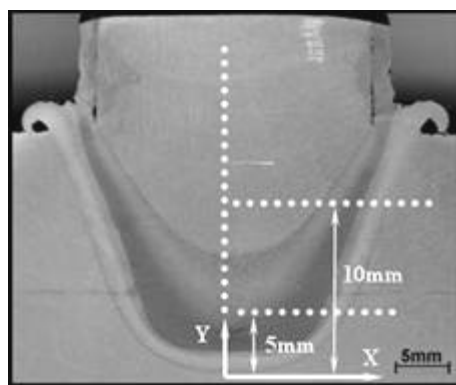


Figura 3: Croqui Representativo dos Perfis de Microdureza.

Foi realizado ainda, um ensaio de reparo por costura “*Stitch Welding*”, simulando o reparo de uma trinca, mediante a sobreposição de sete reparos do tipo “*FHPP*”. Para a confecção do bloco e pinos, foram utilizados os mesmos materiais mencionados anteriormente. Em uma primeira etapa, foram abertos quatro furos, os quais foram preenchidos, e numa segunda etapa, mais três furos foram usinados entre os anteriores. Como parâmetros geométricos selecionados, foi utilizada a geometria 5, descrita na figura 2. Todos os ensaios foram realizados com carga axial de 20 KN, 7000 rpm, e força de forjamento igual à carga do ensaio, aplicada por 3 segundos depois de cessada a rotação do pino.

Da amostra de reparo por costura foram confeccionadas três lâminas destinadas a ensaios de dobramento, onde sua especificação e descrição do equipamento de teste estão descritos na norma ASTM E 190 - 92, (2003).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a realização de cada ensaio de reparo por atrito, foram monitoradas a força e a rotação, bem como o comportamento do torque do sistema e o deslocamento axial do pino, todos em função do tempo do ensaio. A figura 4 ilustra essa metodologia.

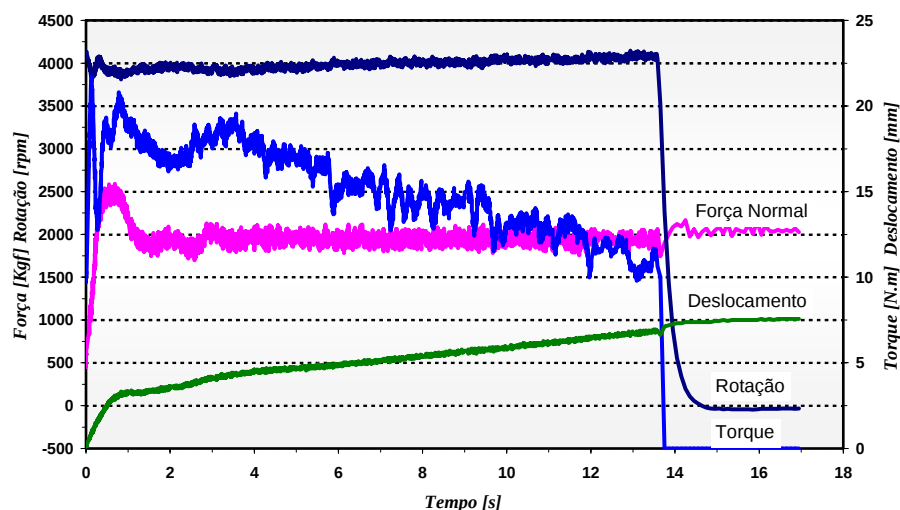


Figura 4: Dados Adquiridos em Tempo Real para o Ensaio 10.

Estes resultados, além de permitir a análise do comportamento da força normal, da rotação, do comprimento de queima (deslocamento) e do torque, para cada par geométrico pino/bloco, permite também correlacioná-los com as mais diversas condições de ensaio.

Foi constatado, que para uma mesma geometria, o tempo de ensaio é reduzido com o aumento da força axial (figura 5). A velocidade de processamento do pino ou taxa de queima é função desta força e da rotação, mostrando-se ser menos sensível para o segundo parâmetro.

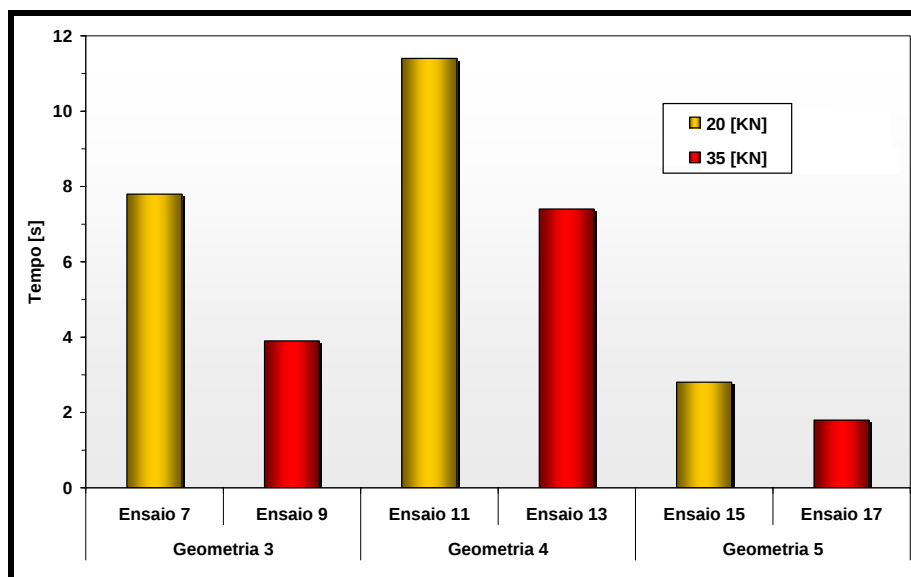


Figura 5: Efeito da Força Axial no Tempo do Ensaio.

As análises metalográficas evidenciaram a presença de defeitos em alguns dos ensaios realizados, comprovando que a qualidade do reparo é dependente dos parâmetros do processo. Estes defeitos caracterizam-se por falta de preenchimento ou vazios na interface inferior entre o material do pino e do substrato, e são, em sua maioria, visíveis apenas micrograficamente, ver figura 6.

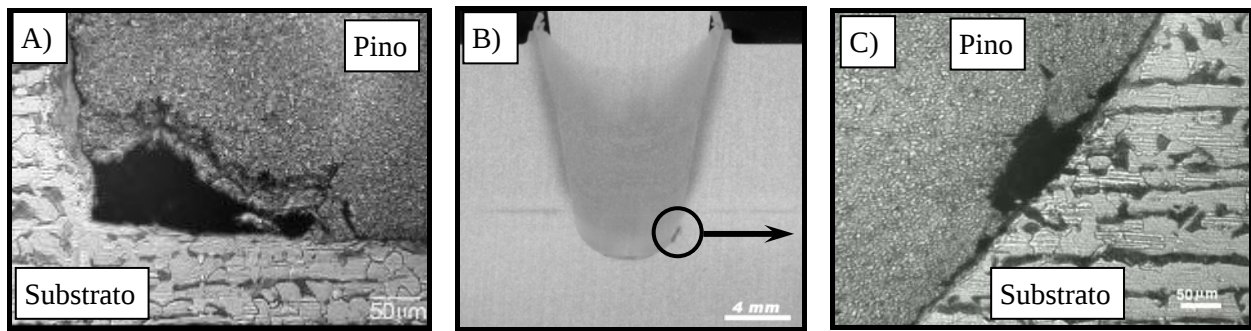


Figura 6: Falhas Observadas Metalograficamente na Interface Inferior pino/bloco: A) Ensaio 5, B) e C) Ensaio 14.

Os parâmetros geométricos são os principais responsáveis pela formação de vazios na região do reparo. As geometrias 1 e 2 apresentaram defeitos como os mostrados na figura 6, decorrentes do pequeno raio de concordância R , e da baixa taxa de aquecimento, impedido um fluxo plástico adequado na interface inferior. As pequenas dimensões dos parâmetros d e C foram também as responsáveis pelos defeitos encontrados nos ensaios realizados com a geometria 5.

As geometrias 3 e 4 apresentaram interfaces pino/bloco livres de defeitos em todos os ensaios realizados. Deste modo, pode-se comprovar que, dentro da faixa de operação de força axial e rotação investigada neste trabalho, a geometria é o fator primordial na obtenção de um reparo de melhor qualidade. Devendo este parâmetro, propiciar um adequado aquecimento tanto do pino quanto do bloco, de modo a permitir uma união metalúrgica ao longo de toda a interface. A figura 7 apresenta as micrografias da interface obtidas com as geometrias 3 e 4.

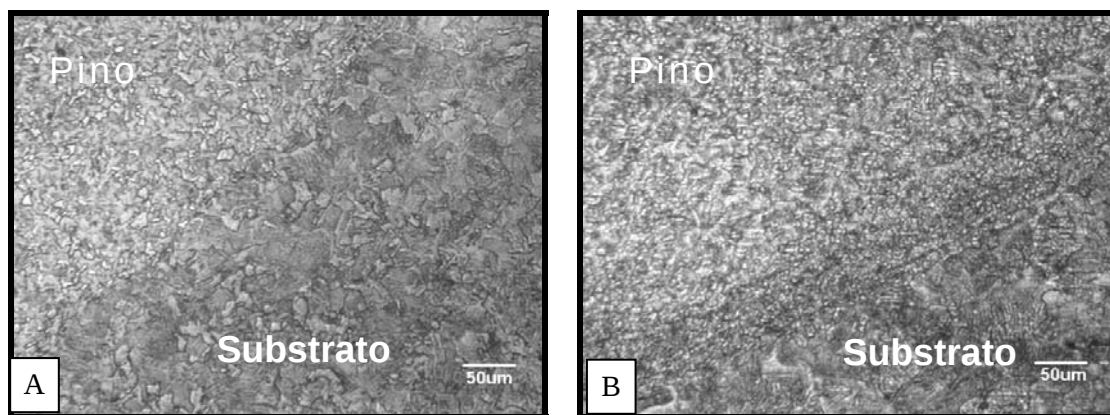


Figura 7: Micrografias na Interface Inferior: A) Ensaio 6; B) Ensaio 10.

As figuras 8, 9 e 10 apresentam os perfis de dureza obtidos para os ensaios 6, 10 e 14. Em todos os ensaios é observado um aumento gradativo de dureza, o qual se inicia, dentro da ZTA, e se processa da interface pino/bloco para o interior do pino.

O aumento de dureza está relacionado com as modificações microestruturais ocorridas durante o processamento do consumível. Estas modificações são também função dos parâmetros do ensaio.

Os perfis de microdureza evidenciaram a influência dos parâmetros geométricos, onde se nota um comportamento semelhante dos valores de dureza para os ensaios 6 e 10, enquanto que para o ensaio 14, há uma nítida tendência para valores mais elevados. Este fato é explicado devido à maior semelhança entre as geometrias 3 e 4. A geometria 5 apresenta um perfil mais estreito, de menor aporte térmico, o que pode acarretar, ao final do processo, uma estrutura mais encruada, com nítidas linhas de fluxo plástico na interface inferior do reparo, (figura 11 A). Este comportamento irá conferir ao material uma dureza superior. Os ensaios 6 e 10 foram realizados em um nível mais elevado de temperatura, sendo submetidos a um superaquecimento e intensificação dos processos difusionais, o que pode ser comprovado pelas análises metalográficas, ressaltando a predominância de uma microestrutura formada por uma ferrita acicular de Widmanstatten, (figura 11 B).

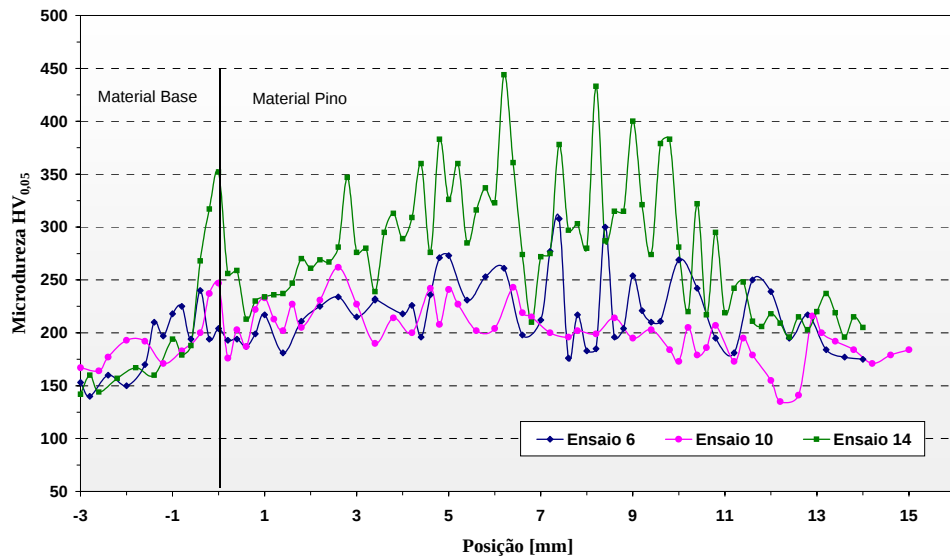


Figura 8: Perfis de Dureza Vertical para os Ensaios 6, 10 e 14.

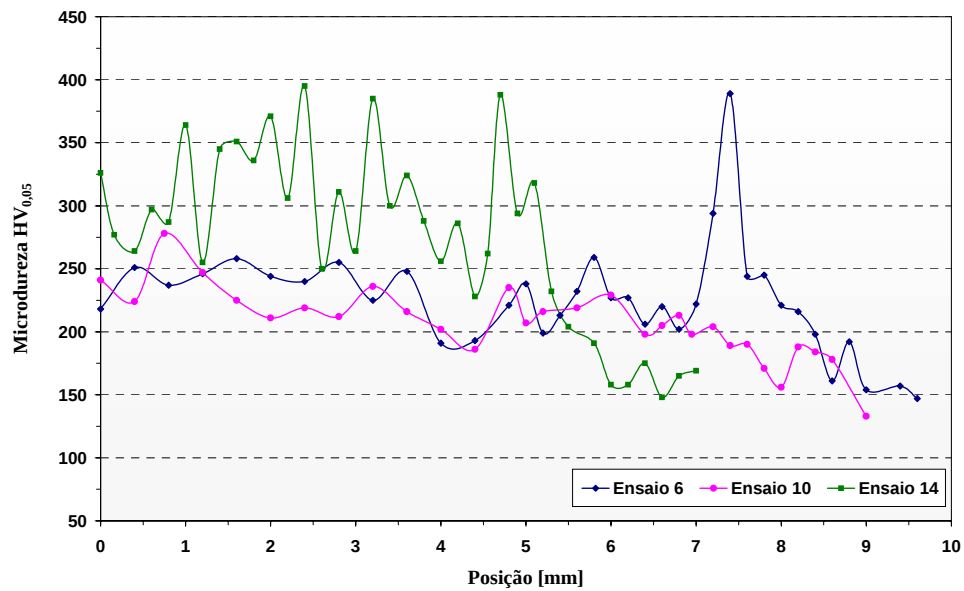


Figura 9: Perfis de Dureza Horizontal a 5 mm, para os Ensaios 6, 10 e 14.

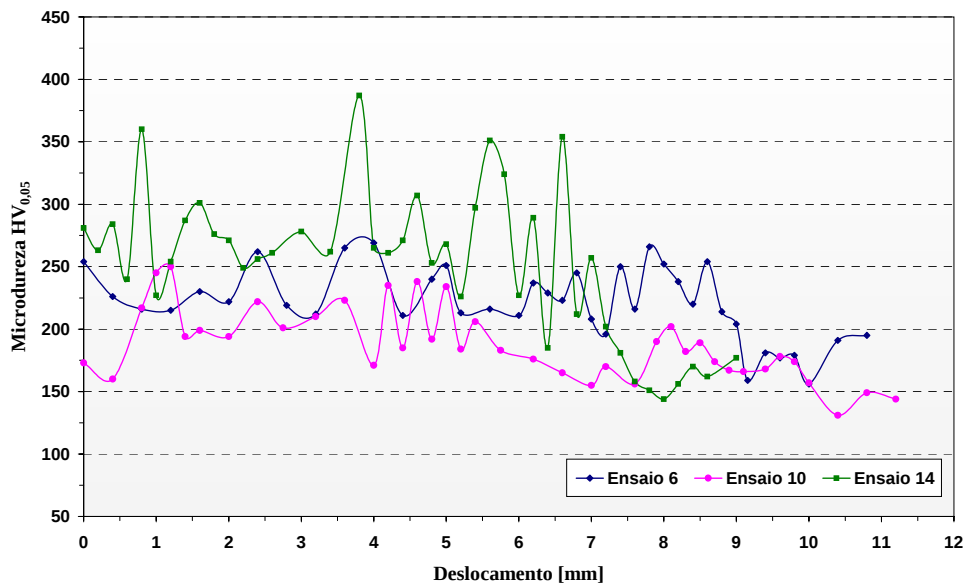


Figura 10: Perfis de Dureza Horizontal a 10 mm, para os Ensaios 6, 10 e 14.

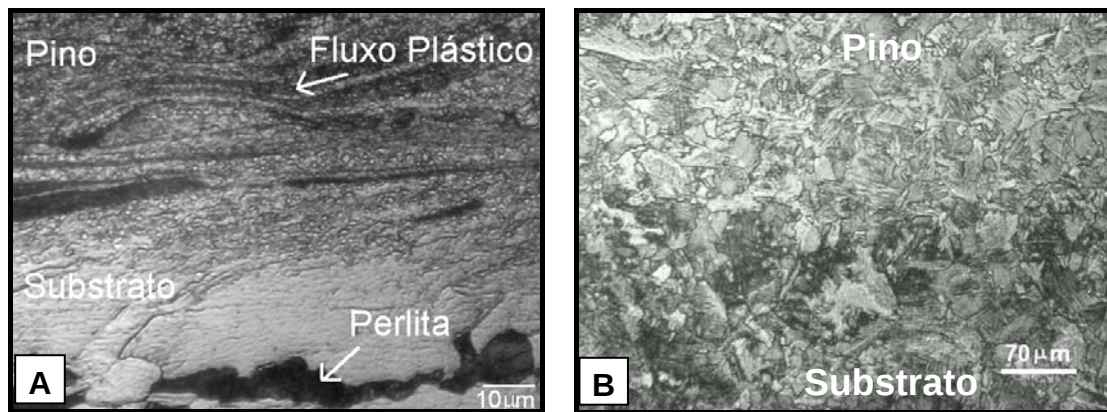


Figura 11: Estrutura na Interface Inferior: A) Ensaio 4 (Evidência de Fluxo Plástico); B) Ensaio 3 (Ferrita Acicular).

Os parâmetros de força normal e rotação, dentro dos limites avaliados, apresentaram influência de menor relevância na morfologia e valores dos perfis de microdureza em relação à geometria.

A figura 12 apresenta algumas micrografias realizadas ao longo da seção transversal do bloco de reparo por costura, paralela à linha central na direção dos reparos. Devido a utilização da geometria 5 para realização dos ensaios, constatou-se a presença de defeitos na interface, conforme explicado anteriormente.

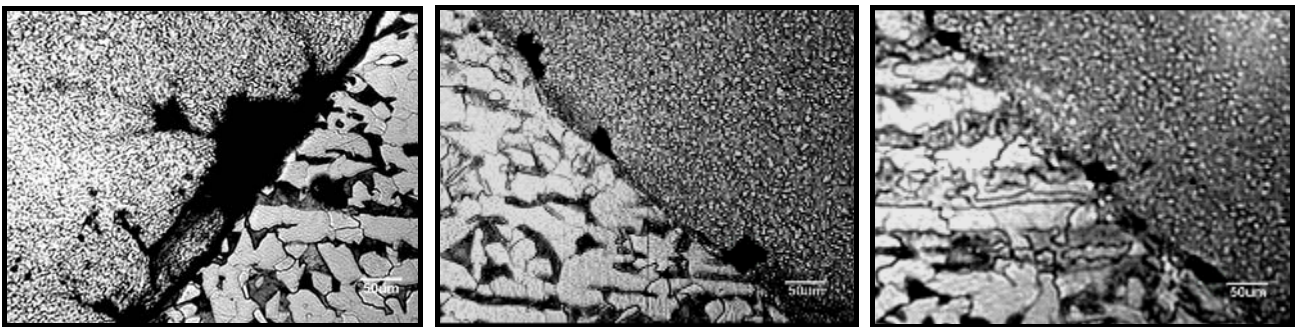


Figura 12: Micrografias na Interface Inferior Pino/Bloco, Seção Transversal do Bloco.

Contudo, mesmo com a presença destes defeitos, os ensaios de dobramento realizados com as três amostras não apresentaram indícios de destacamento ou propagação de trincas na região do reparo. Visto que, o ensaio consiste em dobrar as laminas até um determinado ângulo limite onde se observa com auxílio de uma lupa a nucleação e propagação de trincas. Como pode ser visto na figura 13, as amostras foram dobradas até o ângulo limite de 180° e não foi detectada a presença de defeitos decorrente do esforço de flexão.



Figura 13: Amostras após a Realização do Ensaio de Dobramento.

Tais resultados comprovam a boa qualidade do reparo e a obtenção de uma união metalúrgica entre o material de adição e o substrato. As alterações microestruturais bem como a presença de uma ZTA propiciaram melhorias nos valores de dureza em relação ao material de base, sem, contudo, levar a uma perda de ductilidade na região do reparo. O material apresentou tanto ductilidade quanto tenacidade suficiente para ser deformado plasticamente, sem permitir que a energia de deformação imposta na solicitação se propagasse na forma de trincas.

4. CONCLUSÃO

- As análises metalográficas evidenciaram uma grande correlação entre a qualidade do reparo e os parâmetros do processo, destacando-se com maior influência, dentro dos intervalos de força axial e de rotação investigados, os parâmetros geométricos;
- Os defeitos observados referem-se a vazios formados ao longo da interface inferior, os quais são em sua maioria decorrentes da utilização de uma geometria inadequada;
- As baixas taxas de aquecimento e altas velocidades de processamento podem levar a falhas de preenchimento na interface inferior, entre o material de adição e substrato;
- Os parâmetros do processo, aliados ao tipo de material utilizado, irão determinar a microestrutura formada e as propriedades mecânicas obtidas ao final do reparo;
- Os ensaios de dobramento permitiram a constatação de uma excelente qualidade do reparo, visto que as amostras foram dobradas a um ângulo máximo de 180° sem ocasionar o destacamento do preenchimento ou mesmo trincas na interface. O que sugere a existência de uma união metalúrgica na interface e boa ductilidade na região do reparo.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda equipe de trabalho envolvida no projeto UPPA, aos técnicos do laboratório pelo auxílio na preparação das amostras, a PETROBRAS pela parceria e investimento financeiro no projeto e ao CNPq pela bolsa de mestrado cedida ao aluno Raphael Rezende Pires.

6. REFERÊNCIAS

- Andrews, R.E., 1990, "Underwater Repair by Friction Stitch Welding", *Metals and Materials*, pp 796-797.
- ASTM E 190 – 92, "Standard Test Method for Guided Bend Test Ductility of Welds".
- MEYER, A., 2002, "Friction Hydro Pillar Processing", Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, Germany.
- Nicholas, E.D., 1995, "Friction Hydro Pillar Processing", 11th Annual North American Welding Research Conference.
- Souza, R.J., 2006, "Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- Thomas, W., Nicholas, E.D., Jones, S.B., Lilly, R.H., Dawes, C.J. and Dolby, R.E., 1992, "Friction Forming". TWI, Cambridge, Patent N°.: EP 0 602 072 B1.

INFLUENCE OF THE AXIAL FORCE, OF THE ROTATION AND OF THE PIN AND HOLE GEOMETRIES, IN THE FRICTION WELDING REPAIR CRACKS QUALITY

Raphael Rezende Pires

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, Uberlândia - MG
rrpires@mecanica.ufu.br

Lucas Antônio Caixeta

Universidade Federal de Uberlândia
lucasp01@hotmail

Marcelo Torres Piza Paes

Petrobras/CENPES, Rj
mtpp@petrobras.com.br

Sinésio Domingues Franco

Universidade Federal de Uberlândia
ltm-sdfranco@ufu.br

Abstract: *During the exploitation and production of oil and gas in deep water, the repair procedures of steel structures face great problems. Due to different environment influences, the use of standard fusion welding process is not viable in the crack repairing. Solid state welding processes as friction welding have been considered as a feasible repair alternative by the fact that bonding takes place below the melting point limits, reducing therefore the importance of the environment in the repair quality. It is also indicated to repair cracks under water with high hydrostatic pressures. In consequence of the fact that this technique is very young, the physical process is not well know, as well as parameters effects. For a better comprehension of this technique, this work presents the influence of axial force, rotational speed and pin and hole geometries over the repair quality. The quality was evaluated with metallographic analysis (Vickers microhardness profile) and bending tests. It was verified that the geometry has most influence on results. Force and rotation have mild range influence.*

Keywords: *friction welding repair, pin and hole geometries, axial force, rotation.*