

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UMA UNIDADE DE REPARO POR ATRITO COM CAPACIDADE DE ATÉ 25 TF¹

Camila Monteiro Formoso²
Lucas Antônio Caixeta³
Rony Franco Moura³
Vera Lúcia D. S. Franco⁴
Sinésio Domingues Franco⁵

Resumo

Dificuldades na manutenção de equipamentos utilizados nas extrações de petróleo levaram ao desenvolvimento de uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito. O processo consiste na execução de um furo na superfície danificada, o qual será preenchido por um material submetido a altas rotações e forças axiais, resultando no reparo do local. Devido à recente história do processo, tornou-se necessário desenvolver uma segunda versão do equipamento, capaz de aplicar forças axiais de até 25 tf, possibilitando um melhor estudo da influência de diferentes parâmetros no processo. Para possibilitar a automação desta segunda versão da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito, foi desenvolvido um sistema adaptado ao novo equipamento, de forma a possibilitar o envio dos parâmetros de controle, leitura dos sensores e verificação de erros durante o processo. Desta forma, tornou-se possível a automação do equipamento, bem como a realização de ensaios em laboratório para análise dos resultados, possibilitando a identificação de valores ótimos para aplicação do processo.

Palavras-chave: Processamento de pinos por atrito; Reparo; Controle; Automação.

INSTRUMENTATION AND CONTROL OF A FRICTION HYDRO PILLAR PROCESSING MACHINE UP TO 25 TF

Abstract

During the exploitation and production of oil and gas in deep water, the repair procedures of steel structures faces great problems. To make these repairs easier, a Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) machine was developed. The FHPP technique is a process in which a hole is drilled at the damaged area and filled with a consumable rod of the same material. Owing to the recent history of this process, the influences of processing parameters are not well-known. These facts came as a justification of building a second version of this machine, which is able to apply 25 tf of axial forces, allowing the study of the influences of different parameters in this process. To provide machine automation, a control system was developed, aiming at the optimization of the process and its results. The processing parameters might be adjusted and monitored during the structure repair. In such case, the automation of the equipment became possible, such as the possibility to make repairs at the laboratory, allowing the identification of the best parameters to apply in this process.

Key words: Friction hydro pillar processing; Repair; Control; Automation.

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

² *Engenheira Eletricista*

³ *Graduando em Engenharia Mecatrônica*

⁴ *Orientadora, Doutora em Engenharia Elétrica*

⁵ *Orientador, Doutor em Engenharia Mecânica*

1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias de extração de petróleo, intervenções para manutenção de equipamentos que trabalham em águas profundas se deparam com grandes dificuldades operacionais, como a utilização de mergulhadores, cujo trabalho é restrito a 50 metros de profundidade, ou ainda a utilização de equipamentos de soldagem a arco-elétrico, que podem resultar em uma grande quantidade de defeitos. Além disso, essas operações são realizadas em áreas classificadas, ou seja, onde há riscos de explosão. Para facilitar a execução desses reparos, foi desenvolvido em 1993 um processo denominado *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP), ou Processamento de Pinos por Atrito.⁽¹⁻⁴⁾

Esse processo consiste em fazer um furo cilíndrico ou cônico na região da trinca e, posteriormente, preenchê-lo com um pino (também cilíndrico ou cônico), o qual é submetido a altas rotações e forças axiais. Devido ao atrito entre o pino e a superfície do furo, há o aumento da temperatura das superfícies de contato, o que leva a uma redução do limite de escoamento do material, favorecendo desta forma o fluxo plástico do material do pino.⁽⁵⁾

Em 2006 foi concluída, no Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Uberlândia, a construção de uma primeira versão da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito, capaz de realizar ensaios com rotações de até 8.000 rpm, e forças axiais de até 5 tf. Os detalhes deste equipamento podem ser melhor visualizados no trabalho de Souza.⁽⁶⁾

O processo de reparo por atrito apresenta-se bastante recente e, com isso, surgiu a necessidade de uma avaliação complementar acerca da influência das variáveis do processo, tais como: rotação, força axial e comprimento de queima, sobre a qualidade do reparo. Desta forma, uma segunda versão da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito foi projetada e construída, sendo capaz de aplicar forças axiais de até 25tf, bem como altos torques e baixas rotações. Assim, tornou-se possível a realização de ensaios com novos valores de força axial e rotação, permitindo um estudo adicional sobre a influência dos parâmetros na qualidade do reparo.

Para possibilitar a realização desses ensaios, e a posterior análise da qualidade do material reparado, foi desenvolvido um sistema de monitoramento e controle adequado à segunda versão do equipamento, visando à otimização do processo e dos resultados, bem como o acompanhamento gráfico dos parâmetros em tempo real durante o ensaio.

Neste trabalho, apresentam-se os componentes de instrumentação, as estratégias de programação e o sistema de monitoramento e controle aplicados ao equipamento de reparos por atrito. Além disso, tem-se como objetivo apresentar resultados preliminares obtidos nesse equipamento.

2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO II

Para que se compreenda a instrumentação e controle do equipamento, é necessária uma análise básica de seu funcionamento, uma vez que o condicionamento dos sinais elétricos está diretamente ligado à parte mecânica.

Para realizar ensaios por atrito, é necessário um sistema que permita pressionar o pino contra a amostra, sob altas rotações e forças axiais. Para isto, foi construído um

equipamento onde o pino é acoplado a um eixo. A Cabeça de Reparo por Atrito pode ser dividida em Haste (ou Cilindro) e Motor Hidráulico, conforme Figura 1.

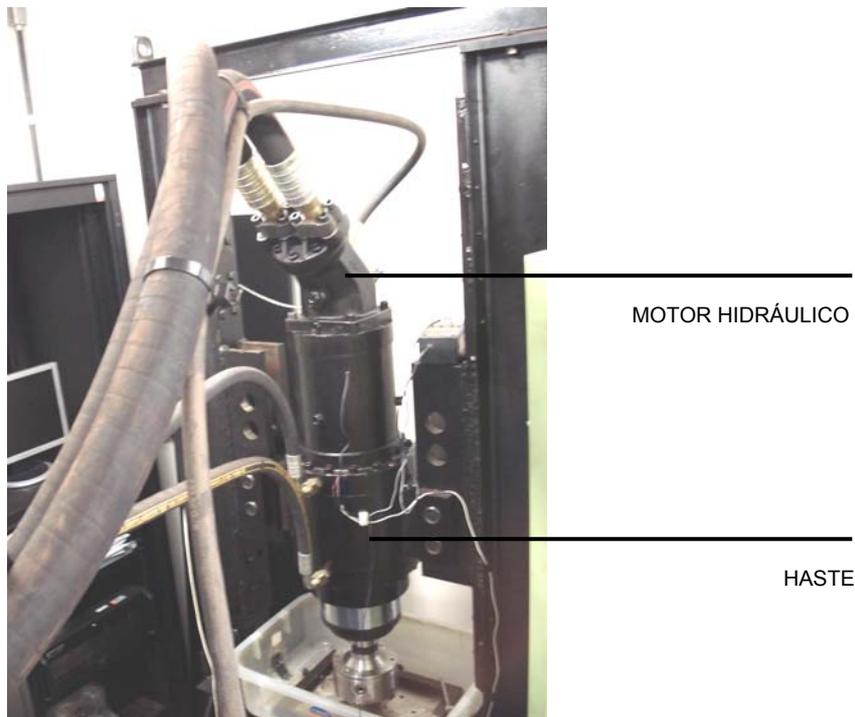


Figura 1. Detalhe da cabeça de reparo por atrito

O equipamento de reparo por atrito é alimentado por uma unidade hidráulica, que pode ser vista na Figura 2.



Figura 2. Unidade hidráulica do segundo equipamento de reparos por atrito

2.1 Comunicações Hidráulicas no Sistema de Força Axial

A Haste é responsável por implementar a Força Axial ao eixo, e pode aplicar uma força de até 25 tf. Para isto, a Haste é dividida em duas partes (entrada e saída), que são conectadas, através de mangueiras, a uma bomba acionada por um motor de indução de 10cv. Este motor e bomba estão inseridos na unidade hidráulica. Desta forma, a Haste recebe o fluxo hidráulico e, através da diferença de pressão entre a entrada e a saída, desloca o eixo aplicando uma força axial.

Este fluxo hidráulico é controlado através de uma válvula direcional proporcional inserida em um Bloco de Válvulas. Através desta válvula consegue-se controlar a pressão e, conseqüentemente, a força axial aplicada no eixo, bem como seu sentido de deslocamento (avanço ou retorno).

2.2 Comunicações Hidráulicas no Sistema de Rotação

O Motor Hidráulico é responsável por implementar a Rotação ao eixo. É conectado por mangueiras a uma bomba acionada por um motor diesel de 180 cv e, através de uma luva acoplada ao eixo, transfere a este a rotação devida ao fluxo hidráulico. Este motor é capaz de gerar uma rotação de até 2500 rpm.

Na unidade hidráulica existe um terceiro motor de indução, de 7,5 cv, o qual é responsável pela circulação e refrigeração do óleo.

3 INSTRUMENTAÇÃO E ELETRÔNICA APLICADOS À UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO II

Para possibilitar a automação do processo, foram instalados sensores de posição, pressão e rotação junto ao equipamento. Estes sensores podem ser visualizados na Figura 3.

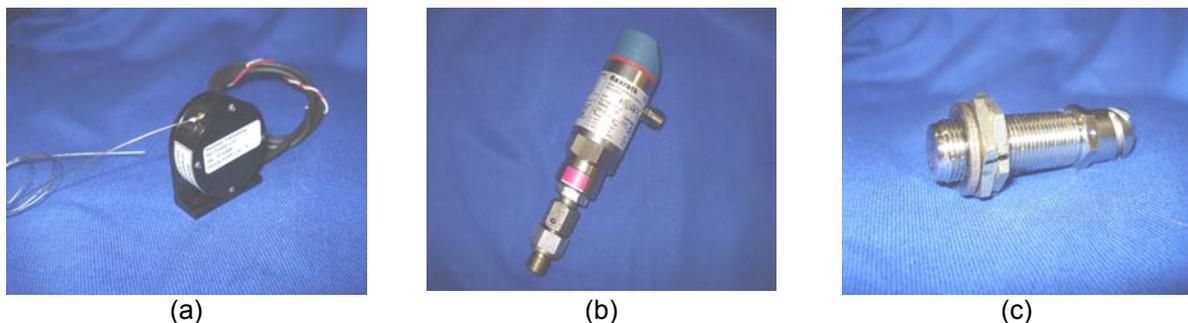


Figura 3. Sensores de: (a) posição, (b) pressão e (c) rotação

Os sensores foram calibrados, e as curvas obtidas apresentaram-se lineares. Dessas curvas foram extraídas as funções de correspondência entre o sinal elétrico do sensor e a grandeza física medida, permitindo a conversão eletrônica do sinal nos programas utilizados para monitoramento e controle.

O sensor de posição utilizado é um sensor do tipo potenciométrico, mostrado na Figura 3 (a), que tem como saída um sinal de tensão contínua proporcional à variação de seu comprimento. Este sensor foi alimentado com uma fonte de 6Vdc.

Para leitura da força axial e do torque, foram utilizados sensores de pressão (Figura 3 (b)) na entrada e na saída da haste e do motor hidráulico, respectivamente. A diferença entre as pressões de entrada e saída do motor hidráulico apresenta-se proporcional ao torque, podendo-se, desta forma, calcular o torque aplicado durante

o ensaio. No cilindro hidráulico, a diferença entre as pressões de entrada e saída determina a força axial aplicada, e é utilizada nos programas para o cálculo da força. Para realizar a diferença entre os sinais elétricos produzidos pelos sensores, foram construídos dois circuitos eletrônicos subtratores, conforme Figura 4.

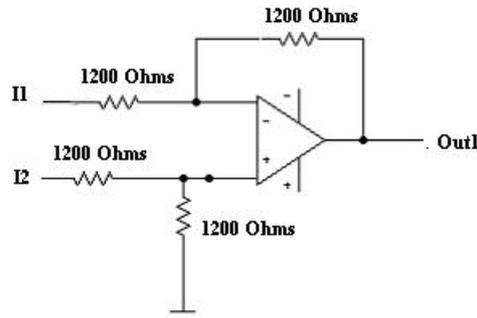


Figura 4. Circuito subtrator

Para a leitura da rotação, utilizou-se um sensor indutivo, ilustrado na Figura 3 (c), o qual utiliza o princípio de relutância magnética. Para a medição da rotação, foi utilizada uma roda dentada metálica que, quando próxima do sensor, este apresenta em sua saída um sinal de pico de 24 Vdc (tensão de alimentação do sensor). Quando o vale da roda passa pelo sensor, o sinal de saída é igual a 0 V. Desta forma, o sinal gerado pelo sensor é pulsado, e mostra-se incompatível com as entradas analógicas do CLP e da placa de aquisição de dados.

Para adequar o sinal do sensor de rotação às entradas analógicas do CLP e da placa de aquisição de dados, foi necessária a construção de um circuito analógico conversor de frequência em tensão, ilustrado na Figura 5.

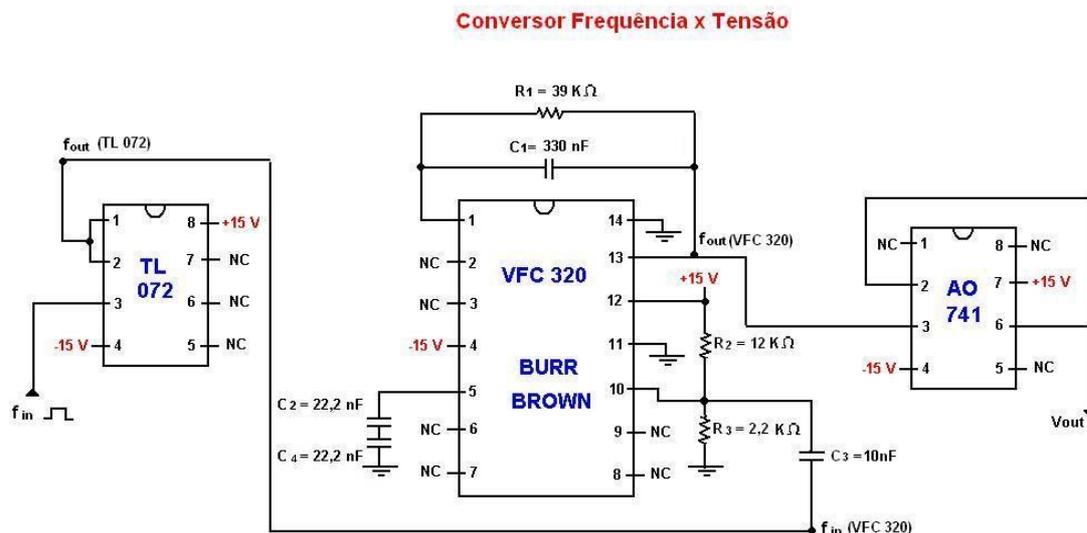


Figura 5. Circuito conversor de frequência em tensão

Através deste circuito, o sinal de saída do sensor indutivo de rotação pode ser convertido em um sinal de tensão contínua. Para a construção deste circuito utilizou-se o circuito integrado VFC320, da Burr Brown, o qual converte um sinal com uma determinada frequência em um sinal de tensão contínua. A saída do conversor

apresentou tensão máxima de 8,5 Vdc, sendo, portanto, possível a leitura do sinal pelo CLP e pela placa de aquisição.

Foi necessário desenvolver uma fonte de tensão de saídas de -15 Vdc, 0 V e +15 Vdc, para alimentação dos circuitos integrados utilizados.

4 SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE

Para o monitoramento dos sinais emitidos pelos sensores, foi desenvolvido um programa através do *software* LabView®, versão 8.2, o qual permite acompanhamento do processo em tempo real através de gráficos de fácil visualização.

A aquisição dos sinais é realizada através de uma placa de aquisição de dados PCI-DAS1602/6 MCC, AD/DA, resolução de 16 bits, 330 kHz, da Measurement Computing Corporation. As portas analógicas da placa operam em tensões de -10 Vdc a +10 Vdc, e as portas digitais operam em nível TTL.

O programa desenvolvido contém uma interface ilustrada na Figura 6, e permite, além do acompanhamento em tempo real do processo, importar dados de arquivo referentes a ensaios anteriores, possibilitando assim a avaliação posterior dos resultados obtidos.

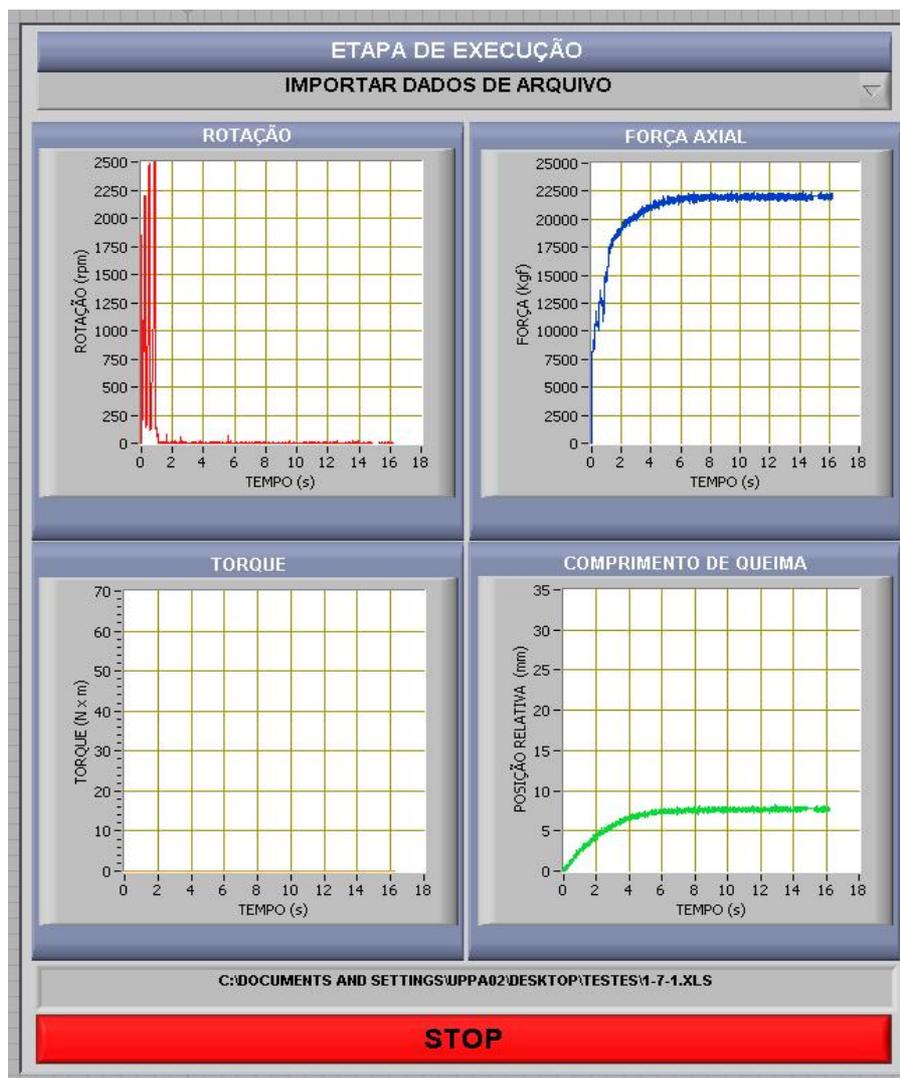


Figura 6. Interface do programa de monitoramento

O controle do processo é realizado através do CLP Siemens SIMATIC S7-200, ilustrado na Figura 7 (a). Para executar o processo, o CLP foi programado em linguagem *ladder* através do *software* Step 7-Micro/Win 32, e conectado a uma Interface Homem-Máquina (IHM) Dakol, mostrada na Figura 7 (b), através da qual o operador pode entrar facilmente com os parâmetros de referência do ensaio. O programa apresenta a seqüência lógica de tomada de decisões necessária para o funcionamento adequado do processo.



Figura 7. (a) CLP Siemens SIMATIC S7-200 e (b) Interface Homem-Máquina

As saídas digitais do CLP são utilizadas, dentre outras funções, para habilitar as válvulas na unidade hidráulica. As entradas analógicas recebem os sinais vindos dos sensores, os quais são processados no programa, determinando os próximos passos referentes ao processo. As saídas analógicas enviam, por fim, os sinais de referência da rotação e força axial para dois cartões controladores PID, os quais atuam sobre as válvulas proporcionais na unidade hidráulica.

O CLP, os controladores e os demais equipamentos eletrônicos encontram-se em um painel elétrico, responsável também pelo acionamento dos motores.

5 SEQÜÊNCIA LÓGICA DO PROCESSO

Para execução de um reparo por atrito, inicialmente o operador deve configurar a IHM com os valores de referência do ensaio, tais como: rotação, força axial, comprimento de queima e forjamento.

Em seguida, tem-se a implementação da rotação em vazio. Para isto, o CLP, através das saídas digitais, liga as válvulas de ventagem da unidade hidráulica, e habilita a válvula do motor diesel. Na seqüência, através da saída analógica, o CLP envia ao controlador PID da rotação um valor em tensão equivalente à rotação determinada pelo operador.

A segunda fase corresponde ao avanço do eixo, já sob rotação. Da mesma forma que na primeira fase, o CLP envia um valor em tensão equivalente à velocidade de deslocamento do eixo, e, enquanto o cilindro avança, o programa verifica o sinal de saída do subtrator (diferença entre os sensores de pressão na entrada e saída da haste). Caso a diferença entre as pressões apresente um valor significativo, o programa passa à terceira etapa.

A terceira etapa do processo corresponde ao reparo por atrito. Assim que esta fase se inicia, o CLP envia à placa de aquisição de dados, contida em um

microcomputador, um sinal digital que dá início ao programa de monitoramento dos sinais. Em seguida, o programa do CLP envia ao cartão PID responsável pelo controle da força axial, o valor referente à força de reparo. Enquanto isso, o programa compara o sinal do sensor de posição com o valor de “comprimento de queima” determinado pelo operador. Enquanto o valor lido pelo sensor for menor que o comprimento de queima estabelecido, o CLP permanece enviando os sinais analógicos, referentes aos valores de rotação e força de reparo, para os controladores PID. Quando o sinal do sensor for maior ou igual ao comprimento de queima, o programa passa à quarta etapa.

A quarta etapa pode encerrar o procedimento de duas formas: com e sem forjamento. Caso o operador tenha escolhido a opção “sem forjamento”, ao final do processo a rotação é mantida e o CLP inverte o sentido de deslocamento do eixo, retornando-o à posição inicial. Em seguida, a rotação é zerada, as válvulas são desabilitadas e o processo se encerra. Caso o operador tenha optado por ensaio “com forjamento”, ao final do processo, ainda na fase plástica, a rotação é zerada e o pino é pressionado contra a amostra, aplicando a força de forjamento, por um tempo também determinado pelo operador. Após este tempo, o processo é encerrado.

Para ambos os casos (com e sem forjamento), o CLP envia um sinal digital para a placa de aquisição de dados do microcomputador, encerrando o programa de monitoramento dos sensores.

A seqüência lógica do processo pode ser visualizada através do fluxograma, ilustrado na Figura 8.

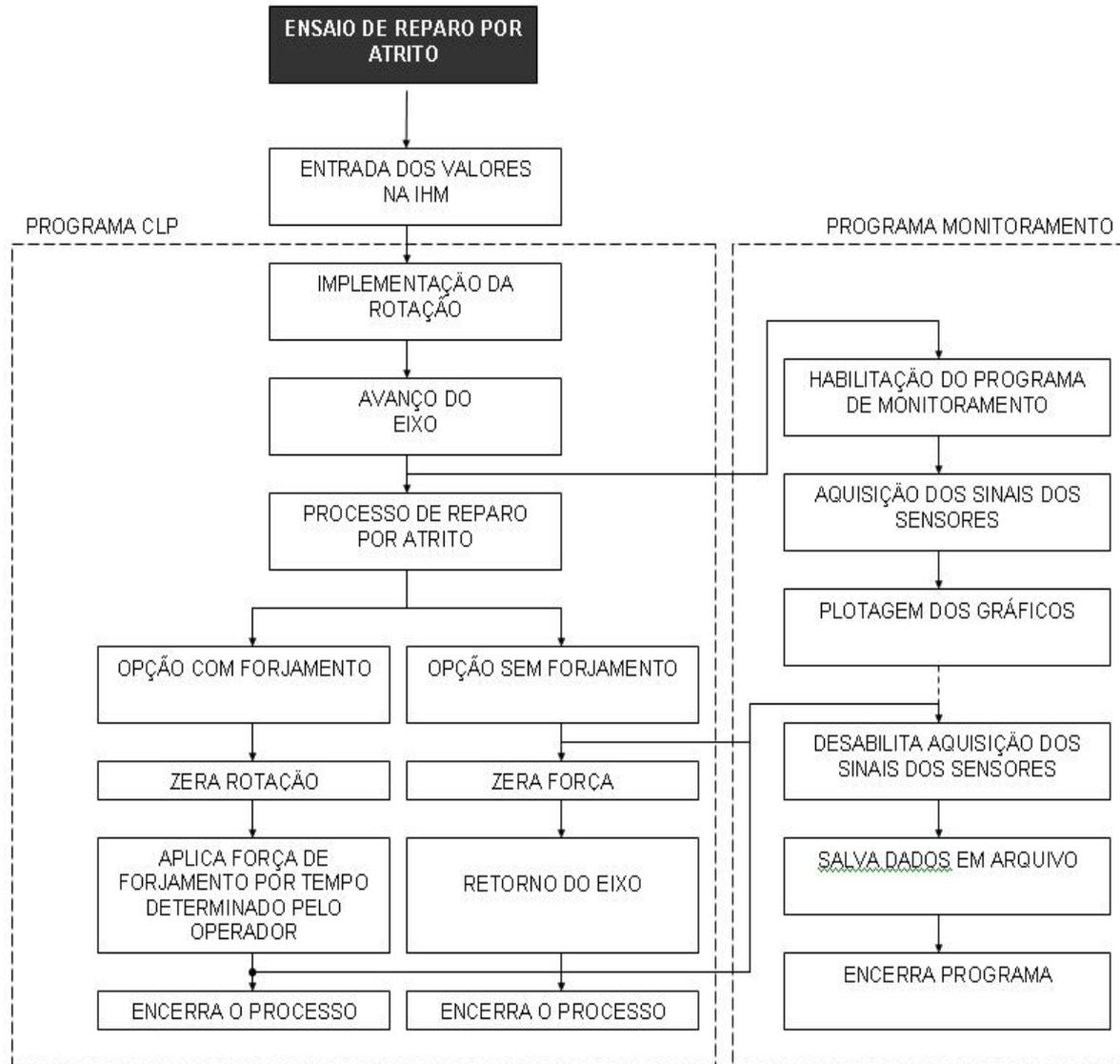


Figura 8. Fluxograma da seqüência lógica do processo de reparo por atrito

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de validar tanto o equipamento, quanto o sistema de controle, alguns processamentos foram realizados variando-se os parâmetros de força axial, velocidade de rotação e comprimento de queima.

Para estes processamentos foram utilizados blocos confeccionados em aço ASTM A36 e pinos em aço ABNT 1010. Nos blocos foram usinados furos cônicos, com ângulo do tronco de cone de 20° e profundidade do furo de 20 mm. Os pinos possuíam um diâmetro máximo de 25,4 mm e ponta também cônica, com ângulo da ponta de 15°.

A Figura 9 apresenta o gráfico gerado com os sinais adquiridos em tempo real para um processamento realizado a uma força de reparo de 18.000 kgf e rotação de 2.500 rpm.

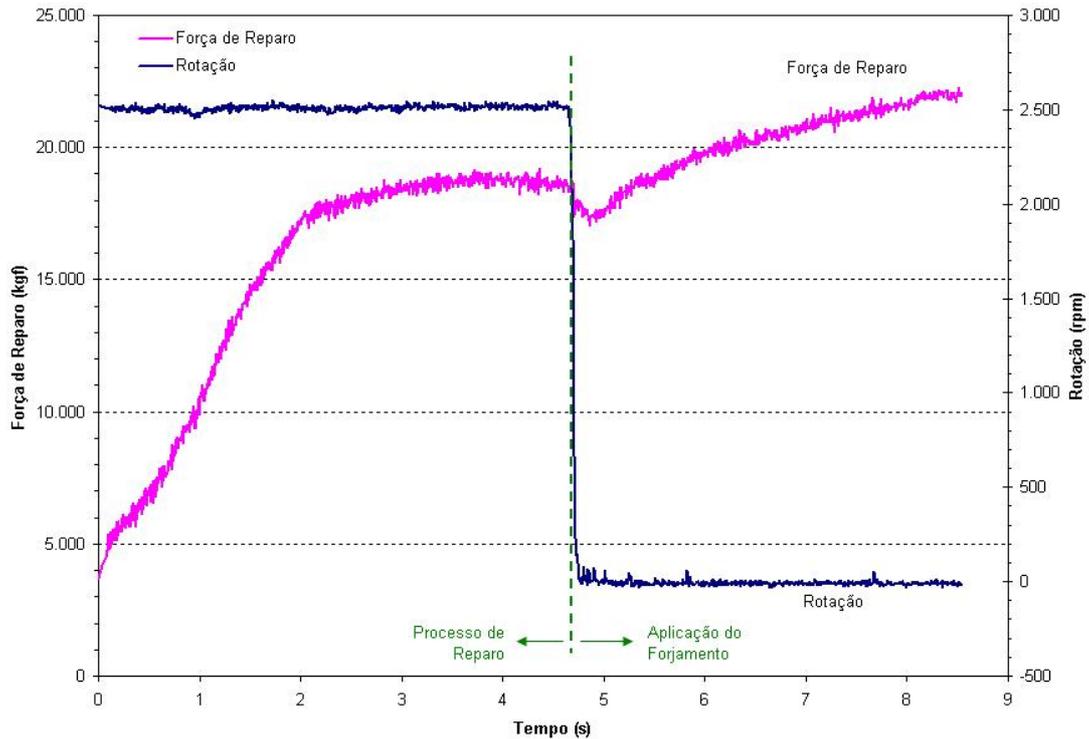


Figura 9. Gráficos de rotação e força adquiridos durante ensaio de reparo por atrito

Através dos gráficos obtidos nos ensaios preliminares, percebeu-se a necessidade de ajustar o controle da força axial, buscando-se reduzir o tempo de alcance da força determinada, bem como aprimorar o controle da força durante a etapa de forjamento. No entanto, apesar da necessidade desses ajustes, pode-se notar através desta figura que a lógica de controle foi eficaz na obtenção e manutenção dos parâmetros controlados nos seus valores preestabelecidos.

As Figuras 10 e 11 apresentam resultados de testes realizados com força axial de 14.000 kgf e rotação de 2400 rpm. Da Figura 10 pode-se notar que os ensaios de preenchimento realizados em condições distintas de força e rotação apresentaram macrograficamente ausência de defeitos ao longo de toda a interface pino/bloco. Desta figura percebe-se, ainda, a formação de uma estreita Zona Termicamente Afetada (ZTA), ao longo de toda a região interfacial.

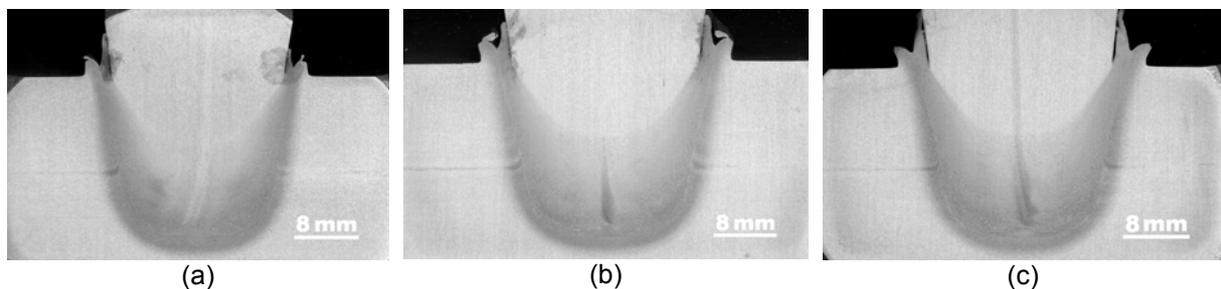


Figura 10. Macrografia das amostras processadas: (a) amostra 1; (b) amostra 2 e (c) amostra 3.

A análise micrográfica constatou também a ausência de defeitos na interface pino/bloco, além de evidenciar uma união metalúrgica entre o material do pino de processamento e o material do bloco. Esta união metalúrgica é constatada também nas extremidades da interface inferior, como pode ser visto na Figura 11. As

extremidades inferiores são consideradas regiões com maior grau de dificuldade de se obter um completo preenchimento livre de defeitos.

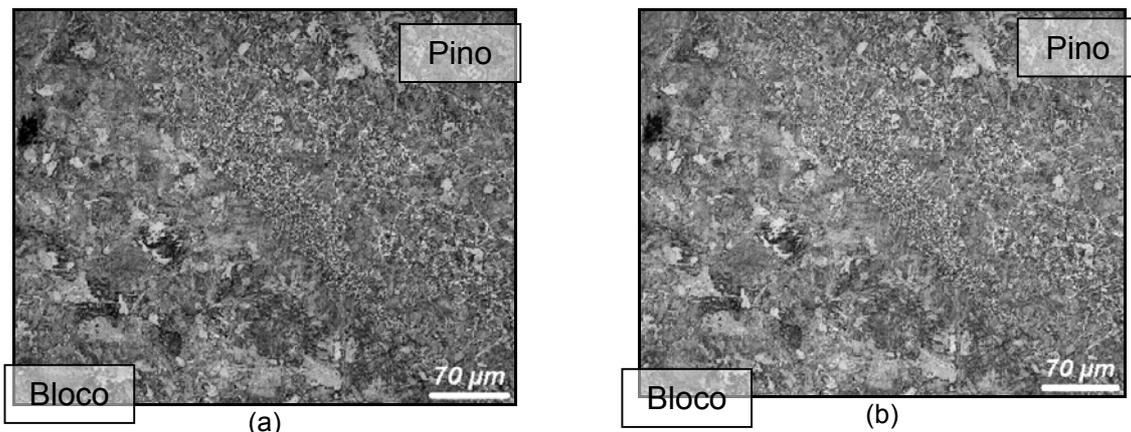


Figura 11. Fotomicrografia realizada na amostra 2: (a) região localizada na interface pino/bloco inferior no lado esquerdo; (b) região localizada na interface pino/bloco inferior no lado direito.

7 CONCLUSÕES

A construção de uma segunda Unidade de Processamento de Pinos por Atrito lançou grandes desafios para a instrumentação e controle do novo equipamento.

Através da utilização de circuitos eletrônicos, foi possível adequar os sinais elétricos, gerados pelos sensores instalados no equipamento, à placa de aquisição de dados. Com isso, através do desenvolvimento de um programa de aquisição de sinais, tornou-se possível monitorar o processo durante os ensaios, através de gráficos que mostram os valores dos parâmetros em tempo real.

O condicionamento dos sinais gerados pelos sensores possibilitou também a aquisição dos mesmos pelo CLP e, através do programa desenvolvido em *ladder*, foi possível realizar a leitura destes sinais, permitindo assim a atuação do programa de acordo com o andamento do processo.

A utilização de controladores PID possibilitou o controle do sistema através de correções em malha fechada, e a aplicação de uma IHM facilitou a operação do equipamento, através de uma tela de fácil utilização.

Desta forma, através da completa automação do equipamento, foi possível a realização de ensaios preliminares e, observando-se os resultados obtidos através das análises de macro e micrografia, pôde-se perceber a ótima qualidade dos reparos obtidos com a segunda versão da unidade de processamento de pinos por atrito, e, ainda, a viabilização de se processar pinos de maiores diâmetros utilizando-se cargas axiais mais elevadas e rotações mais baixas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP e à PETROBRAS pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 ANDREWS, R.E. Underwater repair by friction stich welding, in Metals and Materials. p.796-797, 1990.
- 2 THOMAS, W.D. Nicholas S.D., et al., Friction Forming. patent no. EP 0.602.072 B1, 1992.
- 3 NICHOLAS, E.D. Friction Hydro Pillar Processing, in 11th Annual North American Welding Research Conference, 7-9/11/1995.
- 4 THOMAS, W.M., TEMPEL-SMITH, P. Friction plug extrusion, GB 2.306.365, 1997.
- 5 MEYER, A. Friction Hydro Pillar Processing, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2002.
- 6 SOUZA, R. J. Desenvolvimento, projeto e construção de um equipamento de reparo de trincas por atrito, em dissertação de mestrado para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.