

# INFLUÊNCIA DA FORÇA AXIAL, DA ROTAÇÃO E DAS GEOMETRIAS DO PINO E DO FURO, NA QUALIDADE DO REPARO DE TRINCAS POR ATRITO<sup>1</sup>

Raphael Rezende Pires<sup>2</sup>

Lucas Antônio Caixeta<sup>3</sup>

Marcelo Torres Piza Paes<sup>4</sup>

Sinésio Domingues Franco<sup>5</sup>

## 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, torna-se, em grande parte dos casos, difícil o emprego da técnica de soldagem a arco voltaico. É neste contexto que o potencial processo de reparo de trincas por atrito apresenta-se como uma prática extremamente viável e vantajosa, visto que este é um processo que ocorre sem fusão do material, e é menos susceptível ao meio externo. Estas características evidenciam o emprego da potencial técnica de reparo por atrito em áreas submersas e sobre 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 tem como objetivo avaliar a influência da força axial, da velocidade de rotação e das 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. Pôde-se verificar que o fator geometria apresenta função primordial no completo preenchimento do reparo e na formação de uma união metalúrgica entre a interface pino/bloco. Uma menor relevância na qualidade final do reparo foi observada neste trabalho, dentro dos limites investigados, com os parâmetros força axial e da velocidade de rotação do pino.

**Palavras-chave:** Reparo por atrito; Geometrias do pino e do furo; Força axial; Rotação.

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

### 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 known, 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.

**Key words:** Friction welding repair; Pin and hole geometries; Axial force; Rotation.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Mestrando, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica;*

<sup>3</sup> *Graduando, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecatrônica;*

<sup>4</sup> *Mestre Engenheiro, Petrobras - Cenpes;*

<sup>5</sup> *Prof. Dr. Eng. do Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia.*

## 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 preenchimento através da soldagem a arco elétrico.<sup>(1)</sup> Esta prática acarreta a fusão tanto do material de base a ser reparado, quanto do material de adição, os quais estarão, assim, submetidos aos inconvenientes metalúrgicos ligados à solidificação, além da formação 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 onerosa e difícil de ser aplicada. Além disso, a solda a arco sofre forte influência do meio externo, principalmente quando realizada em ambientes submersos a altas pressões hidrostáticas.

Como alternativa a estes inconvenientes, o reparo por atrito surge como uma técnica altamente atrativa, já que o mesmo ocorre no estado sólido, sem fusão de material, e sofre pouca ou quase nenhuma influência do ambiente externo. Estas características tornam-se extremamente vantajosas 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. Este processo consiste no preenchimento de um furo cego através da introdução coaxial de um pino ou consumível, em rotação, o qual é submetido a um esforço de compressão contra a superfície do furo.<sup>(1-4)</sup>

O processo possui, como fonte geradora de calor, o atrito decorrente do movimento relativo entre a superfície do pino (consumível) e 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 material plastificado desenvolve-se axialmente em relação ao consumível, e se une difusionalmente ao substrato, promovendo-se assim uma união metalúrgica ao longo da interface pino/bloco.

O reparo de trincas é então conseguido pela sobreposição de uma série de preenchimentos do tipo FHPP ao longo do comprimento do defeito.<sup>(1,3)</sup> 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 da formação de uma união metalúrgica na interface pino/bloco. A ausência de um fluxo plástico adequado pode levar à falta de preenchimento do consumível no interior do furo, ocasionando a presença de defeitos na execução do reparo.

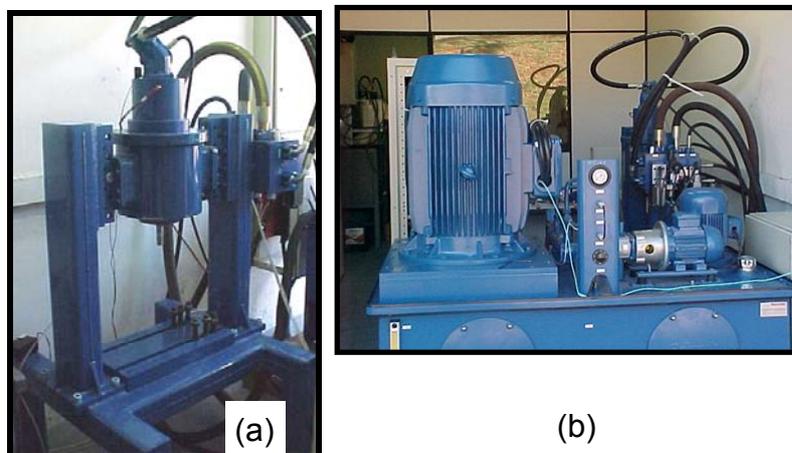
Estes defeitos são em geral caracterizados por vazios no interior do furo, com forte ocorrência na região interfacial. Estes vazios podem vir a se comportar como concentradores de tensões ou mesmo como núcleos para a geração e propagação de trincas.

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

Desta forma este trabalho tem por objetivo verificar a influência dos parâmetros geométricos, da força axial e da rotação sobre a qualidade final do reparo obtido, visando uma interface livre de defeitos. Para tanto, foram 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) (Figura 1).



**Figura 1:** Imagens ilustrativas do equipamento: (a) Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA); (b) Unidade Hidráulica

O equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. 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. O monitoramento destes parâmetros é realizado em tempo real, via interface implementada em Labview®. Uma melhor descrição deste equipamento foi realizado no trabalho desenvolvido por Souza.<sup>(5)</sup>

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, força axial e 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, foi 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 foi mantida por um período de três segundos. Assim, visou-se 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.

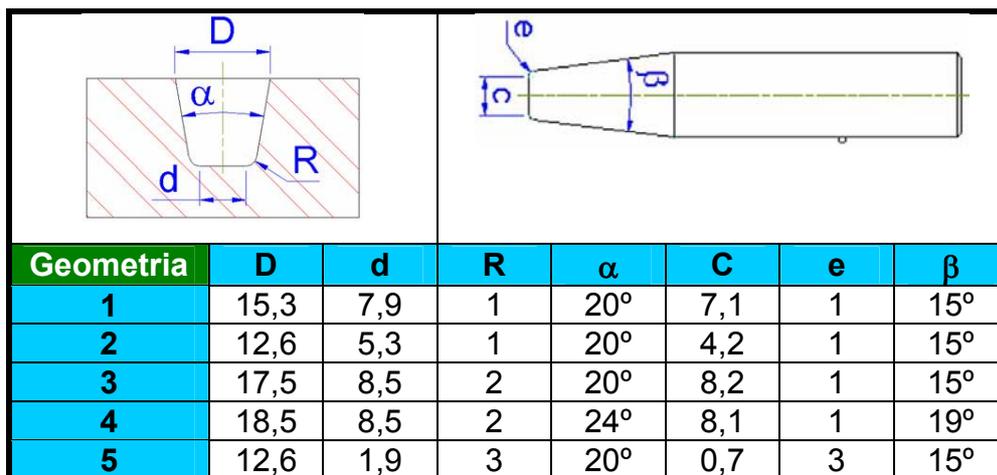


Figura 2: Descrição dos Parâmetros Geométricos.

Os valores de força normal e velocidade de rotação, bem como os demais parâmetros empregados para a realização dos ensaios de reparo estão dispostos na Tabela 2.

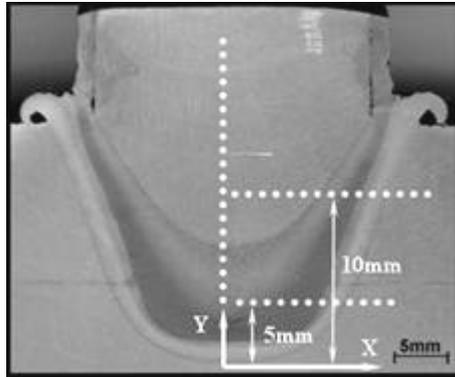
Tabela 2: Parâmetros Utilizados nos Ensaios de Reparo por Atrito.

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

Depois de concluídos 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 1.200, polidas com pasta de diamante de granulometria 3µm, e atacadas com Nital a 2% para análise micrográfica.

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 Figura 3.



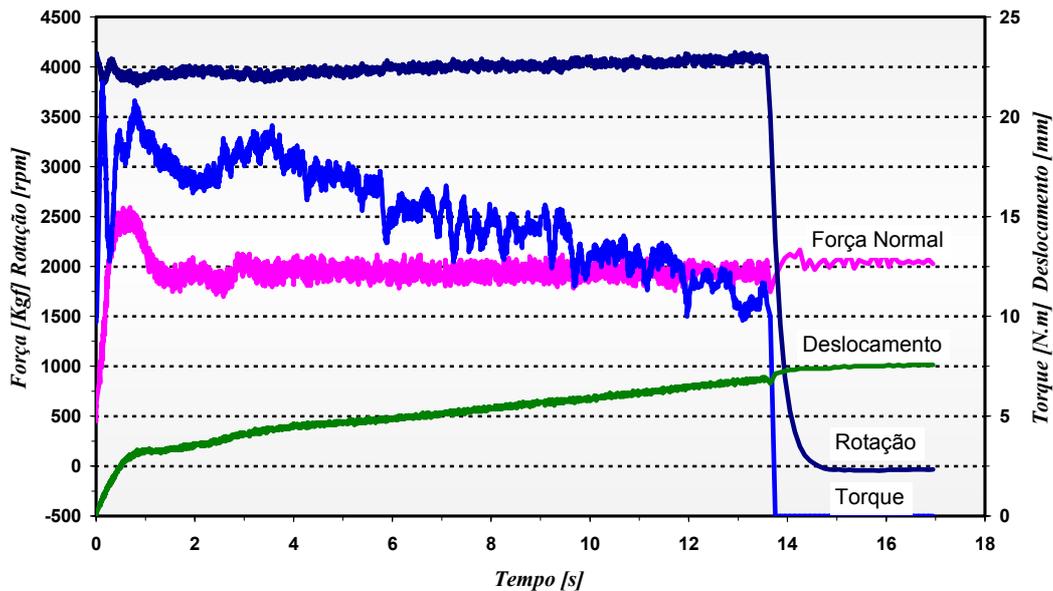
**Figura 3:** Croqui Representativo dos Perfis de Microdureza.

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, 7.000 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 a especificação e descrição deste equipamento estão descritos na norma ASTM E 190 - 92(6). Os ensaios consistiram em dobrar as laminas até um determinado ângulo limite, definido pelo instante em que se observava, com auxílio de uma lupa, a nucleação e propagação de trincas.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

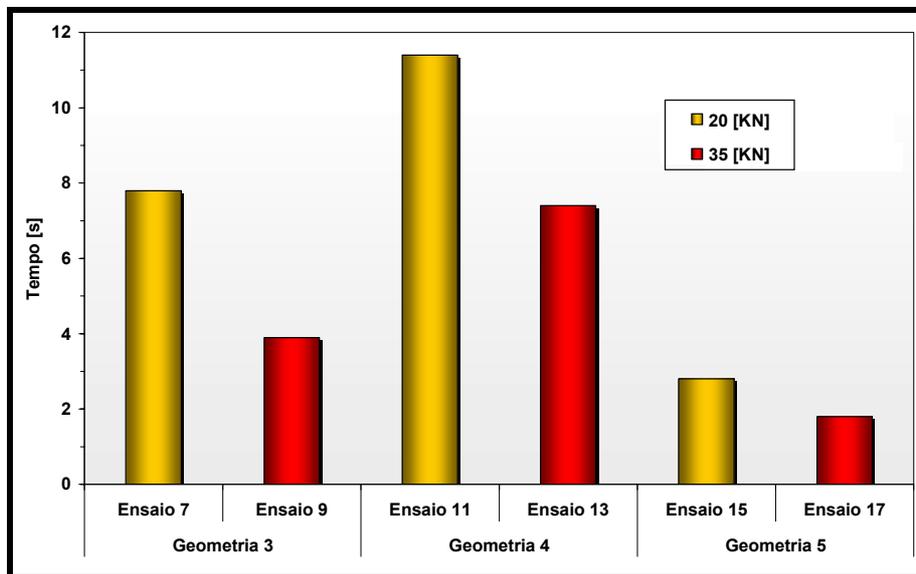
Durante a realização de cada ensaio de reparo por atrito, foram monitoradas a força e a rotação, bem como o comportamento do torque do sistema e o deslocamento axial do pino, todos em função do tempo do ensaio. A Figura 4 ilustra essa metodologia.



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

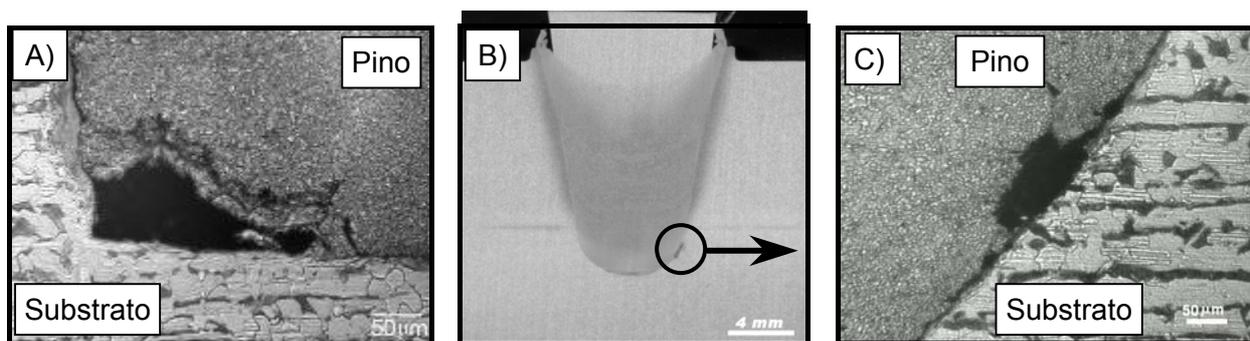
Estes resultados, além de permitirem a análise do comportamento da força normal, da rotação, do comprimento de queima (deslocamento) e do torque, para cada par geométrico pino/bloco, permitem também correlacioná-los com as mais diversas condições de ensaio.

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 menos sensível para o segundo parâmetro.



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

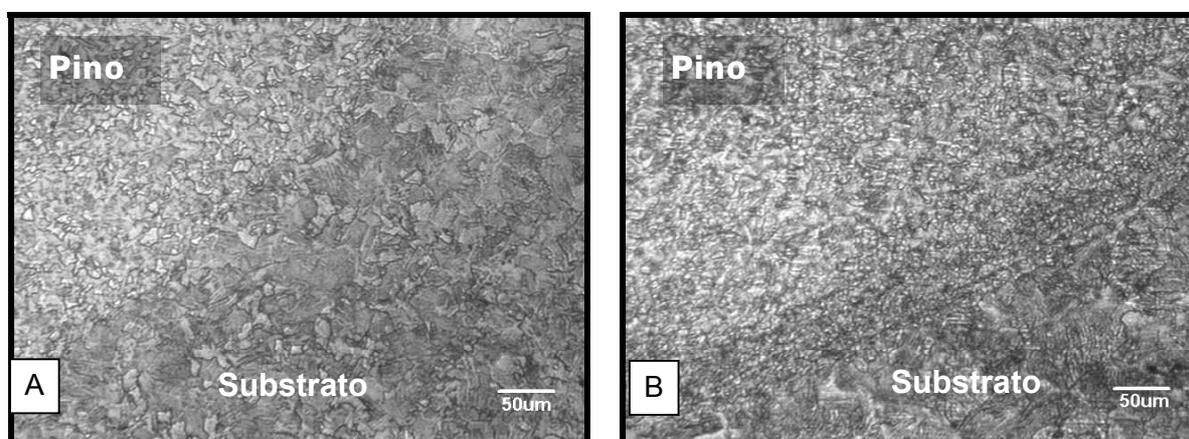
As análises metalográficas evidenciaram a presença de defeitos em alguns dos ensaios realizados, comprovando que a qualidade do reparo é dependente dos parâmetros do processo. Estes defeitos caracterizam-se por falta de preenchimento ou vazios na interface inferior entre o material do pino e do substrato,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



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

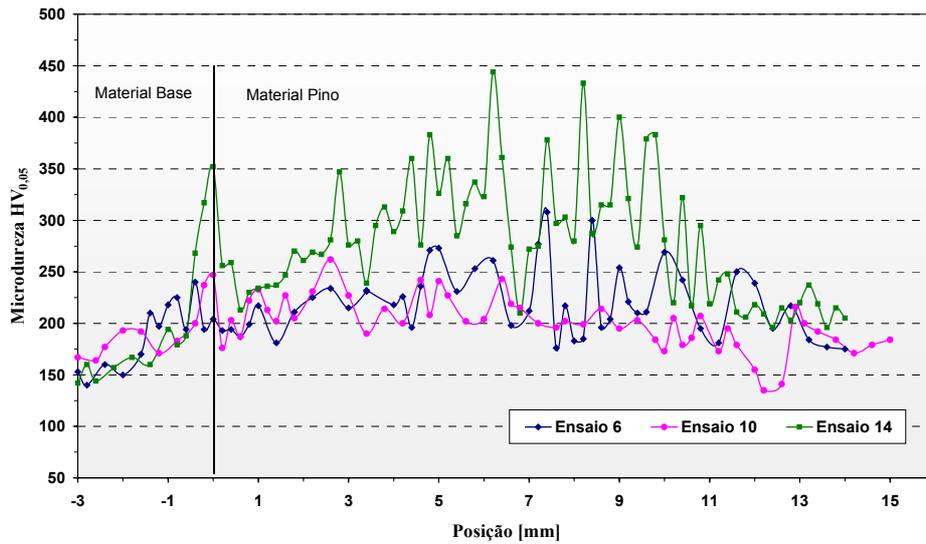
Os parâmetros geométricos são os principais responsáveis pela formação de vazios na região do reparo. As geometrias 1 e 2 apresentaram defeitos como os mostrados na Figura 6, decorrentes do pequeno raio de concordância R, e da baixa taxa de aquecimento, impedindo um fluxo plástico adequado na interface 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. Este parâmetro deve propiciar um adequado aquecimento, tanto do pino quanto do bloco, de modo a permitir um fluxo plástico capaz de preencher o volume do furo e uma união metalúrgica ao longo de toda a interface. As micrografias apresentadas na Figura 7 demonstram a interface obtida com as geometrias 3 e 4.

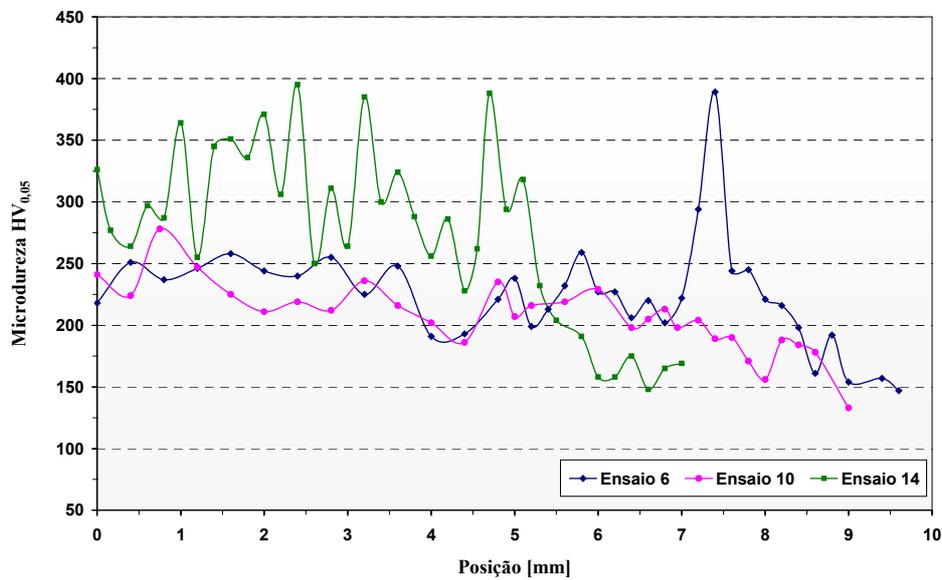


**Figura 7:** Fotomicrografias realizadas na interface pino/bloco inferior esquerda: A) Ensaio 6; B) Ensaio 10.

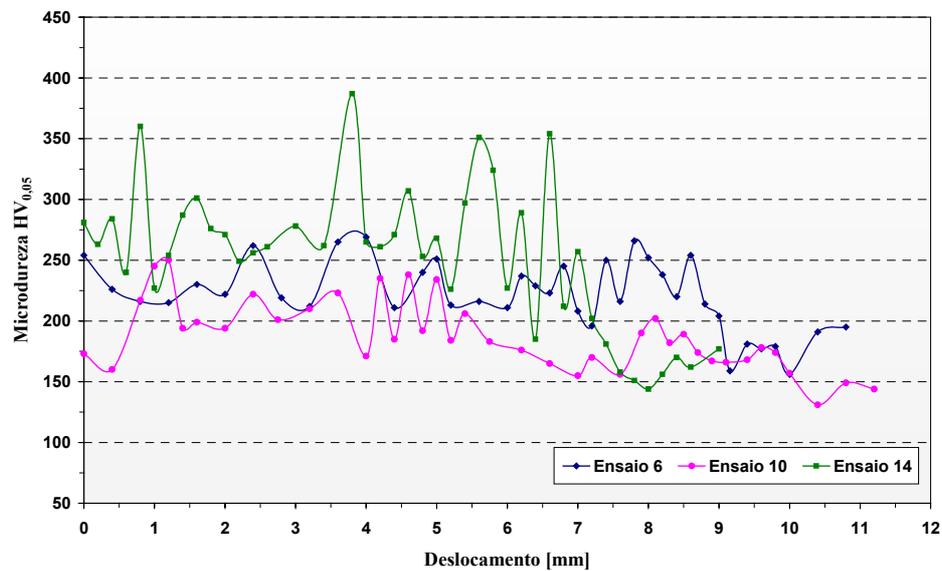
As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os perfis de dureza obtidos para os ensaios 6, 10 e 14. Em todos os ensaios é observado um aumento gradativo de dureza, o qual se inicia a partir da ZTA, e se propaga da interface pino/bloco para o interior do pino. O aumento de dureza está relacionado com as modificações microestruturais ocorridas durante o processamento do consumível. Estas modificações são também funções dos parâmetros do ensaio, visto que eles influenciam no tempo total do processo e na taxa de geração e dissipação de calor.



**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.

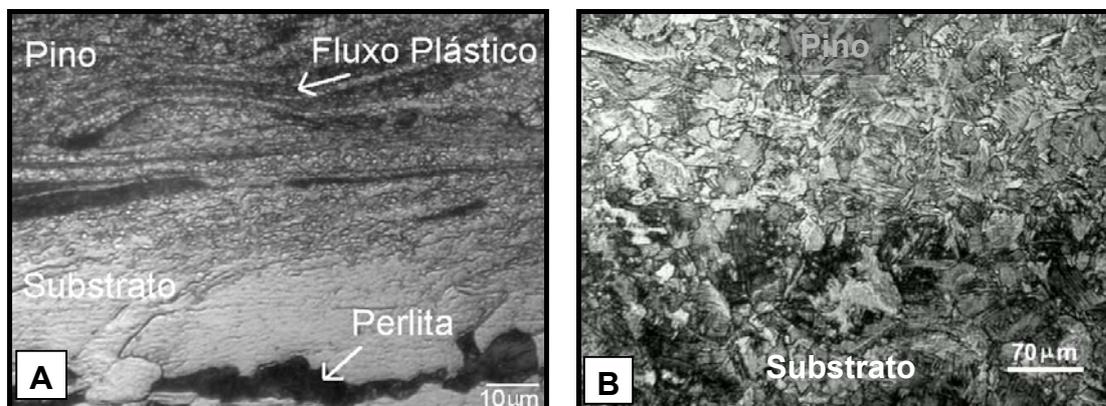


**Figura 10:** Perfis de Dureza Horizontal a 10 mm, para os Ensaios 6, 10 e 14.

A dispersão dos valores de dureza observada nos gráficos pode ser justificada pela utilização de uma baixa carga de indentação, o que implica em uma redução na escala dos ensaios de microdureza. É importante salientar também, que não há uma completa homogeneidade microestrutural ao longo da região de preenchimento. A microestrutura sofre leves modificações, tanto na forma, quanto no tamanho dos microconstituintes que a compõem, além da possibilidade da formação de fases esparsas de maiores durezas (bainita e/ou martensita).

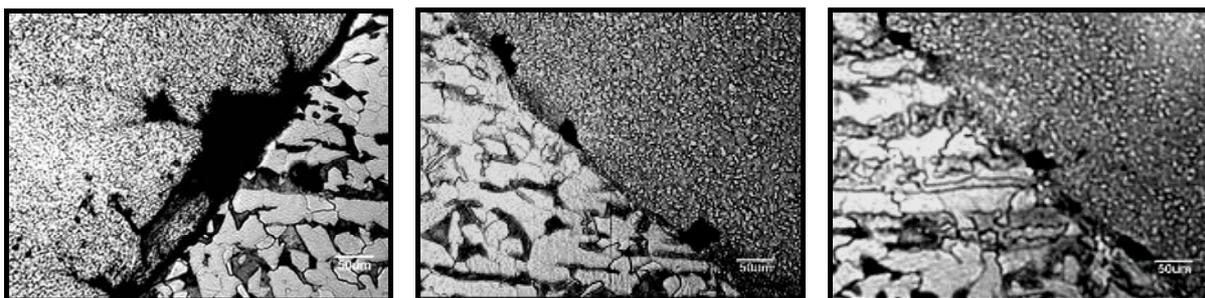
Os perfis de microdureza evidenciaram a influência dos parâmetros geométricos. Nota-se um comportamento semelhante dos valores de dureza para os ensaios 6 e 10, enquanto que para o ensaio 14, há uma nítida tendência para valores mais elevados. Este fato é explicado devido à maior semelhança entre as geometrias 3 e 4, utilizadas respectivamente para os ensaios 6 e 10. 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. Este fato pôde ser comprovado pelas análises metalográficas e exemplificado na Figura 11B, a qual ressalta a semelhança entre a microestrutura da interface pino/bloco e a predominância de uma ferrita de Widmanstätten.

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.



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

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 à 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. 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 decorrentes 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 utilidade na região do reparo. O material apresentou tanto utilidade 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 utilidade na região do reparo.

## **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 concedida ao aluno Raphael Rezende Pires.

## **REFERÊNCIAS**

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