

**BRUNO MAREGA BORGES**

**INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E OPERACIONALIZAÇÃO  
DE UMA UNIDADE DE REPARO POR ATRITO COM  
CAPACIDADE DE CARGA AXIAL DE 500 KN**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2011



**BRUNO MAREGA BORGES**

**INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E OPERACIONALIZAÇÃO  
DE UMA UNIDADE DE REPARO POR ATRITO COM  
CAPACIDADE DE CARGA AXIAL DE 500 KN**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco  
Co-orientadora: Profa. Dra.-Ing. Vera Lúcia D.S. Franco







À meus pais,  
Jair Gonçalves Borges e Rosemar Mary Marega Borges.





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Jair e Rosemar pelo apoio incansável e luta a favor de mais essa conquista em minha vida. A você pai que sempre foi um exemplo para minhas atitudes e decisões ficam os ensinamentos e saudade eterna.

Aos professores Sinésio Domingues Franco e Vera Lúcia D. S. Franco pelo apoio e orientação durante todo o trabalho.

Aos demais professores, engenheiros, técnicos, mestrandos, alunos de iniciação científica, secretária e demais membros do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste – UFU pela troca de conhecimentos e apoio às adversidades que compuseram este trabalho.

Ao engenheiro Lucas Antônio Caixeta pelas informações e experiências transmitidas para o desenvolvimento do trabalho.

À Petróleo Brasileiro S. A. – Petrobras pelo apoio financeiro.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos.



BORGES, B. M., Instrumentação, Controle e Operacionalização de uma Unidade de Reparo por Atrito com Capacidade de Carga de 500 kN, 2011, 99p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil.

### **Resumo**

O presente trabalho apresenta os resultados relativos à instrumentação, controle e operacionalização de uma unidade de reparo por atrito com capacidade de carga axial de 500 kN. Neste caso, um pino é rotacionado e pressionado contra um bloco com um furo. O movimento relativo entre as superfícies cria uma ligação metalúrgica entre o pino e o material do bloco. Após a instrumentação e controle do equipamento, foram realizados ensaios para avaliar a funcionalidade do equipamento e identificar os limites de operação do mesmo. Como parâmetros de processamento, foram controlados os seguintes parâmetros: força, rotação e comprimento de queima. Além desses parâmetros foi adquirido o torque, permitindo assim, o cálculo do aporte térmico na operação. As matrizes de ensaio avaliadas permitiram identificar faixas de operação do equipamento, bem como os efeitos da energia aportada ao sistema sobre as microestruturas formadas e suas propriedades mecânicas. Além disso, pôde-se constatar que a adoção de dois estágios constitui-se numa estratégia importante na execução de ensaios de reparo por atrito.

---

**Palavras-chave:** Instrumentação e Controle, Reparo por Atrito, Efeitos de Parâmetro de Processamento, Microestrutura, Propriedades Mecânicas.



BORGES, B. M., Instrumentation, Control and Operation of a Friction Welding Repair Unit with Load Capacity of 500 kN, 2011, 99p. Master of Science Dissertation in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia-MG, Brazil.

### **Abstract**

This work presents the results for the instrumentation, control and operation of a friction hidro pillar processing unit with an axial load capacity of 500 kN. In this case, a pin is rotated and pressed against a block with a hole. The relative motion between the surfaces creates a metallurgical bond between the pin and block material. After its instrumentation and control, tests were carried out to evaluate the functionality of the equipment and identify the limits of its operating parameters. The following parameters were controlled: axial force, rotational speed and burn-of-length. In addition to these parameters was acquired the torque, thus allowing the calculation of heat input in the operation. Welding parameter matrices were evaluated making it possible to identify the unit operating ranges as well as the effects of the input energy on the final microstructure and mechanical properties. Moreover, it was observed that using a two-stage cycle may be an important strategy to overcome some difficulties during friction hidro pillar processing.

---

**Keywords:** Instrumentation and Control, Friction Hidro Pillar Processing, Effects of Processing Parameters, Microstructure, Mechanical Properties.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processamento de pinos por atrito através do preenchimento de um furo .....	03
Figura 2.1 – Número de publicações envolvendo a soldagem por atrito (PINHEIRO, 2008) .....	07
Figura 2.2 - Fases do Processo de Soldagem por Atrito e comportamento característico de acordo com os parâmetros relacionados. (MEYER, 2003) .....	10
Figura 2.3 – Macrografia de uma FPTW. (BEAMISH 2003 citado por MEYER 2008) .....	14
Figura 2.4 – Sistema montado para realização de ensaios FTPW. (HWANG, 2010) 2009 .....	15
Figura 2.5 - Reparo por atrito. (1) material base e (2) Pino e (3) junção. Sequência de processamento: (a) Aplicação de velocidade rotacional no pino. (b) Força axial no pino girando e aproximação dele ao material base e (c) formação da ligação metalúrgica e geração da zona afetada pelo calor e a deformação. (UNFRIED et al, 2009) .....	16
Figura 2.6 – Regiões características de um preenchimento por atrito, com a inserção de um pino de aço carbono em um substrato de aço Cr-Mo (BLACKEMORE, 1999) .....	16
Figura 2.7 – Croqui do processo de Costura por Atrito para reparo de trincas. a) Reparo de uma chapa plana. b) Reparo de um tubo (Friction Taper Plug Welding) .....	17
.Figura 2.8 – Croqui da técnica de Revestimento por Atrito .....	19

Figura 2.9 – Principais partes da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito .....	20
Figura 2.10 - Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1; a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas, b) Pórtico de Reparo, c) Esquema geral .....	21
Figura 2.11 – Pórtico de reparo da UPPA2 com motor hidráulico e cilindro de aplicação de força em base única .....	22
Figura 3.1 – Vista tridimensional do projeto da Unidade de Processamento de pinos por Atrito 3 .....	26
Figura 3.2 – Simulação de perfil “I” dupla alma. a) Simulação de tensões equivalentes (Von Mises); b) Simulação de deformação total .....	27
Figura 3.3 – Cilindro hidráulico para aplicação de cargas com pressão de trabalho de 250 bar fabricado pela Bosch Rexroth acoplado ao pórtico .....	28
Figura 3.4 – Conjunto Pórtico de Reparo por atrito sem ligação de mangueiras e sensores .....	29
Figura 3.5 – Detalhes do porta blocos (a) e placa de castanha (b) para fixação de corpos de prova .....	29
Figura 3.6 – Bloco de válvulas composto por válvulas proporcionais servo controladas e transdutores de pressão .....	30
Figura 3.7 – Disposição de mangueiras para alta pressão conectadas no motor e cilindro hidráulicos .....	31
Figura 3.8 – Conexões do cilindro hidráulico para aplicação de força; a) conexões iniciais que apresentaram vazamentos; b) conexões soldadas com vedação total e sem presença de vazamentos .....	32
Figura 3.9 – Bomba com motor de 10 cv acoplada a uma válvula limitadora de pressão .....	32



Figura 3.10 – Terminal e conexão da mangueira de dreno do motor hidráulico .....	33
Figura 3.11 - Acoplamento flexível .....	33
Figura 3.12 – Torquímetro sistema Monitorq <sup>TM</sup> .....	34
Figura 3.13 – Vista explodida dos componentes do torquímetro; 1:Cubo; 2:Anel de Poliuretano; 3: Anel de Poliamida; 4:parafuso de fixação do anel; 5:parafuso de travamento do cubo no eixo rotativo. ( <i>Installation and Maintenance Instructions SAMIFLEX Couplings Type A &amp; C – Autogard</i> ) .....	34
Figura 3.14 – Estruturas danificadas após primeiros testes de rotação; a) Parte do acoplamento flexível GUMMI A-60 danificado; b) Cubo em ferro fundido com 2 dentes rompidos. C) Dentes do cubo de ferro fundido .....	35
Figura 3.15 – Cubos para acoplamento do torquímetro e placa de alumínio para ajuste de altura do flange do motor hidráulico .....	36
Figura 3.16 – Cubo de aço SAE 1045 acoplado ao eixo do motor hidráulico .....	36
Figura 3.17 – Painel de acionamentos elétricos e comandos para controle do equipamento de reparos por atrito .....	37
Figura 3.18 – Sistema de medição da rotação com sensor indutivo .....	38
Figura 3.19 - Detalhe da primeira disposição do transdutor de deslocamento .....	39
Figura 3.20 – Nova fixação do sensor de deslocamento .....	39
Figura 3.21 - Detalhes do sensor de rotação acoplado ao motor hidráulico e do receptor do sinal de torque via onda de rádio .....	40
Figura 3.22 – Interface Homem Máquina para configuração de parâmetros .....	41
Figura 4.1 – Função de transferência do sensor de deslocamento.....	43
Figura 4.2 – Montagem do sistema de calibração da força axial .....	44
Figura 4.3 – Função de transferência do sistema de força .....	45

Figura 4.4 – Função de transferência do sensor de rotação e conversor de frequência.....	47
Figura 4.5 – Sistema de verificação de funcionamento do torquímetro por telemetria.....	48
Figura 4.6 – Curvas da função resposta para o carregamento e descarregamento estático .....	49
Figura 5.1 – Geometria “H” para pino e bloco utilizados em ensaios preliminares e de preenchimento .....	52
Figura 5.2 – Geometrias de pinos e blocos utilizados nos ensaios de preenchimento; a) Pino e bloco geometria “A”; b) Pino e bloco geometria “B” .....	55
Figura 5.3 – Posicionamento para levantamento de perfis de microdureza e principais regiões de interesse .....	59
Figura 6.1 – Primeiros sinais adquiridos para sistema controlado, com pino cilíndrico, sem a geometria de preenchimento .....	62
Figura 6.2 – Sinais adquiridos para carga de 60 kN, um estágio, geometria “A” .....	65
Figura 6.3 - Sinais adquiridos para carga de 100 kN, dois estágios, geometria “A” .....	66
Figura 6.4 - Sinais adquiridos para carga de 200 kN, dois estágios, geometria “A” .....	67
Figura 6.5 - Sinais adquiridos para carga de 300 kN, dois estágios, geometria “A” .....	67
Figura 6.6 - Sinais adquiridos para carga de 400 kN, dois estágios, geometria “A” .....	68
Figura 6.7 - Sinais adquiridos para carga de 60 kN, um estágio, geometria “B” .....	69

Figura 6.8 - Sinais adquiridos para carga de 100 kN, dois estágios, geometria “B” .....	69
Figura 6.9 - Sinais adquiridos para carga de 200 kN, dois estágios, geometria “B” .....	70
Figura 6.10 - Sinais adquiridos para carga de 300 kN, dois estágios, geometria “B” .....	71
Figura 6.11 - Sinais adquiridos para carga de 400 kN, dois estágios, geometria “B” .....	71
Figura 6.12 - Sinais adquiridos para carga de 100 kN, dois estágios, geometria “H” .....	72
Figura 6.13 - Sinais adquiridos para carga de 200 kN, dois estágios, geometria “H” .....	73
Figura 6.14 - Sinais adquiridos para carga de 300 kN, dois estágios, geometria “H” .....	73
Figura 6.15 - Sinais adquiridos para carga de 400 kN, dois estágios, geometria “H” .....	74
Figura 6.16 – Macrografias referentes aos ensaios de 1 a 5, utilizando a geometria “A” .....	75
Figura 6.17 – (a) Região contendo óxido na interface da amostra A06; (b) Espectro de raios-X do ponto 1 de (a), MEV .....	76
Figura 6.18 - (a) Região da amostra B06 com óxidos acumulados na interface; (b) Espectro de raios-X do ponto 1 de (a), MEV.....	77
Figura 6.19 – Macrografias dos ensaios de número 6 a 10, utilizando a geometria “B” .....	78
Figura 6.20 - (a) Região contendo óxido na interface da amostra B06; (b) Espectro de raios-X do ponto 1 de (a) .....	79

Figura 6.21 – Região de interface entre pino e bloco para amostra A10 (geometria A, 100 kN, dois estágios) .....	80
Figura 6.22 – Macrografias dos ensaios 4 a 7, geometria “H” .....	81
Figura 6.23 – Detalhe da região composta pela formação de provável óxido no ensaio 7.....	82
Figura 6.24 – Interface lado direito do ensaio com 300 kN, dois estágios, geometria “H” .....	83
Figura 6.25 – Perfil <b>horizontal</b> de microdureza Vickers situado a 5 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “A” .....	84
Figura 6.26 – Perfil <b>horizontal</b> de microdureza Vickers situado a 10 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “A” .....	85
Figura 6.27 – Perfil <b>vertical</b> de microdureza Vickers para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “A” .....	86
Figura 6.28 – Perfil <b>horizontal</b> de microdureza Vickers situado a 5 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “B” .....	86
Figura 6.29 – Perfil <b>horizontal</b> de microdureza Vickers situado a 10 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “B” .....	87
Figura 6.30 – Perfil <b>vertical</b> de microdureza Vickers para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “B” .....	87
Figura 6.31 – Perfil <b>horizontal</b> de microdureza Vickers situado a 5 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H” .....	88
Figura 6.32 – Perfil <b>horizontal</b> de microdureza Vickers situado a 10 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H” .....	88
Figura 6.33 – Perfil <b>horizontal</b> de microdureza Vickers situado a 20 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H” .....	89
Figura 6.34 – Perfil <b>vertical</b> de microdureza Vickers para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H” .....	90

Figura 6.35 – Tempos gastos para ensaios das Tabelas 5.2 e 5.4 .....	91
Figura 6.36 – Energia gasta em cada ensaio realizado até o encerramento da velocidade de rotação .....	92



## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Composição química de materiais utilizados em testes e ensaios (% em peso) .....	50
Tabela 5.2 – Matriz de ensaios preliminares com geometria “H” e rotação de 1700 rpm .....	52
Tabela 5.3 – Matriz preliminar para definição de comprimento de queima, utilizando-se uma força de 200 kN .....	52
Tabela 5.4 – Matriz de ensaios de preenchimento para geometrias “A” e “B”. O comprimento de queima do primeiro estágio foi de 5 mm e do segundo de 3 mm.....	55





## LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM: American Society for Testing and Materials

BSP: British Standard Pipe

CENPES: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello

FHPP: Friction Hydro Pillar Processing

FPPW: Friction Pull Plug Welding

FS: Friction Surfacing

FTPW: Friction Taper Plug Welding

FTSW: Friction Taper Stich Welding

Kd: constante derivativa

Ki: constante integral

Kp: constante proporcional

LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

PID: Proporcional Integral Derivativo

SAE: Society of Automobile Engineers

UPPA: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito

ZAC: Zona Afetada Pelo Calor



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>06</b>
<b>2.1 – Soldagem por Atrito .....</b>	<b>06</b>
2.1.1 – <i>Energia de Processamento .....</i>	<i>09</i>
2.1.2 – <i>Fases do Processo .....</i>	<i>09</i>
2.1.3 – <i>Parâmetros de Influência no Processo .....</i>	<i>11</i>
<b>2.2 – Reparo por Atrito .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 – <i>Técnicas de Processamento .....</i>	<i>13</i>
<b>2.3 – Unidades de Reparos por Atrito .....</b>	<b>19</b>
2.3.1 - <i>Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA) .....</i>	<i>19</i>
2.3.2 – <i>Versões já Desenvolvidas e Características .....</i>	<i>20</i>
2.3.3 – <i>Unidade de Processamento de Pinos por Atrito .....</i>	<i>23</i>
<b>CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DA UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO PARA CARGAS DE ATÉ 500 kN .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 – Montagem do Sistema Mecânico .....</b>	<b>25</b>
3.1.1 – <i>Ligações Hidráulicas .....</i>	<i>30</i>
3.1.2- <i>Acoplamento do Torquímetro .....</i>	<i>33</i>
<b>3.2 – Painel de Acionamentos Elétricos e Comandos .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3 – Instrumentação e Sistema de Controle .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 – <i>Sensores para Aquisição de Dados .....</i>	<i>38</i>

3.3.2 – Programação para o Controle do Sistema .....	40
<b>CAPÍTULO 4 – VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS SENSORES E LEVANTAMENTO DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA .....</b>	<b>42</b>
4.1 – Verificação do Funcionamento do Sensor de Deslocamento .....	42
4.2 – Verificação do Funcionamento do Sensor da Força Axial .....	43
4.3 – Verificação da Velocidade de Rotação .....	46
4.4 – Verificação do Torque .....	47
<b>CAPÍTULO 5 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>50</b>
5.1 – Ensaio Preliminares .....	50
5.1.1 – Materiais e Geometrias Utilizadas .....	50
5.1.2 – Matriz para Teste de Funcionalidade .....	52
5.1.3 – Procedimentos para Realização de Testes .....	54
5.2 – Ensaio de Preenchimento .....	54
5.2.1 – Materiais e Geometrias para Pino e Bloco .....	54
5.2.2 – Matriz de Ensaio de Preenchimento .....	55
5.2.3 – Procedimentos para Reparos por Atrito .....	56
5.3 – Aquisição de Dados.....	57
5.4 – Preparação Metalográfica .....	57
5.4.1 – Macrografia .....	57
5.4.2 – Micrografia .....	58
5.5 – Ensaio de Microdureza Vickers .....	59

<b>CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSÕES .....</b>	<b>60</b>
6.1 – Operacionalização do Sistema .....	60
6.2 – Ensaios Preliminares .....	61
6.3 – Ensaios de Preenchimento .....	64
6.4 – Macro e Micrografia .....	74
6.5 – Ensaios de Microdureza Vickers .....	84
6.6 – Energia de Processamento .....	90
 <b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES .....</b>	 <b>94</b>
 <b>CAPÍTULO 8 – TRABALHOS FUTUROS .....</b>	 <b>96</b>
 <b>CAPÍTULO 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>97</b>

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

A soldagem está presente em processos industriais e é um método fundamental na união de materiais a nível atômico. O desenvolvimento da indústria do petróleo, junto às novas descobertas de reservas de petróleo e gás, tem incentivado a pesquisa e a melhoria dos processos de soldagem e técnicas afins.

Novos campos descobertos na área do pré-sal dispõem de riquezas que necessitam de novos recursos tecnológicos para serem extraídas. As paredes de tanques e tubulações de plataformas de petróleo sofrem com a dinâmica do transporte, armazenamento e intempéries. Isso pode provocar a formação de trincas que podem causar a ruptura do material que compõe essas estruturas, causando prejuízos diversos e possibilitando o acontecimento de acidentes.

Dentre as diversas empresas do setor petrolífero, destaca-se a Petróleo Brasileiro S.A., comercialmente conhecida como Petrobras. Ela atua de forma integrada nas atividades de exploração e produção, refino, comercialização, transporte e petroquímica, distribuição de derivados, gás natural, biocombustíveis e energia elétrica.

As parcerias tecnológicas desenvolvidas com as Universidades e Institutos de Pesquisa criaram modelos coordenados pelo Cenpes - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello – o qual atende às demandas tecnológicas que impulsionam a Petrobras. Os modelos estratégicos são os núcleos de competências e as redes temáticas. Estes modelos prevêm a criação de infraestrutura necessária ao desenvolvimento de projetos de pesquisa nas instituições parceiras e a formação de recursos humanos compatível com as demandas identificadas (<<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/>>. Acesso em: 8 jun. 2010).

Com a criação de projetos e parcerias entre empresas, universidades e demais instituições de pesquisa e desenvolvimento tem-se um crescimento na área

tecnológica, colaborando para maior competitividade nacional no mercado mundial. Uma pequena porcentagem da receita bruta de grandes empresas pode fazer grande diferença para a pesquisa e desenvolvimento.

Para manter-se como referência na competição mundial, uma tecnologia requer desenvolvimentos a fim de minimizar custos para operação de seu processo. Dessa forma, novas técnicas, materiais e mecanismos necessários para a concretização de um objetivo são desenvolvidos.

A manutenção de sistemas produtivos pode estar relacionada com paradas de produção e desperdício de tempo, principalmente para a indústria de produção de petróleo. Além disso, somam-se os riscos encontrados devido aos ambientes hostis que sistemas de produção e transporte podem estar sujeitos.

Para manter os sistemas de produção e transporte em operação, tem-se desenvolvido técnicas alternativas de união de estruturas afins. Particularmente, cita-se o reparo submerso de estruturas *offshore* e oleodutos. Por muitos anos foram utilizados processos de soldagem por fusão na grande maioria dos casos (MINERALS MANAGEMENT SERVICE, 2000 citado por MEYER, 2003). Nestas situações, a coexistência simultânea do arco elétrico e o aço fundido em ambiente muito úmido ou totalmente molhado tem sido a preocupação de sociedades de certificação e descontentamento de operadores (POPE et. al, 1997 citado por MEYER, 2003).

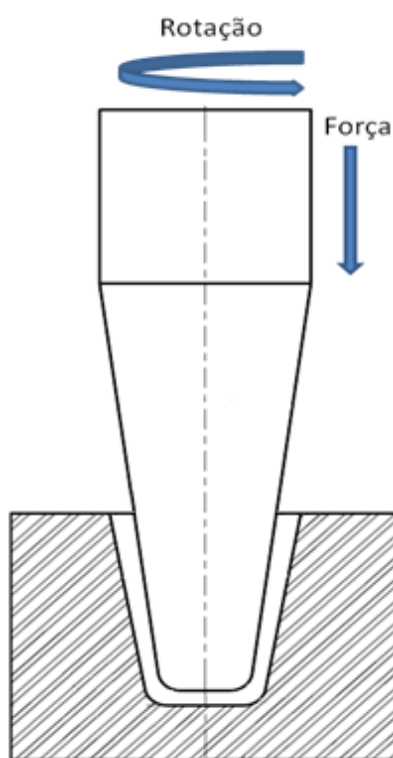
A aplicação de técnicas que envolvem altas temperaturas e arco elétrico promove o risco de operação e a aplicação em áreas classificadas. Além disso, existem problemas relacionados à fusão e solidificação, como a adsorção de gases da atmosfera pela poça de fusão, levando à formação de fases frágeis de baixa tenacidade à fratura, além da fragilização pelo hidrogênio e a formação de poros no interior do cordão de solda.

Diante desse contexto, novas técnicas foram desenvolvidas a fim de minimizar ou eliminar problemas até então encontrados nos métodos tradicionais de soldagem, os quais se caracterizam pelo baixo nível de calor aportado, gases residuais excessivos e periculosidade envolvida de aplicação em áreas classificadas.

Para atender a esses requisitos, é estudada a técnica de reparos por atrito, originada da soldagem por atrito. Ela tem sido aceita na indústria como um processo

que produz soldas de alta integridade, com boas estruturas metalúrgicas, não apenas no aço-carbono, mas também na combinação de diversos materiais. O uso da técnica para muitos componentes com tempo de vida crítico provoca um endosso impressionante da qualidade inerente e da repetibilidade do processo (BLAKEMORE, 1993).

O processamento de pinos por atrito consiste na introdução de um pino com formato cilíndrico e ponta cônica no interior de um furo. Esse furo geralmente é cônico e encontrado no material de um bloco usinado a partir de uma chapa. O pino é introduzido com determinada rotação e força sobre o bloco, estabelecendo um contato entre a superfície do pino e a parte interna do furo, Figura 1. O movimento relativo entre as superfícies gera um aquecimento devido ao atrito, o que gera um fluxo de material plastificado próximo à região de contato. Este fenômeno cria uma ligação metalúrgica entre o pino e o material do bloco.



**Figura 1** – Processamento de pinos por atrito através do preenchimento de um furo.

As modificações estruturais e propriedades mecânicas estão relacionadas com muitas variáveis do processo, e não há uma relação direta simples que defina até que níveis de operação os parâmetros devem ser tratados e o impacto que cada um tem na qualidade do reparo.



Diante dos diversos parâmetros do processo, faz-se necessário o desenvolvimento de um sistema eletromecânico robusto e controlado. Para tanto, há uma necessidade de implantar toda uma instrumentação específica para aquisição de dados que permitem a análise dos ensaios de reparo por atrito.

A exploração da técnica de reparo por atrito iniciou-se com a construção de uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA1). Esse equipamento aplica cargas de até 5 tf e rotações de até 8 mil rpm. Para explorar diferentes faixas de operação para a técnica de reparo por atrito, uma segunda versão foi desenvolvida, a qual está projetada para atingir forças de até 25 tf. Após trabalhos com geometrias variadas e aplicação de diferentes valores para os parâmetros do processo, uma terceira versão foi proposta para execução da técnica com cargas mais elevadas, projetada para suportar cargas de até 50 tf. Uma quarta versão também já foi desenvolvida no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), a qual possui a flexibilidade de portabilização para aplicações a campo em ambiente submerso (água do mar).

Assim, o objetivo deste trabalho foi executar a instrumentação, controle e montagem final do equipamento de reparos por atrito com cargas de até 500 kN. Além disso, realizar ensaios em corpos de prova com geometria específica para avaliar a eficiência da técnica. Para tanto, tem-se a operacionalização do equipamento com montagem do sistema mecânico, instrumentação com sensores diversos e demais estruturas necessárias para a aquisição dos parâmetros de controle e leitura. A partir de ensaios preliminares foi possível verificar os limites de operação do equipamento para as dimensões do corpo de prova e material utilizados. Pretendeu-se ainda avaliar a microestrutura e a qualidade final da união metalúrgica encontrada com o reparo por atrito com auxílio da infraestrutura oferecida pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste.

Este trabalho está organizado de acordo com a descrição dos seguintes capítulos:

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a soldagem por atrito e demais técnicas de reparo em desenvolvimento.

No capítulo 3 são descritos os principais sistemas que compõem o equipamento de reparos por atrito desenvolvido.

No capítulo 4 encontram-se todas as verificações de funcionamento para os diversos sensores que compõem o equipamento de reparo por atrito. Foram

levantadas diversas curvas que correspondem às saídas dos parâmetros do processo a partir de níveis de tensão correspondentes.

No capítulo 5 estão descritos os procedimentos experimentais para a realização dos ensaios preliminares e ensaios de preenchimento. Também se encontra a forma de aquisição dos sinais e procedimentos para ensaios de microdureza Vickers.

No capítulo 6 são apresentados os resultados e discussões do trabalho tanto para funcionamento quanto para os ensaios realizados.

No capítulo 7 encontram-se as principais conclusões obtidas.

No capítulo 8 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

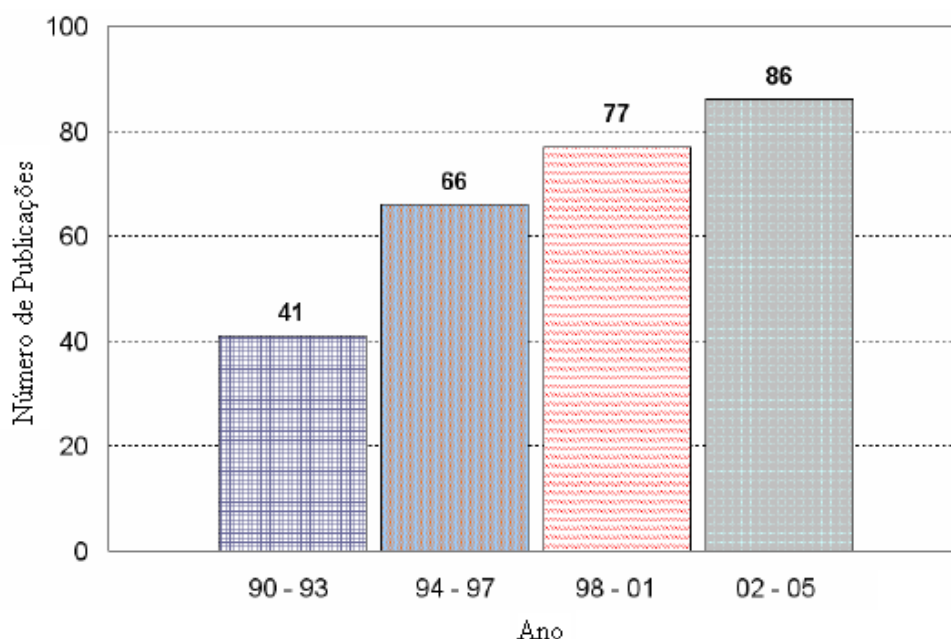
## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A soldagem por atrito utiliza o atrito para gerar calor. Há muito tempo sabe-se que o atrito gera calor, mas o registro sobre sua utilização para unir metais é conhecido a partir de 1891, quando a primeira patente sobre a utilização de calor obtido por atrito para união de cabos de aço foi utilizada nos Estados Unidos da América. Durante a segunda Guerra Mundial, na Alemanha, tubos de material termoplástico foram unidos por atrito. Entretanto, somente com a publicação das experiências realizadas na antiga União Soviética em 1957, renasceu o interesse sobre o processo. O processo de soldagem por atrito é amplamente utilizado por fabricantes que lideram a produção automotiva, aeroespacial, reparo de oleodutos operantes, linhas de gás e linhas de metanol, segundo Blakemore (1993). Também são encontradas aplicações em máquinas agrícolas, ferramentas de corte e componentes da indústria de engenharia elétrica.

#### **2.1 – Soldagem Por Atrito**

Devido à vasta gama de aplicações e versatilidade, a solda por atrito tem-se mostrado um assunto expressivo. Pinheiro (2008) destaca o número de publicações e atividades de pesquisas realizadas envolvendo a soldagem por atrito durante os últimos anos, Figura 2.1. Isso mostra a importância do assunto e a necessidade de maiores investigações.



**Figura 2.1** – Número de publicações ISI (Institute for Scientific Information) envolvendo a soldagem por atrito. (PINHEIRO, 2008).

O processo de soldagem por atrito utiliza a transformação de energia mecânica em calor gerado através do atrito entre as superfícies que serão unidas. Assim, a soldagem ocorre em alta temperatura, mas na fase sólida, e é obtida por pressão e escoamento plástico dos materiais envolvidos. As impurezas envolvidas são expelidas da superfície juntamente com o metal que flui, formando um recalque (excesso) em torno da peça.

Podem ser definidas algumas etapas características do processo, sendo que pelo menos uma peça sofre rotação. As superfícies são aproximadas, se interagem pelo atrito e a energia gerada leva as mesmas ao estado plástico. Ocorre compressão das peças, continuando, ou não, a rotação de uma peça, dependendo do método de soldagem empregado.

A soldagem no estado sólido é estabelecida pelas interações entre as superfícies de interface, ocasionando a destruição e remoção do filme de óxido e contaminantes nas faces adjacentes. A deformação plástica localizada preserva as propriedades mecânicas e facilita a união no estado sólido de materiais frágeis.

Existem algumas variantes do processo, as quais são denominadas “Convencional” e por “Inércia”. Independente de qual seja o tipo, segundo Machado (1996), a soldagem por atrito apresenta as seguintes vantagens:

- Não é utilizado material de adição, ou consumível em geral;
- Não é necessária, em geral, atmosfera protetora;
- A junta apresenta boas propriedades mecânicas;
- A Zona Afetada pelo Calor (ZAC) é extremamente reduzida;
- Os gastos com energia são muito menores quando comparado com os de qualquer outro processo de soldagem;
- A velocidade com que as soldas são produzidas é elevada.

Entretanto, existem algumas limitações, dentre as quais se citam:

- As peças devem, em princípio, possuir geometria compatível com as características do processo;
- O equipamento de solda deve ser suficientemente rígido e resistente para manter o alinhamento das peças sob as grandes cargas aplicadas;
- As peças devem ser capazes de resistir aos esforços aplicados, principalmente a região aquecida, próxima à interface;
- Peças com geometria não circulares, que requeiram perfeito alinhamento, podem ser soldadas, mas somente com equipamento especial;
- É relativamente grande o investimento de capital inicial.

A soldagem convencional é caracterizada por possuir somente uma peça em rotação, enquanto a outra se desloca axialmente. A parte giratória é acelerada à velocidade desejada, a outra avança, iniciando o atrito e a pressão entre as superfícies. Assim, ocorre o aquecimento mantendo-se a compressão e rotação e na fase final (fase de forjamento), a parte giratória cessa o movimento e as peças sofrem compressão final com determinada carga.

Já na soldagem por inércia, uma peça é fixa num sistema apropriado, enquanto a outra gira juntamente a um volante com grande momento de inércia. O volante é acelerado a uma velocidade de rotação conveniente, sendo o fator determinante na energia disponível para a soldagem. O outro membro avança, enquanto o sistema que provoca a rotação é desconectado, deixando a peça giratória livre.

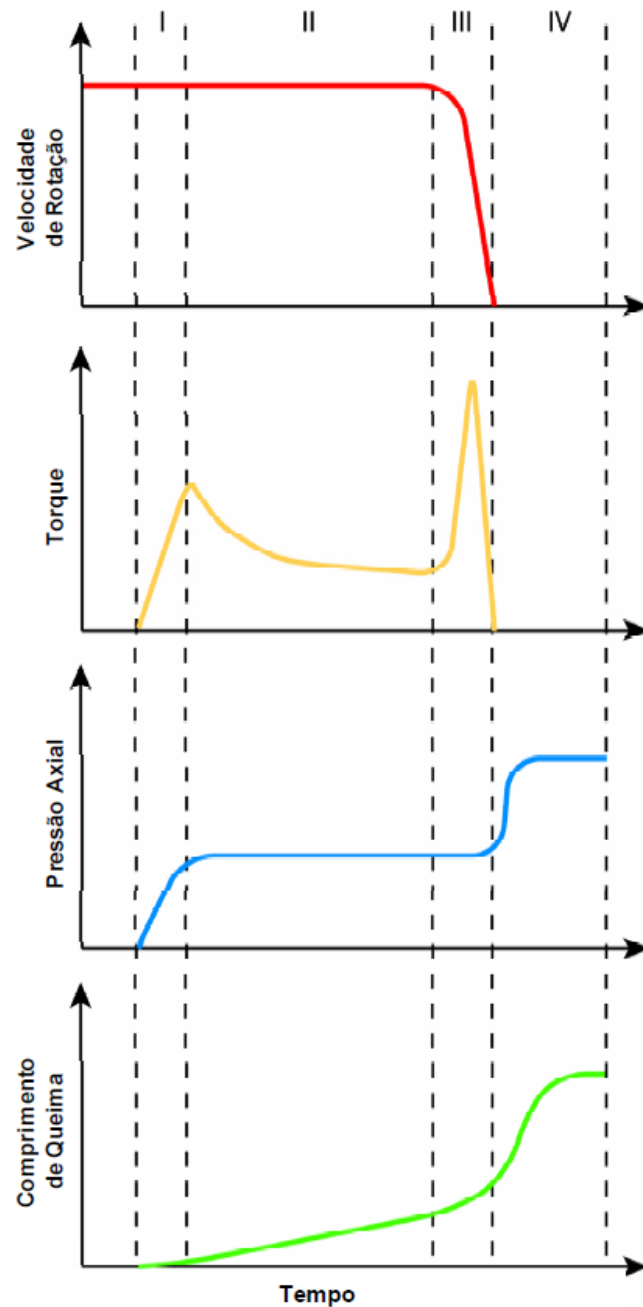
### *2.1.1 – Energia de Processamento*

O aporte térmico gerado na região de reparo tem forte influência na taxa de deformação que os materiais sofrerão durante o movimento relativo entre pino e bloco. Para a geração do calor necessário para que ocorram os fenômenos de deformação plástica tem-se como principal responsável o parâmetro velocidade de rotação. De acordo com o nível de velocidade selecionado, diferentes taxas de aquecimento são produzidas e, conseqüentemente, diferentes transformações metalúrgicas podem ocorrer.

De acordo com Lebedev e Chemenko (1992), a junta soldada é formada no estado sólido mediante deformação plástica do material atinge temperaturas na faixa de 1273 a 1573 K para os metais ferrosos. As mudanças na temperatura provocam mudanças no coeficiente de atrito. Em temperaturas da ordem de 453-473 K ocorre mudança qualitativa nos lubrificantes, formando um regime de atrito seco, aumentando o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, a temperatura. A ligação metalúrgica está vinculada com deformações plásticas localizadas, as quais, por sua vez, dependem das características do material base, do aporte térmico empregado e da pressão exercida na região de interface.

### *2.1.2 – Fases do Processo*

Estudos já realizados dividem a solda por atrito em fases características. Uma das formas encontradas de separação dos momentos do processo, segundo Meyer (2003), é dividi-los em quatro fases, como na Figura 2.2: fase de atrito, fase de aquecimento, fase de parada e fase de forjamento.



**Figura 2.2** – Fases do processo de soldagem por atrito e comportamento característico de acordo com os parâmetros relacionados. (MEYER, 2003).

A fase de atrito, fase I, ocorre durante os primeiros instantes de contato físico entre as duas superfícies. Nessa fase ocorre um aumento da área de contato em atrito na interface, acompanhado de deformação plástica dos materiais, dependendo dos tipos de materiais utilizados no reparo. A formação de superfícies de atrito

planas está vinculada às altas tensões iniciais, sendo que, acontece o primeiro valor máximo de torque no final dessa fase. A temperatura na junção aumenta gradualmente, principalmente nas regiões externas da junta, onde se tem alta velocidade rotacional relativa entre as superfícies. Nessa fase ainda ocorre a quebra da camada de óxido, adsorção e remoção de contaminantes.

Terminada a primeira fase, regiões mais frias recebem o escorregamento de material plastificado, ao mesmo tempo em que novas fricções ocorrem devido ao resfriamento imediato do material plastificado. A transferência de calor se estende por toda a área do contato, chegando ao equilíbrio de temperatura. Nesse instante, a taxa de queima passa a ser quase constante. Essa é a fase de aquecimento, fase II, que termina com uma queda do torque de atrito.

Durante a fase de parada, fase III, a velocidade de rotação diminui até cessar o movimento de giro. Assim, não há mais fonte de aquecimento intensa, o que provoca a diminuição da temperatura. Além disso, a diminuição da rotação aumenta a resistência ao cisalhamento, o que caracteriza o segundo valor máximo de torque e o estabelecimento da ligação metálica e união permanente da junção.

A última fase do processo é a fase de forjamento, fase IV, durante a qual não há velocidade de rotação do pino e se estabelece uma pressão constante de forjamento. Esta pressão provoca uma homogeneização da ligação na seção transversal, aumento abrupto na taxa de queima e contato mais íntimo das superfícies de soldagem. Também é estabelecida uma recristalização estática, e regeneração dos cristais devido o resfriamento (MEYER, 2003).

### *2.1.3 – Parâmetros de Influência no Processo*

Os principais parâmetros de influência na qualidade da junta soldada a serem destacados são a velocidade de rotação, força axial, taxa de queima, tempo de aquecimento, velocidade de frenagem e força de forjamento. Dentre estes parâmetros, destacam-se a velocidade de rotação e a força axial para a solda por atrito. Como existe um movimento relativo entre as superfícies em contato, ocorre geração de calor devido ao atrito existente, sendo que as fases do processo demonstram um aporte térmico variável, com influência da rotação. Altas velocidades de rotação tendem a aumentar o tempo de aquecimento necessário



para obtenção do fluxo plástico adequado. Isso ocorre devido à existência de um efeito de “polimento” entre as superfícies em contato.

A força axial também possui forte influência no processo na medida em que, o aumento da carga externa provoca um aumento da área média de contato, tornando as interações entre as superfícies dependentes da área real de contato. Dessa forma, o tempo total de processamento pode diminuir, já que a taxa de consumo do pino seria maior. Isso também influencia a zona afetada pelo calor (ZAC), em função da dissipação de calor ao longo do volume da peça, modificando também a microestrutura final.

Pires (2007) destaca que a qualidade do reparo realizado é fortemente dependente dos parâmetros do processo citados e, em especial da geometria do pino de queima e do furo a ser preenchido. Também podem ser apontados como parâmetros de influência no processo o torque e a taxa de resfriamento.

A geometria condiciona o aporte térmico e, conseqüentemente, a propagação da ZAC. A geometria do bloco é importante no incremento da qualidade do reparo, sendo responsável pela eliminação da falta de união.

A força axial atua de maneira preponderante nos tempos de preenchimento. Quanto maior for esse parâmetro, tanto menor será o tempo de processamento. Apesar de as altas forças contribuírem para o aumento da potência requerida no processo, as mesmas propiciam a diminuição na energia total de soldagem, em decorrência dos curtos tempos de processamento.

O parâmetro velocidade de rotação do pino não é considerado como fator de grande influência no processo. No entanto, Meyer (2003) aponta que a diminuição de velocidades de rotação produzem uma ZAC mais fina e com um perfil notavelmente muito mais severamente marcado em comparação com soldas similares produzidas com velocidades de rotação mais altas. O aumento de rotações conduzem menores taxas de resfriamento, maior ZAC e, portanto, menores durezas na região próxima à junção.

Análises microestruturais de união de aços soldados mostram que, para uma dada pressão de soldagem, o incremento na velocidade produz aumento no tamanho do grão, Meyer (2003).

## 2.2 – Reparo por Atrito

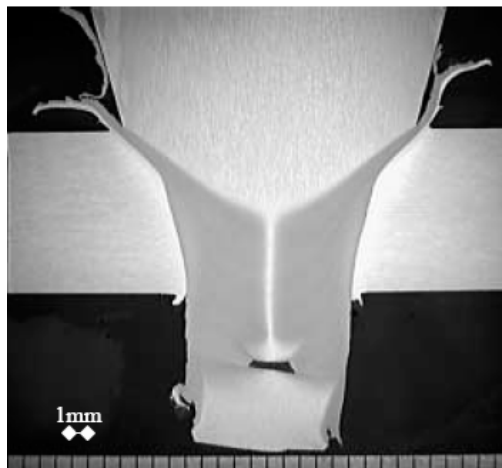
As necessidades e tecnologias desenvolvidas na indústria têm se mostrado presentes há muitos anos. Neste cenário encontram-se aplicações específicas que exigem alto grau de confiabilidade e qualidade. Com o desenvolvimento da soldagem por atrito, também foram criadas novas técnicas que passaram a fazer parte do universo de ferramentas para a solução dos problemas associados à união de partes metálicas. Assim, a técnica de reparo por atrito foi criada e vem se desenvolvendo com trabalhos realizados para a indústria do petróleo. Como exemplo tem-se as paredes de tanques e tubulações de plataformas de petróleo sujeitas à formação de trincas. O reparo desses defeitos é extremamente importante para evitar a ruptura dessas estruturas e acidentes.

O reparo por atrito também é conhecido como processamento de pinos por atrito, ou ainda na literatura inglesa como *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP).

### 2.2.1. – Técnicas de Processamento Variantes da Soldagem por Atrito

Andrews e Mitchel (1990) desenvolveram o FHPP. Esta foi originada do processo FTPW (Friction Taper Plug Welding), o qual realiza o preenchimento de um furo cônico passante através da deformação plástica de um pino também cônico, Figura 2.3. O calor gerado entre as superfícies do pino e do furo passante no FTPW causa a deformação plástica e fluência do material até o diâmetro maior do furo cônico, o qual é preenchido instantaneamente.

A Figura 2.3 mostra claramente o aspecto do preenchimento do furo cônico após um corte na seção transversal da região submetida ao FTPW. Esse também é um tipo de reparo que acontece no estado sólido para ações estruturais na indústria *offshore* e marinha. Como se trata de uma soldagem sem fusão ela evita problemas associados com a solidificação e por ocorrer no estado sólido e sem arco elétrico, tem muito potencial de aplicação subaquática.



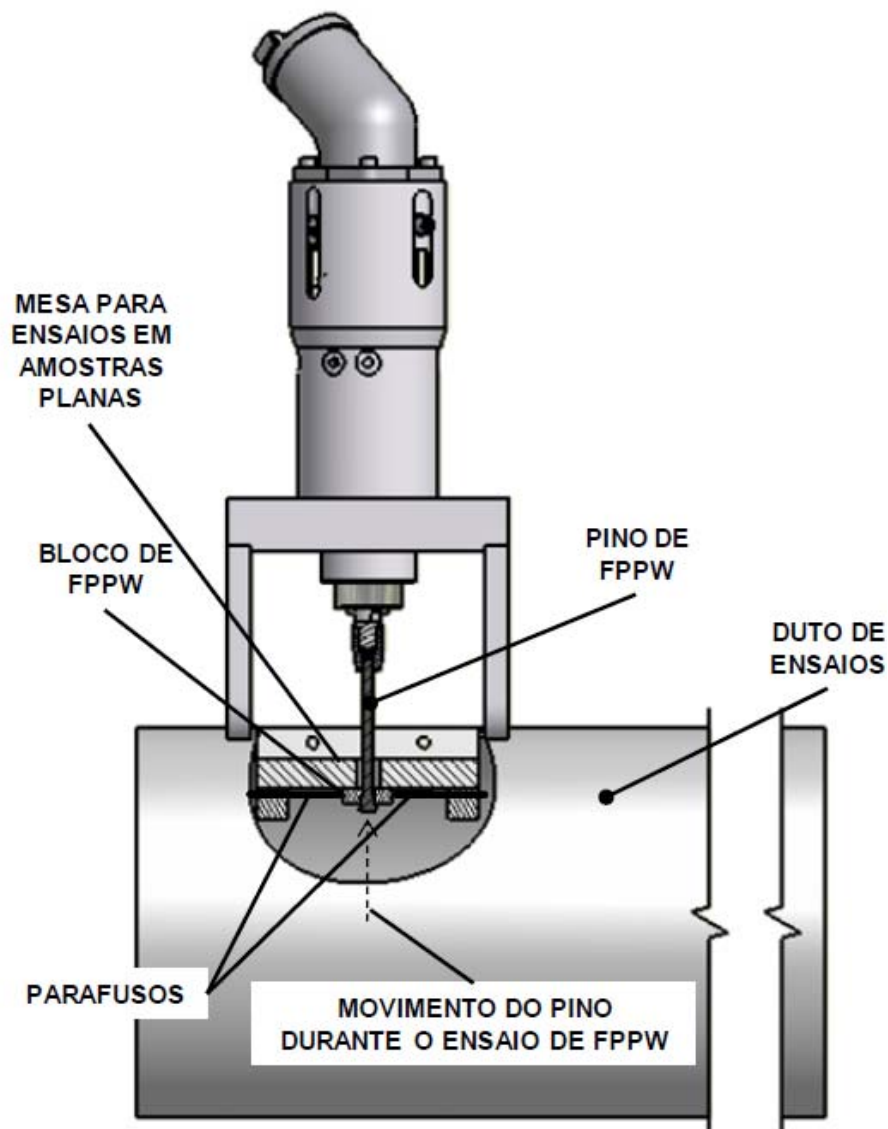
**Figura 2.3** – Macrografia de uma FTPW. (BEAMISH 2003 citado por PINHEIRO 2008)

De acordo com Andrews e Mitchel (1990), as primeiras aplicações eram para o reparo de trincas de fadiga em cordões de solda de estruturas *offshore* (membros tubulares de espessuras de 15 a 40 mm) localizadas a mais de 100 m de profundidade.

Algumas patentes já foram registradas com processos semelhantes. Há registro de pedido de patente internacional publicado no tratado de cooperação de patente (PCT) de título “*Friction Plug Welding Methods and Systems*”, com autoria de Maciel (2009). A patente para “*Friction Forming*” de Thomas et al. (1993), teve sua publicação em outubro de 1995, sobre propriedade da TWI (The Welding Institute) em *Cambridge*. Outras patentes, tais com título “*Friction Pull Welding: Dual Chamfered Plate Hole*”, e “*Friction Pull Plug Welding: Top Hat Plug Design*”, ambas de Edmond et al. (2001 e 2002) também podem ser citadas.

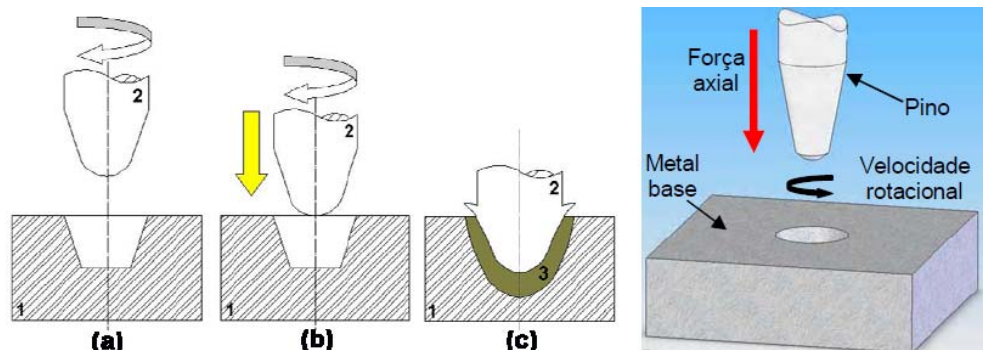
Desenvolveu-se recentemente no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste um equipamento que consegue realizar uma técnica de reparo em dutos bem semelhante, chamada de FPPW (*Friction Pull Plug Welding*), que é o reparo por atrito através da tração, Figura 2.4, HWANG (2010). Este equipamento é dito Unidade de Processamento de Pinos por Atrito versão 4. Ela é o resultado da evolução de outros equipamentos desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, como será abordado mais a frente. Franco et al. (2009) já fizeram o requerimento de patente desse equipamento que é basicamente compreendido por um motor hidráulico, uma camisa, uma haste, um eixo maciço e um

acoplamento. Além de realização de reparos FPPW, também podem ser aplicadas soldas em superfícies planas e ensaios FHPP.



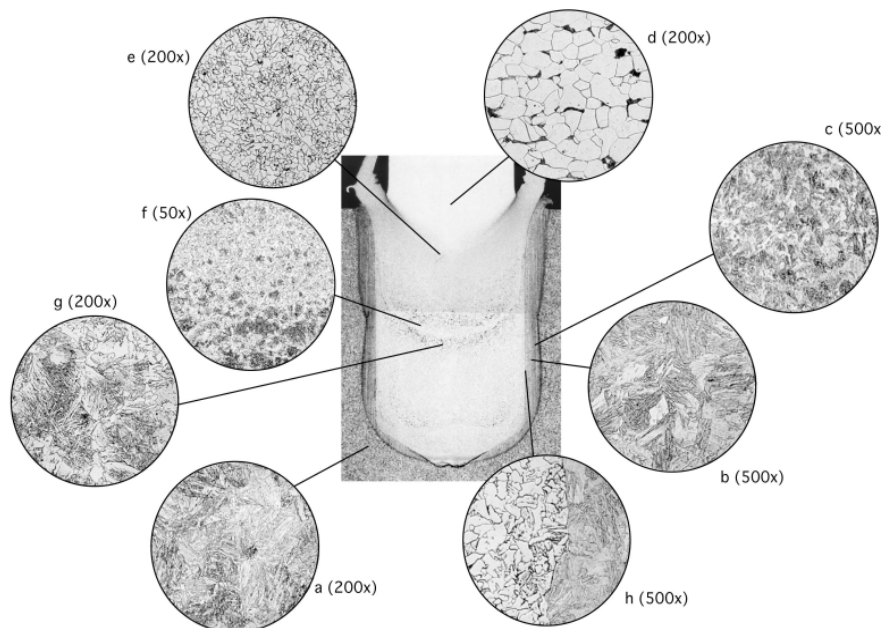
**Figura 2.4** – Sistema montado para realização de ensaios FPPW. (HWANG, 2010).

O processamento de pinos por atrito (FHPP) - Figura 2.5, envolve o preenchimento completo de um furo cônico através de um pino que toca o fundo do furo, aquece a região pelo atrito gerado entre as superfícies e deforma-se plasticamente. Nesse caso o furo é não passante. Em virtude de a união metálica acontecer abaixo do ponto de fusão, limita-se a extensão e complexidade das reações metalúrgicas que causam a fragilização (por exemplo formação de fases intermetálicas), fissuração e porosidade (MEYER, 2003).



**Figura 2.5** - Reparo por atrito. (1) material base e (2) Pino e (3) junção. Seqüência de processamento: (a) Aplicação de velocidade rotacional no pino. (b) Força axial no pino girando e aproximação dele ao material base e (c) formação da ligação metalúrgica e geração da zona afetada pelo calor e a deformação. (UNFRIED *et al.*, 2009).

Como resultado das transformações metalúrgicas durante alguns segundos do reparo por atrito, tem-se microestruturas formadas com propriedades mecânicas diferenciadas e com características próprias, como pode ser visualizado na Figura 2.6.



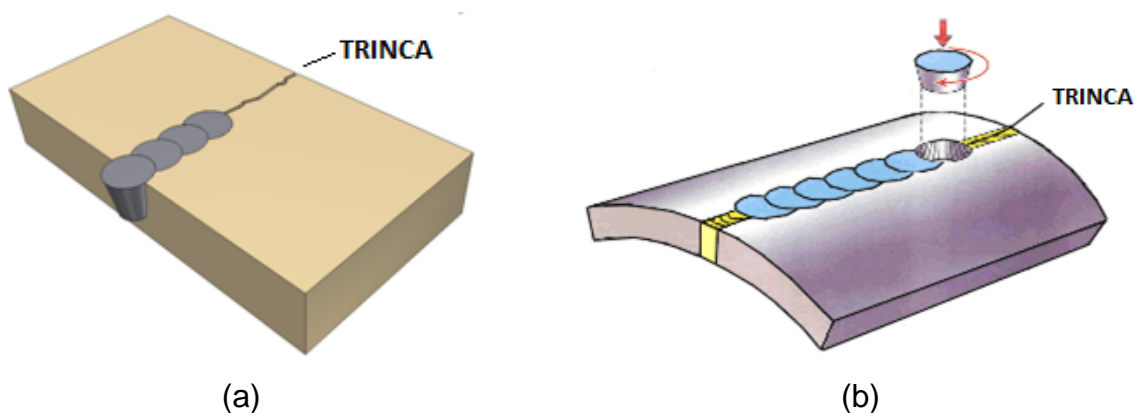
**Figura 2.6** – Regiões características de um preenchimento por atrito, com a inserção de um pino de aço carbono em um substrato de aço Cr-Mo (BLAKEMORE, 1999).

Cada região mostrada na Figura 2.6 é designada como:

- (a) Material base do substrato;
- (b) Zona Afetada pelo Calor (ZAC), adjacente à linha da junção;
- (c) ZAC do material base;
- (d) Material do pino;
- (e) Material forjado com grão fino na região de transformação;
- (f) e (g) Material forjado com grão fino completamente transformado;
- (h) Linha da junção entre o consumível e o material base.

Outras técnicas também foram desenvolvidas para reparos por atrito. Todas elas possuem características similares à soldagem por atrito. Como exemplos, citam-se o *Friction Taper Stich Welding* (FTSW) ou também chamado Reparo por Costura e *Friction Surfacing* (FS) ou Revestimento por Atrito.

O Reparo por Costura, Figuras 2.7, foi empregado originalmente para o preenchimento de furos previamente abertos em uma estrutura com trinca ou defeitos em chapas ou tubos de aço. Da mesma forma que as outras técnicas de soldagem já abordadas, o FTSW é um processo de soldagem na fase sólida. Ela é acompanhada de um furo cônico passante ou não no local de reparo ou defeito. Em seguida, um pino cônico com angulação similar à do furo é introduzido no mesmo. As superfícies cônicas se tocam, aquecem com o atrito e ocorre uma união metalúrgica dependendo do tipo de material empregado.



(a)  
(HWANG, 2010)

(b)  
(<http://www.twi.co.uk/content/faqedn002.html#>)

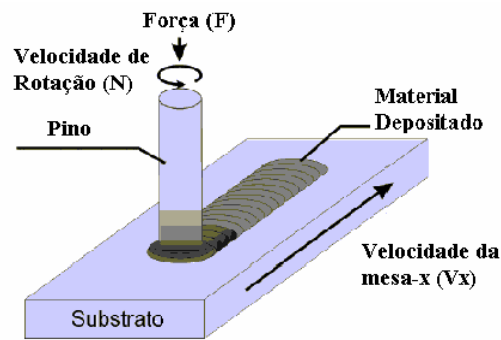
**Figura 2.7** – Croqui do processo de Costura por Atrito para reparo de trincas.

a) Reparo de uma chapa plana. b) Reparo de um tubo.

O Revestimento por Atrito, mostrado na Figura 2.8, também possui a aplicação da rotação do pino e a força axial. Todavia, quando o material entra em fluxo plástico ele não preencherá um furo. Neste caso, tem-se um movimento relativo do substrato (deslocamento horizontal), obtendo-se, assim, a deposição do material do pino sobre uma chapa ou substrato. Através dessa técnica, pode-se então aplicar diferentes tipos de materiais sobre substratos, resultando em incrementos na resistência à corrosão e/ou desgaste.

O revestimento obtido deve cumprir uma série de requisitos para ser considerado de interesse. Em primeiro lugar, sua aderência ao substrato deve ser boa, de maneira que não se delamine com facilidade, resistir às condições de trabalho para as quais está dirigido, que podem incluir temperaturas extremas, atmosferas corrosivas ou desgastes mecânicos elevados. Por último, o revestimento deve contribuir para melhorar determinadas propriedades do material utilizado como substrato. No entanto, já foram apontadas algumas limitações que retardaram a ampliação da aplicação desta técnica, tais como a falta de dispositivos de detecção precisos para monitoramento do processo em tempo real confiável e um modelo do processo adequado (VOUTCHKOV et. al., 2001).

Em particular, a procura por revestimentos que combinem dureza elevada, com baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao desgaste resulta do grande interesse de seu potencial de aplicações tecnológicas. Por exemplo, boa parte das ferramentas metálicas de cortes fabricadas está recoberta por camadas que melhoram sua resistência ao desgaste (VEPREK, 1999 citado por ESPINOZA, 2003). Além disso, a utilização de revestimentos de elevada dureza, baixo atrito e alta resistência ao desgaste em maquinarias encarregadas dos processos de fabricação industriais permitem a redução do uso dos refrigerantes e lubrificantes líquidos utilizados atualmente, em geral nocivos para o meio ambiente e cuja reciclagem supõe elevados custos de produção (CSELLE et. al., 1995, citados por ESPINOZA, 2003).



**Figura 2.8** – Croqui da técnica de Revestimento por Atrito.

### 2.3 – Unidades de Reparos por Atrito

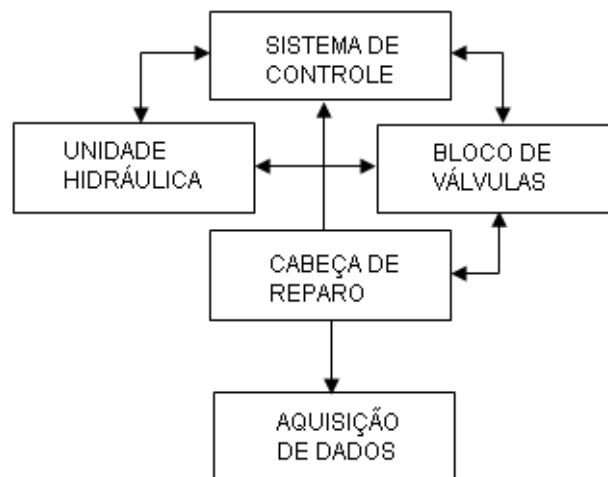
Com o desenvolvimento das técnicas de reparo por atrito, encontrou-se oportunidade para projeto e construção de equipamentos que atendessem às demandas da indústria do petróleo e gás.

Diante dos diversos parâmetros que esta tecnologia apresenta, faz-se necessário o desenvolvimento eletromecânico robusto e controlado do equipamento de reparo por atrito. Para tanto, houve a necessidade de construir máquinas capazes de executar reparos por atrito com faixas de valores que atendam os requisitos de aplicação.

#### 2.3.1 - Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA)

Para desempenhar a técnica de reparo por atrito foi construída uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito no LTAD. Este é um sistema constituído basicamente por cinco partes principais, quais sejam: unidade hidráulica, bloco de válvulas, cabeça de reparo, sistema de controle integrado e aquisição de dados, como podem ser visualizados esquematicamente na Figura 2.9.





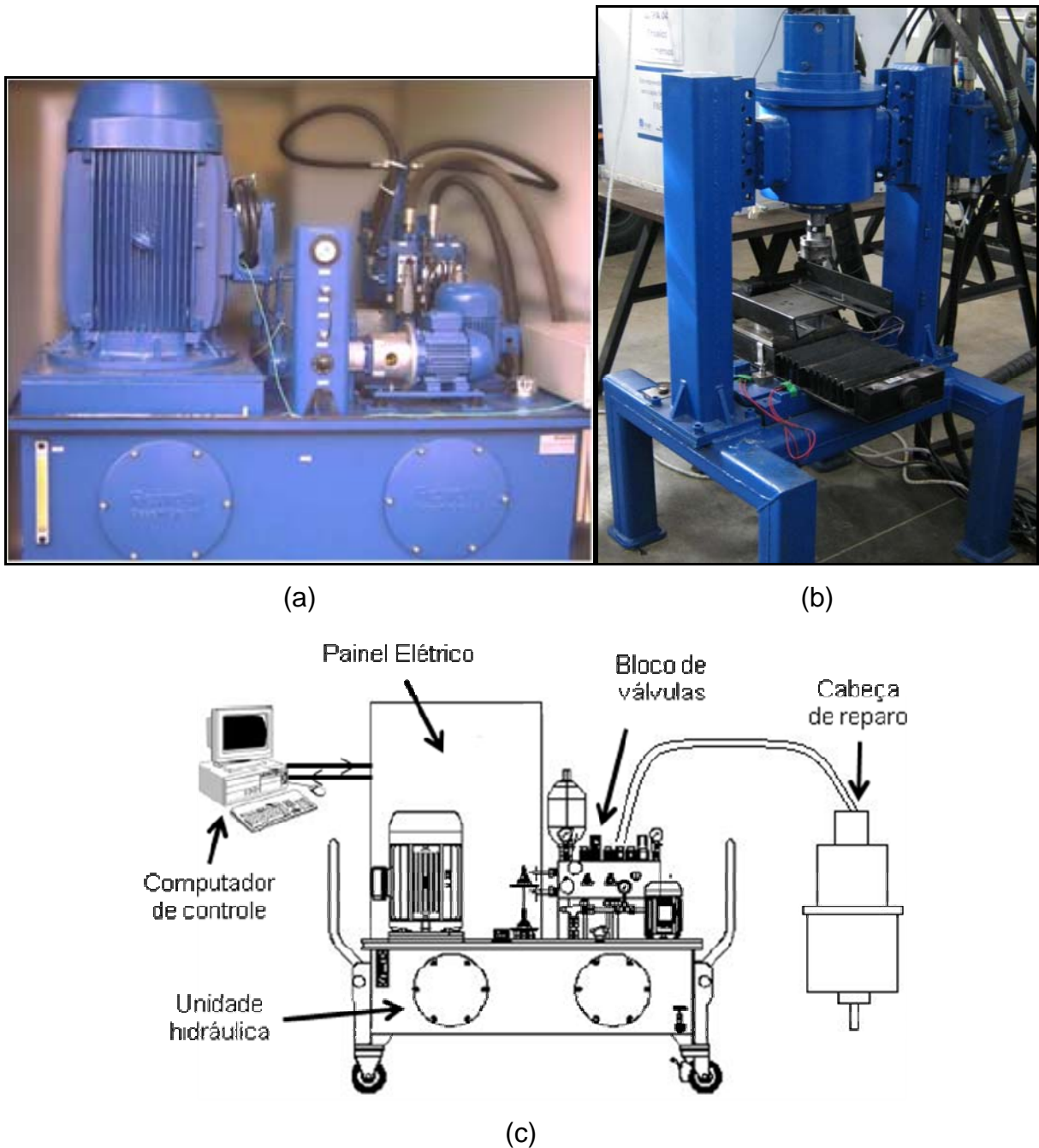
**Figura 2.9** – Principais partes da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito.

O sistema de controle troca informações com a unidade hidráulica, o bloco de válvulas e a cabeça de reparo. Para cada acionamento elétrico, monitoramento geral, controle de válvulas ou verificação de algum parâmetro, existe interligações próprias entre as partes do equipamento. A unidade hidráulica possui todos os componentes necessários à geração de energia mecânica, através de motores, bombas, mangueiras e reservatório hidráulico. E para dosar a transmissão do fluido hidráulico para a cabeça de reparo tem-se o bloco de válvulas. Este é controlado e encontra-se entre a unidade hidráulica e a cabeça de reparo. Através de mangueiras que entram e saem do bloco de válvulas, direciona-se o fluxo hidráulico utilizado no acionamento dos sistemas de giro e aplicação de carga que estão presentes na cabeça de reparo.

### 2.3.2 – Versões já Desenvolvidas e Características

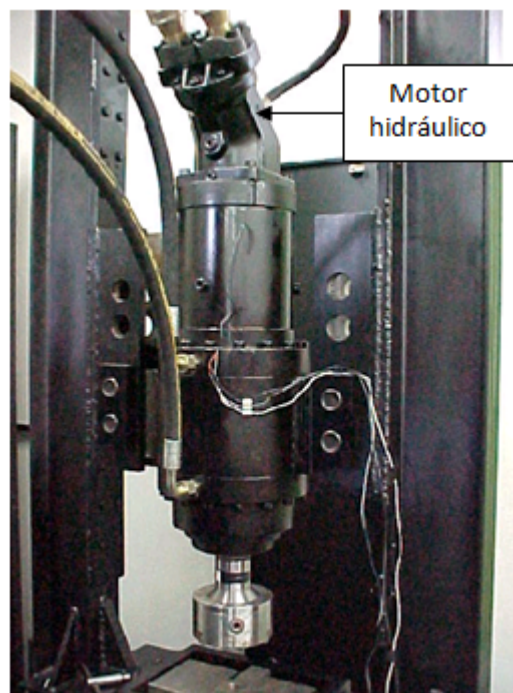
A primeira versão do equipamento chamado Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA1) foi concluída em 2006, Figura 2.10. Ela é capaz de realizar ensaios FHPP com rotações de até 8.000 rpm, e forças axiais de até 50 kN. Souza (2006) realizou trabalhos com este equipamento, trazendo informações relevantes para o desenvolvimento de novos trabalhos sobre a técnica de reparo por atrito. Filho (2008) também desenvolveu um programa de controle para furação no mesmo equipamento, capaz de controlar a velocidade de avanço, rotação do motor hidráulico e posição da broca.

Observa-se na Figura 2.10 (b) a disposição do pórtico para deslocamento do sistema de giro na vertical, enquanto que o material a ser reparado é fixado em uma morsa que também é fixa a uma mesa de deslocamento horizontal. Este equipamento possui também a flexibilidade da realização de ensaios de Revestimento por Atrito.



**Figura 2.10** - Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1; a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas, b) Pórtico de Reparo, c) Esquema geral.

A fim de trabalhar com outra faixa de operação para a técnica de reparo por atrito, uma segunda versão do equipamento foi construída, Figura 2.11, sendo capaz de aplicar forças axiais de até 250 kN e rotações menores em relação à primeira versão, em torno de 2.500 rpm. Para a Unidade de Processamento de pinos por Atrito 2 (UPPA2), foi desenvolvido um sistema de monitoramento e controle, com o intuito de otimização do processo como um todo.



**Figura 2.11** – Pórtico de reparo da UPPA2 com motor hidráulico e cilindro de aplicação de força em base única.

As duas versões foram construídas de tal forma que o contato entre os corpos de prova aconteça pelo deslocamento vertical descendente do pino em rotação sobre o bloco fixo em uma base. Este movimento acontece através de uma válvula direcional proporcional localizada em um bloco de válvulas. Com esta válvula controla-se a pressão e, portanto, a força axial aplicada ao cilindro hidráulico que realiza a movimentação do pino. Um motor hidráulico é utilizado para implementar a velocidade de rotação. Para as versões 2 e 3 ele é conectado por mangueiras a uma bomba acionada por um motor a diesel de 180 CV. O conjunto formado pelos componentes, reservatório hidráulico, motor diesel, bloco de válvulas, bombas

hidráulicas, mangueiras de condução e demais estruturas são necessárias para a operação da segunda e terceira versões do equipamento.

### *2.3.3 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3*

A terceira versão para a Unidade de Reparos por atrito (UPPA3), a qual foi instrumentada, controlada e operacionalizada, é composta por uma estrutura mecânica própria para a aplicação de cargas de até 50 tf. A instrumentação do equipamento a ser utilizado para a aplicação de elevadas cargas axiais é composta por: sensor de deslocamento, sensor de rotação indutivo, sensor de torque e transdutores de pressão. Através destes componentes eletrônicos, a quantificação dos valores de comprimento de queima do pino, velocidade de rotação, torque e força axial são passíveis de serem monitorados. No entanto, juntamente com uma instrumentação dimensionada para a aplicação de aquisição de sinais, o sistema de controle deve possuir a confiabilidade para a resposta do sistema, de forma a garantir a execução da técnica de reparo por atrito.

O controle de válvulas do sistema hidráulico como um todo é realizado separadamente através de uma interface homem máquina (IHM), a fim de realizar testes para os movimentos de rotação do pino e deslocamentos horizontais do bloco. Para comandos de deslocamento que permitem os movimentos de avanço e retorno do bloco existem duas mangueiras que saem do bloco de válvulas e se conectam ao cilindro hidráulico. O giro do motor hidráulico, através do fluxo do fluido que passa por um canal de entrada e um de saída do motor, transmite a velocidade de rotação para o pino.

Todos os comandos para abertura e fechamento de válvulas e demais rotinas de comando são realizados através de um Controlador Lógico Programável (CLP). Este é o portador da lógica de programação e controle da execução da sequência de operação do equipamento. Já o sistema de aquisição de dados é realizado via microcomputador com uma placa de aquisição. O gerenciamento da leitura dos sinais é realizado pelo software LabView® que mostra os resultados em gráficos e os salva logo em seguida.

Através da implantação de todo o sistema de instrumentação e controle, conexão do motor e cilindro hidráulicos ao bloco de válvulas por meio de mangueiras próprias e adequação do sistema de aquisição de dados foi possível a operacionalização da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito com cargas de até 500 kN.

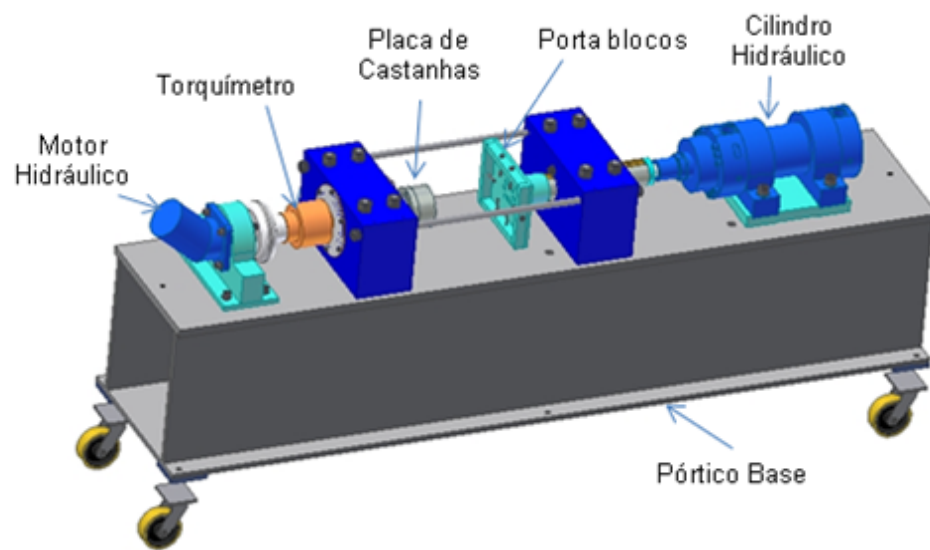
## **CAPÍTULO 3**

### **DESENVOLVIMENTO DA UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO PARA CARGAS DE ATÉ 500 kN**

#### **3.1 – Montagem do Sistema Mecânico**

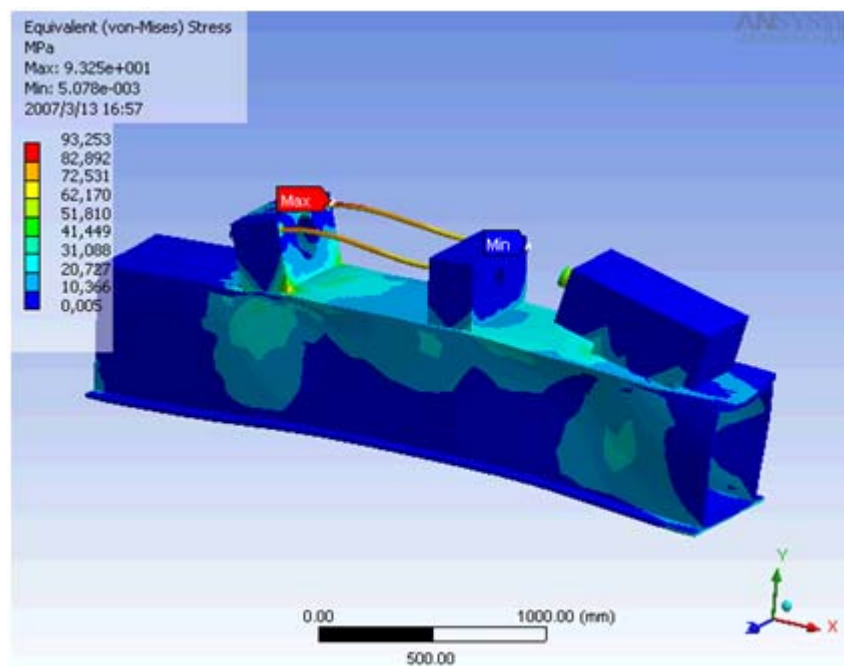
O reparo por atrito com cargas da ordem de algumas dezenas de toneladas exige um sistema mecânico robusto para suportar os esforços e tensões às quais todo o equipamento que realiza o processo fica submetido. Assim, a UPPA3 foi projetada e construída para atender às necessidades de aplicação de força e velocidade estabelecidas. O conjunto dito pórtico de reparo é constituído por um pórtico base de sustentação, motor hidráulico, torquímetro, porta blocos, mancais e cilindro hidráulico, como mostrado na Figura 3.1.

As principais diferenças encontradas nesse sistema em relação às versões anteriores são relacionadas a seguir. Primeiramente, tem-se um aumento da capacidade de carga de reparo. Além disso, a idéia inicial visava atender também o reparo de dutos, já que os movimentos de rotação e translação são independentes, não existindo um cilindro especial de reparo como ocorre nas versões anteriores, nas quais esses movimentos são realizados em uma mesma estrutura. Outro diferencial desta versão é a utilização de um sistema de aquisição de torque independente, o qual permite medir o sinal de torque e transmiti-lo via telemetria para aquisição e armazenamento. Nas versões anteriores, a aquisição de torque é realizada com base no monitoramento das pressões de entrada e saída do motor hidráulico. Desta forma, pode-se estimar a potência e o torque transmitidos ao eixo.

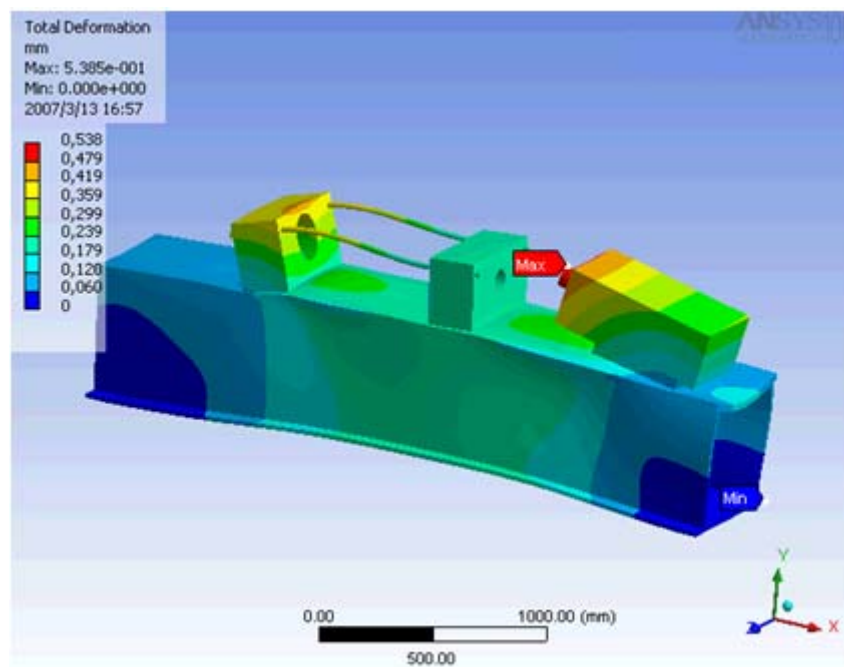


**Figura 3.1** – Vista tridimensional do conjunto da Unidade de Processamento de pinos por Atrito 3.

Durante o dimensionamento do pórtico, houve uma intenção de projetar uma estrutura com uma tensão de resistência variando de 70 a 90 MPa, com deformação máxima de aproximadamente 0,5 mm. Nessa fase de concepção, pensou-se na utilização de perfis do tipo caixão. A necessidade de realização de muitas soldas de precisão devido ao excesso de perfis motivou a utilização de perfis maiores. Novas estruturas compostas por menores reações aos esforços foram simuladas, utilizando o *software* Ansys Workbench 10.0. Por fim, a melhor estrutura encontrada para atender às exigências iniciais foi com perfil “I” de dupla alma soldada, com tirantes entre as carcaças de rolamento e de deslizamento. As simulações finais para tensão equivalente e deformação total podem ser vistas na Figura 3.2.



(a)



(b)

**Figura 3.2** – Simulação de perfil “I” de dupla alma. a) Simulação de tensões equivalentes (Von Mises); b) Simulação de deformação total. (MUNIZ, 2007).



Após definição da estrutura de base para montagem dos demais componentes da UPPA3, a mesma foi construída na Usiminas Mecânica S.A. em Ipatinga-MG. O cilindro hidráulico utilizado na aplicação das cargas de reparo é apresentado na Figura 3.3. O cilindro hidráulico em questão tem curso de 200 mm e capacidade de até 50 tf.



**Figura 3.3** – Cilindro hidráulico para aplicação de cargas com pressão de trabalho de 250 bar fabricado pela Bosch Rexroth acoplado ao pórtico.

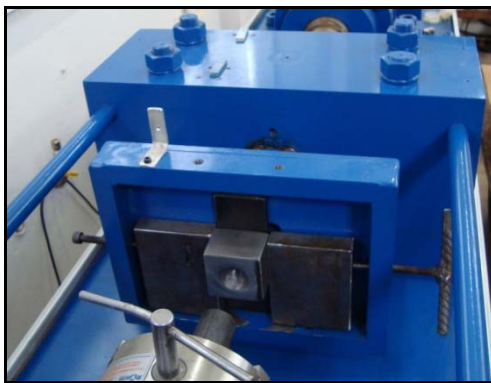
Os elementos rotativos, tais como motor hidráulico, acoplamento flexível, eixo de acoplamento do torquímetro, torquímetro, eixo de rotação principal e placa de castanhas também foram definidos de acordo com o projeto de um equipamento para cargas elevadas.

A seleção do motor hidráulico foi realizada com base no catálogo “*Axial Piston Fixed Displacement Motor A2FM*” - Bosch Rexroth AG, Mobile Hydraulics, Product Unit Axial Piston Units. De acordo com as necessidades de rotação, eficiência e torque para uma dada variação de pressão da bomba, o motor hidráulico escolhido foi o Bosch TN125. O mesmo está fixado em um flange por parafusos e é alinhado com a estrutura e demais elementos da unidade de reparo. A Figura 3.4, a seguir, mostra a montagem das principais partes do sistema mecânico sem a interligação com mangueiras e sensores.



**Figura 3.4** – Conjunto Pórtico de Reparo por atrito sem ligação de mangueiras e sensores.

Os corpos de prova são fixados através do porta blocos e a placa de castanha, como indicado na Figura 3.5.



(a)



(b)

**Figura 3.5** – Detalhes da fixação de pinos e blocos, a) porta blocos e b) placa de castanhas.

Inicialmente foi projetado um eixo para a transmissão de movimento entre um acoplamento flexível e o torquímetro. No entanto, após os primeiros testes rotativos foram feitas modificações neste eixo, como será discutido em outro item deste capítulo, bem como do sensor de torque.

### 3.1.1 – Ligações Hidráulicas

O principal meio de transmissão de energia mecânica do sistema é pelo deslocamento de fluido hidráulico. Tanto o sistema rotativo quanto de deslocamento axial para aplicação de cargas utilizam fluxo de óleo. Assim, foram necessárias mangueiras próprias para condução do fluido a alta pressão.

Todo o controle de pressão do óleo hidráulico é feito através do bloco de válvulas, mostrado na Figura 3.6. Ele foi dotado de válvulas proporcionais servo-controladas, que atuam de acordo com os parâmetros definidos para o processo. Também foram integrados transdutores de pressão nas entradas e saídas de óleo.



**Figura 3.6** – Bloco de válvulas composto por válvulas proporcionais servo-controladas e transdutores de pressão.

As necessidades de projeto indicaram mangueiras hidráulicas com diâmetro de 38,1 mm, com quatro metros de comprimento para alta pressão (420 bar) da norma SAE 100 R15 com quatro espiras de arame de aço. Estas foram utilizadas para interligar motor hidráulico e bloco de válvulas. Já o cilindro hidráulico comunica-se com o bloco de válvulas através de mangueiras hidráulicas com diâmetro de 12,7 mm com quatro metros de comprimento para alta pressão (380 bar) da norma EM 853 SN com dois reforços trançados em arame de aço.

Também foram adquiridos terminais para conexão das mangueiras no bloco de válvulas, tais como terminais para flange SAE 6.000 psi, terminais para alta pressão fêmea giratória 90°, redutores BSP e bolachas para flange SAE 6.000 psi.

A disposição das mangueiras conectadas no motor e cilindro hidráulicos pode ser visualizada na Figura 3.7. Nesta fase não haviam sido inseridos ainda o sensor de rotação (acoplado ao motor hidráulico), deslocamento e receptor de sinal de torque.



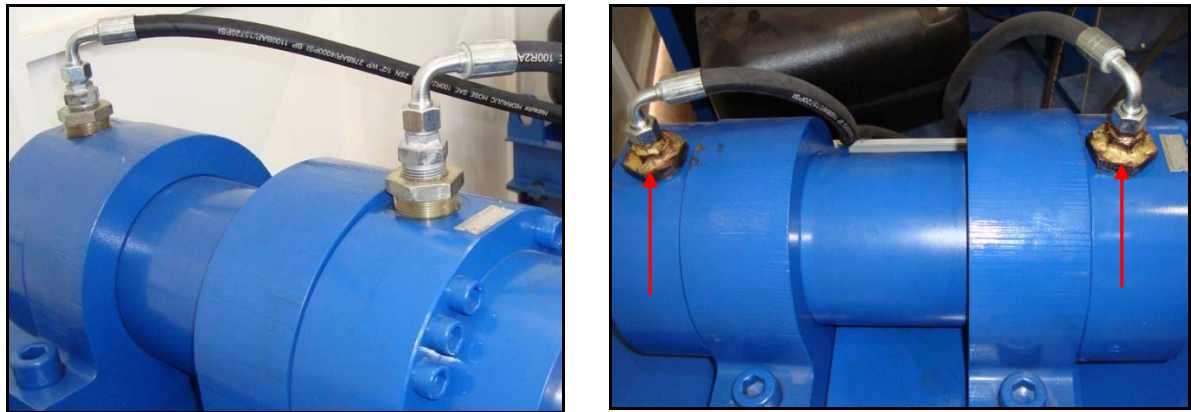
**Figura 3.7** – Disposição das mangueiras de alta pressão conectadas no motor e no cilindro hidráulicos.

Durante a montagem das mangueiras do cilindro hidráulico responsável pela aplicação da força, percebeu-se que as conexões BSP (British Standard Pipe) que atendem ao padrão internacional, baseado na ISO, não eram corretas para a aplicação. Com isso houve vazamento de óleo nessas conexões. A peça adquirida possuía geometria cônica e, mesmo apresentando pequena angulação, não apresentou o encaixe perfeito. Para níveis de pressão tão altos, como os atingidos pelo óleo, o vazamento continuaria e inviabilizaria a operação do equipamento. A solução foi adquirir a conexão BSP reta e com casamento adequado das roscas.

Como a redução do cilindro para a mangueira é de 31,75 mm para 12,7 mm, foi necessário o uso de um adaptador intermediando a conexão BSP e o terminal da mangueira. No entanto, também foram constatado vazamentos nessa peça



intermediária. E para garantir a vedação total e impedir possíveis vazamentos foi realizada uma brasagem, mostrada na Figura 3.8.



(a)

(b)

**Figura 3.8** – Conexões do cilindro hidráulico para aplicação de força; a) conexões iniciais que apresentaram vazamentos; b) conexões soldadas com vedação total e sem presença de vazamentos.

O cilindro hidráulico está diretamente interligado com o bloco de válvulas e este possui a entrada de óleo responsável pela aplicação de cargas para o cilindro. O fluxo de óleo de entrada é alimentado por uma bomba hidráulica, acionada por um motor elétrico de 10 CV. Essa bomba possui uma válvula limitadora de pressão acoplada à mesma e pode ser regulada manualmente, Figura 3.9.

Valvula limitadora  
de pressão.



**Figura 3.9** – Bomba com motor de 10 CV acoplada a uma válvula limitadora de pressão.

Quando foram realizados os primeiros testes de funcionamento do sistema de giro com o motor hidráulico, também foram detectados vazamentos na conexão do dreno do motor hidráulico. Esses vazamentos foram causados por amassamento da rosca do terminal. Esta mangueira também é utilizada para a versão 2 da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito e necessitava a troca do terminal. Assim, o retorno de óleo para o reservatório da unidade hidráulica foi realizado de forma correta após a troca do terminal, Figura 3.10.



**Figura 3.10** – Terminal e conexão da mangueira de dreno do motor hidráulico.

### *3.1.2- Acoplamento do Torquímetro*

Durante o projeto da UPPA3 foi selecionado um acoplamento flexível da empresa Gummi, modelo A-60, mostrado na Figura 3.11. Este acoplamento é utilizado para evitar vibrações e desalinhamentos de eixos acoplados. As vibrações de eixo podem chegar a níveis que interferem nas leituras através do sensor de torque que é solidário ao eixo rotativo principal. Isso ocorre em função dos movimentos de afastamento entre o torquímetro e o receptor do sinal de torque posicionado em suas proximidades.

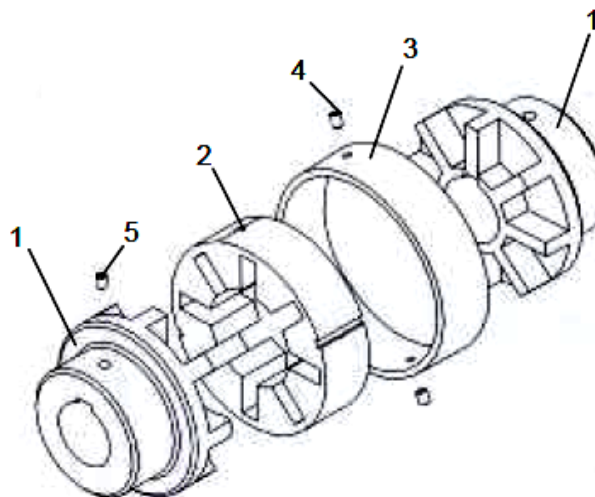


**Figura 3.11** - Acoplamento flexível usado no UPPA3.

Para a medição de torque utilizou-se um torquímetro fabricado pela Autogard®, modelo Monitorq™ (ver Figura 3.12). Este foi escolhido com base na facilidade de acoplamento do sistema de medição de torque, bem como pelo seu custo relativamente baixo. A principal parte desse sensor é o anel de torque, onde se encontram todos os componentes microeletrônicos que sofrem a influência do torque resistivo e transmitem o sinal proporcional. Integrados ao anel de torque estão cubos em ferro fundido com oito dentes, que são interligados por um anel elástico de poliuretano, que por sua vez é envolvido por um anel de poliamida, (ver Figura 3.13).

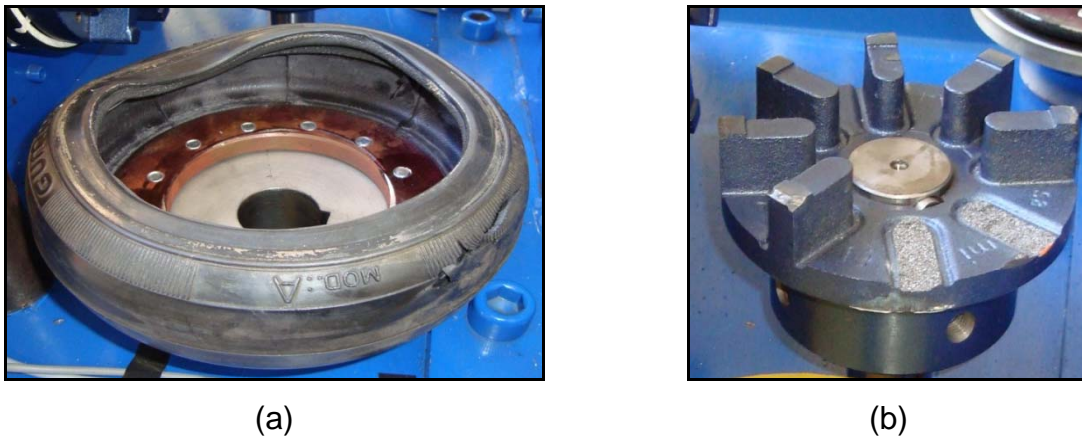


**Figura 3.12** – Torquímetro Monitorq™ da Autogard, usado no UPPA3.



**Figura 3.13** – Vista explodida dos componentes do torquímetro; 1: Cubo; 2: Anel de poliuretano; 3: Anel de poliamida; 4: Parafuso de fixação do anel; 5: Parafuso de travamento do cubo no eixo rotativo. (*Installation and Maintenance Instructions SAMIFLEX Couplings Type A & C – Autogard*).

Após montagem final da UPPA3 e realização dos primeiros testes de rotação para verificação do comportamento do sistema de giro, houve um incidente. As conexões entre o anel de torque e o motor hidráulico se soltaram da estrutura, provocando o rompimento dos dentes de uma das peças em ferro fundido e danificações no acoplamento flexível, como mostrado na Figura 3.14.

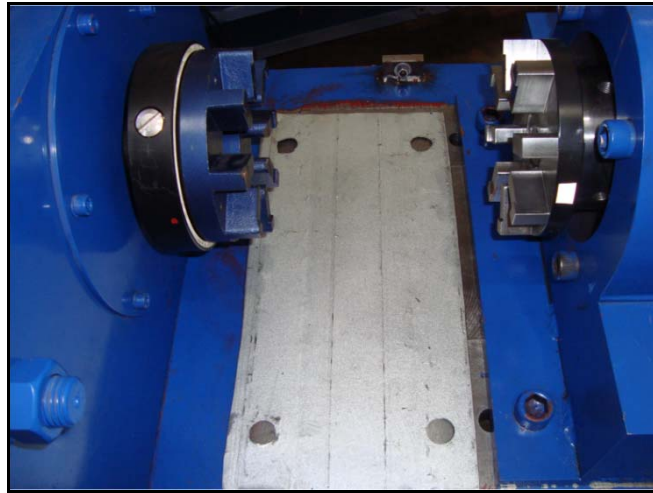


**Figura 3.14** – Estruturas danificadas após primeiros testes de rotação; a) Parte do acoplamento flexível marca Gummi, modelo A-60, danificado e b) Cubo em ferro fundido com 2 dentes rompidos.

As principais causas apontadas para o ocorrido foi o desalinhamento provocado pelo excesso de acoplamentos e a baixa resistência mecânica do cubo de ferro fundido. Após levantamento de medidas cabíveis, foi definida a eliminação do acoplamento flexível e a fabricação de novo cubo.

A eliminação do acoplamento resultou numa aproximação do flange que suporta o motor hidráulico em relação ao anel de torque. Assim, foram realizados mais quatro furos na base do equipamento para a fixação do flange ao pórtico, de tal sorte que se pudesse montar o conjunto sem o acoplamento flexível. Após a verificação de altura e alinhamentos também foi colocada uma chapa de alumínio abaixo do flange, como mostra a Figura 3.15.





**Figura 3.15** – Cubos para acoplamento do torquímetro e placa de alumínio para ajuste de altura do flange do motor hidráulico.

A fabricação do novo cubo que é acoplado ao eixo do motor hidráulico foi realizada por usinagem, em aço ABNT 1045. O novo cubo é apresentado na Figura 3.16.

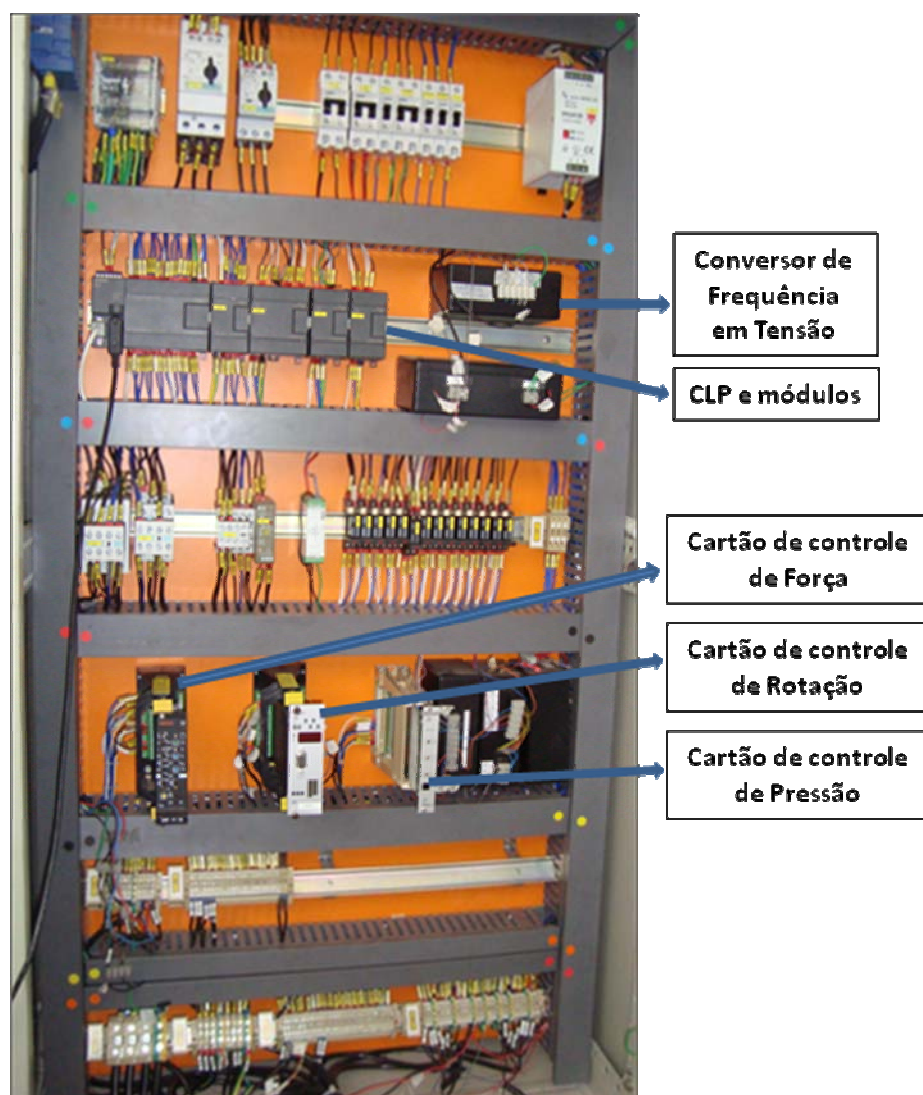


**Figura 3.16** – Cubo de aço ABNT 1045 acoplado ao eixo do motor hidráulico.

Com as modificações realizadas nos acoplamentos do sistema de giro, foram realizados testes para verificação da funcionalidade e estabilidade. Os desalinhamentos foram reduzidos, sendo que o anel de poliuretano do torquímetro passou a ser o principal compensador de possíveis desalinhamentos. Menos componentes, menor massa e menor esforço ou batimento radial foi conferido ao sistema.

### 3.2 – Painele de Acionamentos Elétricos e Comandos

A realização de acionamentos elétricos, comandos e controles em geral do sistema é comandada por um painel, mostrado na Figura 3.17. Nele encontram-se todas as chaves liga/desliga, botões, cabos, controladores, dispositivos de segurança, condicionadores, relés, alimentação, etc..



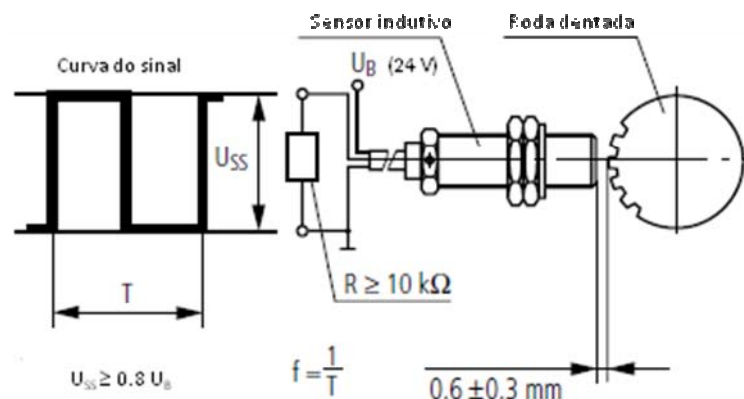
**Figura 3.17** – Painel de acionamentos elétricos e comandos para controle do equipamento de reparo por atrito.

### 3.3 – Instrumentação e Sistema de Controle

### 3.3.1 – Sensores para Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é composto de sensores diversos. Para leitura da rotação do pino tem-se um sensor indutivo que é acoplado próximo a uma roda dentada presente no motor hidráulico. Assim, são gerados pulsos elétricos cada vez que há transição de um dente para outro. Esses pulsos são devidamente condicionados e enviados como referência para o sistema de controle e adquiridos para a leitura em tempo real dos valores de velocidade de rotação.

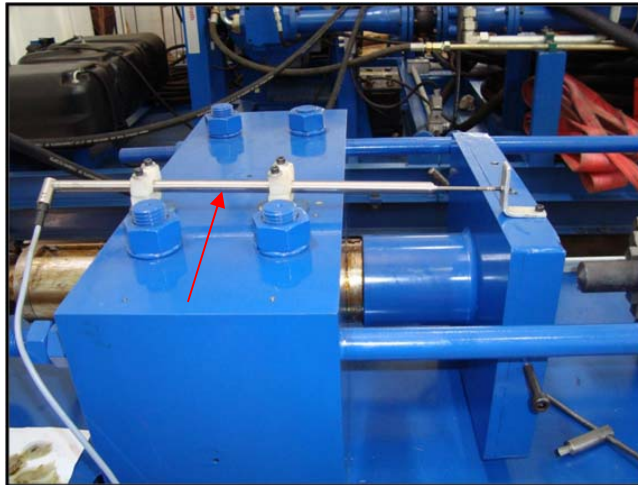
A Figura 3.18 mostra o princípio de funcionamento do sistema de medição da velocidade de rotação.



**Figura 3.18** – Princípio de funcionamento do sistema de medição da rotação usando sensor indutivo.

A aquisição dos valores de comprimento de queima do pino é realizada através de um transdutor de deslocamento indutivo, o qual é baseado no princípio da bobina diferencial a um quarto de ponte.

Inicialmente, foi proposta uma montagem do sensor de deslocamento sobre o mancal do eixo deslizante, com fixação da haste do sensor no porta blocos, como apresentado na Figura 3.19.



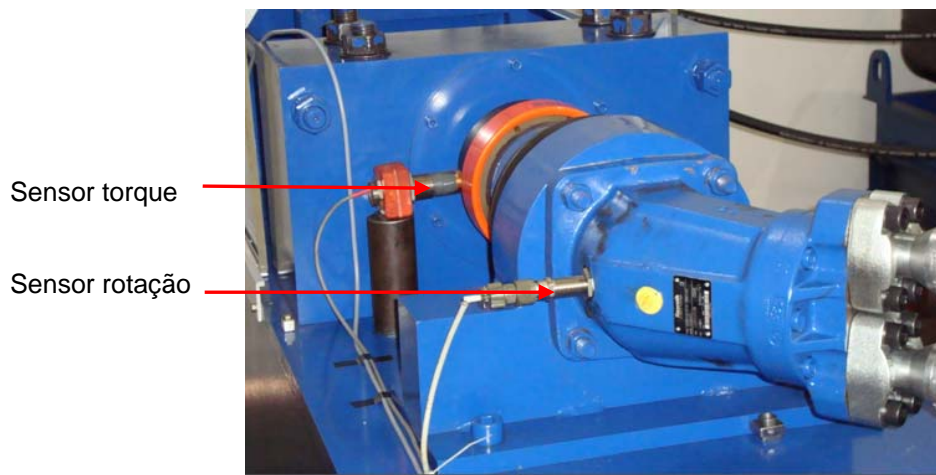
**Figura 3.19** - Detalhe da primeira disposição do transdutor de deslocamento.

Após os primeiros testes com deslocamento do cilindro hidráulico, as curvas do sinal de comprimento de queima do pino indicaram valores que variavam consideravelmente em relação à média. Essa variação ocorreu devido às vibrações experimentadas pelo porta blocos no momento que o pino girante tocava o mesmo. Além disso, foi verificada uma folga excessiva nos parafusos de fixação do porta blocos. O aperto desses parafusos não levou a uma melhora significativa da dispersão dos resultados. Assim, para minimizar a influência da vibração provocada durante um ensaio, definiu-se uma nova configuração para a fixação do transdutor de deslocamento. A Figura 3.20 apresenta a configuração adotada, onde haste do sensor é fixada no próprio cilindro hidráulico, através de uma cantoneira.



**Figura 3.20** – Nova fixação do sensor de deslocamento.

Os sensores de rotação e o receptor do sinal de torque foram dispostos no equipamento como mostrado na Figura 3.21. O sensor de rotação é acoplado em uma entrada própria no motor hidráulico, onde se encontra internamente uma roda dentada utilizada na geração de pulsos elétricos. Já o receptor de sinal de torque foi posicionado próximo (cerca de cinco mm) ao anel de torque. Este receptor adquire as ondas de rádio transferidas pelo anel de torque. O sinal adquirido é transferido para um conversor do sinal de frequência em tensão elétrica. Em seguida, os dados são coletados na placa de aquisição conectada a um microcomputador.



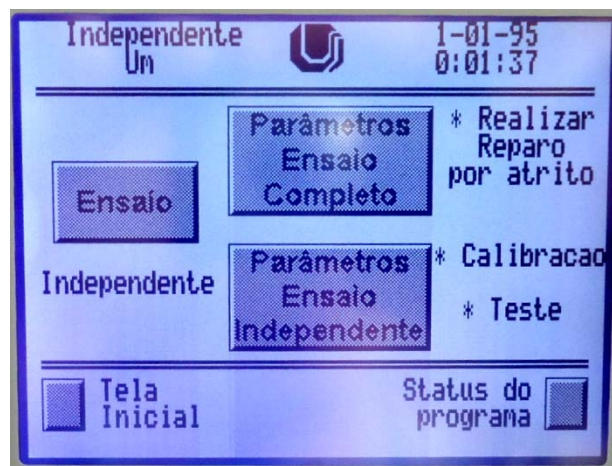
**Figura 3.21** - Detalhes do sensor de rotação acoplado ao motor hidráulico e do receptor do sinal de torque via onda de rádio.

### 3.3.2 – Programação para o Controle do Sistema

O sistema de controle do equipamento é composto por um elemento chave que é o Controlador Lógico Programável (CLP). Este executa os acionamentos e comandos de forma automatizada através de módulos de entrada e saída que processam sinais discretos (5V) e analógicos (4 -20 mA ou 0 – 10 V). Os sinais dos sensores são aplicados às entradas dos controladores e a cada ciclo (varredura), todos os sinais são lidos e transferidos para a unidade de memória interna, denominada memória imagem de entrada. Esses sinais são associados entre si aos sinais internos de referência. Ao término do ciclo de varredura, os resultados são transferidos à memória imagem de saída e então aplicados aos terminais de saída.



Além do CLP, tem-se um dispositivo muito importante para a parametrização de cada ensaio que é realizado. Esse dispositivo é a Interface Homem Máquina ou simplesmente IHM, que é acoplada à porta do painel elétrico. A IHM é composta por um programa construído de forma dedicada à aplicação para ensaios de reparos por atrito. Sua interface é composta por botões diversos de configuração que são ativados e desativados com um simples toque na tela, como mostrado na Figura 3.22. Esse sistema facilita a configuração inicial para definição dos valores de cada parâmetro do processo.



**Figura 3.22** – Interface Homem Máquina para configuração de parâmetros.

A colocação de todo o equipamento em operação de forma controlada só é possível com a configuração das diversas telas utilizadas para a programação.

## **CAPÍTULO 4**

### **VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS SENSORES E LEVANTAMENTO DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA**

Os sinais advindos dos sensores são de fundamental importância, tanto para o monitoramento do processo assim como para o controle do sistema. Para verificar o funcionamento dos sensores no sistema e identificar a função de transferência dos mesmos, foram realizados ensaios de verificação de cada sensor e obtidas as respectivas funções de transferência. Desta forma, é possível monitorar e controlar todo o processo.

#### **4.1 – Verificação do Funcionamento do Sensor de Deslocamento**

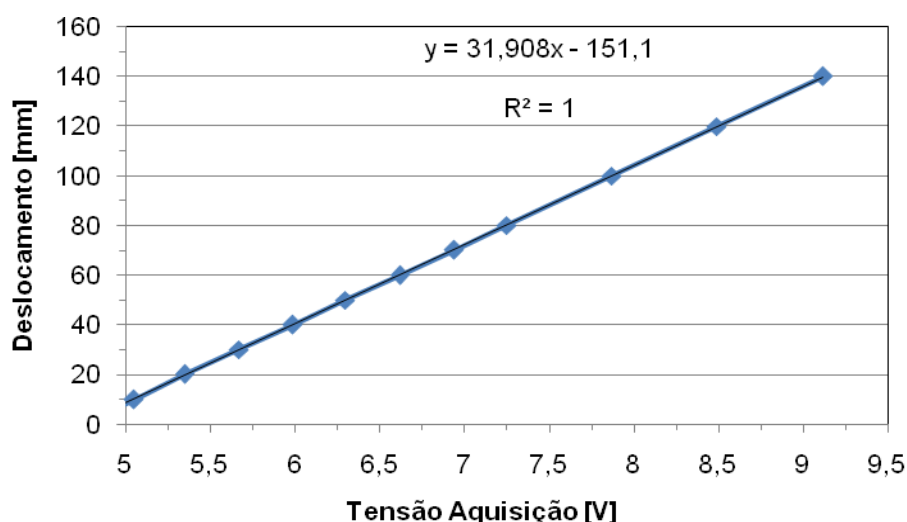
Um parâmetro muito importante na determinação do início e término dos ensaios de reparo por atrito é o comprimento de queima do pino. Através de uma posição de referência é determinada a posição inicial do ensaio e à medida que ocorre o processamento do pino, o mesmo é consumido e ocorrem deslocamentos que são influenciados principalmente pelos níveis de carga aplicados.

Como principal agente na determinação do posicionamento do pino de reparo tem-se o transdutor de deslocamento. Para a aplicação correta do mesmo nas medições diretas de posição foi necessária a verificação da resposta do mesmo com deslocamentos variados. De posse dessa resposta, pode-se então inferir sobre a posição.

Após a instalação do transdutor de deslocamento indutivo no pórtico de reparo e conexões diversas para o sistema de aquisição dos sinais gerados pelo mesmo, construiu-se uma curva de função resposta. Essa curva representa o modelo matemático da relação do sinal analógico gerado, proporcional aos

deslocamentos da haste do sensor. A verificação do funcionamento do transdutor de deslocamento ocorreu utilizando-se um condicionador de sinal próprio, que envia o sinal analógico proporcional ao deslocamento linear na faixa de 0 a 10 V para a placa de aquisição de dados. Para a medição da variação do comprimento utilizou-se um paquímetro com resolução de 0,01 mm. Assim, a verificação iniciou-se com o cilindro de avanço todo recuado definindo-se um ponto inicial zero para construção da curva. Após leitura do sinal analógico proporcional na saída do condicionador para o primeiro ponto, o cilindro de avanço deslocou-se 10 mm para os pontos seguintes até a marca de 140 mm. Cada posição da haste do transdutor de deslocamento teve a leitura do sinal em tensão proporcional.

A Figura 4.1 mostra a função de transferência do sensor de deslocamento utilizado no equipamento. Nota-se dessa figura, que há uma correspondência direta e linear da tensão com o deslocamento.



**Figura 4.1** – Função de transferência do sensor de deslocamento.

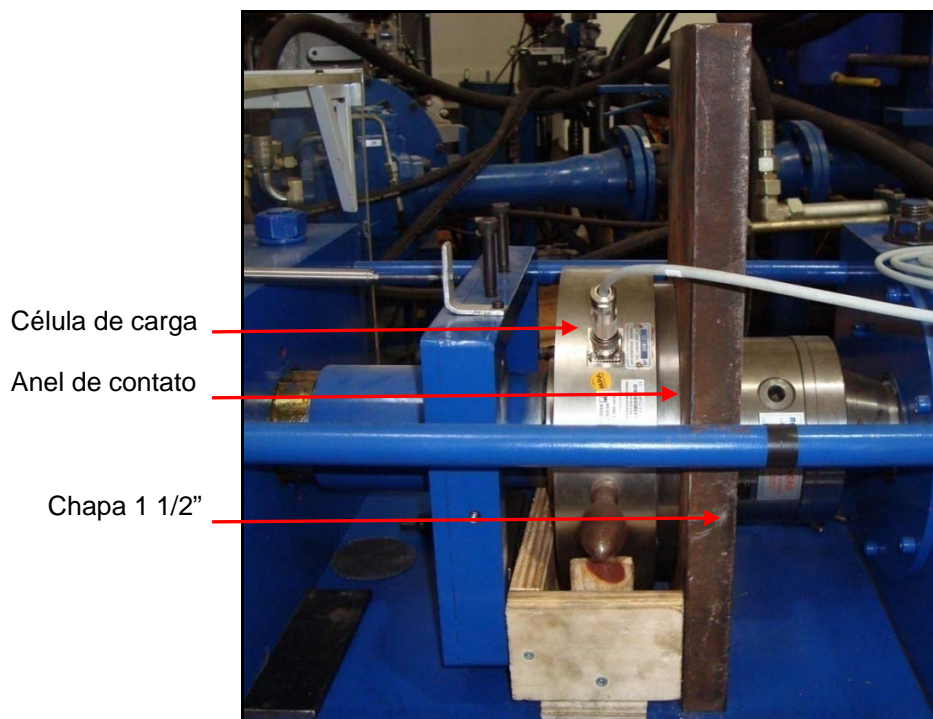
## 4.2 – Verificação do Funcionamento do Sensor da Força Axial

Para verificar a carga aplicada ao sistema, utilizou-se uma célula de carga calibrada da marca HBM, modelo U10M. Ela é um transdutor de força tração/compressão para aplicações dinâmicas e estáticas, com faixa de medição de 0 a 500 kN, sensibilidade de 2 a 2,5 mV/V, linearidade de 0,06%, carga limite de



230% do valor nominal e torque máximo permissível de 11430 kN. Para realizar a verificação do funcionamento da célula de carga, foi necessária a montagem de um sistema, composto por um apoio para a célula de carga, um anel de contato direto com a célula de carga e uma chapa de uma polegada e meia de espessura para apoio do anel, como mostra a Figura 4.2. A leitura da célula de carga foi realizada através de um amplificador de medição próprio, que fornece leituras diretas em kgf. Estabeleceu-se uma faixa ótima de operação entre 100 e 400 kN.

Nessa fase, detectou-se um problema na bomba do cilindro hidráulico da Figura 3.9 durante testes. O disjuntor ao qual a fiação estava ligada estava subdimensionado. Este contratempo foi resolvido após correção do disjuntor.

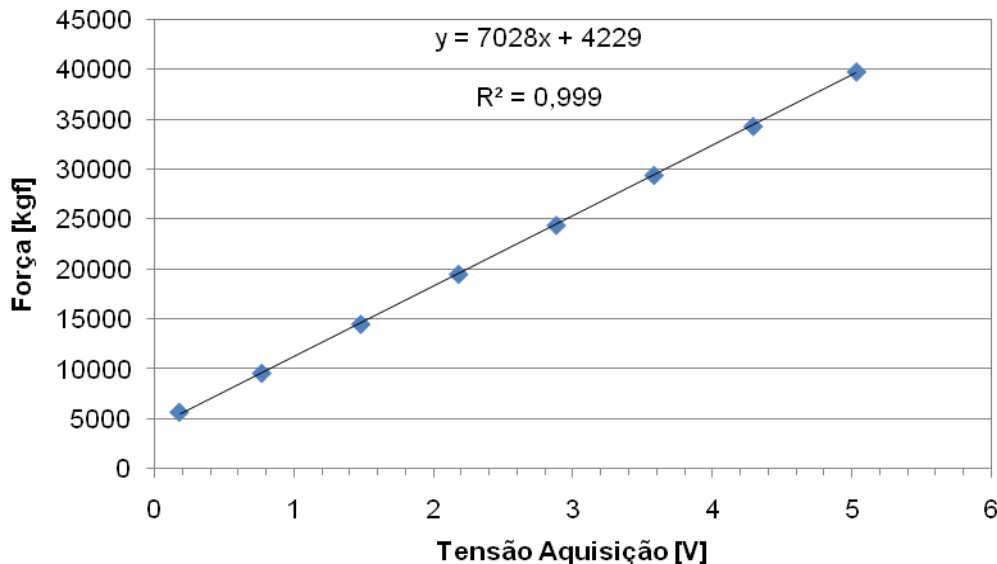


**Figura 4.2** – Montagem do sistema de verificação da força axial.

Realizadas as correções para operação do equipamento, mediu-se a carga aplicada diretamente à célula de carga. Proporcionalmente tem-se a tensão correspondente para acionamento das válvulas proporcionais que controlam o fluxo de óleo no cilindro hidráulico. Esse sinal advém do cartão PID.

Com auxílio do programa de controle enviou-se um sinal de referência, em tensão, para o cartão de controle PID. Mediu-se esse sinal e com a célula de carga encontrou-se diretamente a carga correspondente em kgf. Incrementou-se o sinal de

referência até encontrar-se uma força correspondente de 400 kN, com esse resultado construiu-se a curva mostrada na Figura 4.3.



**Figura 4.3** – Função de transferência do sistema de força.

Observa-se um coeficiente de linearização muito próximo de 1, mostrando alta linearidade do sistema. Dessa forma, o operador entra com o valor da carga de ensaio requerida e a saída do CLP envia um sinal em tensão correspondente para o cartão PID. O cartão é quem garante a aplicação de uma força constante ou o mais próximo possível do valor estabelecido pelo operador.

O sinal de feedback que o cartão recebe é correspondente à diferença entre as leituras realizadas por transdutores de pressão instalados na entrada e saída do cilindro hidráulico. Portanto, essas leituras estão diretamente relacionadas com a tensão necessária para a aplicação da força.

A entrada de valores de força em kgf é convertida para valores correspondentes em tensão elétrica no próprio programa de controle. Com a equação da função de transferência foi possível monitorar a força aplicada durante os ensaios. Essa equação foi inserida no programa de monitoramento dos parâmetros do processo.

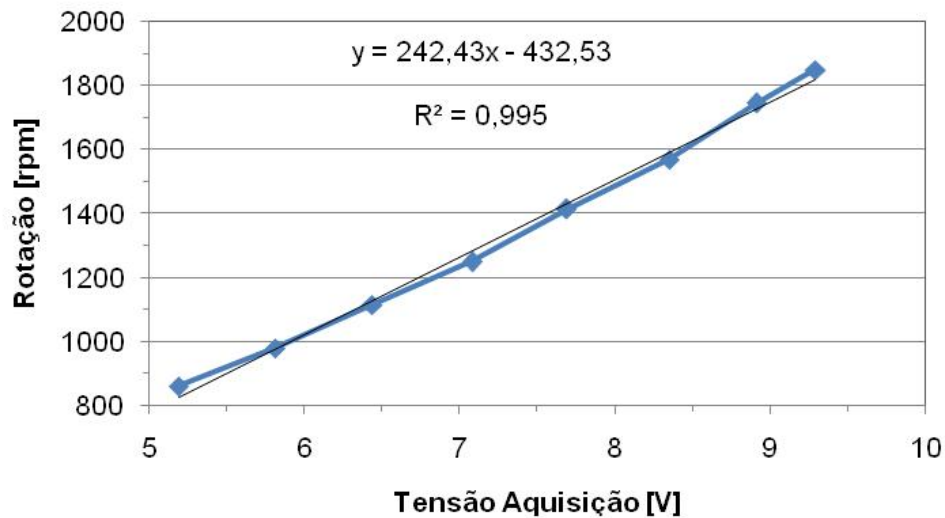
### 4.3 – Verificação da Velocidade de Rotação

Inicialmente foi realizada uma avaliação do comportamento da velocidade de rotação. Após verificar a impossibilidade de utilização de um sensor indutivo “*Balluff*” com atuação até 1 kHz, optou-se pela montagem do mesmo sensor utilizado na UPPA 2. Trata-se aqui de um sensor indutivo de efeito Hall, que opera com frequência proporcional à velocidade de rotação de uma roda dentada, como mostrado anteriormente, o sinal de saída é uma onda quadrada e para compatibilidade do sistema e viabilizar a realização do controle em malha fechada foi necessário a utilização de um conversor de frequência em tensão.

O controle de rotação do motor hidráulico é feito através de um cartão controlador digital PID VT-HACD. Foram realizados ajustes dos parâmetros de controle através do *software* BODAC, que é específico para o ajuste dos parâmetros tais como: Kp, Ki, Kd (constante proporcional, integral e derivativa, respectivamente) e a definição da saída do cartão de controle (sinal em tensão ou corrente). Após a definição desses parâmetros, todas as configurações realizadas foram armazenadas no cartão via comunicação serial RS-232.

Durante vários testes para avaliação da estabilidade e diferentes níveis de rotação, investigou-se uma faixa de atuação de 500 a 1.000 rpm, com a válvula proporcional direcional aberta a 90 %, e um conversor de frequência em tensão foi construído para esta faixa de operação. No entanto, esses níveis de rotação não atenderam às necessidades de preenchimento para as geometrias utilizadas, no que se refere a velocidades relativas de deslizamento entre pino e bloco. Essas velocidades relativas podem variar em torno de 1 a 2 m/s na região de interface pino/bloco. Assim, o conversor de frequência em tensão do sensor de rotação foi redimensionado para atuar com uma frequência de até 2.000 Hz. O ajuste permitiu, então, obter rotações de até 1.800 rpm e realizar os ensaios sem travamento do motor hidráulico.

Com o novo conversor de frequência verificou-se a rotação de acordo com a curva apresentada na Figura 4.4.



**Figura 4.4** – Função de transferência do sensor de rotação e conversor de frequência.

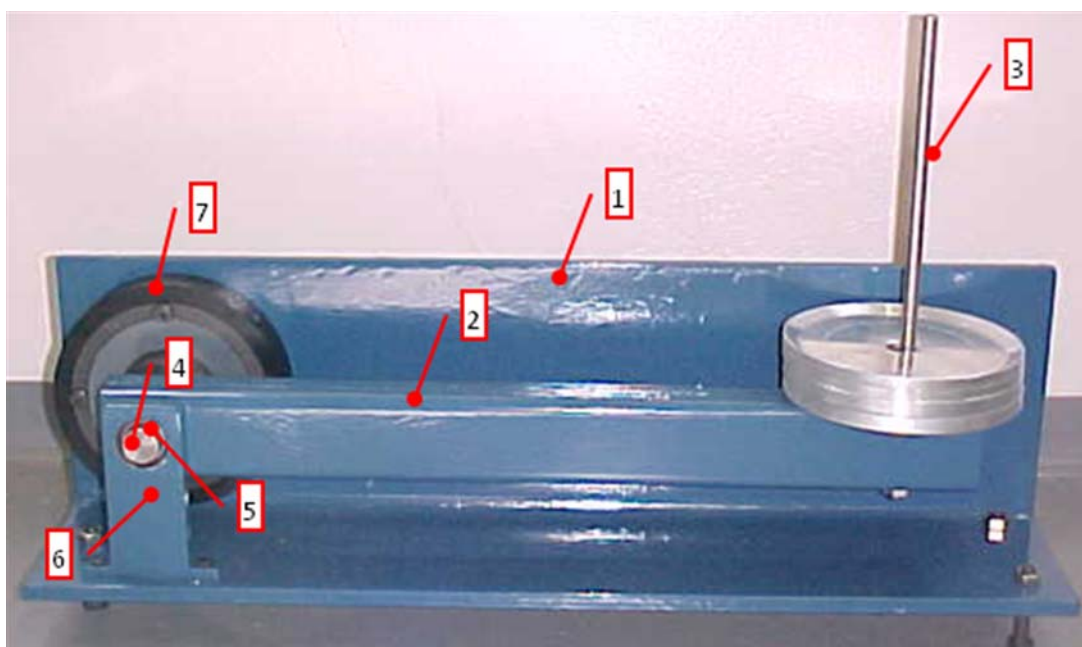
#### 4.4 – Verificação do Torque

Outro importante parâmetro a ser medido nos ensaios de reparo por atrito é o torque. Ele também está diretamente associado à energia gasta no processo. Para determinar os valores de torque foi utilizado um torquímetro que tem como configuração uma resolução de 0,4% do valor nominal de torque (1000 N.m), ou seja, 4 N.m. A correspondente sensibilidade do sensor de deflexão é de 20 mV, já que se tem uma faixa de 0 a 10 V para a saída do conversor de sinal do sistema, abrangendo torques que vão de -1000 a 1000 N.m. Assim, para a tensão de 0 V, tem-se, no sentido anti-horário, um torque de 1000 N.m. Para 5 V o torquímetro não apresenta nenhuma indicação de torque. Já para tensões de 10 V, o esperado é um torque de 1000 N.m, no sentido horário. A precisão é de 5 % do fundo de escala, o que equivale a 50 N.m.

Para a decodificação do sinal do anel de torque e enviar os dados via cabo para o dispositivo de saída, utiliza-se o receptor E60RX da Autogard. Ele foi montado num furo roscado M30 próximo ao anel de torque com uma ponta de plástico, faceando toda a região tangencial do anel durante o giro. A distância recomendada entre o E60RX e o anel de torque é de 5 mm ou menos.

Para conhecimento do comportamento, precisão com que o torquímetro trabalha, verificação e definição de uma curva de calibração, foi projetado um dispositivo para realizar uma calibração do sistema Monitorq (torquímetro por telemetria), como representado na Figura 4.5. Esse sistema consiste basicamente de dois perfis, sendo um em “L” e outro do tipo caixão, e um suporte para pesos.

O conjunto permite simular qual a leitura que deverá ser feita via computador, de acordo com as cargas colocadas, colaborando para que o torque tenha uma variação e sejam gerados sinais de tensão analógica proporcionais a esse torque aplicado.



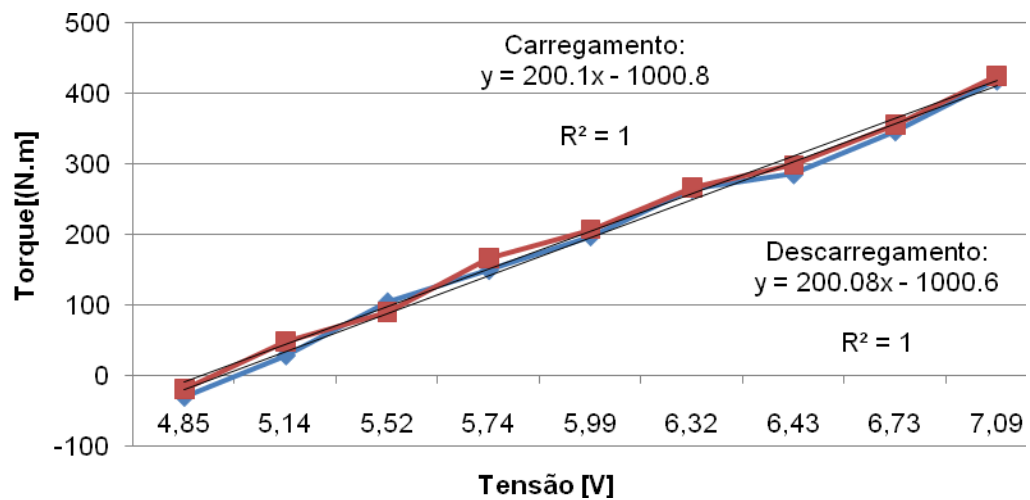
**Figura 4.5** – Sistema de verificação de funcionamento do torquímetro por telemetria.

Cada parte do sistema apresentado na Figura 4.5 será descrita a seguir:

- 1 - perfil em “L” de 200x150x12 mm<sup>3</sup>, ao qual foram feitos furos para fixação do torquímetro, fixação do apoio 6 e colocação de parafusos niveladores;
- 2 - perfil do tipo caixão de 60x40x4 mm<sup>3</sup>, com extremidades furadas para o acoplamento das peças 3 e 4;
- 3 - haste porta-pesos, que tem a função de garantir a posição dos pesos durante a simulação de torque;
- 4 - eixo com chaveta, que é acoplado em 2 e em 5. Este é o eixo passante no torquímetro que transmite o torque gerado pela carga;

- 5 - rolamento de esferas;
- 6 - suporte funcionando como um mancal para o rolamento que dá a sustentação para o eixo que é acoplado ao torquímetro.
- 7 - anel de torque, que é fixado no perfil 1 e para onde efetivamente o torque é transmitido.

Após a aplicação de cargas discretas, encontrou-se uma resposta que levou à definição de uma curva muito próxima da curva fornecida pelo fabricante. O resultado obtido é apresentado na Figura 4.6.



**Figura 4.6** – Curvas da função resposta para o carregamento e descarregamento estático.

## **CAPÍTULO 5**

### **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS PRELIMINARES**

#### **5.1 – Ensaios Preliminares**

Durante a fase dos primeiros testes de verificação da funcionalidade e comportamento da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 estabeleceram-se alguns ensaios preliminares. Estes ensaios foram realizados utilizando geometrias de pinos e blocos baseados em trabalhos anteriores, como os de Pires (2007) e Hwang (2010).

##### *5.1.1 – Materiais e Geometrias Utilizadas*

O material utilizado para pinos e blocos em todos os ensaios foi o aço estrutural ASTM (American Society for Testing and Materials) A36. Para fabricação dos pinos de teste foi utilizada parte de uma barra cilíndrica de 6 m de comprimento com 38,1 mm de diâmetro. Chapas de teste foram obtidas a partir de chapas laminadas de 2 m de comprimento por 1 m de largura e 25,4 mm de espessura.

A composição química dos materiais utilizados é apresenta da Tabela 5.1, sendo determinada via espectrometria de emissão ótica no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES).

**Tabela 5.1** – Composição química de materiais utilizados em testes e ensaios (% em peso).

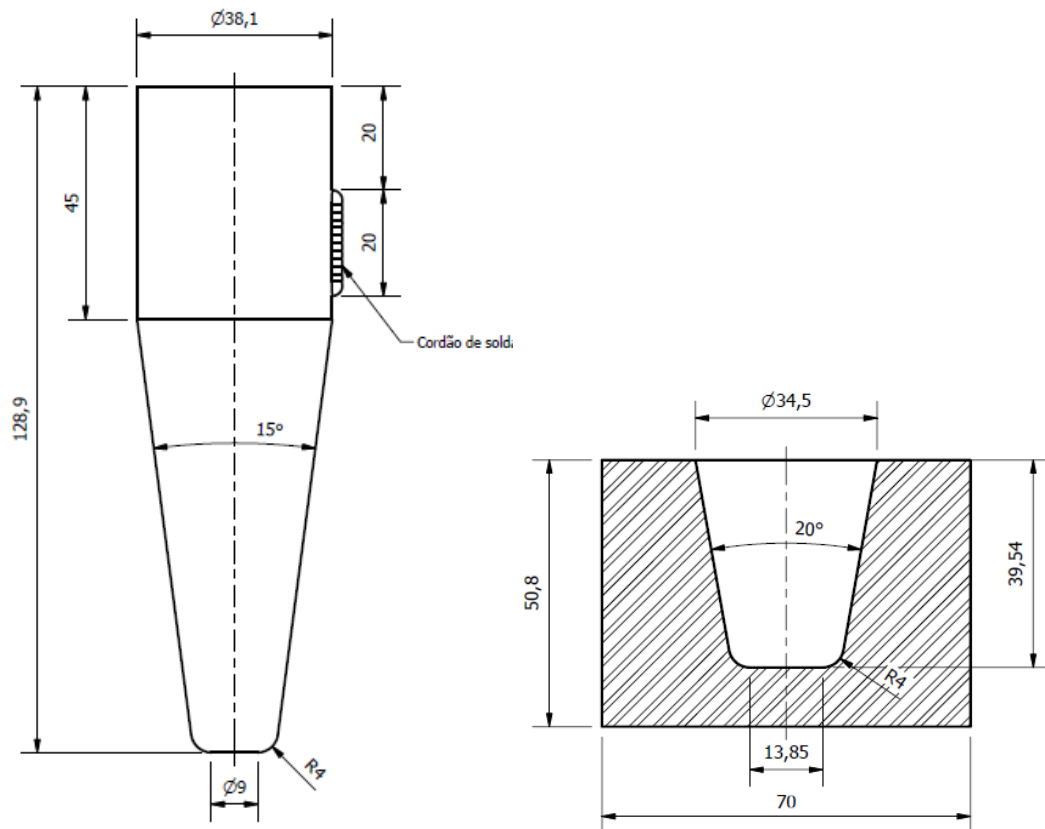
Elementos	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	S	P
<b>Substrato ASTM A36</b>	0,185	0,964	0,429	0,008	0,127	0,294	0,030	0,018
<b>Pino ASTM A36</b>	0,219	0,719	0,006	<0,001	0,009	0,184	-	0,012

Como os primeiros testes tinham por objetivo a adequação do sistema como um todo e verificação de faixas de operação do equipamento, as geometrias não necessitaram de tolerância alguma de acabamento. Assim, os corpos de prova foram preparados sem muitas preocupações dimensionais. Os pinos foram confeccionados mediante usinagem em torno, com arredondamento em uma das extremidades. Ou seja, os pinos aproximaram-se muito de uma geometria totalmente cilíndrica, possuindo uma extremidade cônica de aproximadamente 5 mm de altura. As chapas de teste foram cortadas em serra de fita com dimensões de aproximadamente 100 x 50 mm<sup>2</sup>.

Alguns testes iniciais foram realizados também com a geometria apresentada na Figura 5.1. Esta geometria foi proposta inicialmente com base em resultados obtidos nos trabalhos de Pires (2007). As proporções de ângulo foram mantidas, mas o diâmetro da extremidade (menor diâmetro) do pino e demais dimensões foram aumentadas para testes no equipamento com maior capacidade de cargas e torque (UPPA3).

Por medida de segurança foi construído um cordão de solda na região que fica entre as placas de castanha, impedindo o giro falso entre o pino e as castanhas de fixação.





**Figura 5.1** – Geometria para pino e bloco utilizados em ensaios preliminares e de preenchimento, que corresponde à geometria “H” do trabalho de Pires (2007).

#### 5.1.2 – Matriz para Teste de Funcionalidade

Foi elaborada uma matriz de ensaios com a geometria “H”, sendo que a rotação de trabalho foi definida em função de um intervalo de velocidade linear que o pino possui. Considerou-se a faixa de velocidade linear correspondente ao diâmetro menor do pino (9 mm) até um diâmetro posicionado numa seção 40 mm acima dessa seção equivalente a 26,55 mm.

A matriz com definição dos valores dos parâmetros utilizados pode ser visualizada na Tabela 5.2. Os ensaios de 4 a 7 foram realizados com dois estágios de processamento, sendo o primeiro com 5 mm de comprimento de queima e com 60 kN de carga. O segundo estágio teve 10 mm de comprimento de queima e de acordo com a carga estabelecida.

**Tabela 5.2** – Matriz de ensaios preliminares com geometria “H” e rotação de 1700 rpm..

Ensaio	Força [kN]	Comprimento de queima [mm]	Forjamento [kN] por 3 s
1	100	12	100
2	100	17	100
3	100	22	100
4	60 -100	15	100
5	60 -200	15	200
6	60 - 300	15	300
7	60 - 400	15	400

Com o objetivo de explorar a operacionalidade do equipamento, foi elaborada uma nova matriz de ensaios com mais duas geometrias propostas para exploração dos limites de operação do equipamento.

Para definir o comprimento de queima foram necessários alguns ensaios iniciais e estabeleceram-se três processamentos com comprimentos diferentes, como mostrado na Tabela 5.3. Para inserir um aporte térmico inicial definiu-se um primeiro estágio de processamento (com comprimento de queima, carga e rotação definidos) com a carga mínima controlada de 60 kN e um segundo estágio também com os mesmos parâmetros do primeiro estágio, mas com valores de carga e comprimento de queima diferentes.

**Tabela 5.3** – Matriz preliminar para definição de comprimento de queima, utilizando-se uma força de 200 kN.

Corpo de prova	Primeiro estágio [mm]	Segundo estágio [mm]	Rotação [rpm]
A	3	5	1700
A	3	7	
A	3	9	
B	3	5	1500
B	3	7	
B	3	9	

### *5.1.3 – Procedimentos para Realização de Testes*

Cada ensaio realizado passa pela definição dos valores dos parâmetros do processo. Estes são inseridos via IHM e durante a operação do equipamento, os sensores diversos adquirem todas as informações para controle e monitoramento.

Antes de cada ensaio é realizada uma verificação geral das conexões do sistema hidráulico, motores, tanque de combustível, possíveis vazamentos, etc. Também é feita uma demarcação de área de segurança, evitando trânsito de pessoas nas proximidades do equipamento durante os ensaios. Para operação do equipamento utilizam-se alguns Equipamentos de Proteção Individual (EPI), tais como capacete e protetor auricular. Pino e bloco são fixados ao porta blocos e placa de castanhas, respectivamente. Na sequência é dado início à operação do equipamento de forma segura e precisa.

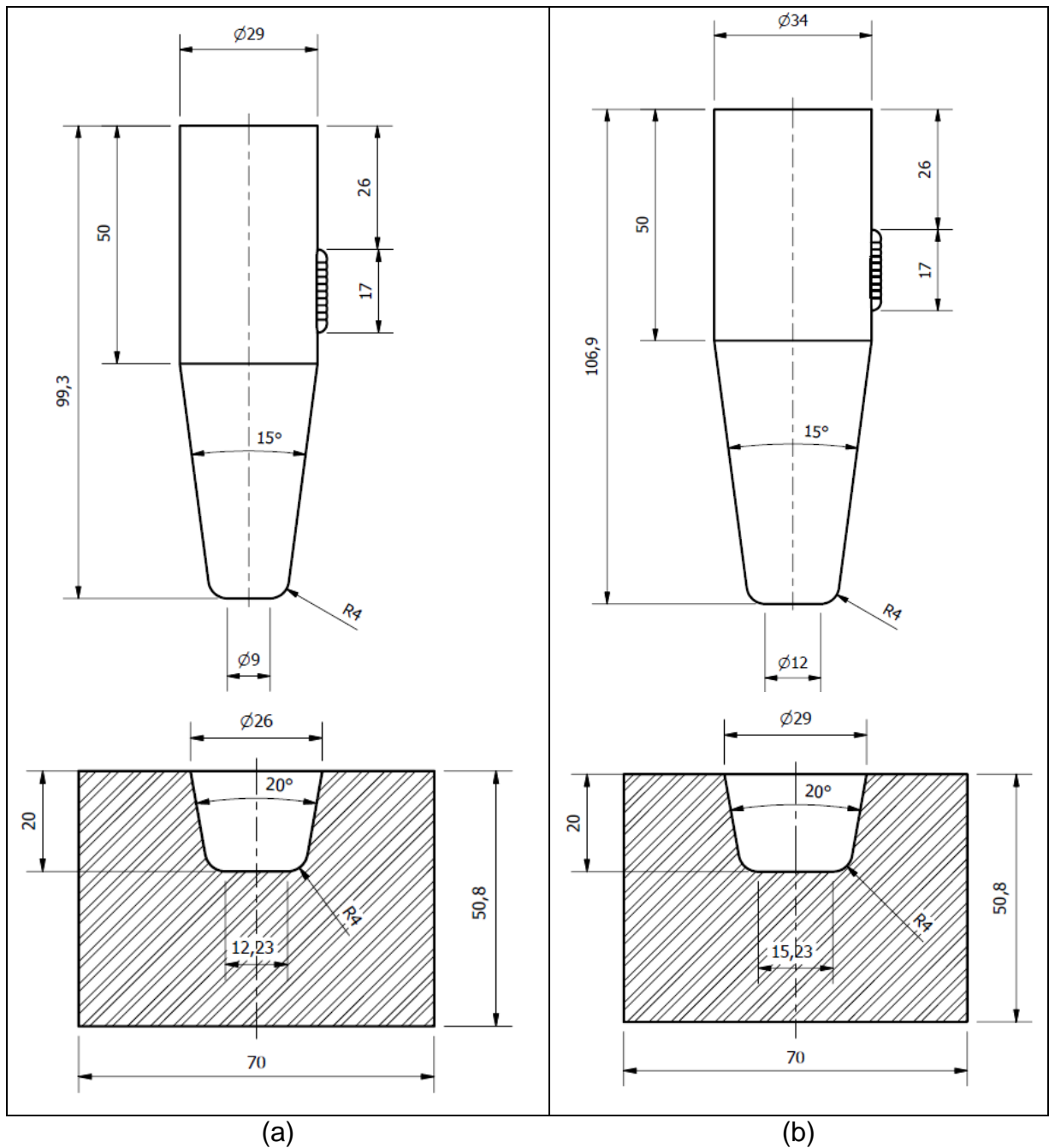
## **5.2 – Ensaio de Preenchimento**

### *5.2.1 – Materiais e Geometrias para Pino e Bloco*

Os ensaios de preenchimento, assim como ensaios preliminares, também foram realizados com o aço estrutural ASTM A36.

As geometrias utilizadas foram três: a geometria “H” abordada anteriormente, uma geometria “A” e uma geometria “B”. No entanto, todas as três geometrias possuem as mesmas proporções de ângulo para as partes cônicas dos pinos e furo dos blocos.

As geometrias “A” e “B” podem ser vistas na Figura 5.2 a seguir:



**Figura 5.2** – Geometrias de pinos e blocos utilizados nos ensaios de preenchimento;  
a) Pino e bloco geometria “A”; b) Pino e bloco geometria “B”.

### 5.2.2 – Matriz de Ensaios de Preenchimento

Com a definição dos comprimentos de queima para cada ensaio e testes com rotações estabelecidas para que não houvesse o travamento do equipamento, construiu-se a matriz da Tabela 5.4.

**Tabela 5.4** – Matriz de ensaios de preenchimento para geometrias “A” e “B”. O comprimento de queima do primeiro estágio foi de 5 mm e do segundo de 3 mm.

ENSAIO	Corpo de Prova	FORÇA [kN]	ROTAÇÃO [rpm]	FORJAMENTO [kN] POR 3 s
1	A	60	1700	60
2	A	60 - 100		100
3	A	60 - 200		200
4	A	60 - 300		300
5	A	60 - 400		400
6	B	60	1500	60
7	B	60 - 100		100
8	B	60 - 200		200
9	B	60 - 300		300
10	B	60 - 400		400

As definições de carga propostas procuraram abranger valores na faixa de 60 a 400 kN. Todas as legendas nomeiam as amostras da seguinte forma: a primeira letra corresponde à geometria considerada (“A”, “B” ou “H”) e os dois números seguintes representam a carga utilizada (60, 100, 200, 300 ou 400 kN). A partir do ensaio 2 e 7 encontram-se os ensaios realizados em dois estágios.

### 5.2.3 – Procedimentos para Reparos por Atrito

A operação do equipamento é feita com os mesmo cuidados e preparação exposta anteriormente para os ensaios preliminares. Porém, agora os ensaios realizados foram realizados para posterior análise microestrutural.

A preparação de limpeza de pinos e blocos foi realizada com utilização de querosene para retirada de óleo, sujeira e graxa, presentes após usinagem dos mesmos. Posteriormente utilizou-se um ultra-som no qual são inseridos os corpos de prova mergulhados em acetona num béquer. Assim, garante-se a eliminação da maior parte de resquícios de óleo e demais resíduos.

Nesses ensaios o primeiro estágio de queima tem por objetivo promover um aporte térmico para o processamento do pino. Em seguida, no segundo estágio,

tem-se a aplicação da carga desejada até completar-se o preenchimento total do furo do bloco.

Os ensaios da Tabela 5.4 foram todos realizados com auxílio de um pino de referência (com as mesmas dimensões do furo do bloco) para o alinhamento em cada ensaio. Esse pino de referência era fixado na placa de castanhas e, em seguida, encaixava-se o mesmo no bloco, até as proximidades do fundo do furo. Isso garantia uma boa centralização para o par pino/bloco antes da realização do reparo.

### **5.3 – Aquisição de Dados**

As informações de cada ensaio são transferidas para o computador. Após condicionamento próprio, cada sinal dos sensores diversos está diretamente conectado a uma placa de aquisição de dados. A placa utilizada é uma PCI-DAS 1200 com resolução de 12 bits. A arquitetura desta placa é baseada no padrão ISA (International Society of Automation).

### **5.4 – Preparação Metalográfica**

Para as análises dos resultados obtidos após preenchimento dos blocos, foram feitas preparações metalográficas de acordo com o tipo de observação. Inicialmente foram feitas observações a olho nu através da macrografia. Em seguida, com intuito de revelar a microestrutura na região da interface bloco/pino, bem como levantar perfis de microdureza Vickers, foram preparadas secções metalográficas das amostras produzidas.

#### **5.4.1 – Macrografia**

Para inspeção macrográfica, a parte não processada foi cortada. Em seguida, foi realizado um corte na direção longitudinal em relação à posição do pino e paralelamente a uma das faces do bloco. A principal preocupação neste momento foi preservar a região central do material para a realização de inspeção e estudo da

qualidade do reparo. Os cortes foram feitos com uma serra de fita, com baixa velocidade de corte e refrigerante a base de água para minimizar qualquer efeito térmico sobre a microestrutura.

O próximo passo foi a retificação do material. Essa etapa foi necessária, principalmente para posteriores análises em microscópios, mantendo a planicidade ao longo de toda a superfície explorada.

A superfície em estudo foi lixada de acordo com o procedimento operacional padrão próprio. As lixas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina) sequencialmente utilizadas possuíam granulometrias de 80, 220, 320, 400 e 600 *mesh*.

Posteriormente, as amostras foram limpas em ultra-som e, enfim, atacadas com solução de Nital a 6%. Após o ataque, foram executadas inspeções visuais da macroestrutura, identificando-se possíveis defeitos de reparo. A principal verificação feita foi com relação ao preenchimento completo e união metalúrgica na região de interface pino/bloco. Além disso, atentou-se para a abrangência da ZAC.

Todas as amostras foram analisadas e as imagens foram obtidas a partir de uma câmera digital.

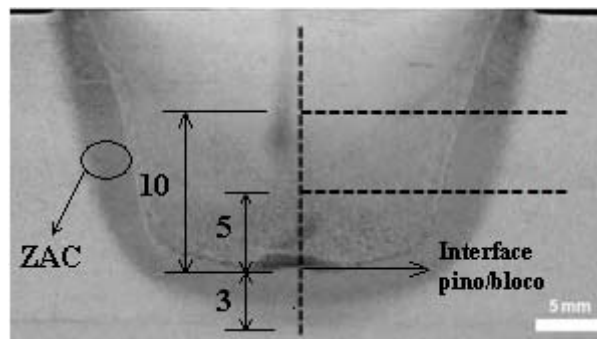
#### 5.4.2 – Micrografia

Realizadas as observações macrográficas, as amostras passaram por uma preparação para obtenção de uma superfície polida. Assim, elas foram lixadas novamente com lixa de 600 *mesh* para retirada da camada atacada anteriormente. Em seguida, utilizou-se a lixa de 1200 *mesh* antes do polimento com pastas de diamante de granulometrias de 6, 3 e finalmente 1  $\mu\text{m}$ . Terminada essa preparação, as amostras foram atacadas com Nital a 2%.

Após toda a preparação metalográfica, foram realizadas observações através de microscópio ótico. Através deste, foram identificadas e registradas as regiões da microestrutura formada após o reparo por atrito. As fotomicrografias caracterizam o impacto provocado pela modificação de algum parâmetro do processo e evidenciam a presença da ligação entre materiais do pino e do bloco.

## 5.5 – Ensaios de Microdureza Vickers

Para avaliar os resultados de reparo por atrito, foram realizados ensaios de microdureza Vickers. A análise foi baseada no levantamento de perfis de microdureza ao longo da seção de preenchimento nas direções horizontal e vertical. O procedimento utilizado buscou abranger as regiões de interface entre pino e bloco, ZAC, centro de reparo e regiões a 5, 10 e até 20 mm (para geometria "H") da interface entre pino e fundo do furo do bloco, como se observa na Figura 5.3.



**Figura 5.3** – Posicionamento para levantamento de perfis de microdureza e principais regiões de interesse.

A preparação metalográfica procedeu-se da mesma forma que a realizada para as observações micrográficas.

Todas as indentações foram realizadas com carga de 0,05 kgf, espaçamento entre cada evento de 0,2 mm para regiões próximas da interface pino/bloco e de 0,5 mm para as demais. O tempo de aplicação da carga durante os ensaios foi de 15 segundos, com um penetrador Vickers.



## **CAPÍTULO 6**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **6.1 – Operacionalização do Sistema**

A aquisição de todos os insumos para a montagem de todo o sistema mecânico, eletro-eletrônico e de controle permitiu a operacionalização completa da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3. Como a maior parte do sistema hidráulico para geração de potência já se encontrava em operação para a UPPA2, foram necessárias modificações nas conexões hidráulicas para adequação para o novo pórtico de reparo. Além disso, toda a parte de instrumentação através de sensores de monitoramento do sistema foi implantada e conectada ao painel elétrico. A programação em linguagem Ladder via CLP também foi implementada para o controle de todas as rotinas de operação.

O bloco de válvulas controla todas as entradas e saídas do fluxo hidráulico. Portanto, as mangueiras transportadoras de óleo adquiridas que ligam motor hidráulico e cilindro hidráulico foram conectadas diretamente ao bloco de válvulas.

Através dos sinais adquiridos de leitura dos parâmetros do processo via sensores, o programa de controle geral busca o valor estabelecido e realiza o controle em malha fechada. Os controladores atuantes são os cartões instalados no painel elétrico e vão influenciar diretamente na resposta de atuação da velocidade de rotação e força axial.

O último instante do ensaio é caracterizado pela aplicação de uma força constante continuada após cessar o giro. Essa é a chamada força de forjamento e foi aplicada em todos os ensaios realizados.

Como inicialmente o sistema não estava controlado, as cargas aplicadas durante os primeiros testes de operação foram estabelecidas a partir de um sinal na faixa de 0 a 10 V enviado ao cartão de controle da força. Esse sinal foi configurado via IHM, a qual transmite o valor para o CLP e que replica o sinal para o cartão.

O sistema de giro foi controlado também a partir da entrada de sinais de 0 a 10 V da mesma forma que o sistema de aplicação de força. Nesse caso, quem recebe o sinal para controle é o cartão de rotação. Há um programa de controle desse cartão que permite alguns ajustes das constantes de controle PID (Proporcional Integral e Derivativo), que são importantes na resposta e estabilização do sistema.

Todos os ensaios de teste iniciais foram realizados a 1000 rpm para se obter maior aporte térmico possível para o ensaio, já que essa era a maior rotação obtida inicialmente. No entanto, os primeiros resultados com a geometria “H” mostraram a necessidade de aumento da rotação. Assim, foram estabelecidas as velocidades de rotação encontradas nas Tabelas 5.2 e 5.3.

Os primeiros testes de giro apresentaram instabilidade em certas faixas de entrada. Essa instabilidade foi sentida diretamente no motor hidráulico, caracterizada por alternância no sentido de giro do motor. Isso resultava em reversões bruscas no fluxo de óleo hidráulico no sistema, e consequentemente em vibrações das mangueiras de alta pressão durante a realização de um reparo.

Após ajustes no programa do cartão de rotação e encontrada a correspondência entre entrada e saída no CLP, a rotação foi controlada e definida uma curva correspondente à função de transferência. Esta curva foi utilizada para definir a equação que corresponde à relação entre sinal proporcional enviado pelo sensor de rotação (V) e a velocidade de rotação correspondente. Assim, foi possível monitorar os valores de velocidade durante os ensaios.

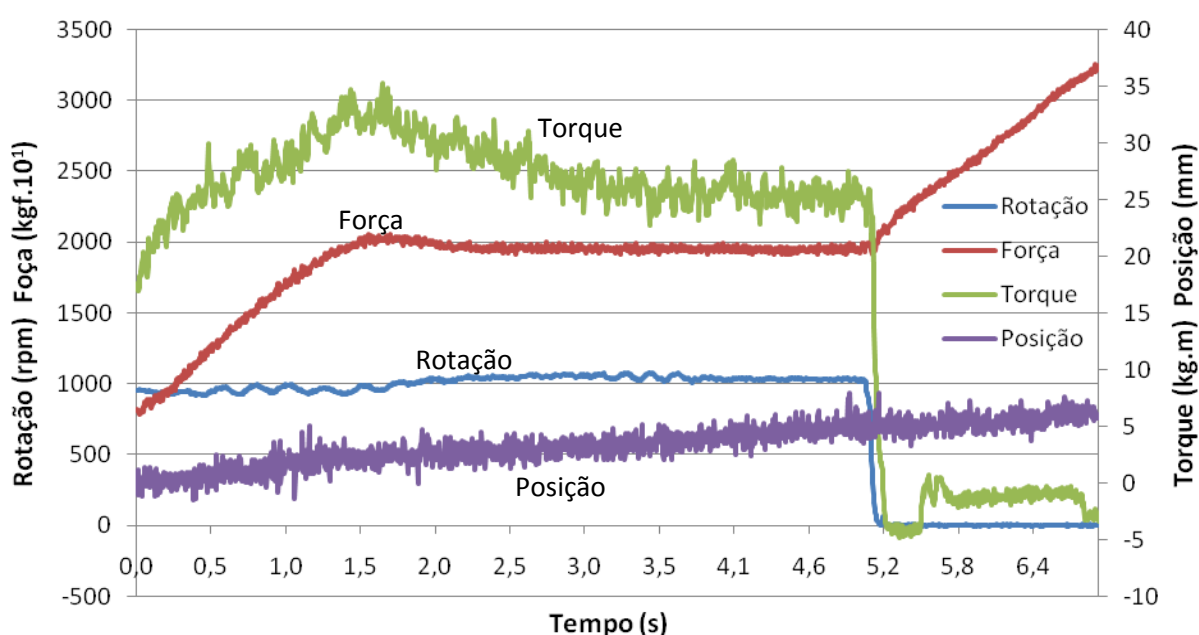
## **6.2 – Ensaios Preliminares**

Nos ensaios preliminares, pinos cilíndricos de 38,1 mm de diâmetro, sem a geometria de preenchimento, foram processados com queima de 5 mm, carga de 100 kN e com forjamento durante 2 segundos.

Nessas condições, verificou-se um pequeno deslocamento do mancal do sistema rotativo (aproximadamente 2 mm). Foram realizados novos apertos nas barras de travamento dos mancais. Com isso, novos testes foram feitos sem deslocamentos mecânicos significativos.

Observou-se ainda, um comportamento não controlado da força aplicada durante o ensaio. Assim, foram feitas correções na programação do controle e, sanou-se o problema. Novos ensaios foram realizados, variando-se a força axial de 100 a 400 kN.

Para o ensaio realizado com pino cilíndrico a 20 tf, com forjamento de mesmo valor, a 1000 rpm e com 5 mm de comprimento de queima, foram encontrados os valores representados na Figura 6.1. A rotação foi mantida praticamente constante, na faixa de 910 e 1080 rpm durante todo o teste buscando o valor de entrada. O tempo necessário para se atingir a força selecionada foi de 1,5 s, instante no qual se atingiu o pico de torque de 350 N.m.



**Figura 6.1** – Primeiros sinais adquiridos para sistema controlado, com pino cilíndrico, sem a geometria de preenchimento.

O gráfico do comprimento de queima apresenta uma variação de cerca de 1 mm para mais e para menos, o que é explicado devido a uma variação no sinal de entrada da placa de aquisição de aproximadamente 30 mV. Mesmo sendo uma

pequena variação relativa à faixa de medição (0 – 10 V), tem-se uma amplificação desse erro devido à própria curva de verificação que possui um ganho de 31 vezes. Outro fator de influência é o próprio desvio linear do transdutor de deslocamento, que representa 0,3 mm de acordo com o fabricante © HBM.

Com o intuito de isolar a aquisição dos sinais de deslocamento e torque de possíveis interferências eletromagnéticas no caminho entre sensor e placa de aquisição, utilizou-se um cabo manga com malha de proteção.

Ainda na fase preliminar foram realizados testes com a geometria “H” para o ensaio de reparo por atrito. Foram realizados testes com cargas de 100 e 200 kN e 10 mm de comprimento de queima. No entanto, após poucos segundos houve travamento do sistema rotativo e o ensaio não foi completado para nenhuma das cargas aplicadas. Consumiu-se uma parte do pino, mas não o suficiente para completar o preenchimento do bloco.

Tentou-se limitar a velocidade de avanço do pino. Dessa forma, esperava-se um maior aquecimento na região de interface do reparo, facilitando o fluxo plástico do material. No entanto, o controle da aplicação da força axial é realizado de acordo com a diferença de pressão detectada nos transdutores de pressão. Dessa forma, a velocidade de avanço do eixo do cilindro hidráulico não é controlada durante o processo. O controle busca manter a força constante, sendo que a velocidade de avanço do cilindro fica limitada pela vazão da bomba hidráulica. A diminuição demasiada da velocidade de avanço do cilindro poderia até levar a uma limitação na resposta da força, já que para consumos maiores de pino seriam necessárias velocidades de avanço maiores também. Limitando-se esse parâmetro, mesmo quando houvesse a necessidade de um avanço mais rápido, o sistema não conseguiria responder adequadamente.

Tentou-se realizar o ensaio com cargas ainda menores, com 30 kN de força. Ainda assim não foi possível completar o ensaio, sendo que houve um consumo maior do pino, mas não suficiente para completar o preenchimento do furo.

Após análises da potência fornecida para o motor hidráulico, verificou-se que a mesma poderia ser aumentada. Como existe uma relação direta entre a velocidade de rotação e a potência, partiu-se para um trabalho de aumento do giro para os ensaios. Além disso, diminui-se a profundidade do furo cônico a ser preenchido, mantendo-se as mesmas proporções para a geometria dos corpos de

prova. Assim, o diâmetro maior do pino ficou reduzido e outro par pino/bloco foi definido para explorar os limites de operação do equipamento (geometrias “A” e “B”).

Para a obtenção de rotações maiores, foi necessária a reconstrução de um conversor de frequência em tensão para que os pulsos gerados devido à rotação fossem adquiridos e enviados através da placa de aquisição. Com o redimensionamento do circuito conversor foi possível trabalhar com rotações de até 1850 rpm.

Realizaram-se ensaios com a geometria “H” com um único estágio e comprimento de queima de 12 mm. No entanto, apesar de um ensaio com 12 mm de queima ter sido completado até o fim, ficou evidente a impossibilidade de operação para cargas de 100 kN. Para outro ensaio com os mesmos parâmetros, modificando-se apenas o comprimento de queima para 17 mm, o giro do motor hidráulico cessou. Então, foi estabelecida a utilização de dois estágios para a realização dos ensaios. Para o primeiro foi utilizado um comprimento de queima de 5 mm e para o segundo um comprimento de 12 mm. Após o primeiro processamento, o preenchimento foi visualmente excessivo. A partir disto, diminuiu-se o comprimento de queima do segundo estágio para 10 mm.

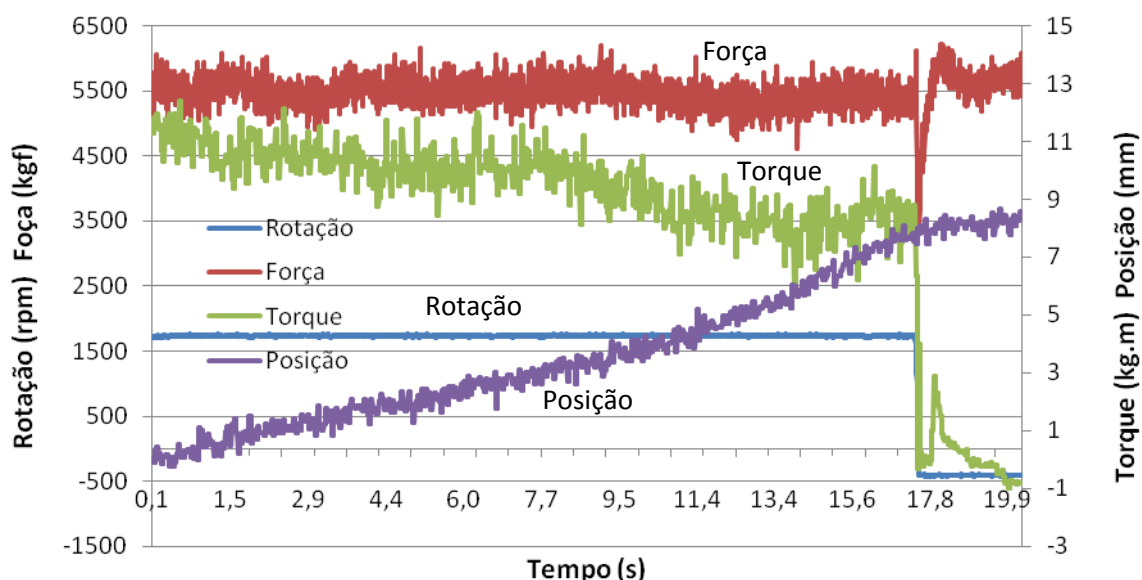
Para o primeiro ensaio com o corpo de prova A, estabeleceu-se um comprimento de queima no primeiro estágio de 3 mm, e comprimento de 5 mm para o segundo estágio. Após o ensaio, pode-se observar, aparentemente, o preenchimento completo do furo. No entanto, a carga de 200 kN estabelecida não foi atingida. A explicação inicial para tal fato seria devido ao segundo estágio começar em uma seção do pino com diâmetro menor em relação ao segundo estágio do corpo de prova H. Com uma área de contato menor, há uma pressão maior na interface pino/furo, provocando uma queima mais rápida, exigindo velocidades maiores de deslocamento do cilindro hidráulico.

### **6.3 – Ensaios de Preenchimento**

Como os ensaios com os corpos de prova H atingiram a carga configurada de 200 kN, manteve-se o comprimento de queima do primeiro estágio em 5 mm para todos os ensaios com os corpos de prova A e B. Para o segundo estágio estabeleceu-se o comprimento de 3 mm, os quais somados aos 5 mm do primeiro

estágio correspondem ao comprimento de queima total de 8 mm anteriormente atingidos e que foram suficientes para o preenchimento completo.

Os gráficos de ensaios realizados de acordo com os parâmetros de rotação, força, torque e posição, Tabela 5.4 são mostrados a seguir, nas Figuras 6.2 a 6.15.

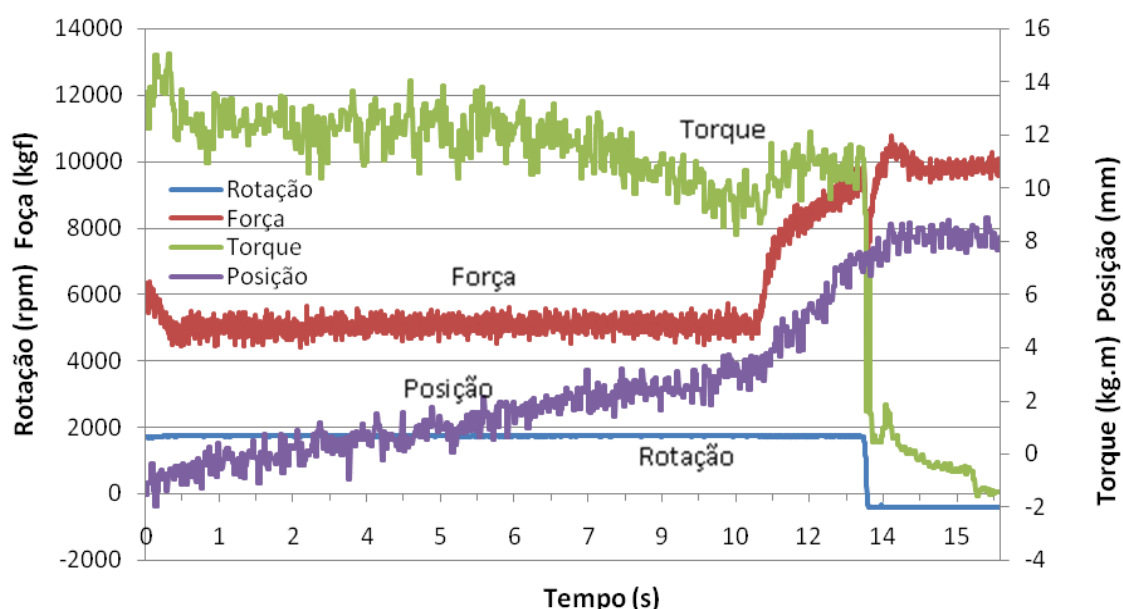


**Figura 6.2** – Sinais adquiridos para carga de 60 kN, um estágio, geometria “A”.

A carga para o primeiro estágio de todos os ensaios é a mais baixa carga controlada de 60 kN. A mesma foi obtida a partir de vários testes e ajustes na programação e na válvula limitadora de pressão, sendo que esta foi a carga, a partir da qual, foi possível encontrar um aquecimento suficiente para completar o reparo sem a parada do motor hidráulico. A Figura 6.2 aponta a fase de forjamento com o mesmo nível de carga utilizado durante o processamento. Já o torque apresenta uma queda ao longo do ensaio, que está associado ao aquecimento do material e conseqüente diminuição da resistência mecânica ao movimento durante o reparo. Observam-se ainda, na fase de forjamento, variações médias quase inexistentes do comprimento de queima do pino. O torque, por sua vez, é nulo, pois é cessada a rotação.

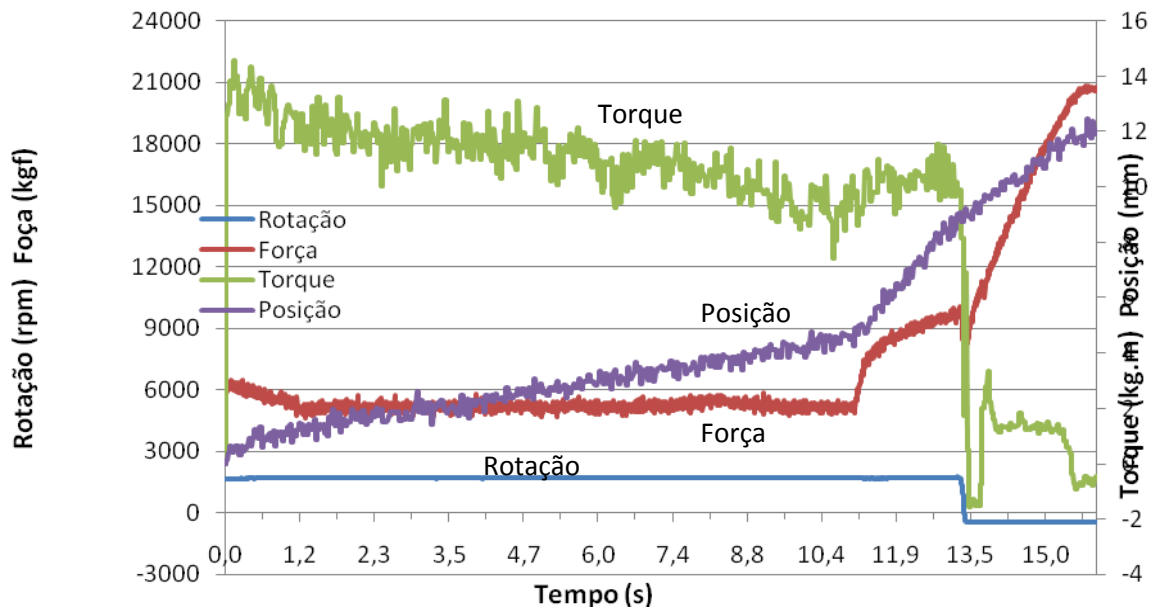
A rotação permaneceu próxima do valor estabelecido para todos os ensaios, e assim, ênfase maior foi dada aos valores da força e do torque.

A partir do segundo ensaio da Tabela 5.4, tem-se ensaios com dois estágios, sendo que a Figura 6.3 mostra o segundo estágio com a carga de 100 kN. O sinal de torque adquirido mostra o mesmo comportamento da figura anterior até o fim do primeiro estágio. No momento em que é aplicada a carga para o segundo estágio, o valor do torque tende a aumentar. Além disso, observa-se uma maior taxa de queima do pino, como pode ser observado no intervalo de 10 a 14 segundos. Durante a fase de forjamento, a carga estabelecida é atingida e mantém-se constante até o encerramento do ensaio.



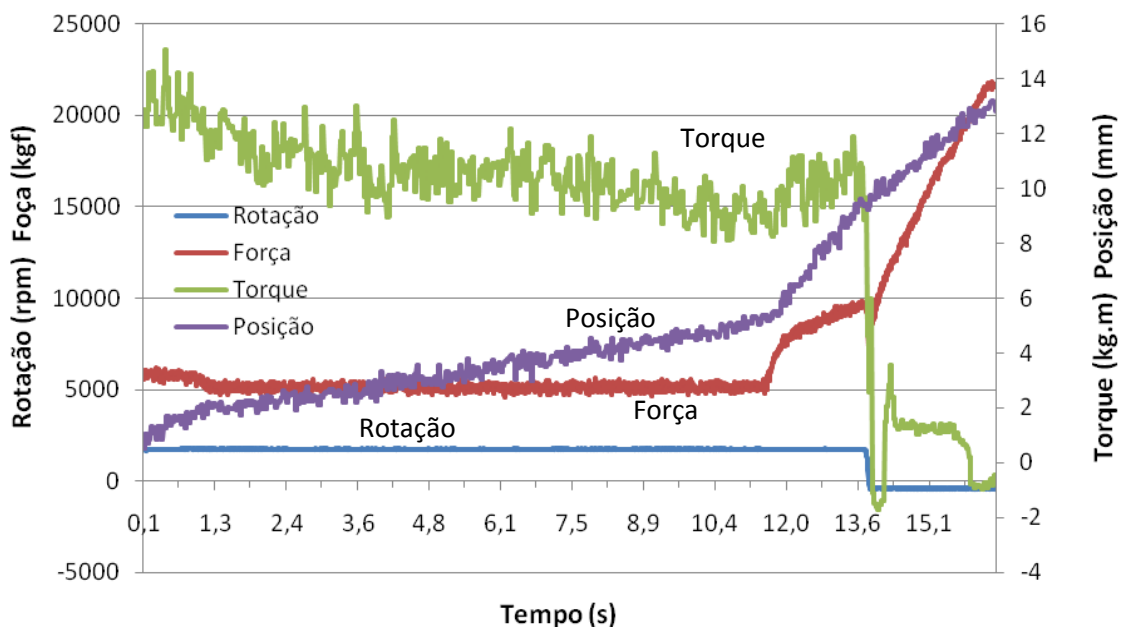
**Figura 6.3** - Sinais adquiridos para carga de 100 kN, dois estágios, geometria "A".

Os ensaios subseqüentes, Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, apresentaram comportamentos semelhantes. No entanto, a força atingida até que se completassem os 5 mm iniciais não foi o valor selecionado. Apesar da alta taxa de queima, a resistência ao movimento vertical cai. Já a última fase do processo, quando não há mais rotação do pino, encontra-se maior resistência na direção da força e, portanto, ocorre um aumento brusco da mesma para atingir a carga estabelecida.



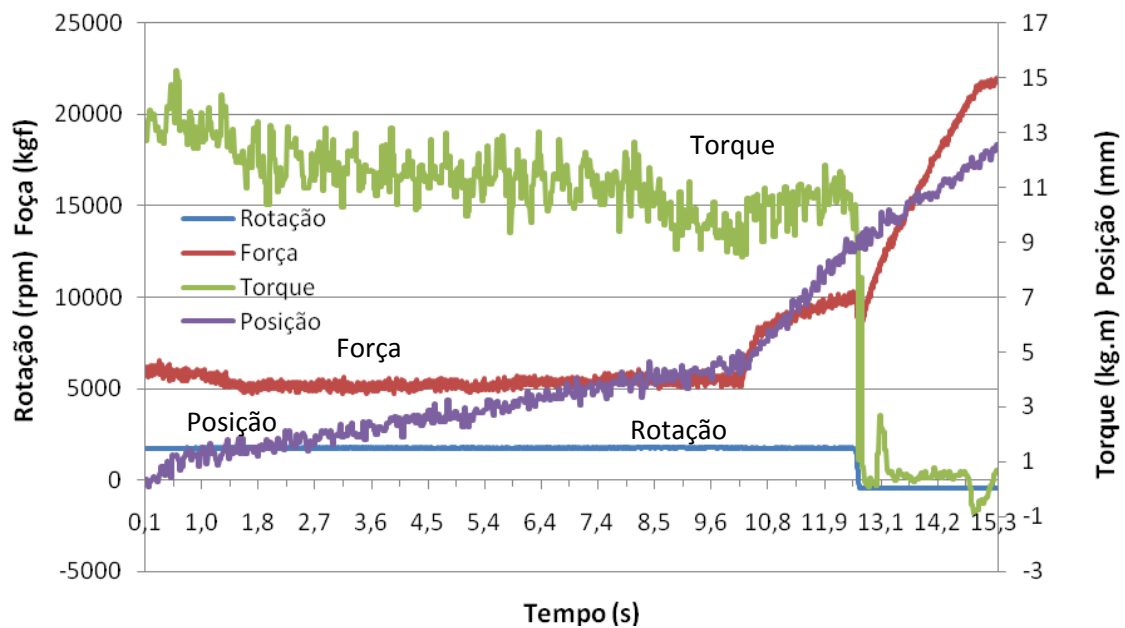
**Figura 6.4** - Sinais adquiridos para carga de 200 kN, dois estágios, geometria “A”.

Observa-se nas Figuras 6.5 e 6.6 que a força atingida no final do processo está abaixo da força estabelecida. Tal fato poderia estar ligado ao fato de o tempo da fase de forjamento ser muito curto (3 segundos) para que maiores cargas sejam atingidas. Caso a força tivesse um valor mais alto ao atingir os 5 mm de queima, talvez a carga final estivesse mais próxima da estabelecida para o ensaio.



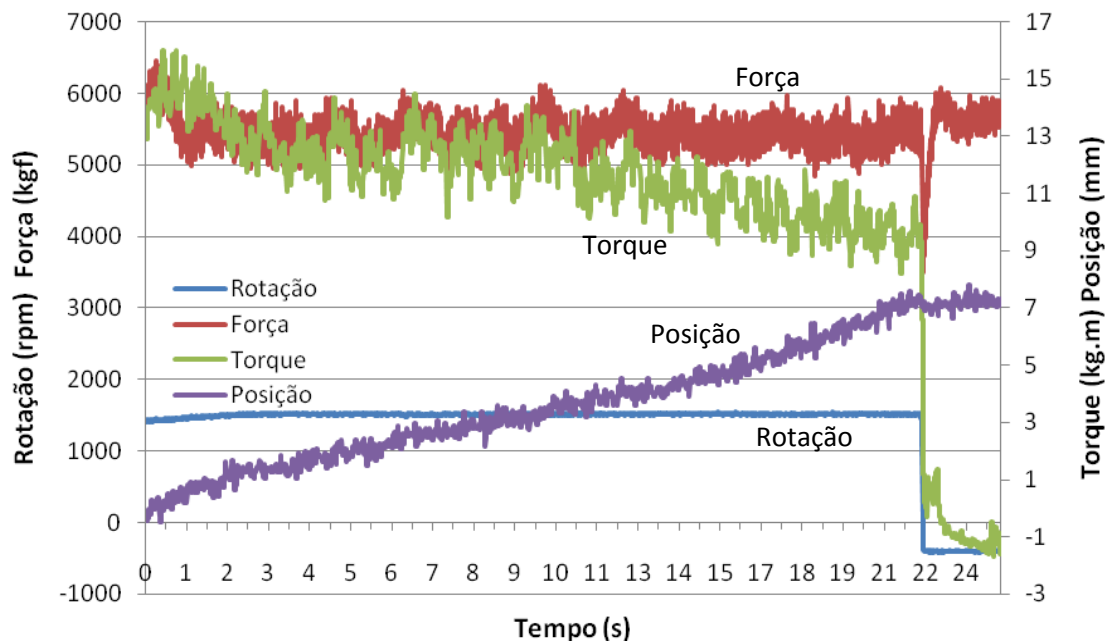
**Figura 6.5** - Sinais adquiridos para carga de 300 kN, dois estágios, geometria “A”.





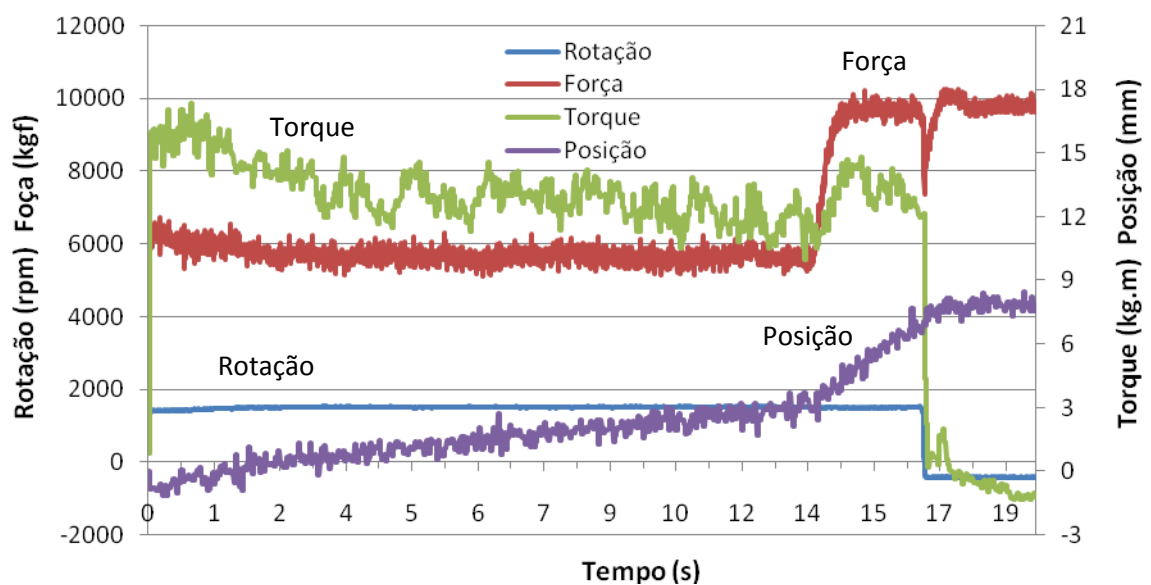
**Figura 6.6** - Sinais adquiridos para carga de 400 kN, dois estágios, geometria “A”.

As próximas figuras tratam dos ensaios realizados com diâmetros das extremidades do pino maiores em relação aos anteriores. O principal objetivo foi verificar o comportamento dos sinais adquiridos quando há uma maior área de contato entre pino e bloco. A Figura 6.7 apresenta comportamento muito semelhante com o da Figura 6.2.



**Figura 6.7** - Sinais adquiridos para carga de 60 kN, um estágio, geometria “B”.

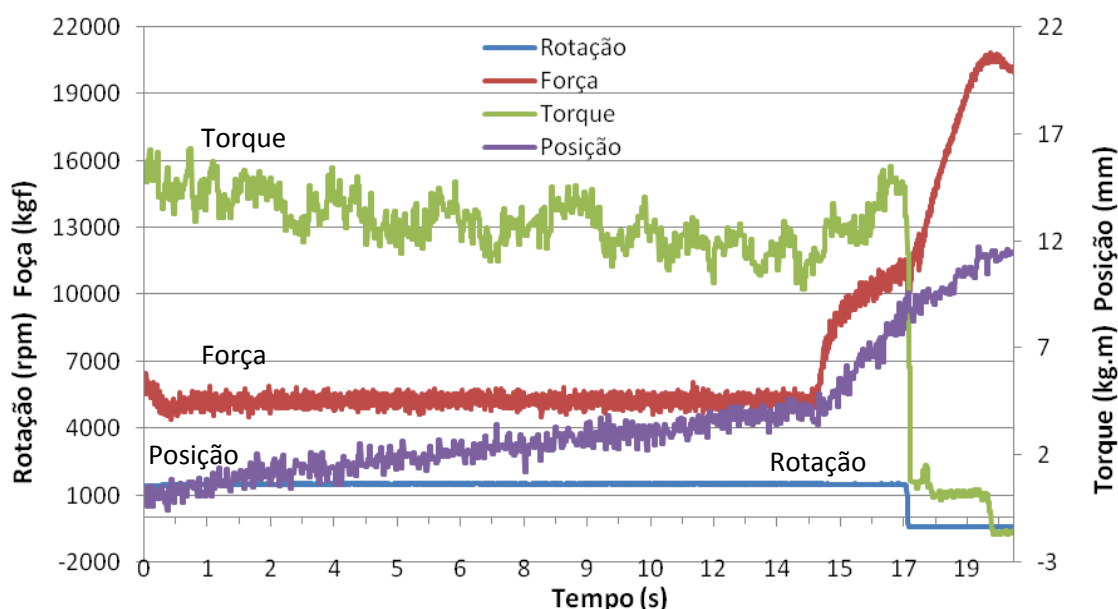
Para a segunda carga aplicada, de 100 kN, mostrada na Figura 6.8, a força atingiu o valor estabelecido mais rapidamente em relação ao ensaio com a mesma carga da geometria “A”.



**Figura 6.8** - Sinais adquiridos para carga de 100 kN, dois estágios, geometria “B”.

Com uma área de seção transversal maior, conseguiu-se atingir forças maiores logo antes do início da fase do forjamento para os demais ensaios das Figuras 6.9 a 6.11, comparativamente aos reparos com a geometria “A”. Lembrando que a proporção de ângulos é a mesma tanto para “A” quanto para “B”, assim como a cavidade dos furos para os blocos.

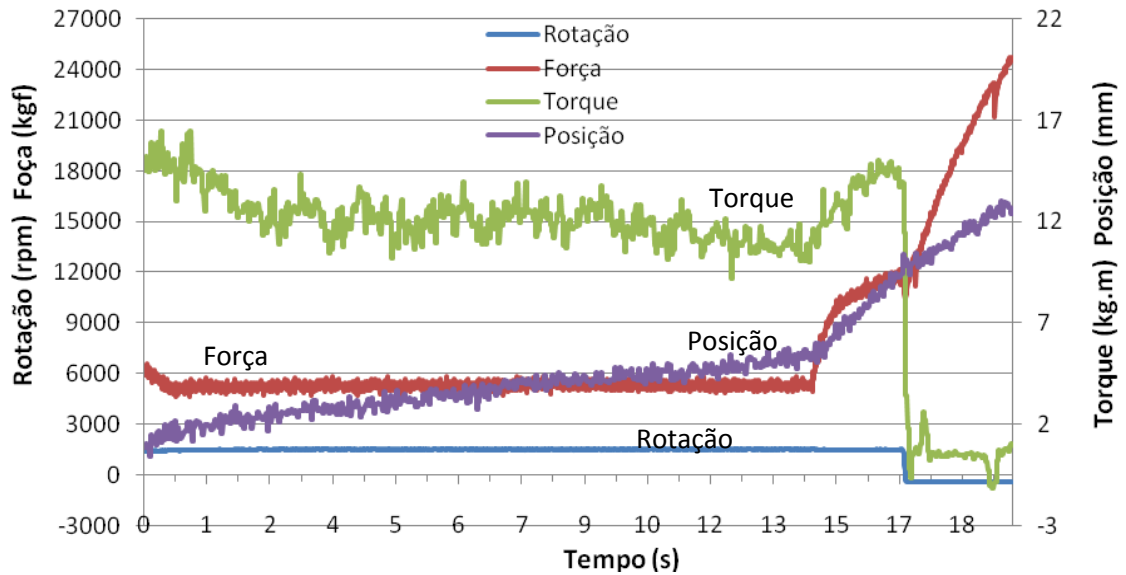
A Figura 6.9 mostra uma carga de aproximadamente 115 kN, logo antes da fase de forjamento. Essa carga, nessa fase do reparo, é maior comparativamente ao ensaio da Figura 6.4.



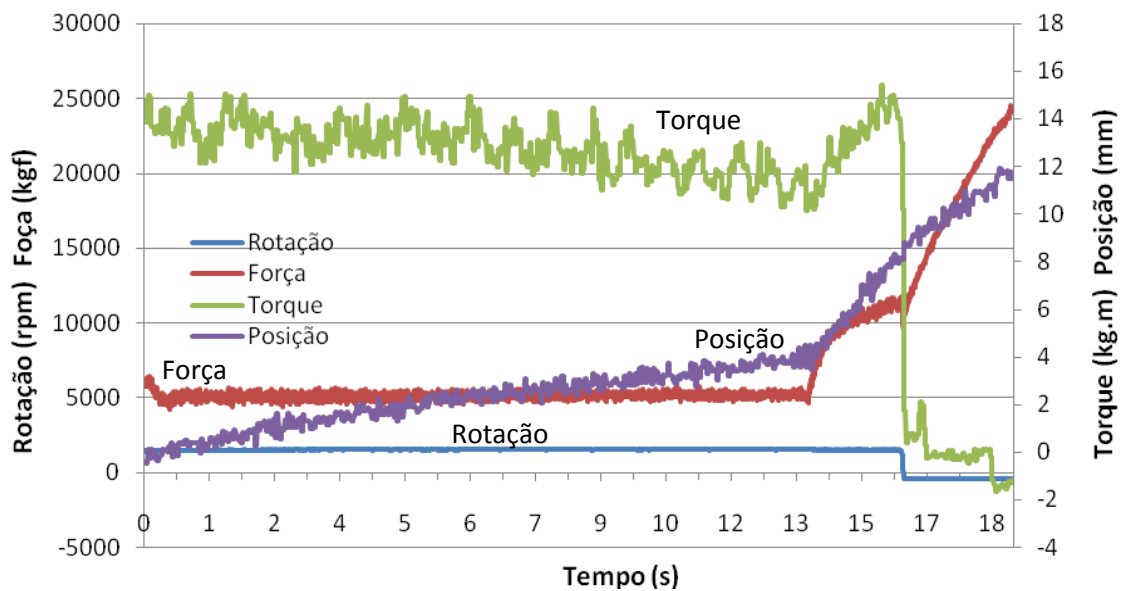
**Figura 6.9** - Sinais adquiridos para carga de 200 kN, dois estágios, geometria “B”.

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentaram forças maiores atingidas no final de cada ensaio, comparativamente às mesmas condições de ensaio para pinos e blocos da geometria “A”. Isso demonstra a influência da resistência ao movimento durante o reparo por atrito. Não foi possível atingir novamente a carga estabelecida para os ensaios de maiores cargas, já que a resistência ao movimento e o tempo não foram suficientes para o intervalo de tempo de forjamento considerado. Esperava-se que as forças selecionadas fossem atingidas durante a fase de preenchimento, o que não aconteceu para os ensaios de dois estágios das Figuras 6.9 a 6.11.

Observa-se em todos os ensaios com cargas acima de 100 kN que houve um contínuo aumento do comprimento de queima durante a fase de forjamento. Isso não ocorre da mesma forma para os ensaios realizados com cargas de 60 e 100 kN.



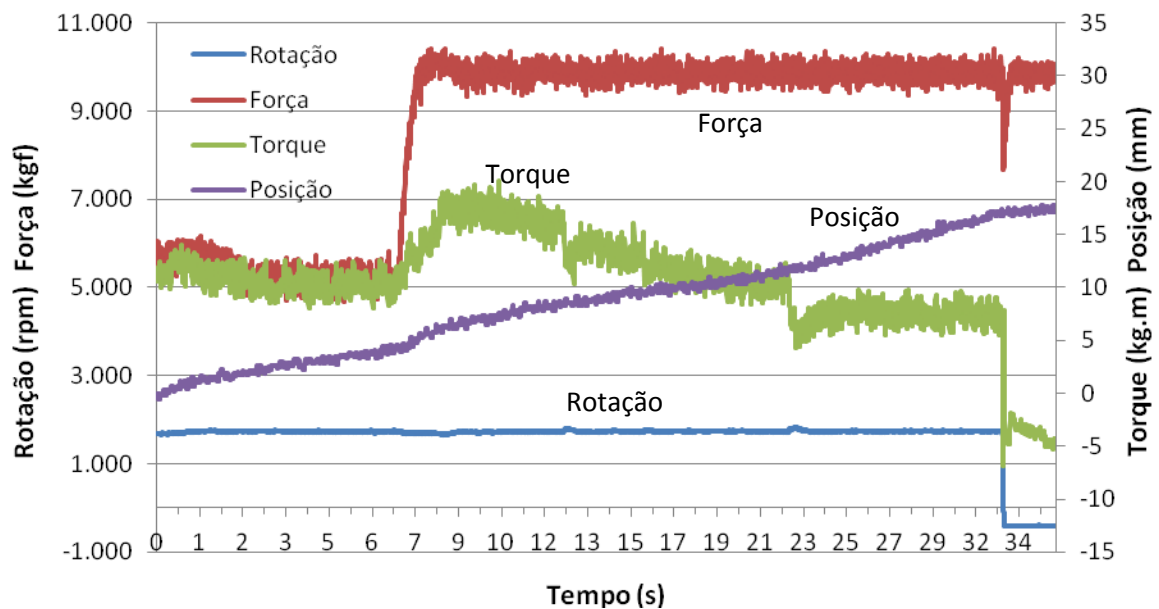
**Figura 6.10** - Sinais adquiridos para carga de 300 kN, dois estágios, geometria “B”.



**Figura 6.11** - Sinais adquiridos para carga de 400 kN, dois estágios, geometria “B”.

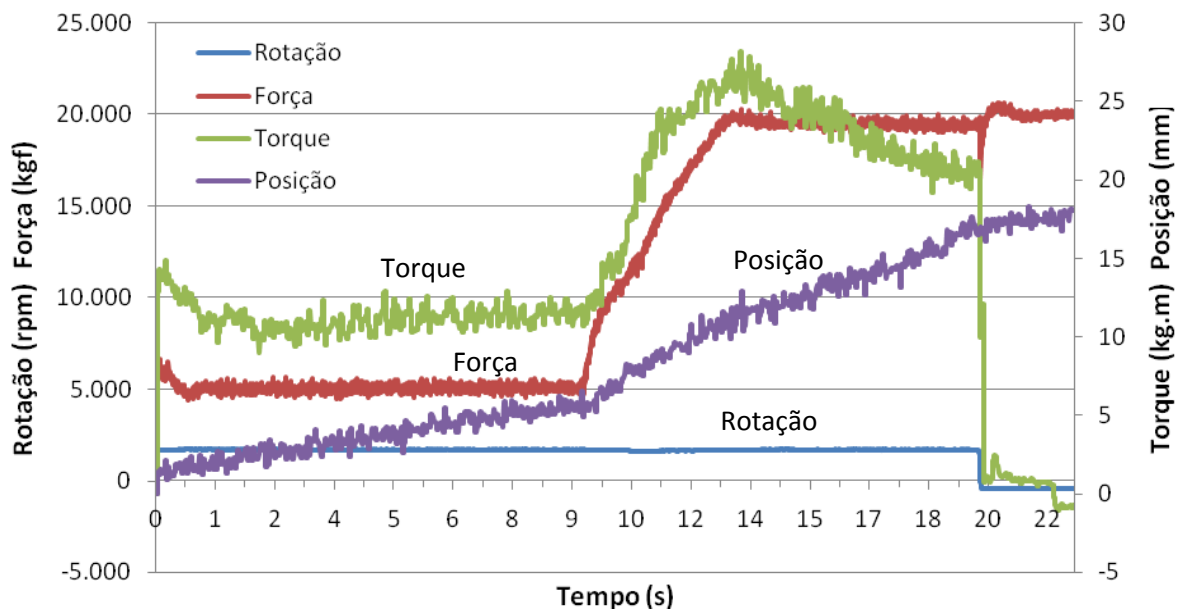
Novos ensaios realizados com a geometria “H” permitiram verificar novos comportamentos para o processo de reparo por atrito. Nesse caso, tem-se pinos e furos maiores em relação aos ensaios abordados anteriormente. O maior diâmetro do pino é 4,1 mm maior em relação ao maior diâmetro do pino da geometria “B”.

A Figura 6.12 mostra a resposta adquirida para o ensaio a rotação de 1700 rpm e carga de 100 kN, como apresentado na Tabela 5.2. Observa-se uma queima de 5 mm em aproximadamente 6,5 segundos. Este tempo é relativamente muito menor em relação aos ensaios já apresentados.



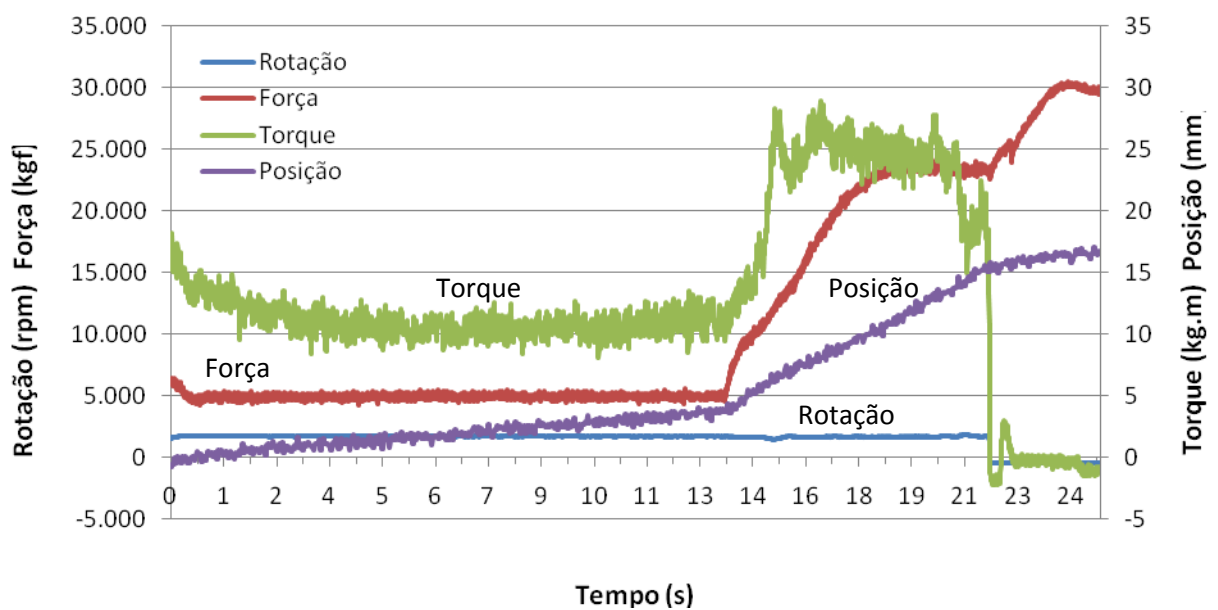
**Figura 6.12** - Sinais adquiridos para carga de 100 kN, dois estágios, geometria “H”.

A Figura 6.13 apresenta torque com pico da ordem de 270 N.m, momento em que a carga nominal de 200 kN é atingida.



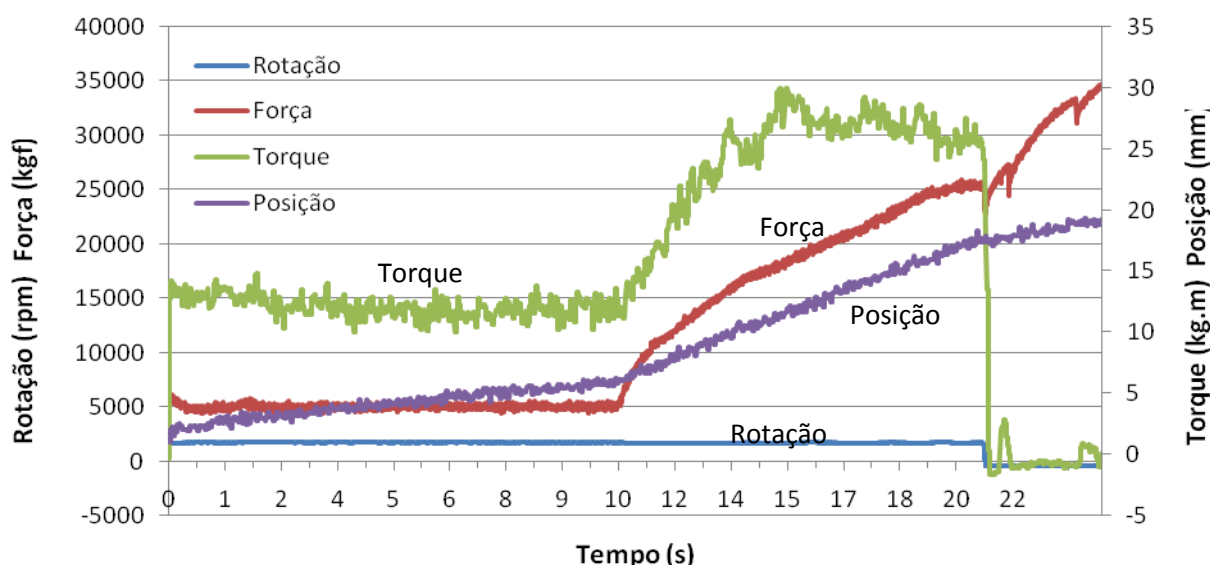
**Figura 6.13** - Sinais adquiridos para carga de 200 kN, dois estágios, geometria “H”.

Para a carga de 300 kN também encontram-se valores de torque em torno de 250 N.m no momento em que tenta-se atingir a força nominal. No entanto, a maior carga adquirida foi em torno de 235 kN. Em seguida, durante o forjamento foi possível observar a força de 300 kN.



**Figura 6.14** - Sinais adquiridos para carga de 300 kN, dois estágios, geometria “H”.

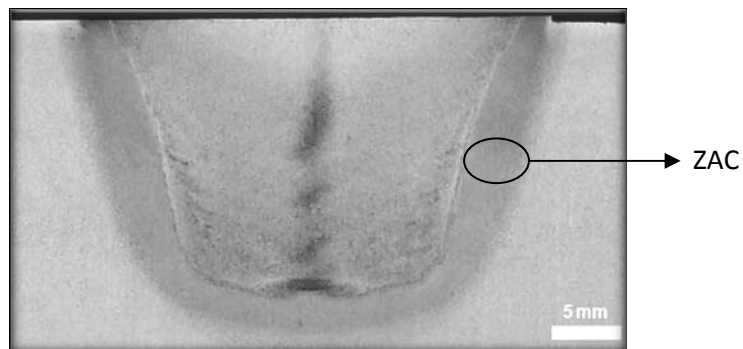
Já o ensaio com 400 kN da Figura 6.15 não se alcançou a carga nominal no final do reparo. Talvez com mais tempo fosse possível atingir a mesma ou então com um pino de maior diâmetro. A limitação para a utilização de pinos com diâmetros maiores poderia estar ligada à bomba que gera o fluxo hidráulico para o motor hidráulico, o qual estaria sujeito a torques maiores. Assim, os níveis de torque chegariam a valores que ultrapassariam o limite do motor hidráulico.



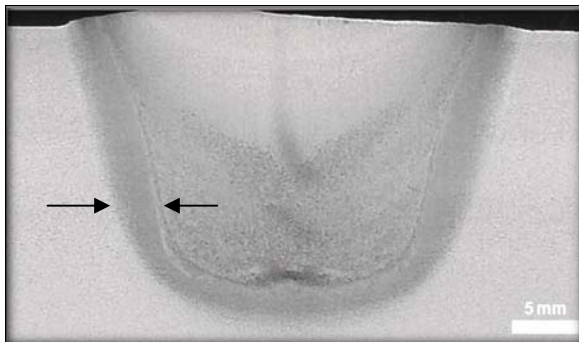
**Figura 6.15** - Sinais adquiridos para carga de 400 kN, dois estágios, geometria “H”.

#### 6.4 - Macro e Micrografia

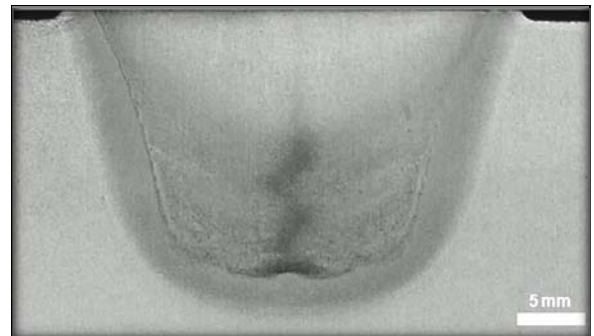
As macrografias obtidas ao longo da seção longitudinal do pino de preenchimento para os ensaios da Tabela 5.4 são apresentadas na Figura 6.16. Estes ensaios referem-se à geometria “A”. Aparentemente, houve uma forte união metalúrgica entre a região interfacial pino/bloco. Há evidências também do desenvolvimento de uma ZAC na região adjacente à linha interfacial, no material do bloco de reparo.



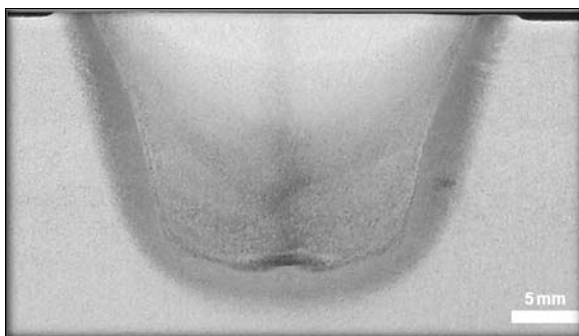
Ensaio 1 ("A"/60 kN)



Ensaio 2 ("A"/100 kN)



Ensaio 3 ("A"/200 kN)



Ensaio 4 ("A"/300 kN)



Ensaio 5 ("A"/400 kN)

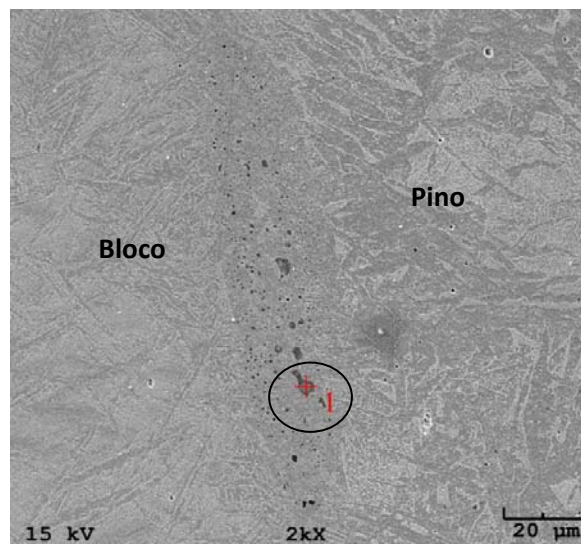
**Figura 6.16** – Macrografias referentes aos ensaios de 1 a 5, utilizando a geometria "A".

Observa-se macroscopicamente uma união metalúrgica sem a presença de vazios nas regiões de interface entre material do pino e do bloco. Para o ensaio 1 encontra-se uma ZAC mais larga, principalmente em função do maior tempo de processamento, ocasionando maior aquecimento do material até o preenchimento completo. Já os outros ensaios apresentaram uma ZAC com abrangências semelhantes, em função de os níveis de força do segundo estágio, o que agiliza o preenchimento total.

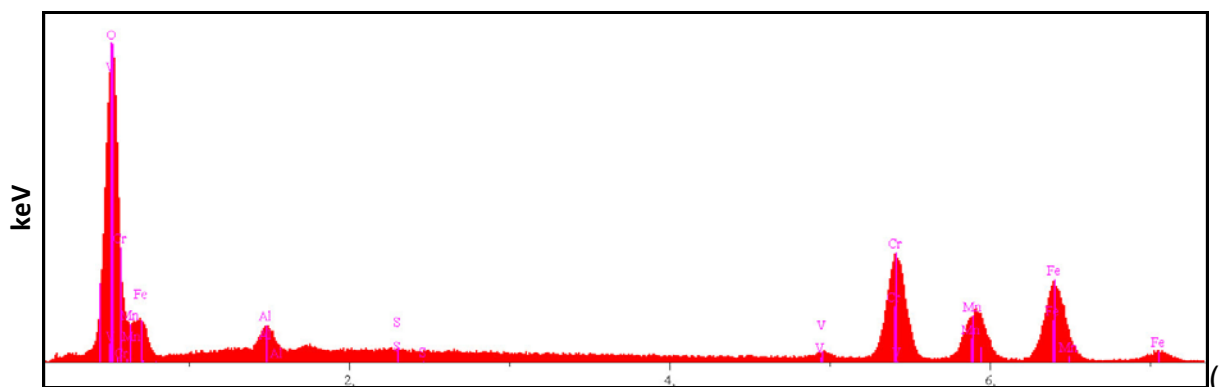


Para melhor compreensão das regiões de interface pino/bloco, foram realizadas análises de composição química via EDX nas amostras A06 e B06, as quais apresentaram aparentes estruturas diferenciadas com relação à maior parte da região processada.

A seguir, tem-se a Figura 6.17 (a) mostrando a interface do lado esquerdo da amostra A06, onde se encontra a presença de inclusões principalmente de óxido de Alumínio. O espectro da Figura 6.17 (b) mostra a região de interesse composta além de Ferro, por Cromo, Manganês, Alumínio, e teores elevados de Oxigênio



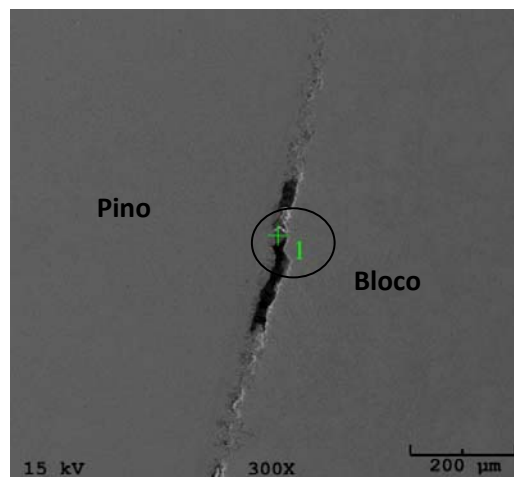
(a)



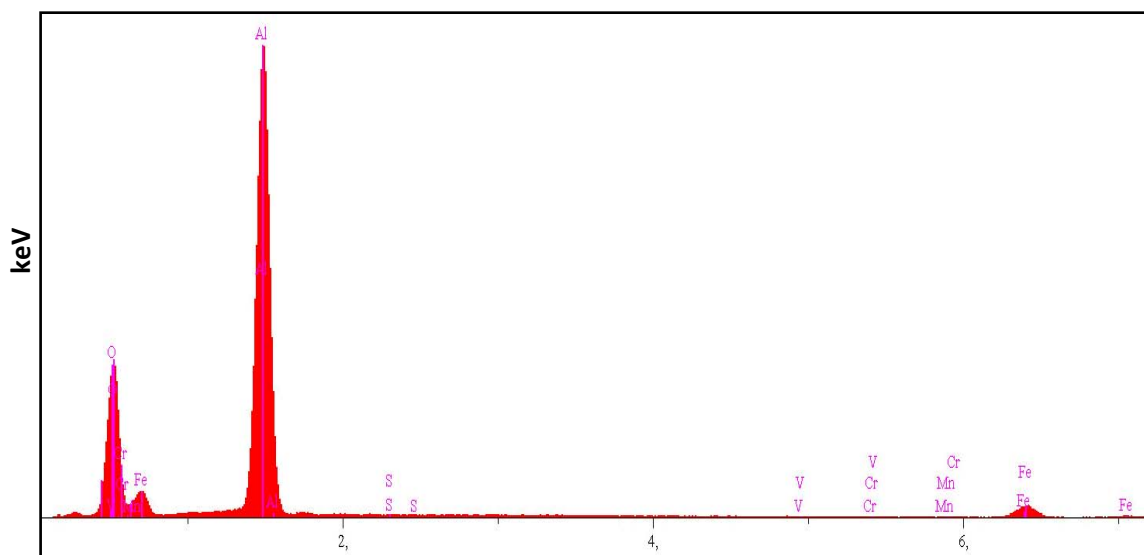
(b)

**Figura 6.17** – (a) Região contendo óxidos na interface da amostra A06; (b) Espectro de raios-X do ponto 1 de (a), MEV.

Comportamento similar foi observado na amostra B06, onde se observa a presença de óxidos na interface (microscopia eletrônica de varredura) (ver Figura 6.18). Neste caso, foram observados raios-X basicamente de Oxigênio e de Alumínio, portanto, óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Esse óxido, assim como o sulfeto de Manganês ( $\text{MnS}$ ), representa uma impureza advindo do processo de fabricação do aço. Tais impurezas em quantidades significativas podem levar a modificações nas propriedades mecânicas. Como elas são encontradas na interface pino/bloco, podem contribuir para uma redução da resistência mecânica da interface.



(a)



(b)

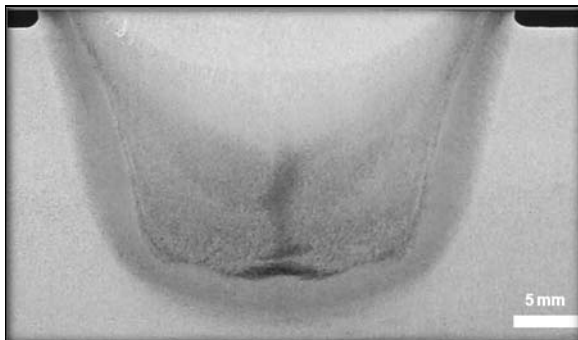
**Figura 6.18** - (a) Região da amostra B06 com óxidos acumulados na interface; (b) Espectro de raios-X do ponto 1 de (a), MEV.

A Figura 6.19 apresenta o aspecto macrográfico das amostras produzidas com a geometria B. Notam-se aqui macrografias com aspecto similar aos encontrados nas amostras geradas com a geometria “A” (ver Figura 6.16)

Observando com maiores aumentos, MEV, nota-se mais uma vez a presença de óxidos na interface (Figura 6.20). Nesse caso, tem-se óxidos de Ferro. Como não é de se esperar que sejam encontrados óxidos de Ferro nesses aços, acredita-se.



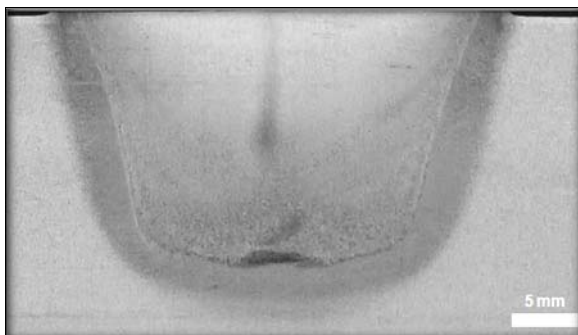
Ensaio 6 (“B”/100 kN)



Ensaio 7 (“B”/200 kN)



Ensaio 8 (“B”/300 kN)

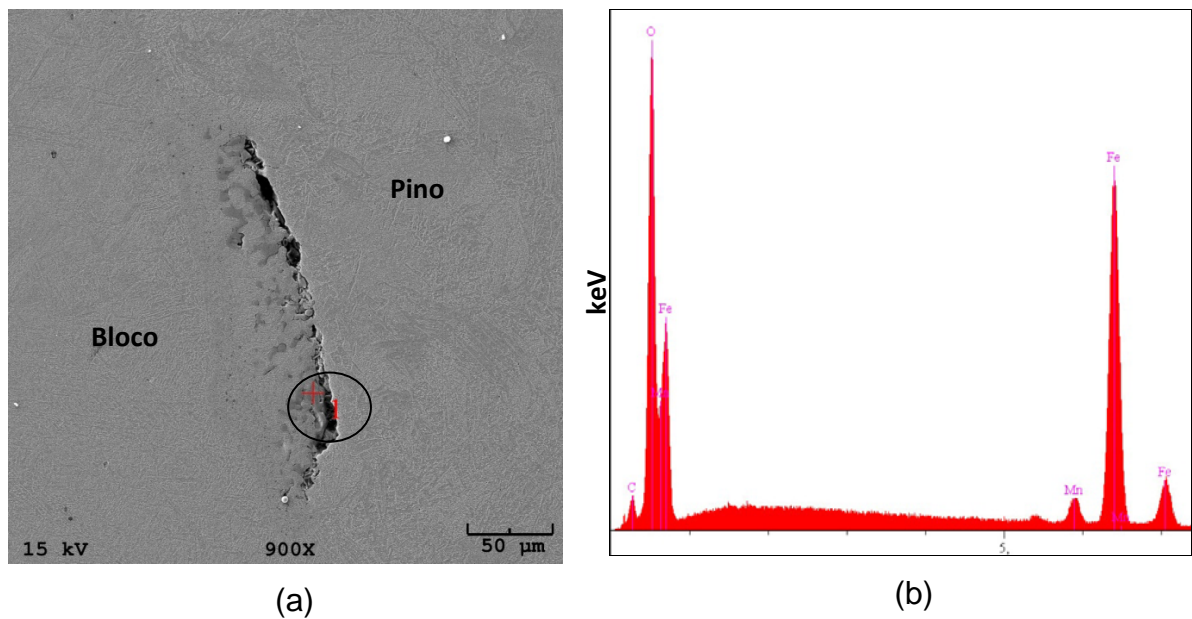


Ensaio 9 (“B”/300 kN)



Ensaio 10 (“B”/400 kN)

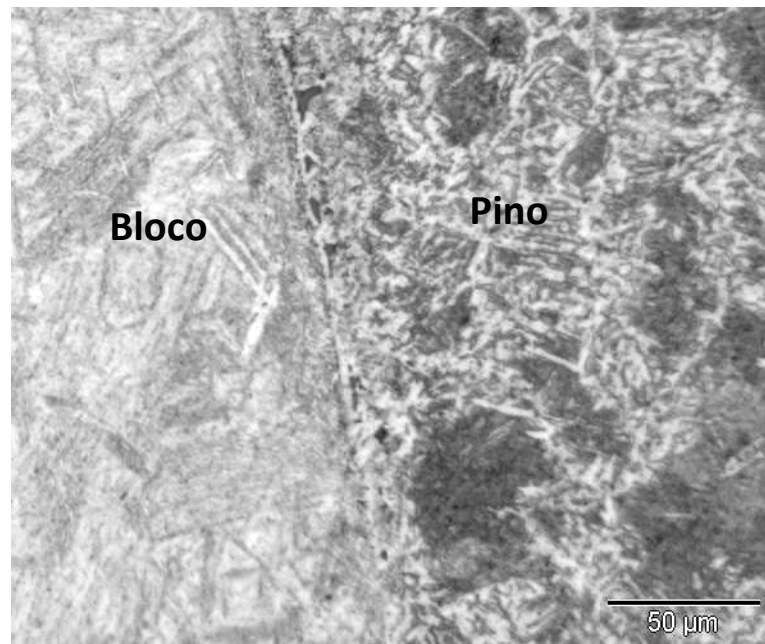
**Figura 6.19** – Macrografias dos ensaios de número 6 a 10, utilizando a geometria “B”.



**Figura 6.20** - (a) Região composta por óxido da amostra B06; (b) Espectro de raios-X do ponto 1 de (a).

que esses tenham sido aprisionados nessa região durante o processamento. As causas para isso podem estar associadas a uma geometria com folga excessiva entre pino e bloco. Assim, sugere-se que essa folga seja revista para essas dimensões.

A Figura 6.21 mostra uma região de interface pino/bloco a aproximadamente 5 mm da interface da base do preenchimento. Observa-se uma microestrutura formada por ferrita de Windmanstätten, bainita e/ou martensita.

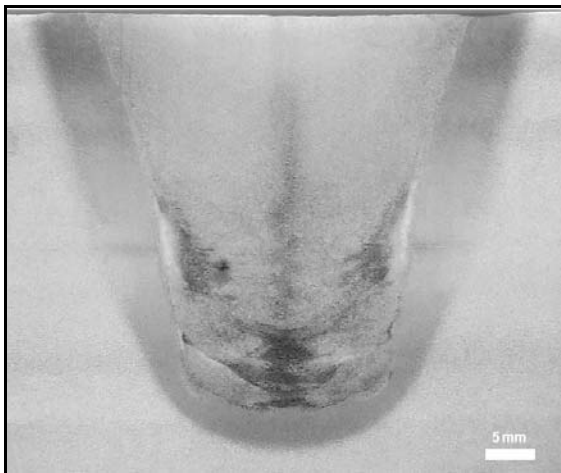


**Figura 6.21** – Região de interface entre pino e bloco para amostra A10 (geometria A, 100 kN, dois estágios).

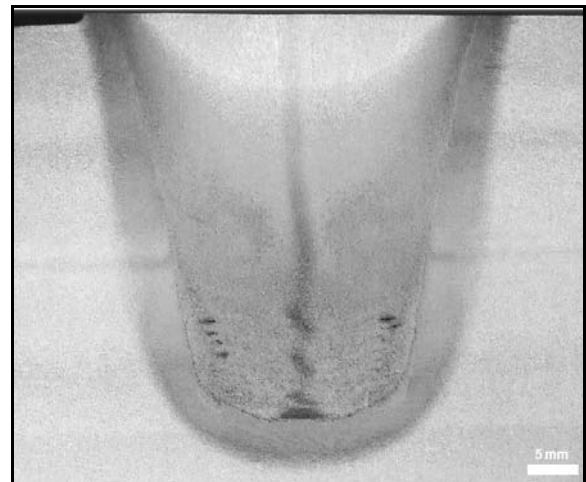
A seguir, Figura 6.22, encontram-se as macrografias realizadas de acordo com a Tabela 5.2, para os ensaios com a geometria de maior profundidade do bloco de reparo. Nesse caso também aparece uma faixa de ZAC mais larga para o ensaio de menor carga aplicada e com um único estágio.

A região central da Figura 6.23 é provavelmente um óxido, encontrado no ensaio 7 (geometria “H”) e foi observado através de microscópio ótico. Ele encontra-se a aproximadamente 19 mm da interface pino/bloco na base. A espessura medida do mesmo na região central é de aproximadamente 90  $\mu\text{m}$  e foi obtida com auxílio do *software* do microscópio Olympus BX51M.

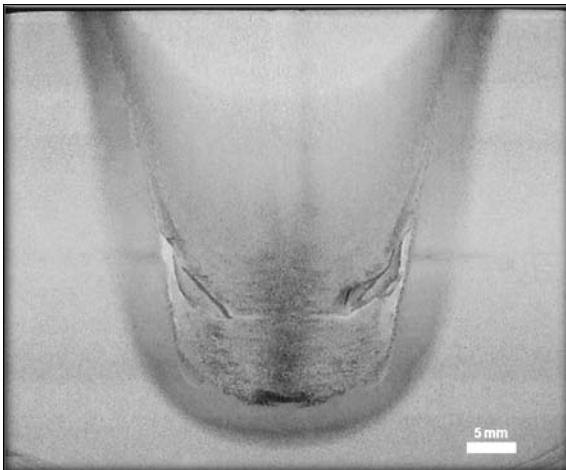
Não foi feita uma análise via MEV em função de contratempos para entrega do trabalho. Sugere-se posterior análise para melhor investigação da região apresentada.



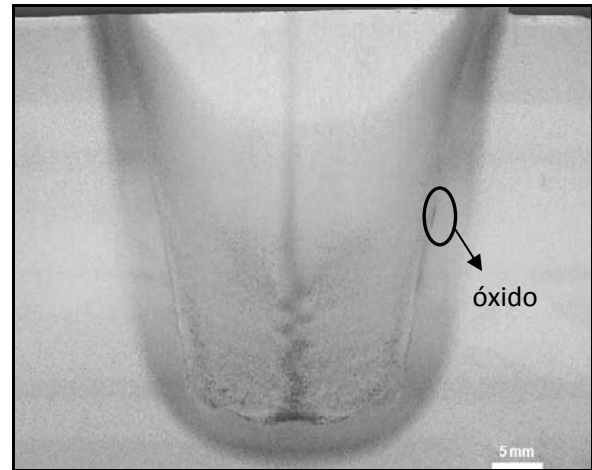
Ensaio 4 ("H" 100 kN)



Ensaio 5 ("H" 200 kN)



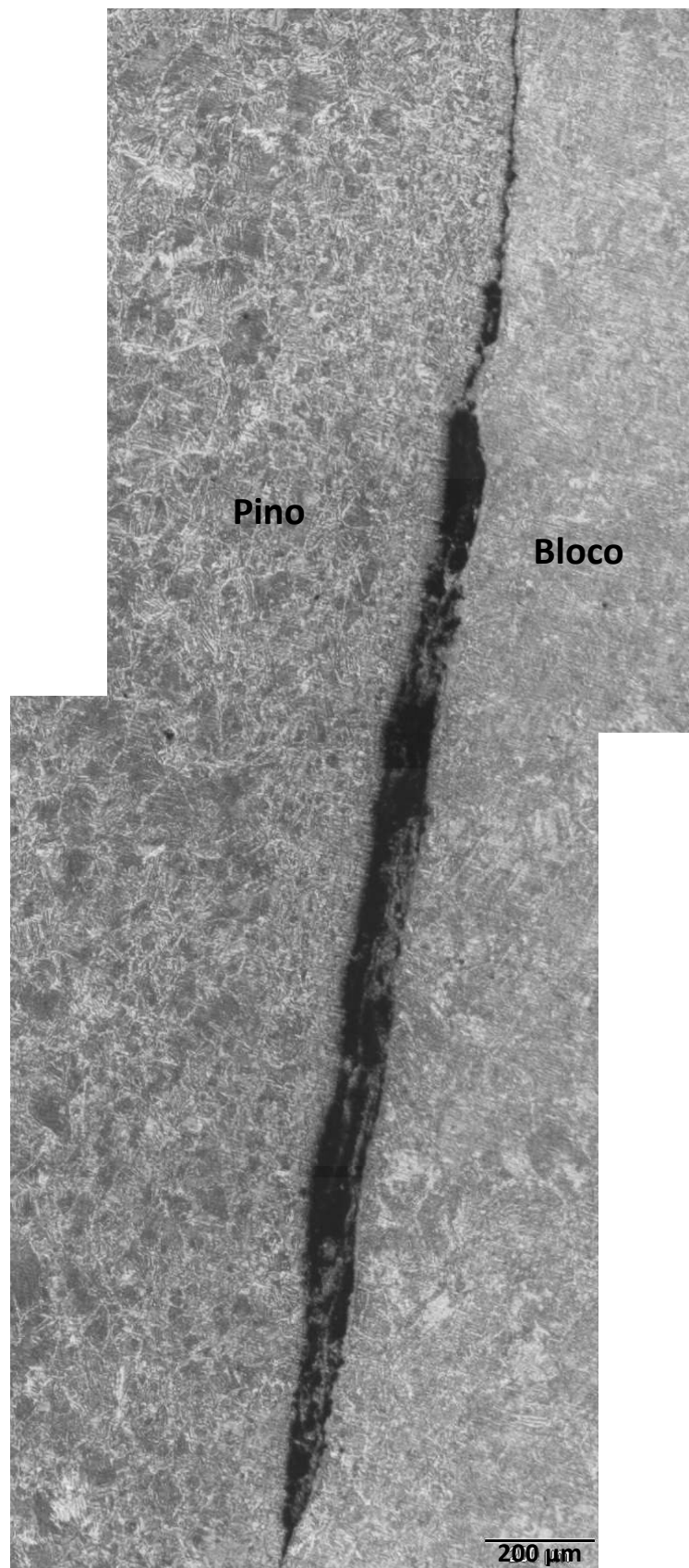
Ensaio 6 ("H" 300 kN)



Ensaio 7 ("H" 400 kN)

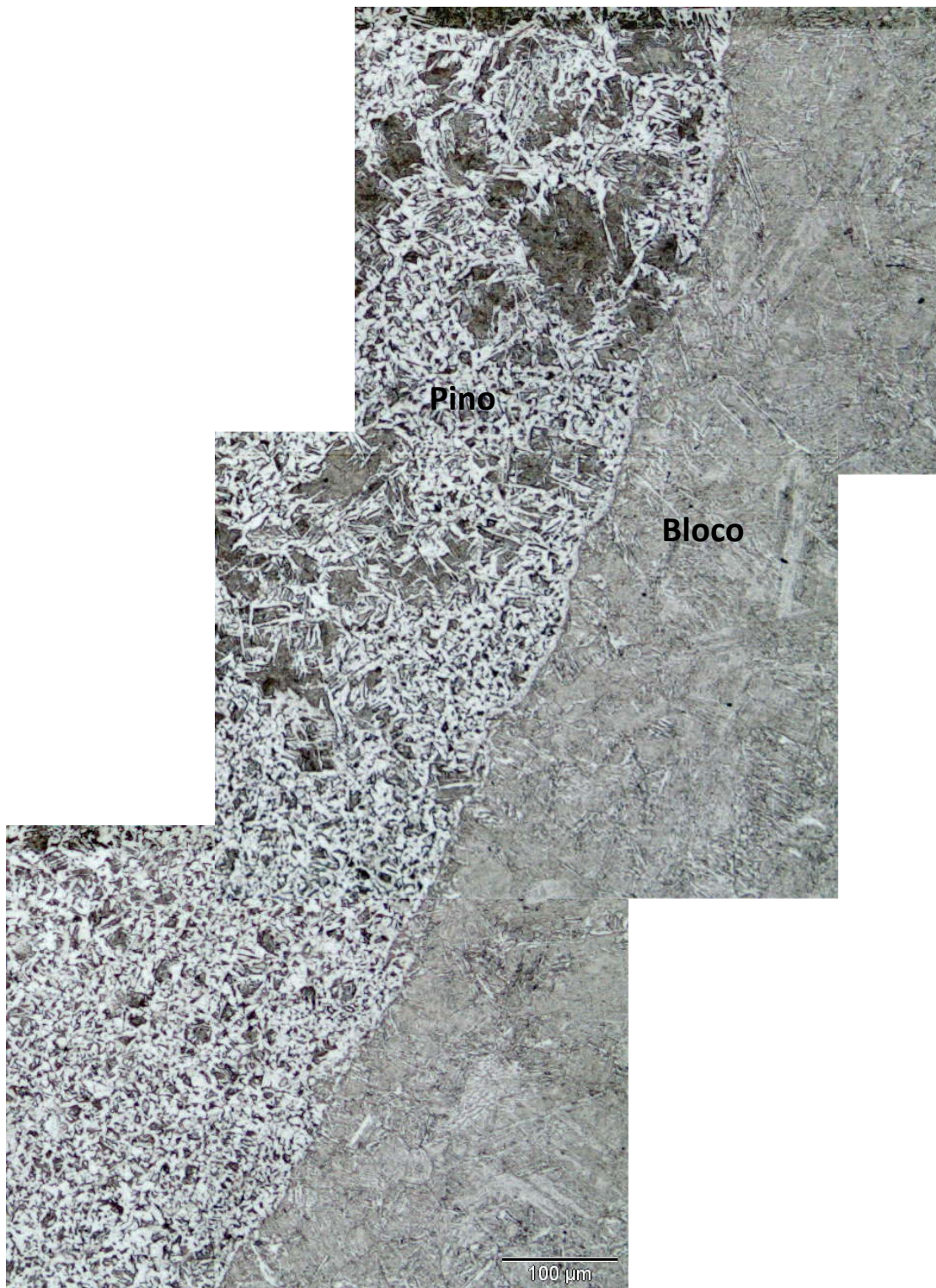
**Figura 6.22** – Macrografias dos ensaios 4 a 7, geometria "H".

A Figura 6.24 mostra a microestrutura de interface pino/bloco encontrada para o ensaio realizado com a carga de 300 kN a aproximadamente 3 mm da interface da base do preenchimento. Observa-se uma diferenciação clara na região de interface entre pino e bloco e com união metalúrgica bem realizada.



**Figura 6.23** – Detalhe da região composta pela formação de provável óxido no ensaio 7.





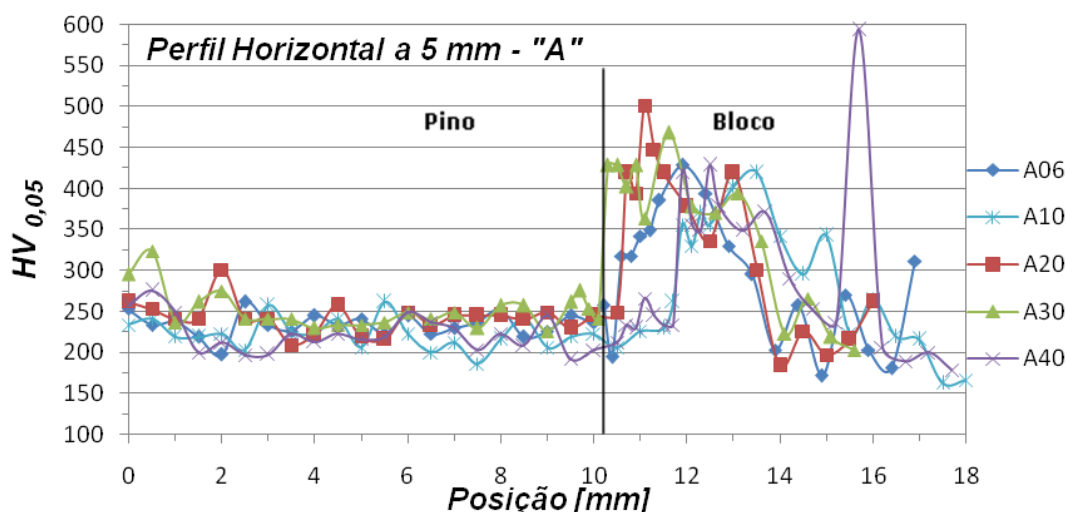
**Figura 6.24** – Interface lado direito do ensaio com 300 kN, dois estágios, geometria “H”.



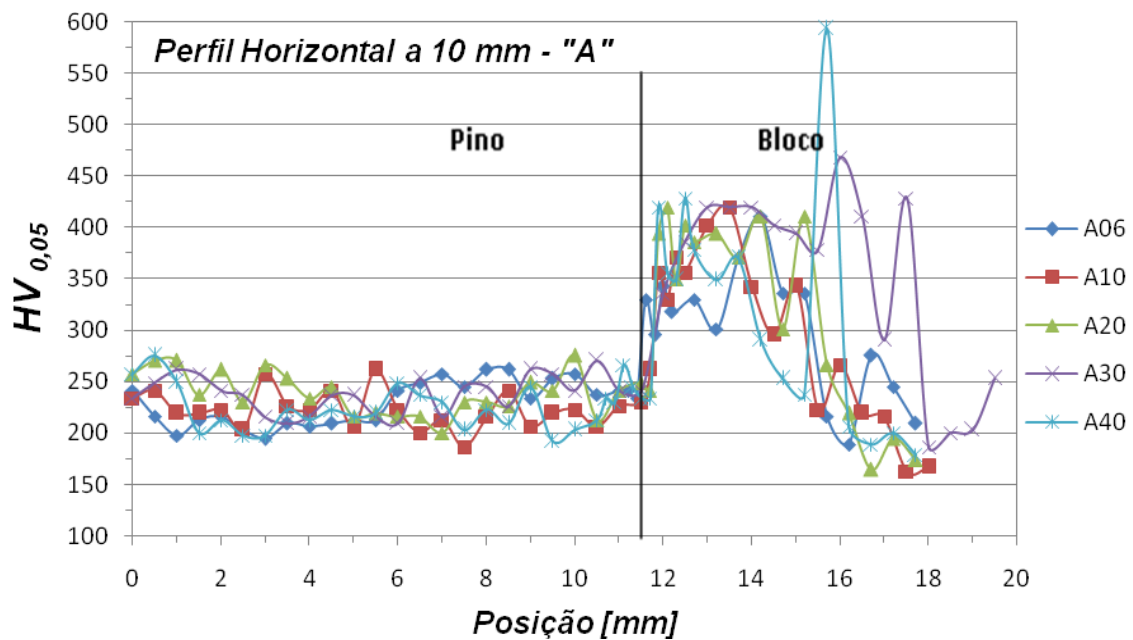
## 6.5 – Ensaios de Microdureza Vickers

A investigação com ensaios de microdureza Vickers foi realizada para verificar como variaram as propriedades mecânicas, variação essa que está intimamente associada à microestrutura. Os gráficos apresentados nas Figuras 6.25 a 6.34 mostram o comportamento da microdureza em cada região analisada para todas as geometrias consideradas. O primeiro gráfico para o perfil horizontal a 5 mm da interface inferior, mostra claramente que a microdureza na região do material do pino oscila entre cerca de 200 e 250HV<sub>0,05</sub>. Na zona termicamente afetada, todavia, são consideravelmente superiores os valores medidos (material base). Essa diferença pode ser explicada em função das diferentes microestruturas observadas na ZAC e o pino (ver Figura 6.24). Essas microestruturas não foram analisadas em detalhes, devendo ser objeto de investigação futura. Todavia, há de se destacar aqui a composição do material dos blocos, onde foi medido um teor de Cromo que eleva a temperabilidade do aço, podendo assim explicar em parte as maiores durezas observadas no material do bloco.

Da Figura 6.26 nota-se que os valores de microdureza da ZAC são significativamente inferiores na amostra A06 em relação aos valores das demais amostras. Isso está associado ao maior aporte térmico, como será mostrado mais adiante.

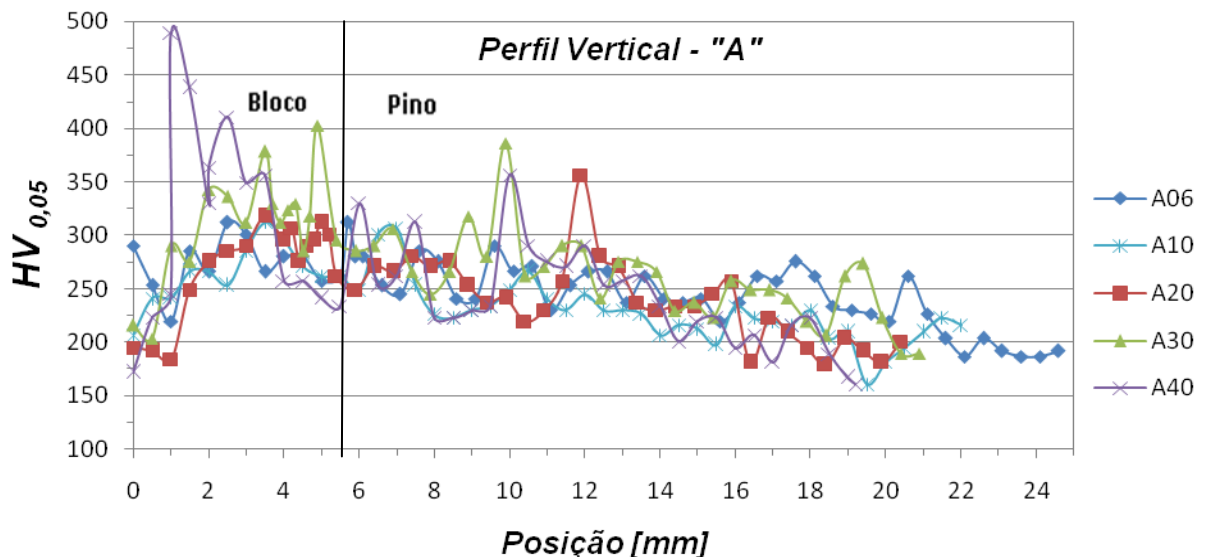


**Figura 6.25** – Perfil horizontal de microdureza Vickers situado a 5 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “A”.



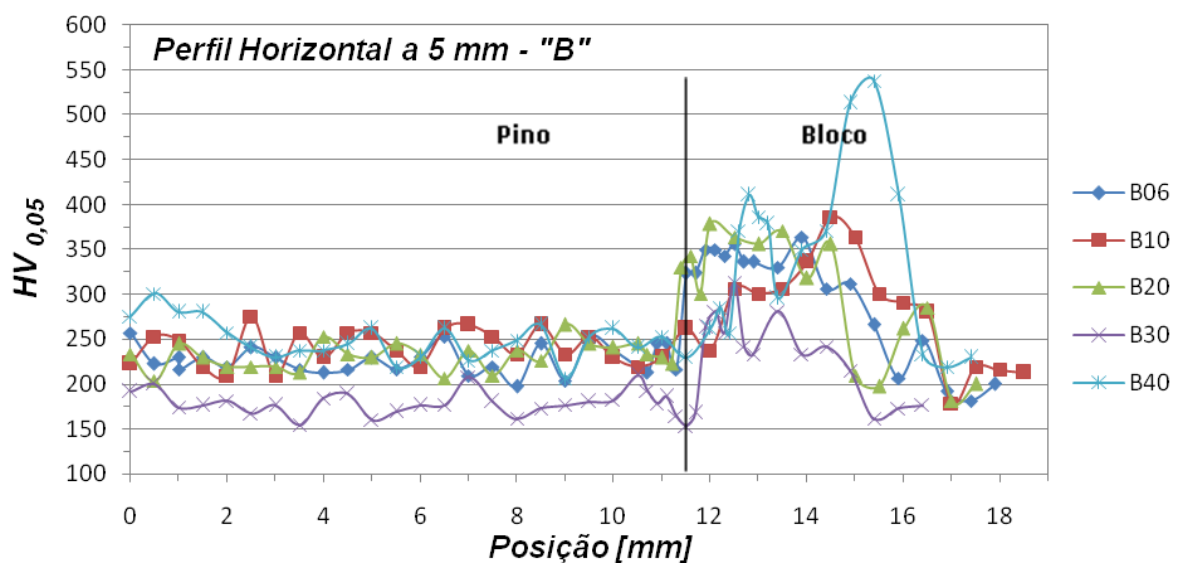
**Figura 6.26** – Perfil **horizontal** de microdureza Vickers situado a 10 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “A”.

Os valores de microdureza encontrados para o perfil vertical “A” encontram-se na Figura 6.27. O ensaio foi realizado a partir de aproximadamente 5 mm da região de interface entre pino e bloco. Pelos resultados encontram-se valores relativamente mais baixos nos primeiros pontos do gráfico. Quando se aproxima de regiões que sofreram maior aquecimento durante o processamento dos pinos (interface), tem-se uma elevação para os valores de microdureza. Os valores de dureza obtidos no material do pino são inferiores aos observados na ZAC (material base).

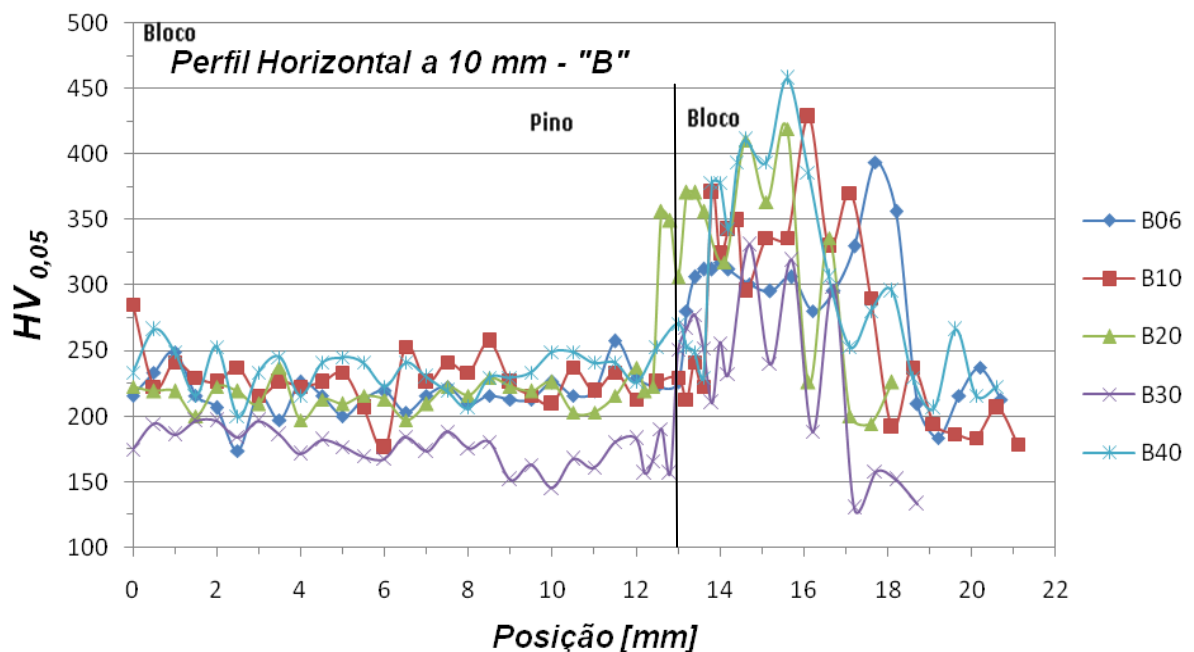


**Figura 6.27** – Perfil **vertical** de microdureza Vickers para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “A”.

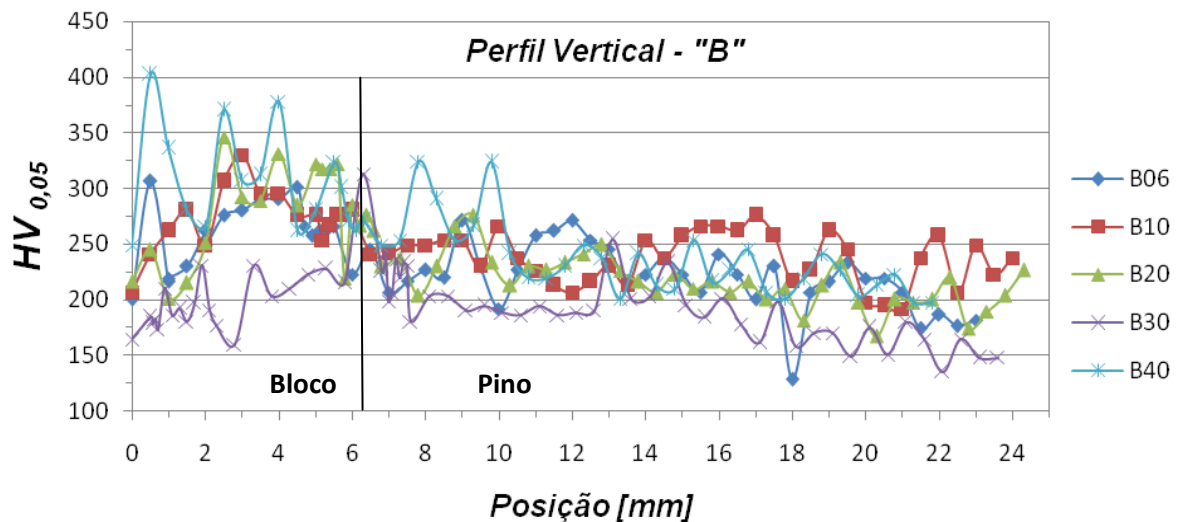
As Figuras 6.28 a 6.30 mostram os resultados obtidos para perfis horizontal e vertical referentes à geometria “B”. Particularmente, observam-se para a amostra B30 valores de microdureza relativamente menores em todos os ensaios. As razões para esse comportamento não foram analisadas, devendo ser objeto de estudo futuro.



**Figura 6.28** – Perfil **horizontal** de microdureza Vickers situado a 10 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “B”.

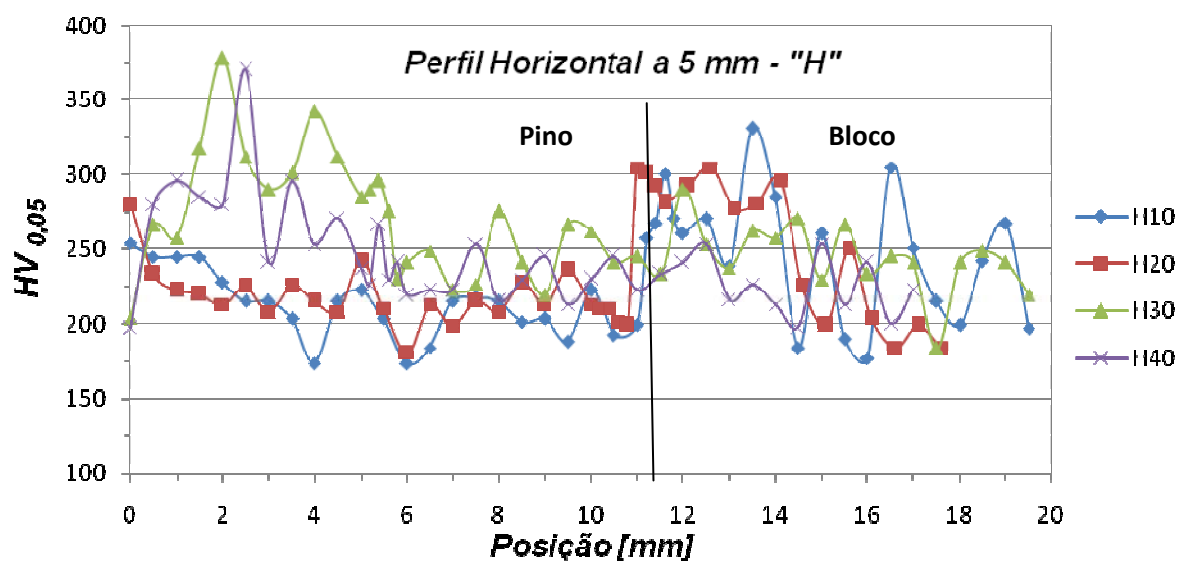


**Figura 6.29** – Perfil **horizontal** de microdureza Vickers situado a 10 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “B”.

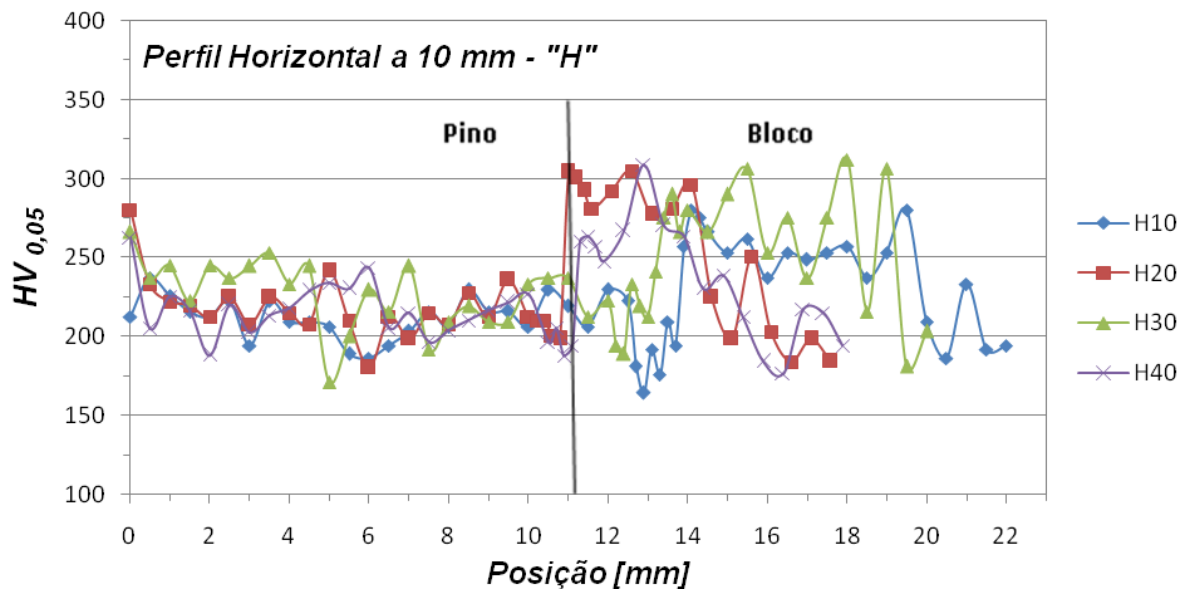


**Figura 6.30** – Perfil **vertical** de microdureza Vickers para ensaios da Tabela 5.4 de geometria “B”.

As Figuras 6.31 a 6.34 representam os resultados encontrados para o levantamento de perfis de microdureza para as direções horizontal e vertical das amostras da geometria “H”.

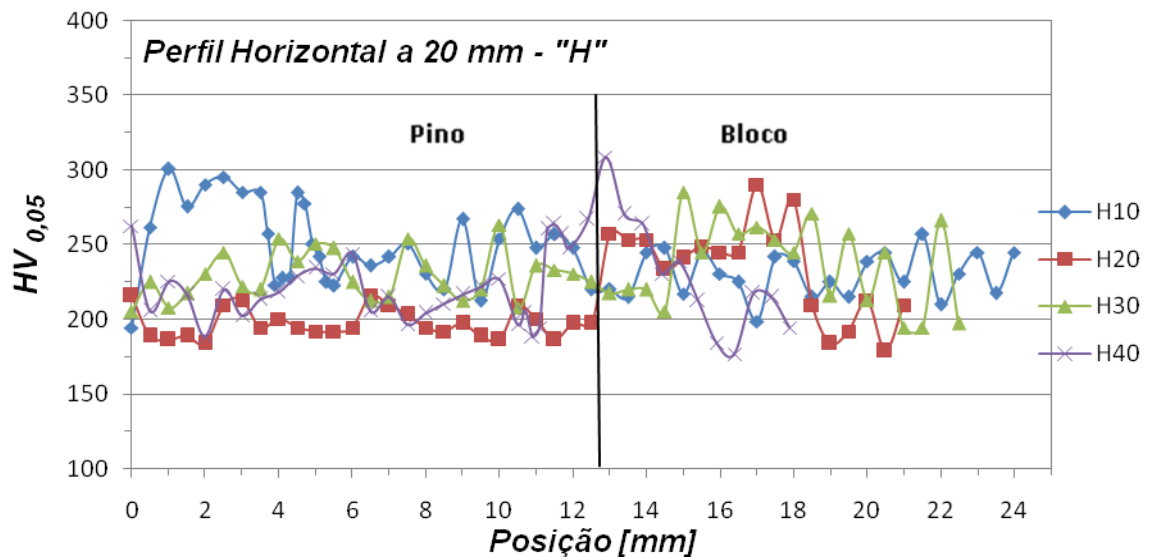


**Figura 6.31** – Perfil **horizontal** de microdureza Vickers situado a 5 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H”.



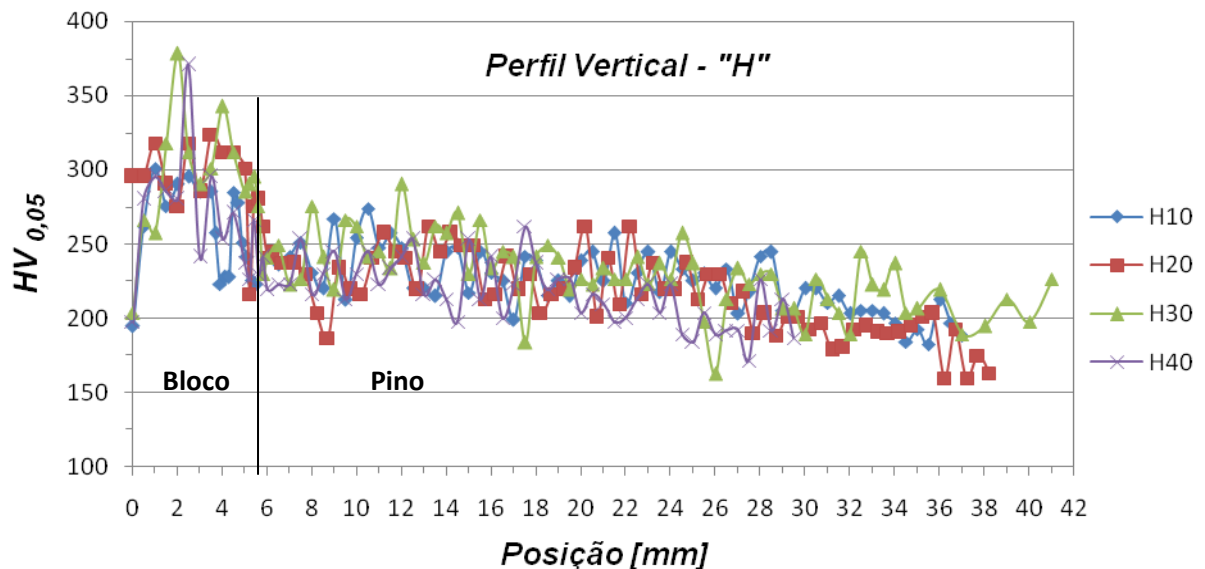
**Figura 6.32** – Perfil **horizontal** de microdureza Vickers situado a 10 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H”.

A Figura 6.33 apresenta perfis de microdureza mais espalhados e não segue o mesmo comportamento que os resultados apresentados para os perfis horizontais a 5 e 10 mm da interface pino e bloco anteriormente estudados. Nesse caso, os valores de dureza não ultrapassaram 300HV<sub>0,05</sub> no material base, ou seja, significativamente inferiores aos medidos nas amostras com geometrias “A” e “B”. Esse comportamento está associado ao fato de que essa geometria exige um maior aporte térmico, como será mostrado mais adiante. Isso resulta em menores velocidades de resfriamento, e, conseqüentemente, menores valores de dureza.



**Figura 6.33** – Perfil **horizontal** de microdureza Vickers situado a 20 mm da interface inferior para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H”.

O perfil de microdureza vertical “H” que pode ser visto na Figura 6.34 apresenta na região do pino uma tendência de redução dos valores de dureza à medida que se afasta da interface inferior. Todavia a maioria dos resultados encontra-se na faixa de 200 a 250HV<sub>0,05</sub>, tal como observado nos demais ensaios. As maiores durezas foram medidas na região da ZAC. Esses valores são, porém, inferiores aos observados nas amostras das geometrias “A” e “B” Isso se justifica pelo maior aporte térmico e consequentemente menor velocidade de resfriamento.



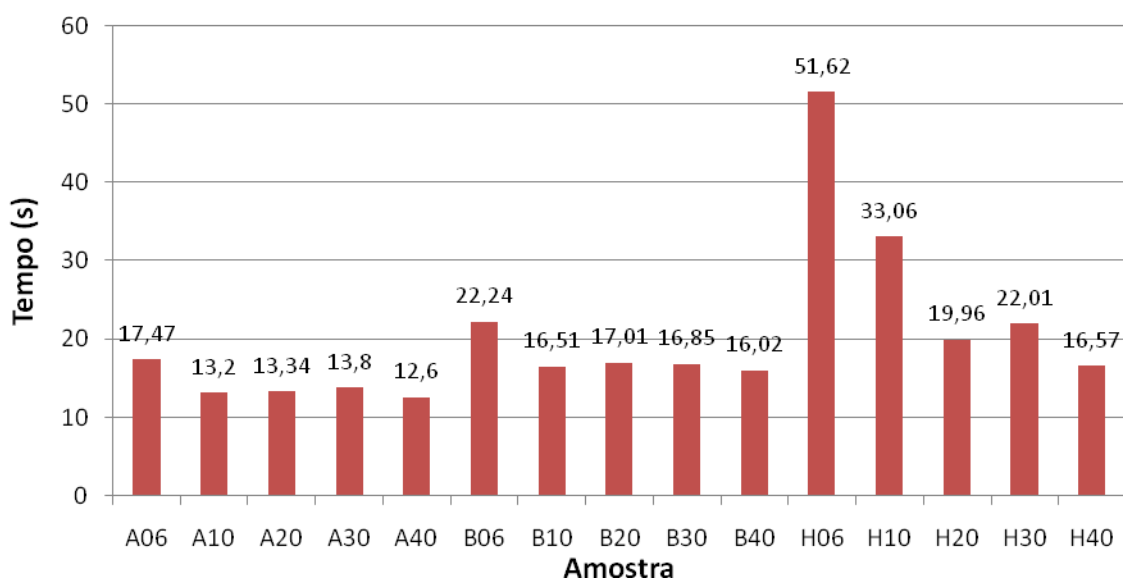
**Figura 6.34** – Perfil **vertical** de microdureza Vickers para ensaios da Tabela 5.2 de geometria “H”.

A força aplicada nos ensaios influencia a largura e as características da ZAC. O calor liberado no caso das maiores cargas é mais bem utilizado na transformação plástica do material e, portanto, não se propaga de forma acentuada na direção axial do pino. Como descrito por Ellis (1972), soldas por atrito realizadas com altas pressões axiais mostram regiões mais estreitas nas quais os valores de dureza são menores em relação ao material base.

## 6.6 – Energia de Processamento

A Figura 6.35 apresenta os tempos gastos no processamento dos pinos para as geometrias testadas. Para a geometria “H”, observa-se claramente que os tempos de processamento diminuem com o aumento da carga aplicada. Essa é uma tendência verificada nos trabalhos de solda e reparo por atrito (MEYER, 2003, PIRES, 2007). Isso pode ser explicado pelo fato de que altas pressões axiais aumentam o consumo de material (maior taxa de queima), gerando ciclos de reparo mais curtos. Os menores tempos de processamento observados nas amostras com geometria “A” estão associados ao fato de que nesse caso tem-se o furo de menor

profundidade e o diâmetro do pino é o menor de todos. Além disso, há de se destacar que a força não teve efeito significativo sobre o tempo. Isso se deveu, basicamente ao fato de que as forças selecionadas para o segundo estágio não foram atingidas durante o processamento.



**Figura 6.35** – Tempos gastos para ensaios das Tabelas 5.2 e 5.4.

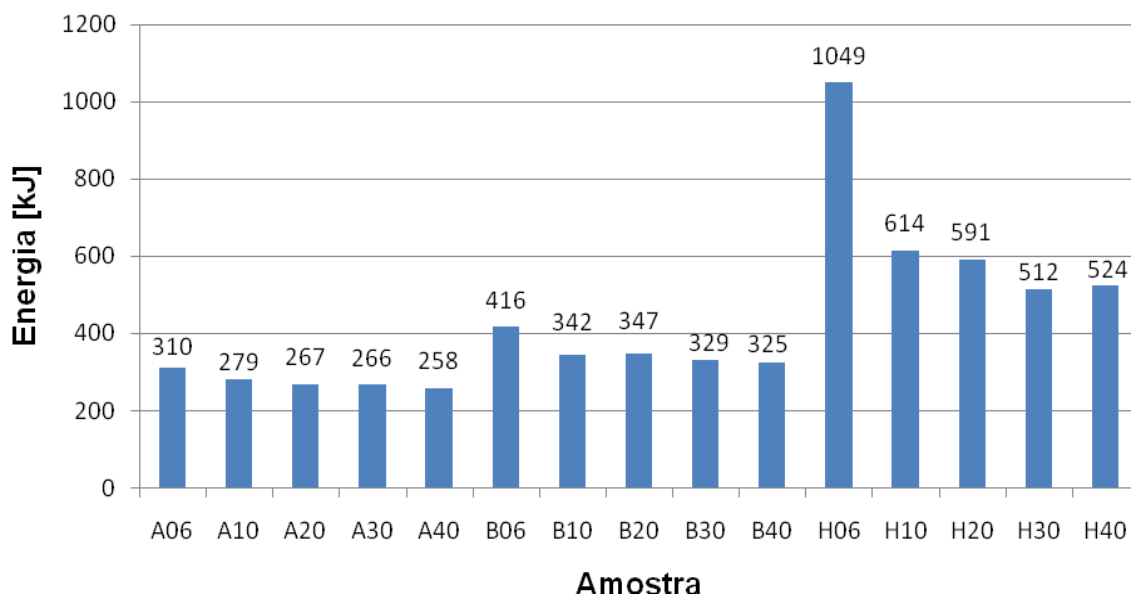
Após aquisição de sinais para os diversos parâmetros do reparo por atrito, construiu-se o gráfico de energia gasta durante o processamento dos pinos de cada ensaio, como apresentado na Figura 6.36. O gráfico mostra a influência da energia gasta à medida que a carga aplicada muda.

Para o cálculo da energia total gasta em cada ensaio utilizou-se o valor médio de potência encontrado para o intervalo entre o início do ensaio até o momento que a rotação do pino cai para zero (final da fase de parada), multiplicando-se esse valor médio pelo tempo nesse instante. A potência média foi calculada a partir dos valores de rotação e torque pontualmente adquiridos durante os ensaios.

Os valores de energia gasta encontrados para o grupo de A06 a A40 são muito próximos. Esse comportamento está associado ao fato de que a geometria “A” tinha apenas 20 mm a ser preenchido e o pino tinha o menor dos diâmetros testados. Isso resultou num rápido consumo do pino e aplicação de forças crescentes no segundo estágio não puderam ser aplicadas na sua totalidade, como



mencionado anteriormente. Comportamento similar foi observado nas amostras da geometria “B”. Todavia, nas amostras da geometria “H”, notou-se uma tendência de redução da energia de processamento com o aumento da carga axial do segundo estágio



**Figura 6.36** – Energia gasta em cada ensaio realizado até o encerramento da velocidade de rotação.

Analisando as diferenças dimensionais entre corpos de prova, encontra-se um preenchimento de bloco com profundidade de furo dobrada (relativo aos corpos de prova de dimensões A e H). A energia gasta para o ensaio com um único estágio é muito mais que o dobro quando se dobra a profundidade do furo preenchido. Já os outros processamentos têm a energia gasta aproximadamente proporcional ao aumento de profundidade do furo reparado.

Esse aumento da energia de processamento resulta em menores velocidades de resfriamento, e, conseqüentemente, menores durezas na ZAC, como mostrado anteriormente. Desta forma, é muito importante que se conheça as energias de processamento, para que se possa, de alguma forma, controlar a microestrutura da região processada. Esse controle poderia ser feito através do cálculo da energia

imediatamente após a execução do ensaio. Assim, poder-se-ia ter um primeiro critério para aceitação do reparo. Isso resultaria em consideráveis economias de tempo na execução do reparo em operações de campo.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES**

Através do desenvolvimento do presente trabalho foi realizada a montagem, instrumentação e controle em malha fechada e de um equipamento de reparo por atrito com capacidade de cargas axiais de até 500 kN. Os resultados obtidos permitiram concluir que:

1. As estratégias de instrumentação e controle adotadas foram eficientes na realização de reparos por atrito sob diversas condições de processamento, incluindo geometrias diversas, forças e rotações diferentes. Essa eficiência foi verificada através dos dados adquiridos e da avaliação macro e micrográfica;
2. Através da correta seleção da força e da rotação do pino, pode-se realizar ensaios com pinos de dimensões relativamente grandes, evitando-se o travamento do motor hidráulico. Além disso, a adoção de um estágio inicial com menores cargas e/ou maiores rotações, facilitam a expansão de janelas de operação, na medida em que se tem uma fase de aporte térmico inicial, destinado a aumentar a temperatura. Isso proporciona a redução das propriedades mecânicas do material e, conseqüentemente menores torques, bem como ligação metalúrgica controlada;
3. No presente equipamento, a utilização de baixas velocidades de rotação (da ordem de 1.000 rpm) conduziu a travamentos do sistema. A placa de conversão de frequência em tensão desenvolvida para o sensor de velocidade apresentou-se eficaz no controle da rotação, tornando possível o reparo de estruturas com maiores diâmetros, sem travamento;

4. O monitoramento do torque via telemetria foi implementado, possibilitando a medição desse parâmetro e, conseqüentemente, da energia aportada durante o processo de reparo por atrito;
5. Para os ensaios com dois estágios e forças de processamento final elevadas, essas cargas não foram atingidas. Isso se deveu ao fato de que a resistência mecânica desenvolvida nessas condições eram relativamente pequena. Para se atingir esses valores, ter-se-ia que aumentar a velocidade de avanço do sistema hidráulico, ou então, aumentar as dimensões dos pinos e blocos;
6. Na geometria “H” foram observadas maiores variações do torque. Essa variação foi atribuída aos maiores diâmetros da amostra, a qual apresentou maior resistência ao movimento, gerando picos de torque em pontos característicos; Através dos ensaios preenchimento realizados, foi possível verificar que, de modo geral, quanto maior o aporte térmico, maior a espessura da ZAC, como esperado. Isso ficou evidente nos ensaios com carga de 60 kN, com processamento em apenas um ciclo;
7. Nos ensaios com as geometrias “A” e “B”, a ZAC apresentou valores de microdureza consideravelmente superiores aos observados no material processado. Essa diferença ficou evidente também nas micrografias. Já nas amostras com geometria “H”, foram observados valores de dureza bem inferiores na ZAC. Essa diferença de comportamento pôde ser explicada através do maior aporte térmico, que resulta em menores velocidades de resfriamento, e, conseqüentemente, em menores durezas;
8. Foram observados óxidos diversos na região da interface. Acredita-se que a sua presença esteja associada a um aumento da folga entre o pino e o furo.

## **CAPÍTULO 8**

### **TRABALHOS FUTUROS**

Em continuidade a esse trabalho sugere-se que ensaios com cargas mais elevadas sejam exploradas. Isso poderá ser feito através do redimensionamento do sistema hidráulico de aplicação da força axial, ou ainda através da adoção de pinos de maiores diâmetros, haja vista que ainda há capacidade do torque resistivo. A primeira das opções é mais custosa, uma vez que se fará necessária a aquisição de uma nova bomba hidráulica. A segunda alternativa, além de não gerar custos, oferece a possibilidade de se reduzir o número de preenchimentos nos casos de reparo por costura. Destaca-se ainda, que, nesse caso, o aporte térmico será maior, o que é benéfico para o processo, evitando a necessidade de pré-aquecimentos.

Com relação ao tempo de forjamento, sugere-se que esse valor seja elevado de tal forma a se alcançar o valor pré-selecionado, caso isso não ocorra durante o processamento. Isso poderia contribuir para a elevação dos níveis de tensões residuais compressivas, o que é extremamente desejado.

Com relação à geometria dos pinos e blocos, sugere-se que os efeitos da folga entre esses sejam avaliados, de tal forma que restos de óxidos não permaneçam na interface.

Por fim, sugere-se estudar a viabilidade de se aplicar como critério de aceitação da operação o cálculo do valor da energia aportada durante o processo. Em operações de campo, isso poderia resultar em consideráveis economias de tempo.

## **CAPÍTULO 9**

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDREWS, R.E.; MITCHELL, S.J., Underwater repair by friction stitch welding, Metals and Materials. p. 796-797, Dec. 1990.

BLAKEMORE, G. R. "Friction Stud Welding in Hazardous Areas". Welding & Metal Fabrication, p. 428-430, Nov./Dec. 1993.

BLAKEMORE, G. R. Friction Welding, Technology for the New Millennium. In: OFFSHORE CONFERENCE, May. 1999, Houston, Texas.

EDMOND, R. C.; MARK A. C., Friction Pull Plug Welding: Dual Chamfered Plate Hole. Lockheed Martin Corporation, New Orleans, Patent N° US06230958 B1, 2001.

EDMOND, R. C.; MARK A. C., Friction Pull Plug Welding: Top Hat Plug Design. Lockheed Martin Corporation, New Orleans, Patent N° US06386419 B2, 2002.

ELLIS, C. R. G., "Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel", in Welding Journal: pp. 183s - 197s. 1972.

ESPINOZA, V. A. A., Incorporação superficial de nitrogênio em filmes DLC tratados em plasma de radio frequência. Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

FILHO, L. C. P. de L., Desenvolvimento de um programa para controle do processo de furação utilizando um equipamento de reparos por atrito. Monografia de projeto

de fim de curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

FRANCO, S. D. ; HWANG, H. F. ; FRANCO, V. L. D. S. ; PAES, Marcelo Torres Piza ; SOUZA, R. J. DE ; RAMOS NETO, Francisco F. ; CARDOSO, L. DE O. A. ; BARBOSA NETO, Teófilo Ferreira ; FORMOSO, C. M. . Equipamento Para Reparo de Estruturas Metálicas e Métodos de Funcionamento. Processo no INPI - PI 0704190-0, 2009.

HWANG, H. F., Desenvolvimento, Projeto, Construção e Teste de um Cilindro de Reparo por Atrito Portátil. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

LEBEDEV, V. K.; CHERNENKO, I. A. "Friction Welding". Sov. Tech. Ver., 1992. v.4. p. 59 – 168.

MACHADO, I. G., Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MACIEL, M. F., Friction Plug Welding Methods and Systems. EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A., São José dos Campos, Patente Nº WO2009089601 A2, 2009.

MEYER, A., Friction Hydro Pillar Processing - Bonding Mechanism and Properties, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2003.

MUNIZ, R. A., Unidade de Processamento por Atrito Versão 3 - Relatório Parcial. Laboratório de Tribologia e Materiais. Universidade Federal de Uberlândia, mai. 2007.

PINHEIRO, G. A., Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Joint

Properties, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2008.

PIRES, R. R. Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito. 2007. 136 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SOUZA, R. J. Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito. 2006. 42 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

THOMAS, W.; NICHOLAS, D.; JONES, S. B.; LILLY, R. H.; DAWES, C. J.; DOLBY, R. E., Friction Forming. TWI, Cambridge, Patent N<sup>o</sup>. EP 0 602 072 B1, 1993.

TWI – The Welding Institute. What is Friction taper plug welding ? Disponível em: <<http://www.twi.co.uk/content/faqedn002.html>>. Acesso em : 15 dez 2010

VOUTCHKOV I.; JAWORSKI B.; VITANOV V. I.; G.M. BEDFORD. An integrated approach to friction surfacing process optimisation. Surface and Coatings Technology 141 26-33, 2001.

UNFRIED, J.; HERMENEGILDO, T.F.C.; RAMIREZ, A. J.; POPE, A. P.; PAES, M. T. P. “Estudo da Influência dos Parâmetros de Processo na Microestrutura da Zona Termo-Mecanicamente Afetada na Soldagem por Atrito com Pino Consumível em Aços C-Mn”. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 6, n. 2, p. 73-79, out.-dez. 2009.

PETRÓLEO BRASILEIRO S. A. Quem Somos. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/>>. Acesso em: 8 jun. 2010