

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

### Lucas Antonio Caixeta

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, Uberlândia – MG.  
[lacaixeta@mecanica.ufu.br](mailto:lacaixeta@mecanica.ufu.br)

### Raphael Rezende Pires

Universidade Federal de Uberlândia  
[rpires@mecanica.ufu.br](mailto:rpires@mecanica.ufu.br)

### 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](mailto:mtp@petrobras.com.br)

### Sinésio Domingues Franco

Universidade Federal de Uberlândia  
[ltm-sdfranco@ufu.br](mailto:ltm-sdfranco@ufu.br)

**Resumo:** Os reparos de componentes mecânicos são de grande importância na indústria, sendo a qualidade desses reparos imprescindível para o bom funcionamento dos equipamentos. Em áreas classificadas, como áreas petrolíferas, a utilização do reparo por atrito ou Processamento de Pinos por Atrito apresenta algumas vantagens quando comparados ao processo de soldagem a arco voltaico, pois aquela técnica apresenta ausência de porosidade e ausência da fragilização por hidrogênio. Além disso, o reparo por atrito se mostra mais seguro por apresentar temperaturas inferiores ao arco voltaico e não sofrer grandes influências do meio externo. O Processamento de Pinos por Atrito consiste em preencher completamente um furo, através da utilização de material submetido à alta força axial e rotação. Essa técnica sofre influência de alguns parâmetros e este trabalho tem por objetivo verificar a influência de alguns deles, tais como: geometria do pino e furo, força axial e velocidade de rotação. Com essa verificação é possível uma otimização do processo, obtendo uma melhor qualidade do reparo. A avaliação da qualidade do reparo por atrito foi realizada através de análises metalográficas e perfis de microdureza Vickers. Verificou-se que, dentro dos limites de força e rotação analisados, a geometria mostrou-se o parâmetro de maior influência na qualidade do reparo.

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

## 1. INTRODUÇÃO

A estrutura dos equipamentos mecânicos está sempre sujeita a formação de trincas, e conseqüentemente, a propagação das mesmas. Esse tipo de acontecimento gera danos ao equipamento e enormes acidentes com a sua ruptura. Um reparo pode ser feito, evitando assim, tais infortúnios, além de perdas financeiras onerosas com paradas de produção. Um dos métodos que possivelmente poderão ser utilizados no reparo dessas trincas, em substituição à soldagem voltaica convencional, é o processo de reparo por atrito, conhecido como Processamento de Pinos por Atrito (Andrews, 1990). Esse processo é uma soldagem no estado sólido, o qual diferentemente dos processos a arco elétrico, não é afetada pela pressão ambiente (Nixon, 1986), sendo isso uma vantagem para reparos feitos ambientes marítimos a altas profundidades e a elevadas pressões

hidrostáticas, como por exemplo, reparo em tubos e estruturas petrolíferos. Outras duas importantes vantagens do processo de reparo por atrito estão relacionadas com a ausência de porosidade no processo e a por não apresentar fragilização pelo hidrogênio.

O aumento da temperatura entre as peças a serem unidas (substrato e pino) é gerado pelo atrito, devido à rotação do pino (consumível) contra o substrato. Esse aquecimento, entre o pino e o substrato, favorece o fluxo plástico, facilitando o preenchimento do furo (Meyer, 2002). O processo de reparo por atrito gera um aquecimento menor que os outros processos de soldagem, conseguindo assim, uma zona termicamente afetada (ZTA) menor.

O reparo tem por objetivo preencher completamente o furo. Entretanto, um baixo aquecimento dos materiais pode resultar em uma ausência do fluxo plástico, gerando assim defeitos na união metalúrgica. Esses defeitos são caracterizados por vazios na interface entre pino (consumível) e substrato, os quais podem vir a comportar como concentradores de tensão.

Um elevado aquecimento dos materiais também deve ser um aspecto a ser observado, pois esse aquecimento pode intensificar as mudanças microestruturais. Essas alterações da microestrutura podem vir a afetar a qualidade do reparo.

Esse trabalho tem como objetivo observar, através da análise metalográfica e dos perfis de microdureza, a influência dos principais parâmetros do processo: geometria do furo e pino, força normal aplicada e rotação do pino, para assim, permitir uma otimização do processo. Isto consiste em otimizar parâmetros do processo visando uma melhor qualidade do reparo, como uma melhor união metalúrgica das interfaces.

## 2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Nesse trabalho foram realizadas várias etapas. Primeiramente realizou-se o reparo por atrito em um equipamento denominado de Unidade Processamento de Pinos por Atrito (UPPA), mostrado na figura 1. Este equipamento permite a aplicação máxima de 50KN de carga normal, rotação de até 8.000 rpm, torque máximo de 57 N.m e deslocamento vertical limite de 45mm, com monitoramento em tempo real desses parâmetros. O equipamento foi desenvolvido por Souza (2006), no Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU (Souza, 2006).

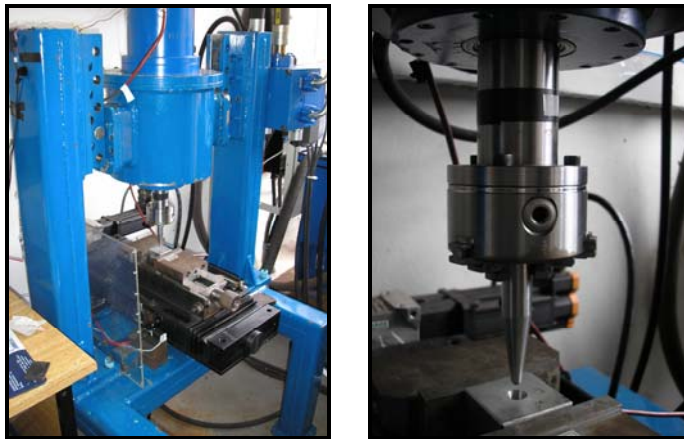


Figura 1: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA).

Para a realização dos ensaios de reparo foram utilizados blocos com furos (substrato) e pinos (consumíveis), fabricados a partir de chapas de aço ASTM A36 e de barras de aço ABNT1010, respectivamente.

Os parâmetros controlados foram: geometria do furo e pino, rotação do pino, força axial de aplicação, comprimento de queima e forjamento, que consiste na aplicação da força utilizada no ensaio após cessada a rotação do pino, durante 3 segundos.

Para a realização dos ensaios foram determinadas 5 geometrias diferentes conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Características das geometrias utilizadas nos ensaios.

Geometria	D(mm)	d(mm)	$\alpha$	R(mm)	e (mm)	$\beta$	R1(mm)
A	17,5	8,50	20°	2,0	8,20	15°	1,0
B	14,0	5,00	20°	2,0	4,20	15°	1,0
C	18,5	8,50	24°	2,0	8,10	19°	1,0
D	12,6	1,92	20°	3,0	0,74	15°	3,0
E	15,8	5,10	20°	3,0	4,10	15°	3,0

Para cada uma das geometrias foram variados os parâmetros: força axial e velocidade de rotação, os quais foram manipulados conforme a matriz de ensaios apresentada na tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros Utilizados na 1ª etapa.

Ensaio	Geometria	Amostra	Força [Kgf]	Rotação [RPM]	Comprimento de queima (mm)	Forjamento
1	A	241A	2000	4000	7,0	2000
2	A	273A	2000	7000	7,0	2000
3	A	374A	3500	7000	7,0	3500
4	A	345A	3500	4000	7,0	3500
5	A	342A	3500	4000	7,0	3500
6	B	241B	2000	4000	8,5	2000
7	B	273B	2000	7000	8,5	2000
8	B	374B	3500	7000	8,5	3500
9	B	342B	3500	4000	8,5	3500
10	C	241C	2000	4000	7,0	2000
11	C	342C	3500	4000	7,0	3500
12	C	273C	2000	7000	7,0	2000
13	C	374C	3500	7000	7,0	3500
14	C	275C	2000	7000	7,0	2000
15	D	241D	2000	4000	6,0	2000
16	D	273D	2000	7000	6,0	2000
17	D	374D	3500	7000	6,0	3500
18	D	342D	3500	4000	6,0	3500
19	D	345D	3500	4000	6,0	3500
20	E	241E	2000	4000	5,0	2000
21	E	273E	2000	7000	5,0	2000
22	E	374E	3500	7000	5,0	3500
23	E	345E	3500	4000	5,0	3500
24	E	342E	3500	4000	5,0	3500

Após a realização de todos os ensaios de reparo foi feita a preparação metalográfica. Primeiramente efetuou-se o corte longitudinal da amostra, utilizando um disco de corte abrasivo. Esse corte foi refrigerado, buscando-se assim minimizar a influência do corte da amostra.

Depois de efetuado o corte, começou-se uma preparação para as análises macrográficas. As amostras foram lixadas utilizando lixas d'água de granulometria 220, 320, 400 e 600, em seguida atacadas com nital 6%. Concluída a macrografia, fez-se um novo lixamento com lixas d'água de granulometria 600 e 1200 para uma análise micrográfica. Para essa análise de micrografia também foi feito um polimento utilizando pasta de diamante de granulometria de  $3\mu\text{m}$ , e posteriormente efetuou-se o ataque com nital 2%.

Após a conclusão das etapas de macrografia e micrografia, iniciou-se os ensaios de microdureza. Foram feitos ensaios Vickers, aplicando uma carga de 50gf durante 15 segundos. O equipamento utilizado para a realização desses ensaios foi um microdurômetro Shimadzu. Também foi definido anteriormente aos ensaios 3 perfis para análise de microdureza, conforme mostra a Figura 2.

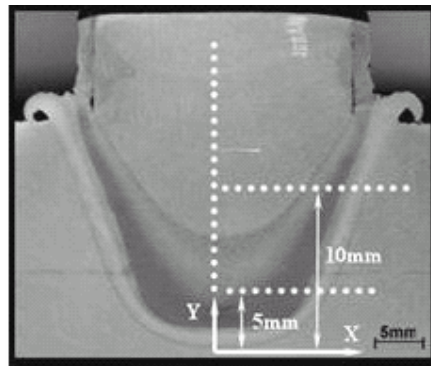


Figura 2: Perfis de microdureza.

O perfil vertical ou perfil Y começa a ser traçado três milímetros abaixo a interface inferior. Os outros dois perfis são perfis horizontais que são traçados a cinco milímetros e a dez milímetros acima da interface.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O monitoramento em tempo real dos parâmetros do ensaio feito por sensores do equipamento é mostrado na figura 3. Esses parâmetros foram: torque, deslocamento axial, força normal aplicada e rotação do pino.

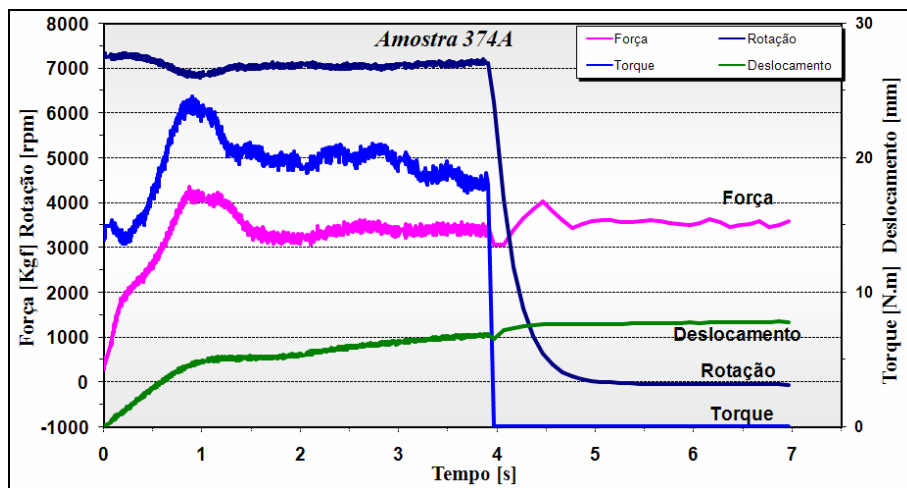


Figura 3: Parâmetros do ensaio de reparo, adquiridos em tempo real.

Com esses parâmetros adquiridos podem ser realizadas comparações dos comportamentos dos pares pinos/substrato quando submetidos a ensaios com diferentes parâmetros, além de permitir uma comparação entre os valores de referências e os valores atingidos. Um ensaio realizado utilizando uma força de 3500 Kgf e uma rotação de 7000 rpm pode ser visto na figura 3. Observando essa figura é possível notar que a rotação se mostra constante e próxima do valor pré-estabelecido. Nessa figura 3, também pode-se observar que a força tem um *overshoot* logo após o início do ensaio, porém depois de um tempo de aproximadamente 1,5 segundos, a mesma se mantém constante e próxima do valor pré-estabelecido.

O torque e o deslocamento axial são adquiridos ao longo do ensaio, sendo que esse deslocamento é dependente da força axial e da velocidade de rotação utilizadas, os quais influenciam no aquecimento e conseqüentemente no fluxo plástico do material.

Através das análises metalográficas pode-se perceber a existência de alguns defeitos, os quais são caracterizados pela falta de preenchimento na interface entre o pino e o substrato. Esses defeitos são encontrados, em sua grande maioria, na interface inferior. A figura 4 ilustra tais falhas na interface inferior. Na figura 4-A encontra-se a macrografia da amostra, onde pode-se ressaltar a presença de defeitos na região da interface inferior, além de verificar a presença de uma ZTA pequena nessa região, quando comparada as outras regiões da amostra. As figuras 4-B e 4-C mostram micrografias da amostra com aumentos diferentes, nas quais pode-se ter detalhes dos defeitos. Através dessas figuras também observa-se que não houve grandes deformações na região do bloco, tornando-se evidente uma separação entre os materiais do pino e bloco, ou seja, evidencia a ausência de uma perfeita união metalúrgica

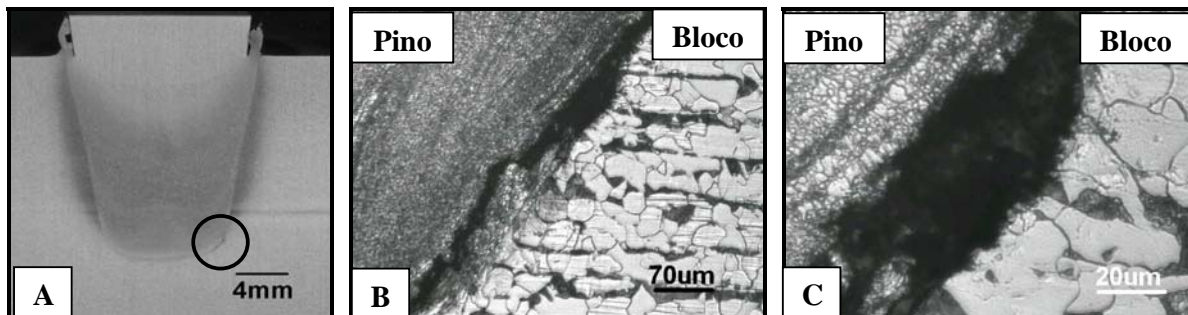


Figura 4: Defeito na interface inferior da amostra 241B: A) Macrografia da amostra B) e C) Micrografias da região do defeito.

Comparando a microestrutura do ensaio 1 (figuras 5 e 6) e a microestrutura do ensaio 6 (figura 4), observa-se um melhor comportamento do primeiro, pois nesse ensaio não há a presença de defeitos. E analisando a macrografia da amostra 241A, mostrada na figura 5, percebe-se uma ZTA ao longo de toda a interface da amostra.

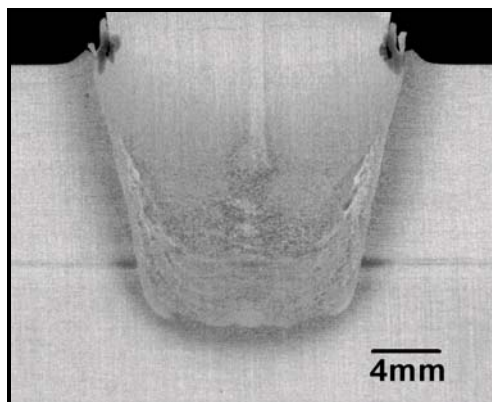


Figura 5: Macrografia da amostra 241A.



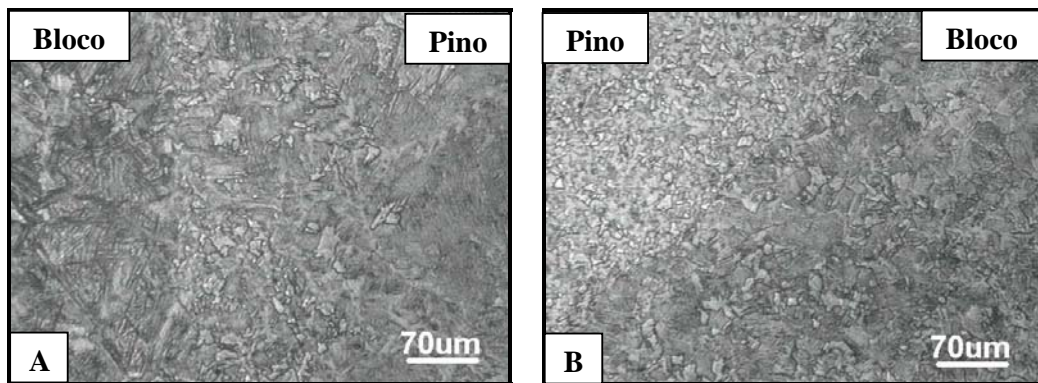


Figura 6: Micrografias de ensaio com amostra 241A: A) Micrografia da interface inferior esquerda B) Micrografia da interface inferior direita.

Baseando-se nas análises acima e na análise da microestrutura das amostras, fica evidenciado que o parâmetro geométrico é o principal responsável, dentro da faixa de força e rotação examinadas, pela formação de falhas e vazios na interface. Esses defeitos foram gerados em consequência da utilização de pequenos raios de concordância (R1 e R) e de um pequeno diâmetro inferior, tanto do pino (e) como do bloco(d).

Geometrias com essas características não apresentam um aquecimento ideal durante o ensaio, o que influencia muito no reparo, pois impede o fluxo plástico necessário na interface inferior. A geometria D também apresenta o mesmo problema da geometria B, uma falta de aquecimento e, conseqüentemente, uma falta de preenchimento na região inferior do reparo, como esta ilustrado na figura 7.

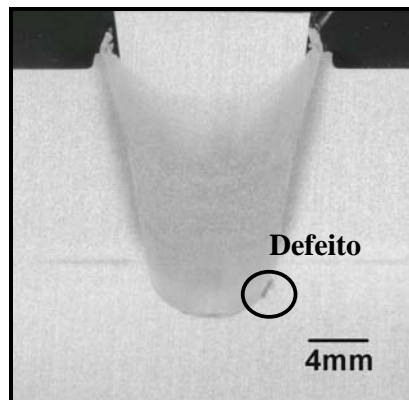


FIGURA 7: Macrografia mostrando defeito na interface inferior da amostra 241D.

As geometrias A, C e E não apresentaram falta de preenchimento nas interfaces em nenhum dos ensaios realizados, evidenciando que a utilização de raios de concordância maiores e de diâmetros inferiores também maiores, proporcionam um aquecimento e um fluxo plástico mais adequado, e então um melhor reparo.

Analisando as microestruturas das amostras, verifica-se que o aumento de temperatura durante os ensaios, submete as amostras a um superaquecimento, em relação à temperatura de austenitização, e a uma intensificação dos processos difusionais, que pode ser comprovado pelas análises micrográficas, ressaltando a predominância de microestrutura formada por ferrita acicular de Widmanstätten, mostrado na figura 8-A. Além dessas, são encontradas microestruturas com aspecto acicular, como demonstra a figura 8-B, e de maior dureza, podendo ser martensitas. Essas microestruturas estão presentes, com maior frequência, nos ensaios feitos com geometrias B e D, as quais apresentam perfis mais estreito, de menor aporte térmico. O aumento de dureza pode ser observado no gráfico de microdurezas, mostrado na figura 9.

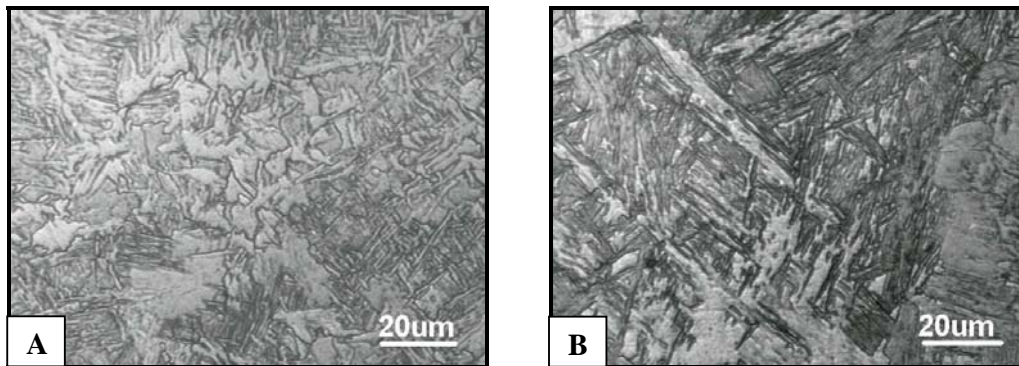


Figura 8: Micrografias das microestruturas: A) Microestrutura formada por ferrita acicular de Widmanstätten B) Microestruturas formadas por ferritas e martensita.

A análise da microdureza também é um fator importante para uma melhor compreensão dos parâmetros. A figura 9 mostra que as amostras com geometria A e C apresentam valores de microdureza semelhantes, sendo esses valores também muito próximos para a geometria E, enquanto a geometria D apresenta uma tendência a ter valores mais elevados em relação às geometrias anteriores. Os valores de A, C e E são próximos devido a grande semelhança entre essas geometrias.

Os gráficos de microdureza também revelam um aumento gradativo dos valores de microdureza da amostra na região de interface entre o substrato e pino, em função da modificação da microestrutura nessa região.

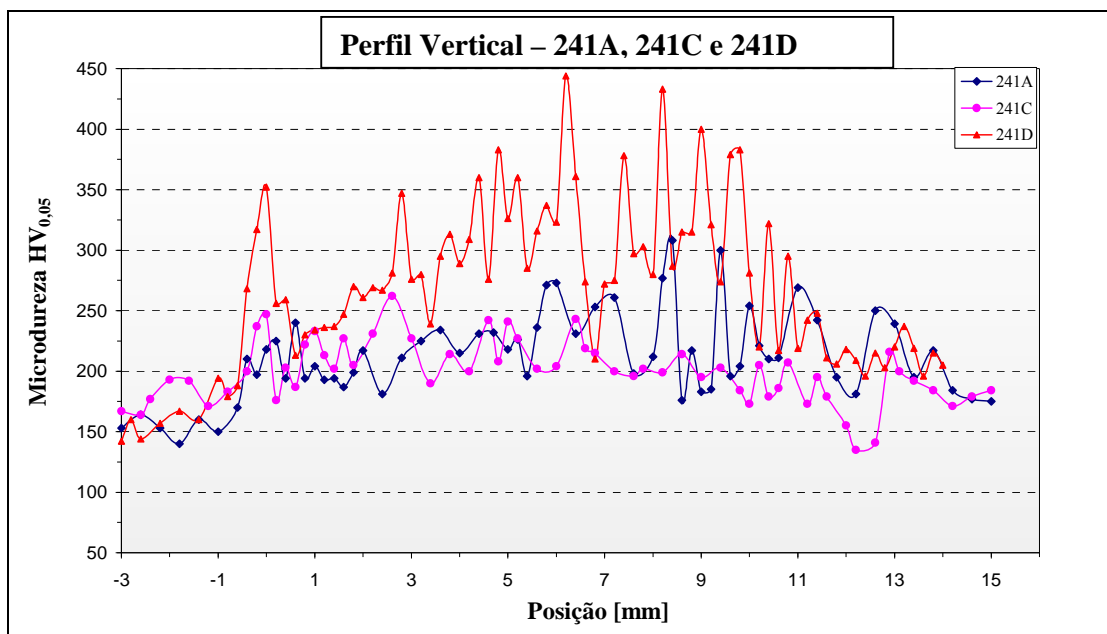


Figura 9: Microdureza do perfil vertical dos ensaios 241A, 241C e 241D.

As figuras 10 e 11 mostram os ensaios de microdureza realizadas em amostras de geometria A. Na figura 10 são mostrados ensaios mantendo a força axial constante em ambos os ensaios e variando apenas a rotação. Na figura 11 é mostrado o ensaio de microdureza mantendo agora a rotação dos dois ensaios e variando a força. Observa-se uma pequena variação dos valores de microdureza, mostrando que para os parâmetros utilizados a força e rotação exercem menor influência que a geometria.

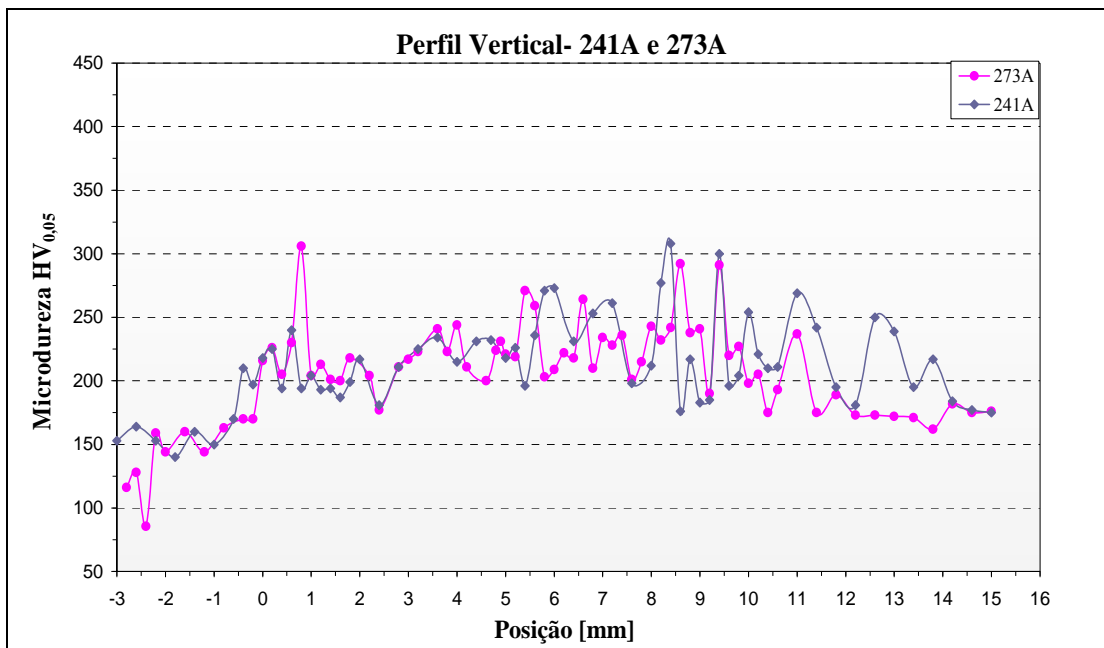


Figura 10: Microdureza do perfil vertical dos ensaios 273A e 241A.

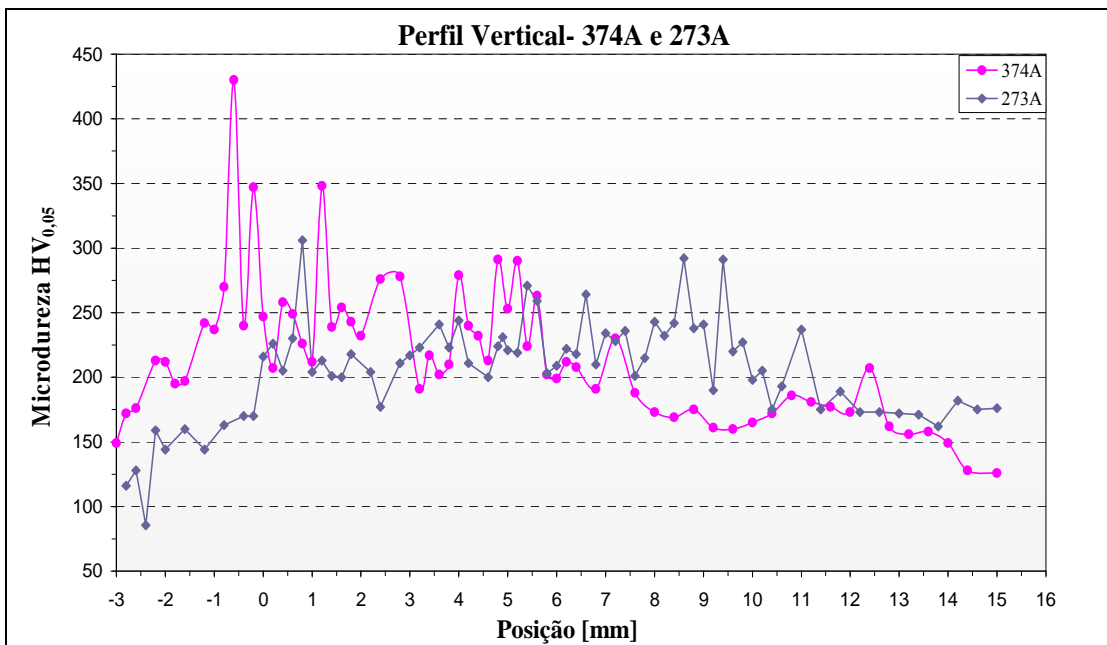


Figura 11: Microdureza do perfil vertical dos ensaios 374A e 273A.

#### 4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados das análises, pode-se concluir que:

- As análises dos ensaios de microdureza e da micrografia são imprescindíveis para melhor compreensão dos parâmetros, uma vez que esses ensaios revelam a mudança ocorrida na microestrutura do material;
- Dentro dos parâmetros observados, a geometrias do furo (substrato) e do pino mostraram grande influência na qualidade do reparo por atrito, visto que, a maioria dos defeitos foram causados pela utilização de geometrias inadequadas;
- Um baixo aquecimento durante a realização do ensaio pode levar a defeitos, principalmente na interface inferior, caracterizados pela falta de preenchimento do furo.



- A rotação e força também são parâmetros que devem ser controlados e bem balanceados para que não haja falha ou defeitos na estrutura da amostra.

## 5. REFERÊNCIAS

- Andrews, R.E., 1990, “Underwater Repair by Friction Stitch Welding”, Metals and Materials, pp 796-797.
- Nixon, J., 1986, Effects of depth on friction stud welding parameters, School of Welding. Cranfield, Cranfield University, England.
- Meyer, A., Friction Hydro Pillar Processing. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, Germany, 2002
- Souza, R.J., 2006, “Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica.

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

### Lucas Antonio Caixeta

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, Uberlândia – MG.  
[lacaixeta@mecanica.ufu.br](mailto:lacaixeta@mecanica.ufu.br)

### Raphael Rezende Pires

Universidade Federal de Uberlândia  
[rpires@mecanica.ufu.br](mailto:rpires@mecanica.ufu.br)

### Marcelo Torres Piza Paes

Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ.  
[mtpp@petrobras.com.br](mailto:mtpp@petrobras.com.br)

### Sinésio Domingues Franco

Universidade Federal de Uberlândia  
[ltm-sdfranco@ufu.br](mailto:ltm-sdfranco@ufu.br)

**Abstract:** *The repairs of mechanicals components are very important in the industry and the quality of these repairs is essential to propitiate a good working to the equipments. In industries of petroleum exploitation, considered classified areas, the Friction Welding Process presents some advantages comparing to the voltaic arc, as the absence of porosity and embrittlement by hydrogen. The friction welding repairs improve more security on in its utilization due to lower temperatures when compared to the arc-voltaic welding and not suffer great influences from the external way. The Friction Welding Process consists of filling a hole, by using a pin submitted to forces and rotation that may lead a metallurgical bond between the parts. This technique presents different results caused by the combination of some parameters and this work has for objective to verify the influence of these parameters, such as: pin and hole geometries, axis force and rotation speed. By studying the results, an optimization of the process may be possible, resulting in a better quality of the repair. The quality can be tested using metallographic analysis and Vickers microhardness test. The geometry of the components, inside the limits of force and rotation analyzed, is the parameter that has most influence to the quality of the repair.*

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