

HENRY FONG HWANG

DESENVOLVIMENTO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E
TESTE DE UM CILINDRO DE REPARO POR ATRITO
PORTÁTIL



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2010

HENRY FONG HWANG

DESENVOLVIMENTO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM
CILINDRO DE REPARO POR ATRITO PORTÁTIL

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

Área de Concentração: Tribologia e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Sinésio Domingues Franco

UBERLÂNDIA – MG

2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

H991d Hwang, Henry Fong, 1976-
Desenvolvimento, projeto, construção e teste de um cilindro de reparo
por atrito portátil [manuscrito] / Henry Fong Hwang. - 2010.
51 f. : il.

Orientador: Sinésio Domingues Franco.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Soldagem - Teses. 2. Materiais - Teses. I. Franco, Sinésio Domingues, 1962- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.791

À minha esposa Fernanda.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por tudo e por todos com os quais pude caminhar e aprender.

Aos meus pais Hwang e Célia, minhas irmãs Gisele, Eliane e Susane pelo constante apoio e incentivo. Ao meu tio Hwang Hong Jeng, um grande engenheiro e um homem de coração exemplar. Aos meus amigos, pela amizade duradoura. À minha esposa Fernanda, pelo amor, paciência e compreensão expressos durante esta caminhada.

Sinto-me grandemente agraciado por ser escolhido para apresentar este trabalho, que é, na verdade, a soma dos esforços de dezenas de pessoas, membros do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste - UFU e do centro de pesquisa da Petrobras (CENPES). Durante quase dez anos (e muitas horas de dedicação e empenho), estas pessoas sonharam e construíram, num espírito de colaboração e amizade, os fundamentos para a realização desta etapa, que representa apenas a ponta de um *iceberg*.

Gostaria de agradecer ao Prof. Sinésio Domingues Franco e Prof^a. Vera Lúcia D. Franco, pela firme e fiel orientação.

Aos engenheiros da Petrobras Marcelo Torres Piza Paes, Francisco Francelino Ramos Neto e Ricardo Reppold Marinho, pela oportunidade e motivação.

Ao Prof. Rafael Ariza Gonçalves pelo apoio técnico.

Aos engenheiros Juliano Oséias de Moraes, Raphael Rezende Pires e Camila Monteiro Formoso pela amizade e a colaboração dentre os desafios deste desenvolvimento.

Ao engenheiro Walter Antônio Kapp pela disposição em auxiliar nos projetos.

Aos alunos Fernando Buiatti Rodrigues, Luiz Carlos Pinagé de Lima Filho, Douglas Teruyuki Cabral, Jean de Cazenove, Ricardo Hiroyoshi Haguimoto e Felipe Braga Afonso, que contribuíram grandemente para a realização deste trabalho e de etapas futuras.

Aos mestrandos e doutorandos Fernando Martins Ferreira, Renato Pacheco Silva, Rodrigo Azevedo Muniz, Hermes Paulo Santos de Oliveira, Ernane Rodrigues da Silva e Rogério Felício dos Santos pelo companheirismo na caminhada.

Aos técnicos Flávio Alves dos Santos, Ângela Maria da Silva Andrade, Jhonathas Ferreira Santos, às secretárias Eunice Helena Nogueira e Sandra Aparecida Rocha Silva, e aos demais integrantes do Núcleo de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia, que de alguma forma contribuíram para concretização deste trabalho.

À Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras e à FINEP pelo apoio financeiro.

HWANG, H. F., Desenvolvimento, projeto, construção e teste de um cilindro de reparo por atrito portátil. 2010. 78p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Resumo

Os movimentos das ondas introduzem tensões significativas em juntas soldadas de estruturas *offshore*, que podem levar ao surgimento de trincas de fadiga. Inovações em técnicas de reparo têm sido estudadas para permitir a realização destas, sem a necessidade de paradas de produção nas FPSOs (*Floating Production Storage and Offloading*). Enquanto as técnicas mais comuns são baseadas em solda a arco elétrico, o reparo de trincas por atrito tem sido considerado um método alternativo a ser utilizado. Ele consiste em fazer um furo na região da trinca, o qual é, posteriormente, preenchido por um pino consumível. Pelo fato de ocorrer no estado sólido, ou seja, abaixo da temperatura de fusão, problemas como trincas, porosidades, adsorção de gases e contaminação se tornam insignificantes. Com o objetivo de desenvolver esta técnica para aplicação em suas estruturas, a Petrobras firmou um convênio com a Universidade Federal de Uberlândia, quando foi construída a primeira Unidade de Processamento de Pinos por Atrito - UPPA1. Parâmetros do processo como geometria, rotação e força axial foram otimizados para a obtenção de uniões metalúrgicas de qualidade. Posteriormente, iniciaram-se os estudos para levar a tecnologia ao campo. O primeiro passo consistiu em portabilizar o cilindro de reparo, que é o componente da unidade que aplica as forças e rotações nos pinos consumíveis. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo conceber, projetar, construir e testar um cilindro de reparo portátil, com capacidade de força axial de 40 kN e rotação de 5.000 rpm, para trabalhar em ambiente submerso (água do mar) até 3 bar. Um cilindro de 15 kg foi construído e conectado à UPPA1 para realização de testes. Foram desenvolvidos mandris, sistemas de fixação do cilindro em tubulações e superfícies planas. Testes de soldagem e preenchimentos por atrito, através da compressão de pinos (*Friction Hydro Pillar Processing*) e tração de pinos (*Friction Pull Plug Welding*) também foram realizados. O cilindro de reparo foi portabilizado e se mostrou apto a realizar operações em campo.

Palavras-chave: Reparo por Atrito, Soldagem por Atrito, *Friction Hydro Pillar Processing*, *Friction Pull Plug Welding*, Cilindro de Reparo, Processamento de Pinos por Atrito.

HWANG, H. F., Development, design, assembly and testing of a portable friction welding head. 2010. Master of Science Dissertation in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia – Brazil.

Abstract

Wave loads introduce significant dynamic stresses on welded connections of offshore structures, leading to fatigue crack growth. Innovations in repair techniques are being pursued to perform these repairs without the need of shutdown of FPSOs (Floating Production Storage and Offloading). While common repair techniques are based on fusion welding process, solid state welding technique such as friction welding has always being sought as an alternative method for repair. The Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) technique can be described as a fill and drill process, where a consumable rod is rotated, then entered co-axially into a cavity. Since the repair occurs below the melting point of the material, the process does not suffer from the common welding problems such as cracking, porosity, gas adsorption, atmospheric contamination and hydrogen embrittlement. Looking forward to applying this technology, the company Petrobras signed an agreement with the Federal University of Uberlandia - Brazil, and a FHPP equipment was developed. It was used to optimize the parameters and geometries for the new technique. Later, studies for field application began towards designing a portable friction welding head, which is the mechanical part that applies axial load and rotation to the consumable rod. In the present work, a portable friction welding head was conceived, designed and assembled for operations of 40 kN of axial load and 5.000 rpm. A 15 kg welding head was connected to the equipment. FHPP and FPPW (Friction Pull Plug Welding) tests were performed. Specific chucks and clamping systems for pipes and flat surfaces were developed and tested. The weld head was portabelized and demonstrated itself capable to perform field operations.

Keywords: Friction Repair, Friction Welding, Friction Hydro Pillar Processing, Friction Pull Plug Welding, Friction Welding Head.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Trinca em tanque de armazenamento de um FPSO da PETROBRAS (SOUZA,2006)	1
Figura 1.2: Esquema ilustrativo da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1)	3
Figura 1.3: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por tração	4
Figura 2.1: Sequência de execução da soldagem por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força; (C) Início da união soldada; (D) Solda completada (AWS, 1991)	6
Figura 2.2: Influência dos parâmetros na soldagem por atrito (MEYER, 2004)	8
Figura 2.3: Fases da soldagem por atrito em relação aos parâmetros (MEYER, 2004)	9
Figura 2.4: Ilustração das etapas do “ <i>Tapered Plug Welding</i> ”	12
Figura 2.5: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito (NICHOLAS, 1999)	13
Figura 2.6: Fase de preenchimento do processo FHPP (PINHEIRO et al., 2001)	14
Figura 2.7: Microestruturas de um furo preenchido por atrito (BLACKEMORE, 1999)	14
Figura 2.8: Processamento por atrito utilizando geometrias cônicas (PIRES, 2007)	15
Figura 2.9: Dobramento a 180° em amostra de FHPP (PIRES, 2007)	16
Figura 2.10: Pino de AISI 316L processado por atrito em substrato de ASTM A36 (FRANCO, 2009)	17
Figura 2.11: Etapas do processo FPPW	18
Figura 2.12: Croqui do processo de costura por atrito	18
Figura 2.13: Amostra transversal de raiz com dobramento a 180° (PIRES, 2007)	19
Figura 3.1: Equipamento de reparo portátil HMS 3000 (www.circletechnical.com)	22

Figura 3.2: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1); a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas, b) Cilindro de reparo acoplado ao pórtico	23
Figura 3.3: Fluxo de informações dos sinais analógicos de controle e monitoração das variáveis do processo (SOUZA, 2006)	25
Figura 3.4: Interface gráfica do programa de controle do equipamento	25
Figura 3.5: Unidade hidráulica e cilindro de reparo da UPPA2	26
A Figura 3.6: Concepção da quarta unidade de processamento de pinos por atrito (UPPA4)	27
Figura 3.7: Concepção do cilindro de reparo portátil	29
Figura 3.8: Montagem do cabeçote inferior com parafusos de corpo retificado	30
Figura 3.9: Sistema de restrição da rotação da haste	31
Figura 3.10: (a) montagem do cilindro de reparo portátil na base de fixação para dutos; (b) montagem das bases de apoio	32
Figura 3.11: Base de apoio sobre vários diâmetros de dutos	32
Figura 3.12: Cintas com catraca para auxiliar na fixação do cilindro de reparo em dutos	33
Figura 3.13: Estrutura com ventosas para fixação do cilindro de reparo portátil	35
Figura 3.14: Concepção da unidade geradora de vácuo	36
Figura 3.15: Ilustração do processo de solda por atrito de pinos roscados em superfícies planas	37
Figura 3.16: Ilustração da sequência de acoplamento e soldagem por atrito de pinos roscados em superfícies planas	38
Figura 3.17: Conjunto de fixação de pinos consumíveis para FHPP	39
Figura 3.18: Conjunto de fixação de pinos consumíveis para preenchimento por tração (FPPW)	40
Figura 3.19: Sistema de fixação do sensor de rotação	41
Figura 3.20: (a) sensor de deslocamento potenciométrico; (b) concepção do sensor	42
Figura 3.21: Montagem do porta-sensor no cilindro	42

Figura 4.1: Cilindro de reparo portátil montado	44
Figura 4.2: Detalhes da ligação hidráulica do motor	45
Figura 4.3: Ligação das mangueiras do sistema de translação no bloco de válvulas da UPPA1	45
Figura 4.4: Ligações hidráulicas do cilindro de reparo portátil	46
Figura 4.5: Sensor de rotação montado no cilindro de reparo portátil	46
Figura 4.6: Porta-sensor de deslocamento	47
Figura 4.7: Montagem alternativa do sensor de deslocamento	48
Figura 4.8: Sistema de fixação para dutos	49
Figura 4.9: Duto para ensaios com mesa para amostras planas	49
Figura 4.10: Sistema de fixação sobre duto de ensaios	50
Figura 4.11: Cilindro de reparo e sistema de fixação para dutos montados sobre o duto de ensaios	50
Figura 4.12: Montagem do cilindro de reparo sobre a estrutura com ventosas	51
Figura 4.13: Unidade geradora de vácuo montada sobre o quadro de alumínio	52
Figura 5.1: Sistema de fixação por ventosas posicionado sobre chapa de testes	54
Figura 5.2: Estrutura fixada sobre parafusos soldados	55
Figura 5.3: Detalhe da fixação da estrutura sobre as barras roscadas, soldadas a arco elétrico	56
Figura 5.4: Estrutura deformada devido ao rompimento das soldas	56
Figura 5.5: Curvas de ensaios de tração realizados em pinos roscados soldados por atrito	57
Figura 5.6: Amostra de ensaio de tração rompida no material de base	58
Figura 5.7: Pino roscado desenvolvido para soldagem por atrito	59
Figura 5.8: Redução da área de atrito devido à inclinação de um pino com ponta cilíndrica submetido às forças tangenciais da soldagem por atrito	60
Figura 5.9: Processo de extração dos pontos de soldagem dos pinos roscados.....	61
Figura 5.10: Processo de soldagem por atrito de um pino roscado	62
Figura 5.11: Disposição de oito pinos roscados soldados por atrito	62

Figura 5.12: Montagem preparatória para o teste de FHPP	63
Figura 5.13: Geometrias utilizadas no ensaio de FHPP	63
Figura 5.14: Ensaio de FHPP. Força axial de 20 kN e rotação de 5.000 rpm	64
Figura 5.15: Montagem para ensaios FPPW	65
Figura 5.16: Geometrias utilizadas nos ensaios FPPW	66
Figura 5.17: (a) pino original (esquerda) e pino rompido durante o ensaio (direita); (b) corte transversal de amostra do ensaio FPPW, 6 kN e 5.000 rpm	67
Figura 7.1: Processo de furação com as ferramentas desenvolvidas	72
Figura 7.2: Sistema de fixação do cilindro de reparo portátil sobre trilhos	73
Figura 7.3: Sistema de fixação para superfícies planas concebido por Cazenove (2008)	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Premissas de projeto do cilindro de reparo portátil	28
Tabela 3.2: Premissas de projeto da fixação em chapas planas	34

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI: American Iron and Steel Institute
API: American Petroleum Institute
ASTM: American Society for Testing and Materials
AWS: American Welding Society
BSP: British Standard Pipe
CCP: Cartão de Controle da Pressão
CCV: Cartão de Controle da Vazão
CPF: Cartão Lógico de Processamento da Força Axial
CPR: Cartão Lógico de Processamento da Velocidade de Rotação
DIN: Deutsche Industrie-Norm
FHPP: Friction Hydro Pillar Processing
FPPW: Friction Pull Plug Welding
FPSO: Floating, Production, Storage and Offloading
GKSS: Forschungszentrum
INPI: Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
LVDT: Linear Variable Displacement Transducer
PID: Proporcional Integral Derivativo
SAE: Society of Automobile Engineers
SP: Sensor de Posição
SR: Sensor de Rotação
TP: Transdutor de Pressão
TWI: The Welding Institute
UFU: Universidade Federal de Uberlândia
UPPA: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito
VRP: Válvula Reguladora de Pressão
VRV: Válvula Reguladora de Vazão
ZAC: Zona Afetada Pelo Calor

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1 Soldagem por Atrito	05
2.1.1 <i>Parâmetros da Soldagem Por Atrito</i>	<i>06</i>
2.1.2 <i>Ciclo da Soldagem por Atrito</i>	<i>08</i>
2.1.3 <i>Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito</i>	<i>10</i>
2.2 Processamento de Pinos por Atrito	12
2.2.1 <i>Tapered Plug Welding</i>	<i>12</i>
2.2.2 <i>Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)</i>	<i>12</i>
2.2.3 <i>Friction Pull Plug Welding (FPPW)</i>	<i>17</i>
2.2.4 <i>Costura por Atrito</i>	<i>18</i>
2.2.5 <i>Vantagens e Aplicações do Processamento de Pinos por Atrito</i>	<i>19</i>
CAPÍTULO 3 – PROJETO DO CILINDRO DE REPARO PORTÁTIL	21
3.1 Histórico do Equipamento	21
3.1.1 <i>Equipamento Comercial</i>	<i>21</i>
3.1.2 <i>Convênio Petrobras – Universidade Federal de Uberlândia</i>	<i>22</i>
3.1.2.1 <i>Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1</i>	<i>23</i>
3.1.2.2 <i>Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 2 e 3</i>	<i>26</i>
3.1.2.3 <i>Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 4</i>	<i>26</i>
3.2 Projeto do Cilindro de Reparo Portátil	27
3.3 Sistemas de Fixação	31

3.4 Acessórios	36
3.4.1 <i>Mandril e Parafuso para Soldagem por Atrito</i>	37
3.4.2 <i>Mandril e Pino para FHPP</i>	38
3.4.3 <i>Mandril e Pino para FPPW</i>	39
3.5 Instrumentação	40
3.5.1 <i>Sensor de Rotação</i>	40
3.5.2 <i>Sensor de Deslocamento</i>	41
 CAPÍTULO 4 – MONTAGEM DOS COMPONENTES	 43
4.1 Montagem do Cilindro de Reparo Portátil	43
4.1.1 <i>Ligação Hidráulica</i>	44
4.1.2 <i>Instalação dos Sensores</i>	46
4.2 Montagem dos Dispositivos de Fixação	48
4.2.1 <i>Sistema de Fixação em Dutos</i>	48
4.2.2 <i>Sistema de Fixação em Superfícies Planas</i>	51
 CAPÍTULO 5 – TESTES DE VALIDAÇÃO	 53
5.1 Testes Iniciais dos Dispositivos de Fixação	53
5.1.1 <i>Testes do Sistema de Fixação para Dutos</i>	53
5.1.2 <i>Teste do Sistema de Fixação em Superfícies Planas</i>	54
5.1.2.1 <i>Teste do Sistema Sobre Ventosas – 5 kN</i>	54
5.1.2.2 <i>Teste do Sistema Sobre Parafusos Soldados - 40 kN</i>	55
5.2 Ensaio de Soldagem por Atrito	57
5.2.1 <i>Materiais, Geometrias e Parâmetros</i>	58
5.2.2 <i>Resultados dos Ensaio de Soldagem por Atrito</i>	61
5.3 Ensaio de FHPP (Friction Hydro Pillar Processing)	62
5.3.1 <i>Materiais, Geometrias e Parâmetros</i>	63

5.3.2 Resultados dos Ensaios de FHPP	64
5.4 Ensaios de FPPW (<i>Friction Pull Plug Welding</i>)	64
5.4.1 Materiais, Geometrias e Parâmetros	65
5.4.2 Resultados dos Ensaios de FPPW	66
 CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	 69
 CAPÍTULO 7 – TRABALHOS FUTUROS	 71
7.1 Desenvolvimento da Costura por Atrito	71
7.2 Melhorias nos Sistemas de Fixação para Superfícies Planas	72
 CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 75

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Estruturas *offshore* e navios geralmente são projetados para suportar condições ambientes extremas durante seu tempo em serviço. Além disto, é prevista uma determinada vida a fadiga, que costuma ser um múltiplo deste tempo (MOAN; GAO; AYALA-URAGA, 2005).

Os movimentos das ondas introduzem carregamentos e tensões significativas nas estruturas e levam ao surgimento de trincas de fadiga em conexões soldadas (LOTSBERG; LANDET, 2005). A Figura 1.1 mostra uma trinca encontrada em um tanque de armazenamento de petróleo em uma plataforma semi-submersível (FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*) da Petrobras (SOUZA, 2006).



Figura 1.1: Trinca em tanque de armazenamento de um FPSO da PETROBRAS (SOUZA, 2006).

Tempestades freqüentes em alto mar também intensificam os efeitos da fadiga e reduzem a vida útil das estruturas. Entre 1974 e 2004 foram contabilizados mais de um

bilhão de dólares em prejuízos causados por falhas mecânicas na indústria *offshore* na América do Norte, Europa e Extremo Oriente (KAISER, 2007).

Devido à importância do assunto, inovações têm sido estudadas para viabilizar a realização de reparos sem a necessidade de paradas de produção nas FPSOs. Enquanto as técnicas mais comuns são baseadas em solda a arco elétrico, o reparo por atrito tem sido considerado um método alternativo para ser utilizado em ambientes hostis (áreas com risco de explosão e espaços confinados). Pelo fato de ocorrer em estado sólido, ou seja, abaixo da temperatura de fusão, problemas como trincas, porosidades, adsorção de gases e contaminação são menos críticos ao processo (SALAMA; LOTSBERG, 2004).

O potencial reparo de trincas, mediante soldagem por atrito, também conhecido como costura por atrito (*Stitch Welding*), consiste na sobreposição de eventos, realizados através da técnica de processamento de pinos por atrito, ao longo do comprimento de uma fratura a ser reparada (PIRES, 2006).

Esta técnica consiste no preenchimento de um furo (cilíndrico ou cônico) por intermédio da introdução coaxial de um pino consumível, estando este submetido a uma velocidade de rotação e a esforços de compressão contra a cavidade do furo. Devido ao calor gerado pela interação entre as superfícies em contato, o material do pino é mantido em uma condição viscoplástica, permitindo a existência de um fluxo de material que se desenvolve ao longo da direção axial do consumível, promovendo-se, assim, o completo preenchimento do furo. Deste modo, longos defeitos podem ser reparados pelo emprego consecutivo deste procedimento (PIRES, 2007).

Resultados obtidos por Meyer (2001) mostraram que é possível fazer preenchimentos sem falhas utilizando altas rotações e baixas forças em um equipamento portátil de reparo por atrito.

Meyer (2004) também estudou a influência dos parâmetros (geometria, força e rotação) no processamento por atrito em aços, além das pressões e temperaturas envolvidas, e obteve uniões metalúrgicas sem defeitos.

Os resultados anteriores despertaram o interesse da Petrobras em desenvolver processos e equipamentos a fim de aplicar essa tecnologia no reparo de suas estruturas *offshore*.

Através de convênio firmado entre a Petrobras e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) foi construída a primeira Unidade de Processamento de Pinos por Atrito - UPPA1 (SOUZA, 2006), constituída basicamente por uma unidade hidráulica, um cilindro de reparo e um sistema de controle, conforme pode ser observado na Figura 1.2.

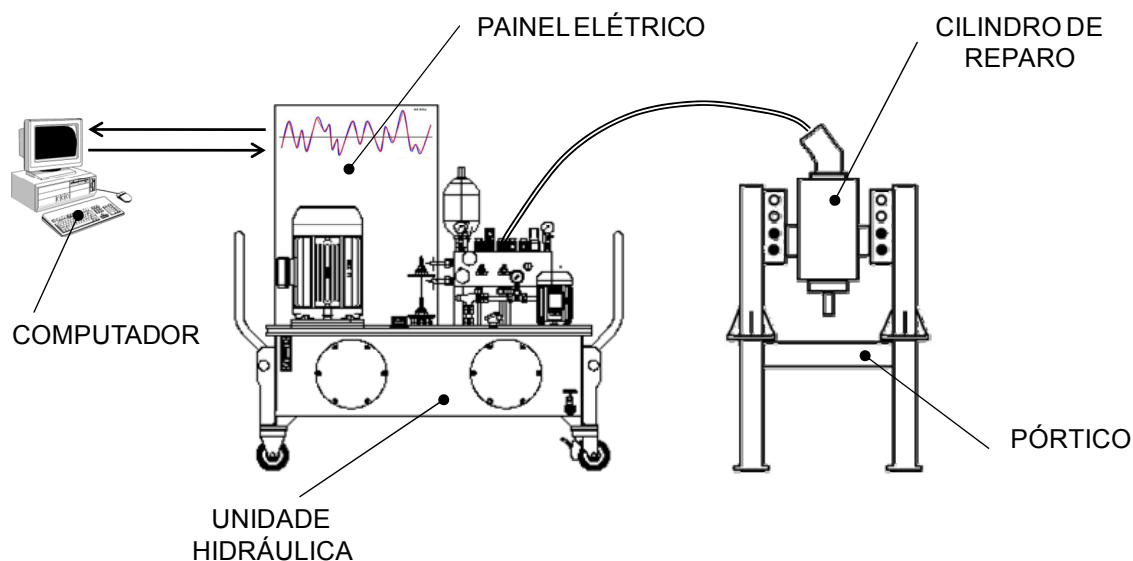


Figura 1.2: Esquema ilustrativo da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1).

A UPPA1 foi utilizada por Pires (2007) para realização de estudos de processos com forças axiais de até 50 kN e torques de até 57 N.m. Parâmetros como geometria, rotação e força axial foram otimizados para a obtenção de uniões metalúrgicas de qualidade.

Após concluída a otimização dos parâmetros realizada por Pires (2007) foi necessário iniciar os estudos para transferir a tecnologia ao campo. O primeiro passo consistiu em reduzir a massa do cilindro de reparo da UPPA1, que foi projetado para funcionar em laboratório (com massa aproximada de 80 kg). Este é o componente responsável por aplicar as forças e rotações nos pinos de adição para preenchimento das trincas e é interligado a uma unidade hidráulica, que fornece a potência e o controle necessários para operação. Ele é formado basicamente por um motor hidráulico acoplado a um cilindro hidráulico de haste vazada, onde são acomodados os mancais de rolamentos e o eixo.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o projeto, a construção e a validação de um novo cilindro de reparo portátil, que deverá atender as operações em campo de reparo por atrito. Ele deverá ainda possuir uma funcionalidade adicional, que é o processamento de pinos por tração, onde o pino consumível é tracionado através de um furo passante (Figura 1.3). A vantagem deste processo é a facilidade de fixação do equipamento, pois as forças reativas são de compressão, o que torna mais simples a ancoragem na superfície a ser reparada.

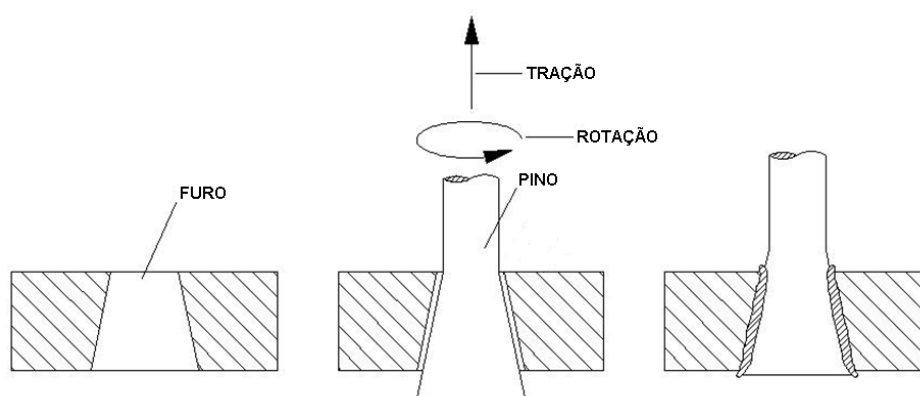


Figura 1.3: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por tração.

Para melhor compreensão, este trabalho foi organizado da seguinte forma:

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o processamento de pinos por atrito.

No Capítulo III é apresentado um breve histórico do equipamento e, posteriormente, o projeto do cilindro, acessórios e dispositivos de fixação.

No Capítulo IV apresentam-se a montagem mecânica, ligação hidráulica e instalação dos sensores do cilindro.

No Capítulo V são apresentados os testes iniciais de validação do equipamento.

No Capítulo VI apresentam-se as principais conclusões do trabalho.

No Capítulo VII são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e continuação do desenvolvimento.

No Capítulo VIII, são apresentadas as referências bibliográficas citadas neste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem por Atrito

A utilização do atrito como uma fonte termo-mecânica eficiente para unir e processar materiais na fase sólida vem percorrendo um longo caminho desde a primeira patente registrada por Bevington ao final do século IX (NICHOLAS, 1999).

A técnica de soldagem por atrito consiste de um processo em estado sólido, que produz juntas através do movimento relativo entre as superfícies de duas peças sob a ação de forças compressivas. Por conseguinte, calor é gerado mediante a superação das forças de atrito, e um deslocamento plástico de material nas superfícies em contato é obtido. Desse modo, é formada uma união metalúrgica entre as peças. (AWS, 1991).

O método mais utilizado é o rotativo, ilustrado na Figura 2.1, onde uma das partes permanece fixa enquanto a outra gira ao redor do eixo comum. O metal aquecido é radialmente extrudado sob a ação da força axial, formando dois anéis a partir do contato entre as faces em processamento (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992).

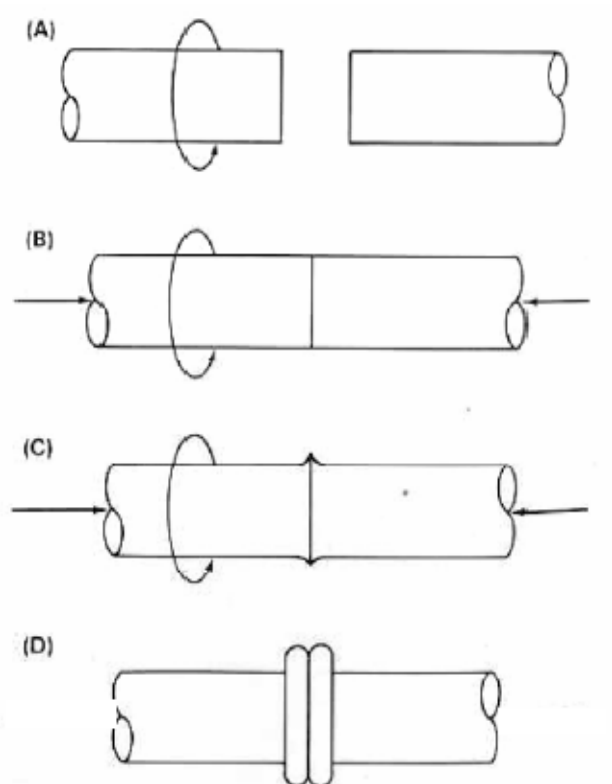


Figura 2.1: Sequência de execução da soldagem por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força; (C) Início da união soldada; (D) Solda completada (AWS, 1991).

Ao final do processo, após cessada a rotação, é usual a aplicação de uma força axial superior àquela aplicada durante a soldagem, denominada força de forjamento, a fim de se obter melhores propriedades mecânicas na ligação metalúrgica entre as partes (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992)

A porção consumida no comprimento das partes durante o processo é conhecida como comprimento de queima. Se observada em função do tempo, é chamada de taxa de queima (MEYER, 2004).

2.1.1 Parâmetros da Soldagem por Atrito

Os principais parâmetros do processo que influenciam na qualidade da junta soldada são a velocidade de rotação, força axial, taxa de queima, tempo de aquecimento, velocidade de frenagem e força de forjamento. As três primeiras variáveis são as mais importantes e as que serão abordadas nesse estudo.

Velocidade de rotação: Uma grande faixa de variação deste parâmetro não provoca alterações significativas na qualidade da solda (AWS, 1991). Apesar disto, a tendência de se aumentar a velocidade de rotação para gerar mais calor e melhorar a união metalúrgica é errônea, pois existem velocidades ótimas para cada par de material ou aplicação. Velocidades baixas até certo ponto são desejáveis para intensificação do processo e aumento da qualidade da união metalúrgica. A eficiência do processo aumenta com a redução de perda de calor, que reduz a quantidade de energia utilizada na soldagem (VILL, 1962, citado por MEYER, 2004). Lebedev e Chernenko (1992) indicam velocidades tangenciais de 1 a 2 m/s.

Força axial: A força axial do processo deve ser suficiente para provocar o íntimo contato entre as peças, de forma a romper o filme de óxidos e promover a formação da ligação metálica (AWS, 1991). Seu valor influencia a espessura e características microestruturais da zona afetada pelo calor (ZAC). Este parâmetro controla também o gradiente de temperatura na região da solda, a potência requerida do equipamento e a taxa de queima. Apesar disto, forças axiais extremamente elevadas aumentam significativamente o aquecimento e a taxa de queima, deixando o processo incontrolável (ELLIS, 1972). A AWS (1991) recomenda a utilização de maiores forças axiais pois essa condição tende a favorecer a formação de uma ferrita refinada, em detrimento da ferrita de Widmanstätten, melhorando a tenacidade da estrutura.

Taxa de queima: A taxa de queima mede a velocidade de consumo do comprimento das peças durante a soldagem. O comprimento de queima é um parâmetro utilizado no controle do ciclo de soldagem, indicando o início e o fim do processo. O tempo de aquecimento também pode ser controlado por este parâmetro. Ellis (1972) demonstrou que maiores forças axiais e velocidades de rotação aumentam a taxa de queima, e que maiores taxas de queima também tendem a desenvolver maiores valores de limite de resistência da união.

A relação entre os principais parâmetros do processo foi apresentada por Meyer (2004) e pode ser observada na Figura 2.2.

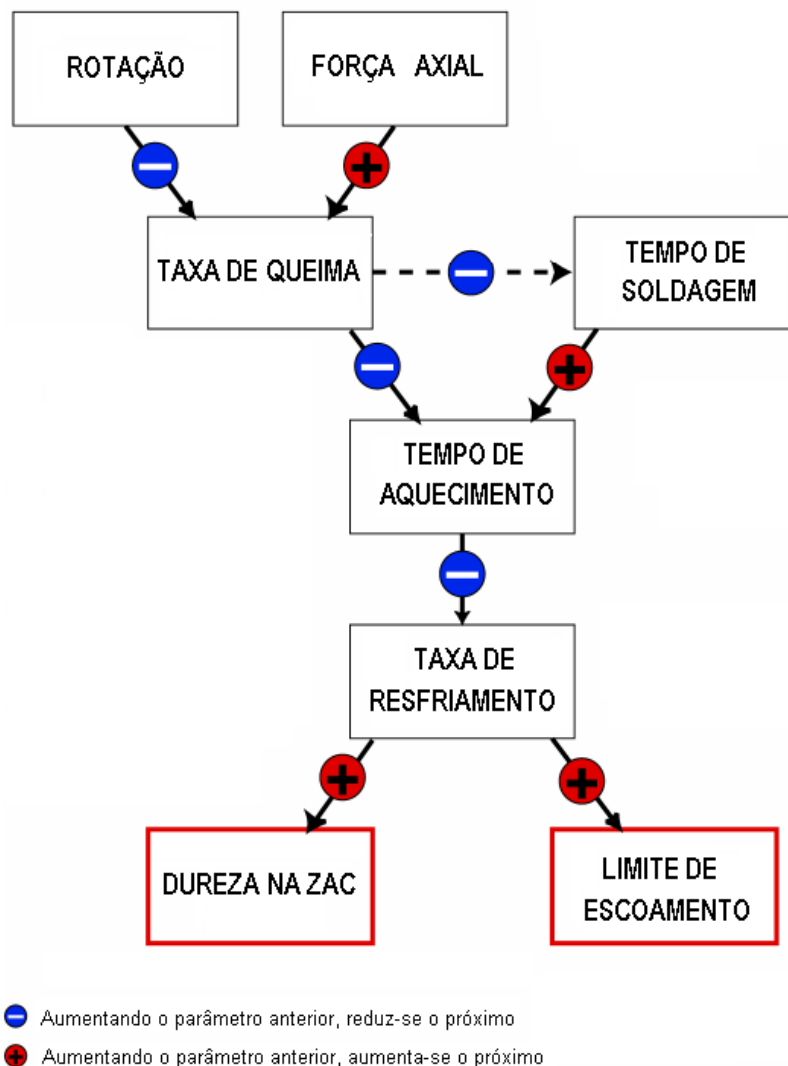


Figura 2.2: Influência dos parâmetros na soldagem por atrito (MEYER, 2004).

2.1.2 Ciclo da Soldagem por Atrito

O ciclo de soldagem por atrito envolvendo os parâmetros como força axial, velocidade de rotação, torque e comprimento de queima, de acordo com Meyer (2004), é mais comumente dividido em quatro fases (Figura 2.3).

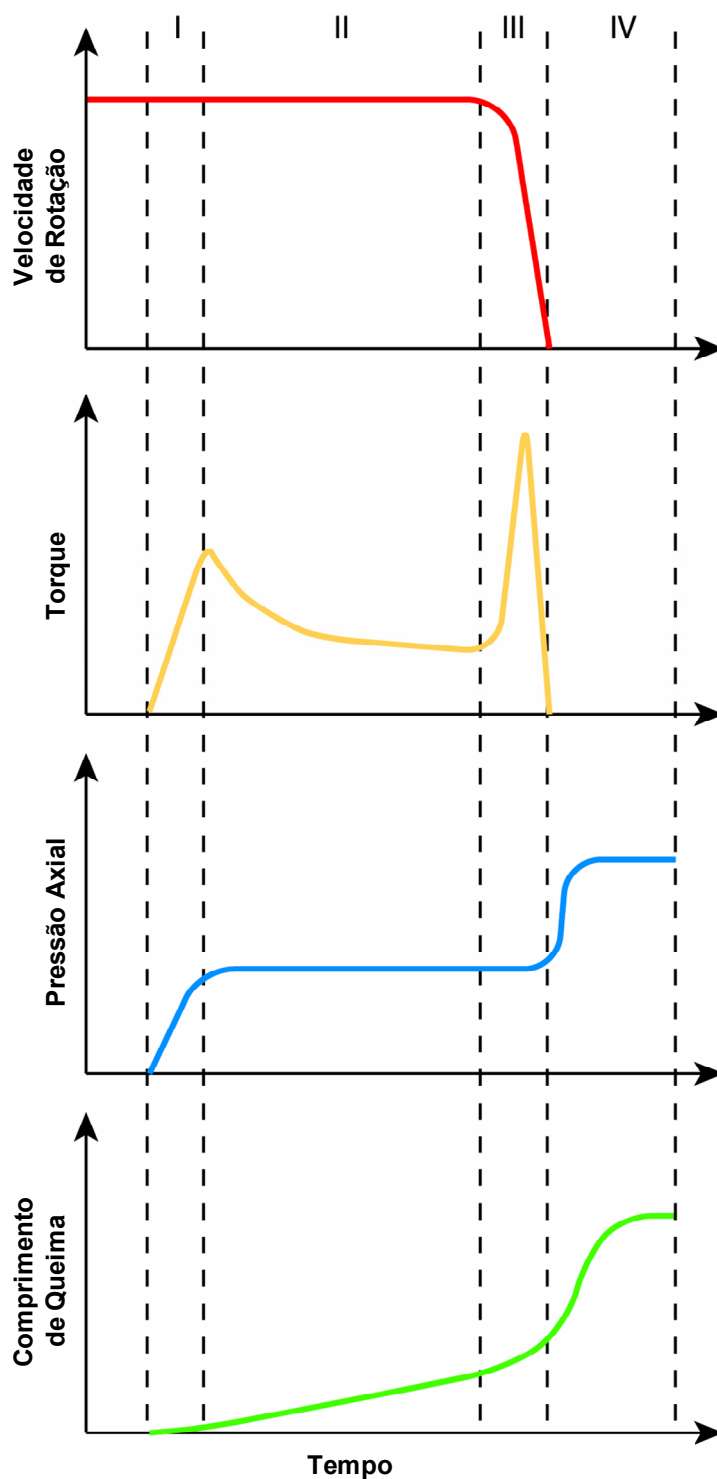


Figura 2.3: Fases da soldagem por atrito em relação aos parâmetros de processo (MEYER, 2004).

Fase I: No início da Fase I, a área de contato entre as superfícies ainda é pequena e conseqüentemente sofre uma severa deformação plástica devido à aplicação da carga axial do processo (MEYER, 2004). A interação entre as asperidades leva ao “alisamento” das

superfícies em contato, e é seguida por eventos de micro-adesão (CROSSLAND, 1971). O aumento da temperatura devido ao atrito seco leva à formação de filmes de cisalhamento que, não resistindo à carga axial, distribui a pressão para outras áreas de contato, aumentando assim o torque. Este fenômeno inicia-se em uma área anular a aproximadamente dois terços do raio, avançando para o centro da peça e posteriormente para seu exterior, até que em toda área de contato é formado o filme cisalhante, que é então extrudado radialmente (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992). Nesta fase, inicia-se o consumo do comprimento das peças. Os contaminantes e resíduos presentes são expelidos para o exterior da união devido à dinâmica do processo (CROSSLAND, 1971).

Fase II: O campo de temperatura estabiliza-se entre as superfícies em contato e o torque de atrito decresce (VILL, 1959, citado por MEYER, 2004). A partir deste momento uma taxa de queima quase-constante se estabelece. A Fase II termina quando o processo alcança os parâmetros de controle pré-ajustados, como temperatura, comprimento de queima ou um tempo determinado (MEYER, 2004).

Fase III: Com a redução da rotação, o calor entre as superfícies também é reduzido. Consequentemente, a resistência ao cisalhamento do material aumenta e o torque alcança seu segundo pico (CROSSLAND, 1971).

Fase IV: Nesta fase, qualquer material plastificado existente é extrudado para fora da interface, especialmente se a carga axial for aumentada (CROSSLAND, 1971). Apesar do mecanismo de ligação metalúrgica iniciar na segunda fase, as ligações não são homogêneas ao longo da área de contato (VILL, 1959, citado por MEYER, 2004). Assim, a força de forjamento faz com que as ligações se tornem uniformes. Apesar de ser aceito o fato de o forjamento melhorar as propriedades mecânicas da união, alguns experimentos mostram soldas de qualidade obtidas sem o aumento da força após cessada a rotação (ELLIS, 1972).

2.1.3 Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito

As vantagens e limitações da soldagem por atrito são apresentadas abaixo (MEYER, 2004).

Vantagens:

- Na maioria dos casos não é necessário o cuidado de limpar as superfícies pois o atrito tende a destruir, deslocar e finalmente remover camadas superficiais para o anel extrudado;
- Não são necessários materiais de adição, fluxo de material granulado ou gás. Diferentemente da soldagem a arco, a soldagem por atrito não oferece periculosidade ao operador, pois não há respingos metálicos, radiação, fumaça tóxica ou perigo de choque elétrico devido à alta voltagem, arco elétrico ou emissão de faíscas;
- Defeitos associados ao fenômeno de fusão e solidificação, como trincas de solidificação e ligação, porosidades e segregações, não estão presentes na soldagem por atrito, pois trata-se de um processo em estado sólido;
- É possível unir materiais dissimilares com limitada soldabilidade ou impossíveis de soldar por outros processos;
- Projetos simplificados de peças, baixo consumo de energia e ciclo curto de soldagem tornam o processo eficaz para produzir componentes geralmente unidos através de outros processos;
- O processo pode ser automatizado para produzir soldas de alta qualidade repetidamente. Equipamentos atuais podem ser operados a distância de 4 km do local de soldagem, o que torna o processo particularmente viável para aplicações em ambientes hostis;
- O baixo aporte térmico e curto ciclo de soldagem permitem a aplicação em dutos em operação, linhas de gás e metanol (BLACKEMORE, 1993);
- Estreitas Zonas Afetadas pelo Calor (ZAC) estão associadas ao processo;
- Operadores não necessitam de habilidade para soldagem;
- Na maioria dos casos, a resistência da junta soldada é maior ou igual ao mais fraco dos materiais a serem soldados.

Limitações:

- É necessário que pelo menos uma das partes a serem soldadas seja simétrica em um de seus eixos;
- O processo é limitado para juntas planas e angulares (ou cônicas);

- O material de uma das partes deve permitir deformação plástica sob as condições de soldagem empregadas;
- Preparação e alinhamento das peças pode ser crítico para a uniformidade do atrito e do aquecimento nas faces;
- O investimento em equipamentos e ferramentas é alto.

2.2 Processamento de Pinos por Atrito

2.2.1 Tapered Plug Welding

Um variante da soldagem por atrito foi apresentada por Andrews e Mitchell (1990) denominada “*Tapered Plug Welding*”, desenvolvida pelo do TWI (“*The Welding Institute*”) com patrocínio da empresa Chevron UK Ltd. O objetivo era reparar trincas de fadiga em cordões de solda de estruturas *offshore* localizadas a mais de 100 m de profundidade. A técnica consistia em remover o metal defeituoso através da furação e utilizar a soldagem por atrito para preencher uma cavidade cônica com um pino consumível. A Figura 2.4 ilustra as etapas do “*Tapered Plug Welding*”.

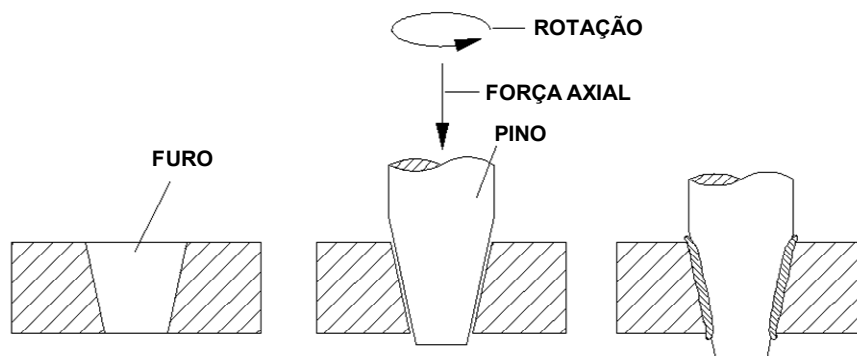


Figura 2.4: Ilustração das etapas do “*Tapered Plug Welding*”.

2.2.2 Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)

A partir da técnica descrita na seção anterior, foi criado o processamento de pinos por atrito, também conhecido como FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*). Patentado através do TWI por THOMAS e outros (1993), o processo também é compreendido pelas operações de furação e preenchimento, onde um pino consumível é rotacionado e inserido coaxialmente em uma cavidade circular ou cônica (BLACKEMORE, 1999).

Caracterizado como um processo de solda por atrito não convencional, o FHPP tem um restrito número de publicações (PIRES, 2007). Até 1999 apenas 7 referências foram publicadas, incluindo fontes não revisadas, folhetos informativos e teses. Isto demonstra que trata-se de um processo em nível embrionário de desenvolvimento e que não é bem conhecido. Além disto, sua aplicação industrial está limitada pelas políticas de licença do inventor (TWI), o que torna quase impossível o desenvolvimento de novos campos de aplicação e a otimização do processo em si (MEYER, 2004). A Figura 2.5 apresenta um esquema ilustrativo do processo.

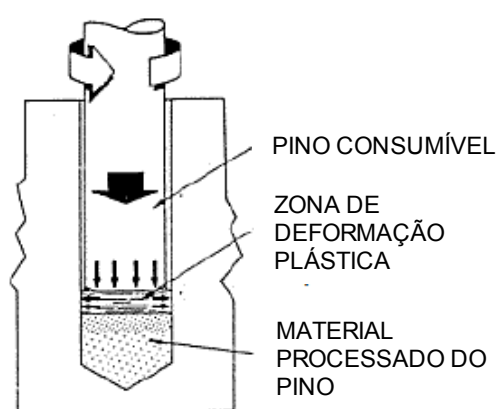


Figura 2.5: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito (NICHOLAS, 1999)

Diferentemente do “*Tapered Plug Welding*”, o FHPP utiliza furos não passantes, de modo que o trabalho termomecânico do consumível acontece ao longo de sua seção transversal, e não somente nas laterais (PIRES, 2007).

À medida que o pino toca o fundo da cavidade, o aquecimento gerado pelo atrito entre as superfícies resulta em um fluxo visco-plástico ao longo de planos de cisalhamento na base do consumível. Através da escolha apropriada da pressão axial e velocidade de rotação, os planos de cisalhamento são induzidos a mover-se axialmente, de forma que o material de adição entre em contato com a parede interna da cavidade. O atrito gerado por este contato também provoca aquecimento, resultando na ligação metalúrgica entre a parede e o pino (BLACKEMORE, 1999). A Figura 2.6 ilustra a fase de preenchimento da cavidade no processo FHPP.

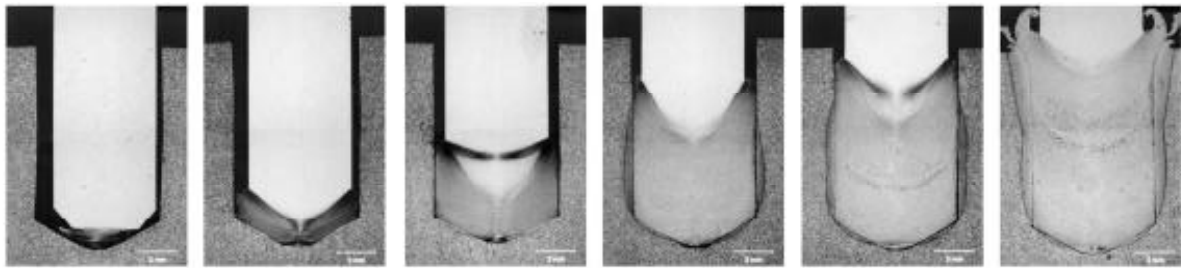


Figura 2.6: Fase de preenchimento do processo FHPP (PINHEIRO et al., 2001).

O pino consumível sofre um significativo trabalho a quente, resultando em uma microestrutura refinada e tratada termicamente (BLACKEMORE, 1999). As microestruturas resultantes em diferentes regiões podem ser observadas na Figura 2.7.

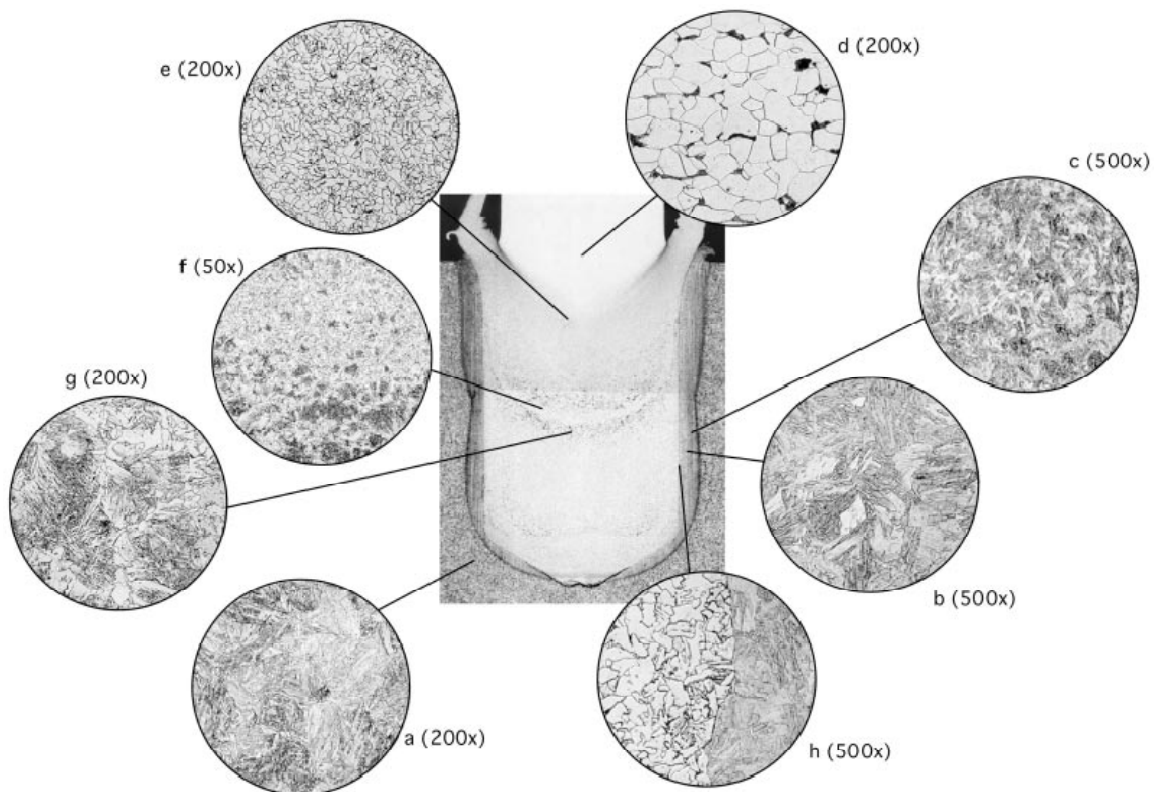


Figura 2.7: Microestruturas de um furo preenchido por atrito, com a inserção de um pino de aço carbono em um substrato de aço Cr-Mo (BLACKEMORE, 1999).

As microestruturas mostradas na Figura 2.7 acima podem ser entendidas da seguinte forma:

- a** – Material base original;
- b** – Zona afetada pelo calor (ZAC), adjacente à linha de união metalúrgica;

- c** – ZAC do material base;
- d** – Material original do pino;
- e** – Material forjado com granulometria fina na região de transformação;
- f e g** – Granulometria refinada, completamente transformada no processo de preenchimento.
- h** – Linha da união metalúrgica entre o consumível e o material base;

Geometrias

Além da geometria cilíndrica inicialmente estudada, estão sendo desenvolvidas cavidades e pinos com geometrias cônicas para aplicação em materiais de difícil processamento sob temperaturas de forjamento (THOMAS; NICHOLAS, 1996). Autores têm obtido uniões metalúrgicas de boa qualidade em ligas de alumínio (THOMAS; NICHOLAS, 1996) e em aços (ANDREWS; MITCHELL, 1990; MEYER, 2004; SALAMA; LOTSBERG, 2004; PIRES, 2007; FRANCO, 2009). A Figura 2.8 ilustra um processamento de pinos por atrito realizado com geometrias cônicas (PIRES, 2007).

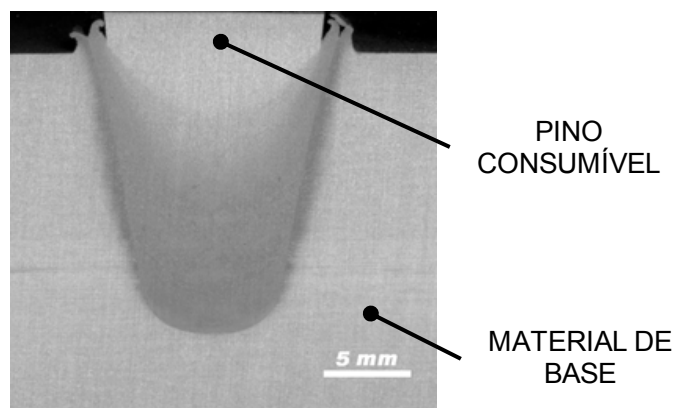


Figura 2.8: Processamento por atrito utilizando geometrias cônicas (PIRES, 2007).

Materiais

Aplicações em diferentes materiais também vêm sendo desenvolvidas. Andrews e Mitchell (1990) utilizaram o processo “*Tapered Stud Welding*” em chapas de C-Mn (BS 4360 50D) e pinos de C-Mn (BS 2772 150 M19). Eles compararam a resistência à fadiga entre preenchimentos realizados em ambientes secos e submersos. As amostras submersas mostraram menor resistência devido a presença de regiões de maior dureza na microestrutura da interface.

Posteriormente, iniciaram-se os estudos de diferentes materiais com o processo FHPP. Meyer et al. (2001) obteve preenchimentos de boa qualidade com o aço AISI 1015 (DIN 1.0037), demonstrando que é possível a obtenção de preenchimentos sem defeitos, utilizando altas rotações e baixas forças em um equipamento portátil.

O processo FHPP foi testado em estruturas semelhantes às utilizadas em FPSOs (SALAMA; LOTSBERG, 2004). Foi verificado que a vida à fadiga dos reparos realizados por atrito ficou próxima dos valores testados com o material de base.

Os aços C-Mn API 5L X65 e S235 foram processados por Meyer (2004), que estudou o mecanismo de união de preenchimentos e também a influência de parâmetros e geometrias na distribuição das forças e temperaturas no processo. Ele verificou que a união metalúrgica acontece sob pressões menores do que o esperado, e que a influência dos parâmetros na geração de calor e na qualidade da união é semelhante ao que já é conhecido na soldagem por atrito.

Ambroziac e Gul (2007) otimizaram os parâmetros do FHPP para o aço S355 a fim de maximizar o diâmetro do consumível. Para diâmetros de até 12 mm, foram obtidos preenchimentos de boa qualidade. Acima deste valor, defeitos de união foram identificados.

Pires (2007) otimizou os parâmetros e geometrias do FHPP em aços de baixo carbono ABNT 1010 e ASTM A36. Foram realizados ensaios com seis diferentes pares de geometrias entre pinos e substratos. Com a melhor geometria e com os parâmetros mais indicados foram obtidos dobramentos a 180° em amostras preenchidas (Figura 2.9).

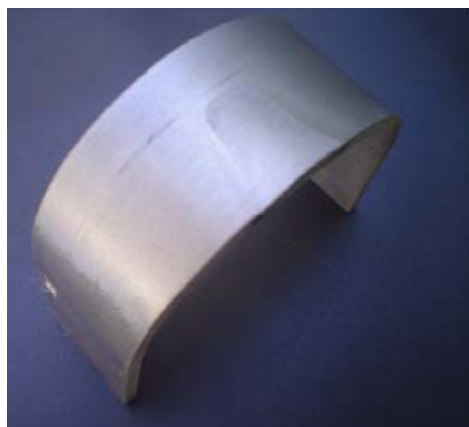


Figura 2.9: Dobramento a 180° em amostra de FHPP (PIRES, 2007).

Pinos de aço inoxidável AISI 316L foram utilizados por Franco (2009) para preencher furos em chapas de aço ASTM A36. Ele verificou que, nos pinos, não ocorreu transformação da matriz austenítica em outras fases. Já, no aço carbono, foi observada a formação de uma

microestrutura refinada de ferrita acicular e de Widmanstatten na ZAC. A Figura 2.10 ilustra um preenchimento de um pino de aço inoxidável AISI 316L em um substrato de ASTM A36.

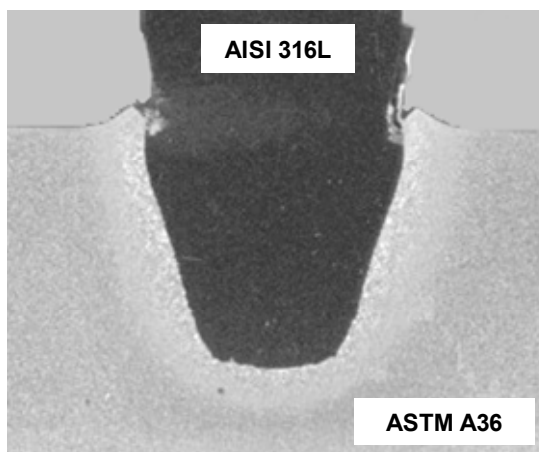


Figura 2.10: Pino de AISI 316L processado por atrito em substrato de ASTM A36 (FRANCO, 2009).

Unfried et al. (2009) estudou a influência da força axial e temperatura de preaquecimento na Zona Termo-Mecanicamente Afetada (ZTMA) em preenchimentos utilizando aços C-Mn. Os resultados mostraram que a dureza, a fração de martensita e a presença do constituinte "austenita retida - martensita" aumentam com o aumento da força axial. O valor de microdureza diminuiu com a aplicação do preaquecimento.

Substratos de aço fundido ASTM A148 GR 115-95 foram processados com pinos de ABTN 1010 para simular o reparo em componentes das FPSOs (FERREIRA, 2010). Foram encontradas trincas nas regiões próximas da interface pino-substrato, indicando que estes materiais necessitam ser processados com parâmetros específicos (diferentes dos aços de baixo carbono) ou até não suportam o processamento por atrito.

2.2.3 Friction Pull Plug Welding (FPPW)

A técnica conhecida como *Friction Pull Plug Welding* é uma variante do processamento de pinos por atrito (FHPP) que consiste em preencher um furo passante através da rotação e tração do pino, que é inserido pelo lado oposto de aplicação da força. A Figura 2.11 ilustra as etapas da técnica.

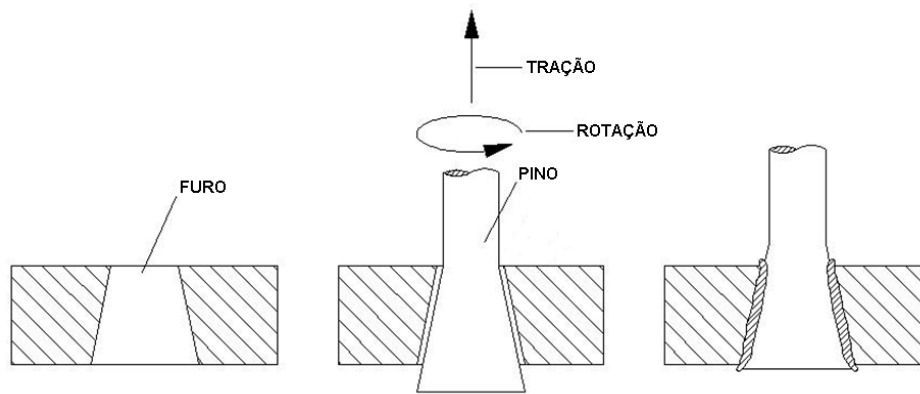


Figura 2.11: Etapas do processo FPPW.

O processo foi patenteado por Coletta e Cantrell (2001) e tinha o objetivo de reparar defeitos em estruturas aeronáuticas. Não foram encontradas bibliografias em domínio público referente a esta técnica, a não ser as patentes dos autores citados.

2.2.4 Costura por Atrito

A sobreposição de vários preenchimentos por atrito ao longo do comprimento de um defeito é conhecida como costura por atrito ou *Friction Stitch Welding*. Esta operação pode ser observada na Figura 2.12.

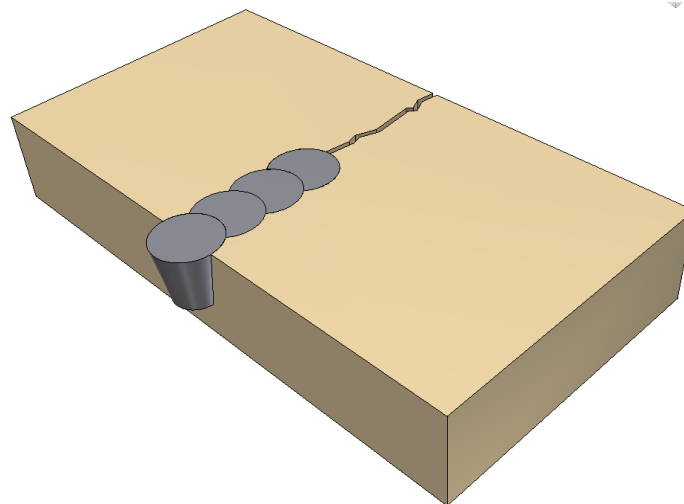


Figura 2.12: Princípio do processo de costura por atrito.

O processo foi apresentado inicialmente como sobreposições de preenchimentos do tipo *Tapered Plug Welding* (ANDREWS; MITCHELL, 1990). Posteriormente, foi testado com o FHPP (MEYER, 2001), e operado por um sistema robotizado visando a aplicação em estruturas submersas. Salama e Lotsberg (2004) preencheram trincas em estruturas

semelhantes às encontradas em FPSOs e avaliaram sua resistência à fadiga. Meyer (2004) estudou a microestrutura da costura por atrito nas áreas de sobreposição do processo. Amostras transversais de raiz com dobramento a 180° (Figura 2.13) foram obtidas por Pires (2007).



Figura 2.13: Amostra transversal de raiz com dobramento a 180° (PIRES, 2007).

2.2.5 Vantagens e Aplicações do Processamento de Pinos por Atrito

Apesar de ainda estar em desenvolvimento, o FHPP já se mostra promissor para união e reparo em placas espessas de materiais ferrosos e não ferrosos, inclusive podendo ser aplicado no reparo de componentes em usinas nucleares (DELANY et al., 2005).

Semelhantemente ao processo convencional de soldagem por atrito, o processamento por atrito pode ser automatizado e os equipamentos podem trabalhar à distância de até 4 km do local a ser reparado, facilitando as operações em áreas classificadas. O baixo aporte térmico e curto tempo de soldagem permitem que ele seja aplicado sobre linhas em operação sem risco de explosão, não exigindo a parada de produção de plantas *offshore* ou instalações petroquímicas (BLACKEMORE, 1999).

Em resumo, pode-se dizer que o processo de costura por atrito apresenta as seguintes vantagens em relação ao preenchimento por soldagem a arco elétrico (PINHEIRO et al., 2001):

- Não é requerida atenção especial com a preparação da superfície, uma vez que o processo é considerado auto-limpante e tende a expulsar impurezas;
- O processo em si não é prejudicial à saúde do operador já que não há fagulhas, radiação ou fumaça tóxica envolvidas;

- Fluxo e gás de proteção não são necessários;
- Defeitos associados à solidificação do material, como porosidade, segregação e trincas (principalmente em aços com alto teor de fósforo e enxofre), não ocorrem, já que o processo acontece no estado sólido;
- Menores custos de mão de obra e energia e ciclos rápidos de soldagem tornam o processo viável para a construção de componentes normalmente fabricados por outros processos de soldagem;
- O processo pode ser automatizado e é capaz de reproduzir soldas com alta qualidade e repetibilidade, podendo ainda ser operado a grandes distâncias da base, fazendo com que seja particularmente adequado para aplicações remotas em ambientes hostis;
- A baixa quantidade de energia cedida à peça, juntamente com os ciclos rápidos de soldagem (alta taxa de transferência do consumível), permite sua aplicação no reparo de oleodutos, linhas de gás e componentes de instalações *offshore* ou petroquímicas em operação, com segurança.

CAPÍTULO 3

PROJETO DO CILINDRO DE REPARO PORTÁTIL

3.1 Histórico do Equipamento

3.1.1 Equipamento Comercial

O primeiro equipamento portátil desenvolvido para executar reparo por atrito em campo foi o HMS3000 da empresa *Circle Technical Services Ltd* (Escócia). Apresentado em 1991 após ter passado por várias melhorias, já foi utilizado para realizar soldas por atrito no Mar do Norte e a oeste de *Shetland* a 395 m de profundidade (BLACKEMORE, 2000).

Constituído de três módulos principais (carretel de mangueiras, contêiner de solda por atrito e unidade hidráulica), ele permite operação a distância de até 4 km. O cilindro de reparo é acoplado ao contêiner de solda por atrito e é o responsável por aplicar a força e rotação necessárias para o processamento dos pinos. A Figura 3.1 ilustra o equipamento, com detalhe ao cilindro de reparo portátil.

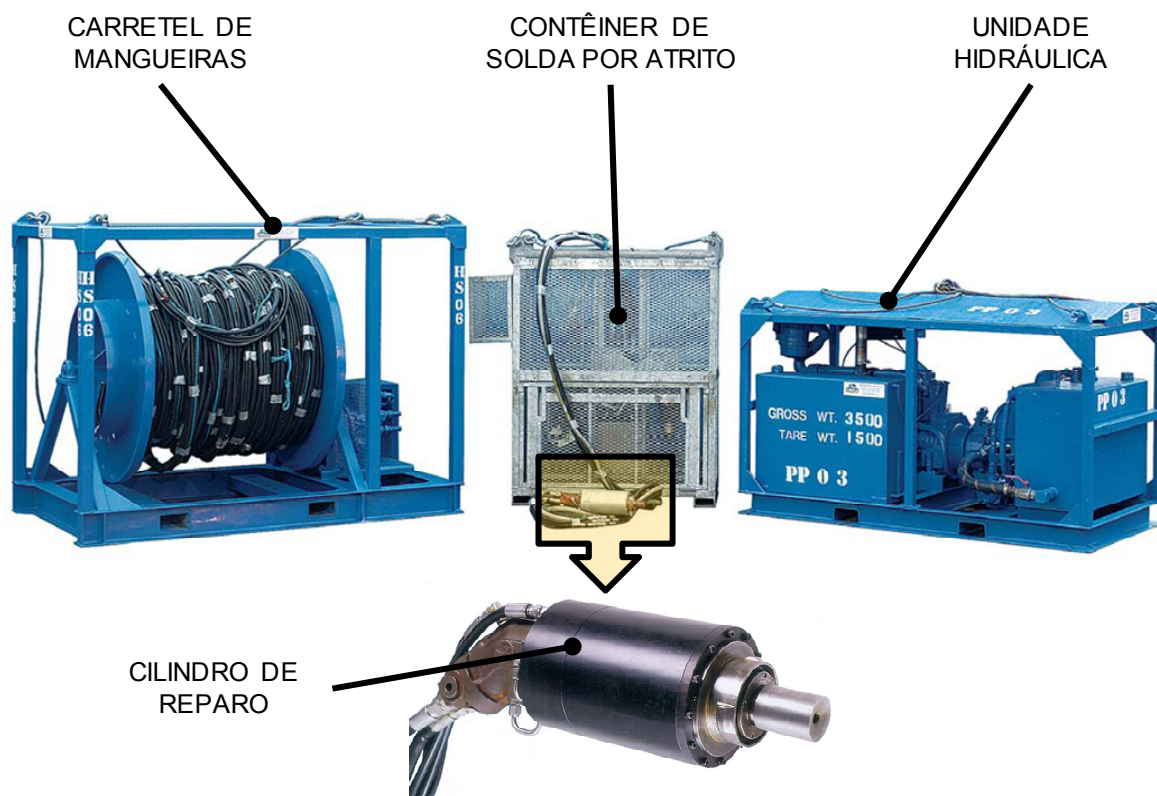


Figura 3.1: Equipamento de reparo portátil HMS 3000 (www.circletechnical.com).

O cilindro de reparo possui 600 mm de comprimento e 160 mm de diâmetro (MEYER, 2004) e é operado hidráulicamente com 50 kW de potência, podendo aplicar 40 kN de força axial e 8.000 rpm (MEYER, 2001). O processo é controlado por um computador que recebe as leituras de deslocamento e rotação de sensores embutidos no cilindro (MEYER, 2004).

Ele tem sido utilizado por centros de pesquisa como o TWI na Inglaterra e o GKSS (*Forschungszentrum*) na Alemanha, e é oferecido comercialmente pelo fabricante *Circle Technical Service Ltd.*

3.1.2 Convênio Petrobras – Universidade Federal de Uberlândia

Motivada pelos resultados obtidos nas pesquisas da técnica de reparo por atrito, a Petrobras celebrou um convênio com o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste – UFU para desenvolver a tecnologia a fim de aplicá-la no reparo de suas estruturas.

3.1.2.1 Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1

A partir deste convênio foi desenvolvida, projetada e construída a primeira Unidade de Processamento de Pinos por Atrito - UPPA1 (Figura 3.2) com capacidade de aplicar 50 kN de força axial e 8.000 rpm (SOUZA, 2006).

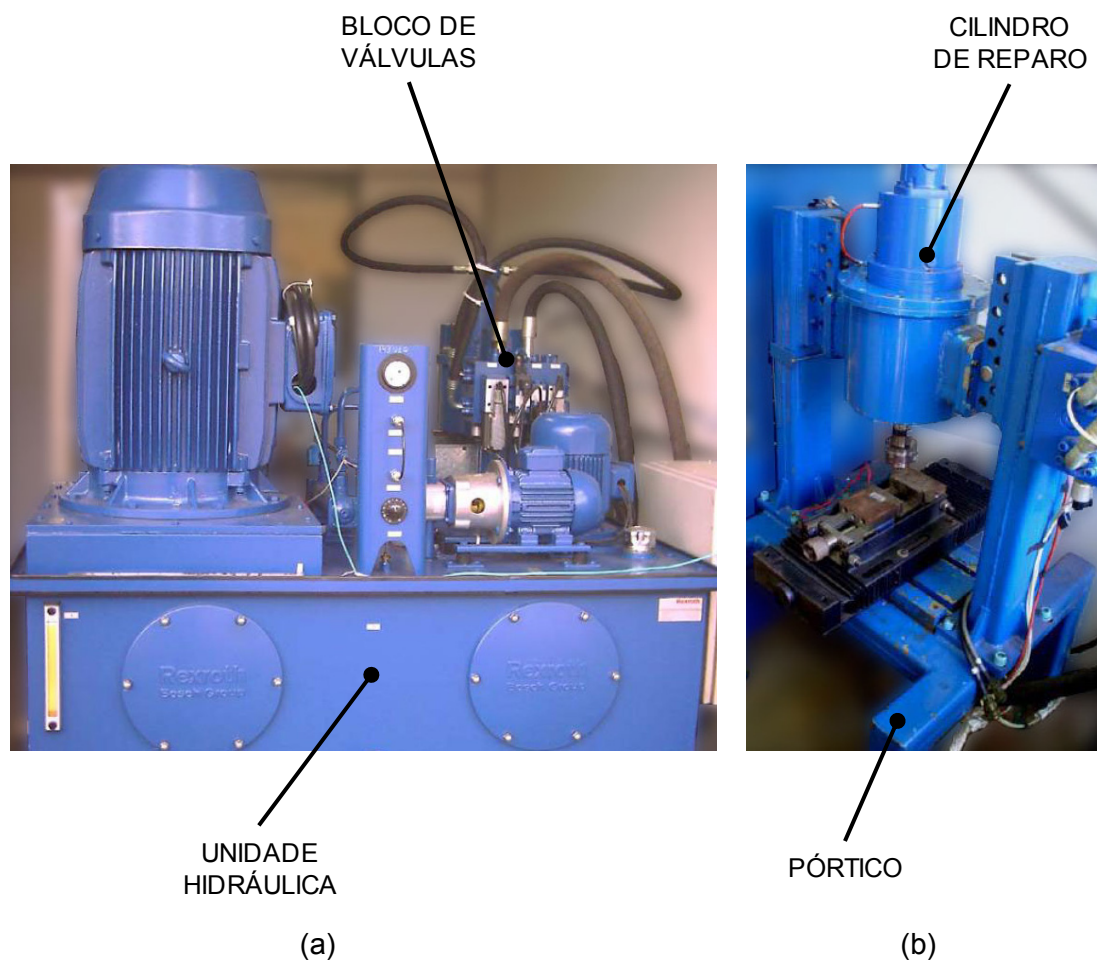


Figura 3.2: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1); a) Unidade hidráulica e bloco de válvulas, b) Cilindro de reparo acoplado ao pórtico.

O equipamento é constituído por quatro componentes principais, a saber: unidade hidráulica, bloco de válvulas, cilindro de reparo e sistema de controle:

Unidade Hidráulica	A unidade de 400 litros é composta basicamente de duas bombas hidráulicas. A primeira, acoplada a um motor elétrico de 100 cv, fornece 99 l/min a 350 bar para rotação do cilindro de reparo. A segunda, com um motor elétrico de 2 cv, conduz sua translação com 5 l/min a 120 bar.
Bloco de Válvulas	O bloco é responsável por regular o fluxo e a pressão do óleo que unidade hidráulica gera para o cilindro de reparo. Ele é constituído por válvulas proporcionais servo controladas e sensores que monitoram as pressões na entrada e saída do cilindro de reparo.
Cilindro de Reparo	É um cilindro hidráulico de haste vazada acoplado a um motor hidráulico. Os dois componentes geram a força axial e simultaneamente o torque para atender as operações de solda e reparo. Sensores acoplados transmitem os dados de deslocamento e rotação ao sistema de controle.
Sistema de Controle	O controle é realizado via " <i>hardware</i> " com cartões analógicos PID (Proporcional Integral Derivativo). A Figura 3.3 apresenta a concepção do sistema de controle. Os sinais adquiridos pelos sensores no cilindro de reparo e no bloco de válvulas são processados por um computador (plataforma de controle em Labview [®]) e os parâmetros da operação são corrigidos pelo sistema de malha fechada que atua nas válvulas proporcionais. A variável de controle é o comprimento de queima, que dita o início e o fim do processo. Os valores de rotação e força podem ser alterados em qualquer momento da operação e podem ser acompanhados juntamente com outras variáveis na tela do computador em tempo real (Figura 3.4).

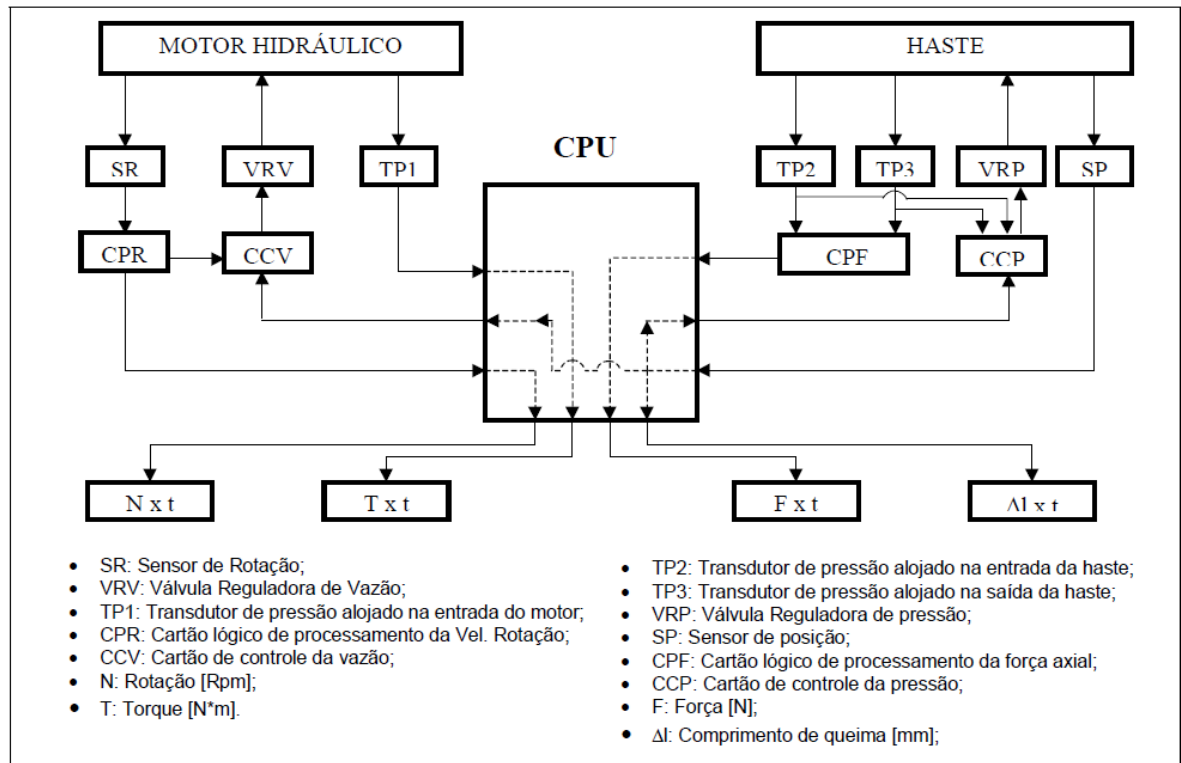


Figura 3.3: Fluxo de informações dos sinais analógicos de controle e monitoração das variáveis do processo (SOUZA, 2006).

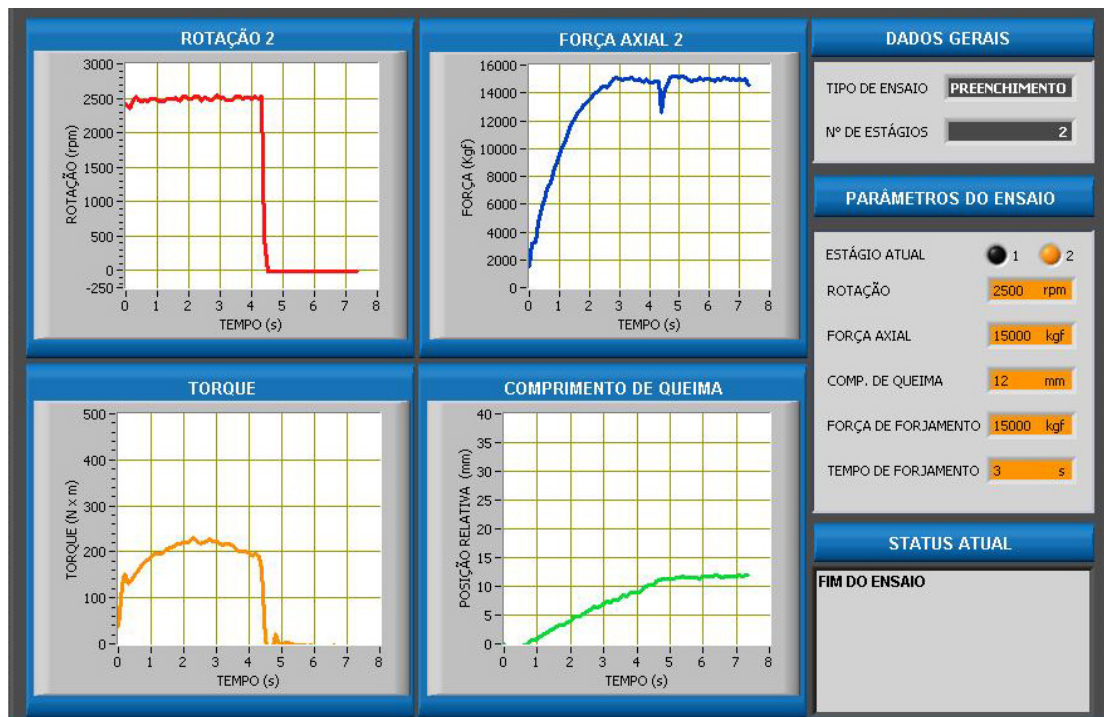


Figura 3.4: Interface gráfica do programa de controle do equipamento.

A UPPA1 foi utilizada por Pires (2007) para realização de estudos de processos com forças axiais de até 50 kN e torques de até 57 N.m. Parâmetros como geometria, rotação e força axial foram otimizados para a obtenção de uniões metalúrgicas de boa qualidade.

3.1.2.2 Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 2 e 3

Com o objetivo de explorar melhor o processamento de pinos por atrito foi desenvolvida uma segunda versão (UPPA2) com capacidade de força axial de 250 kN e rotação de 2500 rpm (Figura 3.5). Para simular situações de campo, onde a unidade hidráulica trabalha a uma determinada distância do local de reparo, foram instalados 60 m de mangueira hidráulica entre o bloco de válvulas e a unidade.

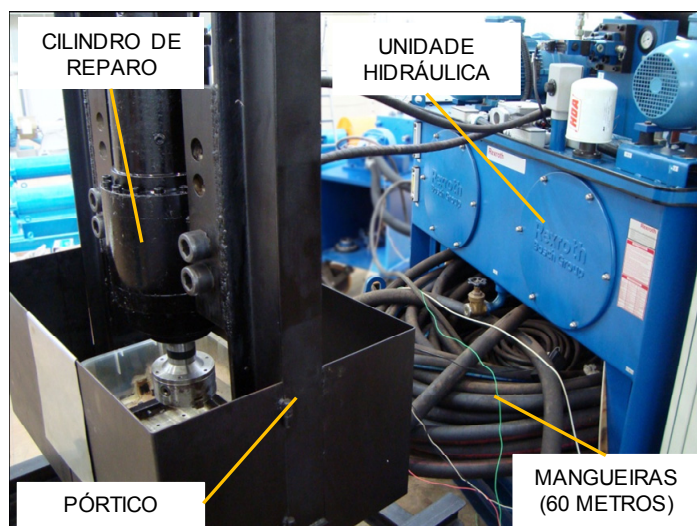


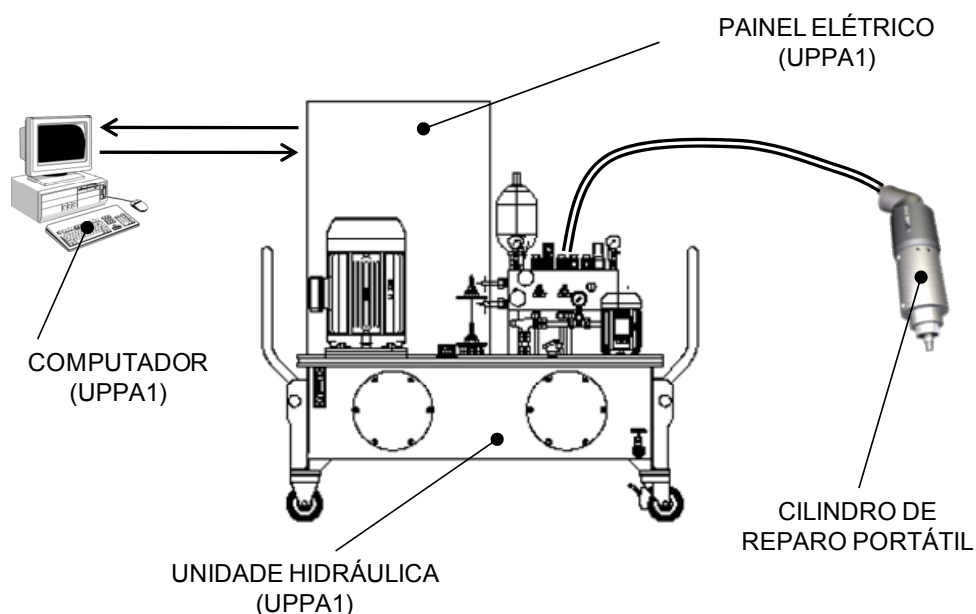
Figura 3.5: Unidade hidráulica e cilindro de reparo da UPPA2.

Posteriormente foi construída uma terceira unidade (UPPA3) com capacidade de 500 kN de força axial e 1400 rpm. Esta unidade foi desenvolvida especificamente para ensaios de laboratório, podendo realizar preenchimentos também em dutos.

3.1.2.3 Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 4

Tendo em vista a aplicação da técnica em campo, foi concebida uma quarta unidade (UPPA4). O foco principal do desenvolvimento foi a portabilização do cilindro de reparo, pois, este mesmo componente na UPPA1, tem 80 kg, o que dificulta sua manipulação em campo.

Foi planejado, portanto, desenvolver um cilindro de reparo portátil a ser conectado à unidade hidráulica da UPPA1 a fim de se utilizar todo sistema hidráulico e de controle já testados e em funcionamento. A Figura 3.6 ilustra a concepção da UPPA4.



A Figura 3.6: Concepção da quarta unidade de processamento de pinos por atrito (UPPA4).

3.2 Projeto do Cilindro de Reparo Portátil

Para ser considerado portátil, foi definido que o cilindro de reparo deveria ter sua massa limitada em aproximadamente 23 kg. Suas dimensões deveriam ficar próximas às dimensões do equipamento da empresa Circle Technical Services Ltd, as quais já se mostraram aceitáveis para aplicação em campo. O cilindro deveria atender às operações de soldagem e reparo por atrito através da compressão e tração de pinos (FHPP e FPPW) com força axial de até 40 kN, torque de 88 Nm e rotação de 5000 rpm. Deveria também suportar pressão em ambiente submerso em água do mar de 3 bar (30 m de profundidade). Finalmente, por ser um equipamento a ser manipulado por pessoas, definiu-se um coeficiente de segurança 3 para as tensões máximas permitidas (Von Mises). A Tabela 3.1 resume as premissas do projeto.

Tabela 3.1: Premissas de projeto do cilindro de reparo portátil.

Massa	➤ 23 kg
Dimensões aproximadas	➤ Comprimento: 600 mm ➤ Diâmetro: 160 mm
Operações atendidas	➤ Soldagem por atrito/furação ➤ FHPP ➤ FPPW
Parâmetros de funcionamento	➤ Força axial: 40 kN ➤ Torque: 88 N.m ➤ Rotação: 5.000 rpm ➤ Curso do cilindro: 60 mm
Ambiente de operação	➤ Submersão em água do mar ➤ Profundidade: 30 m ➤ Pressão: 3 bar
Coefficiente de segurança	➤ 3

O que diferencia esta versão das anteriores é basicamente a redução da massa para portabilização e a flexibilidade de execução de reparos através da tração de pinos. Como o processo de reparo é precedido da etapa de furação, espera-se também utilizar este cilindro para esta operação.

O projeto previu a utilização de ligas de aço e alumínio, com tratamento térmico e/ou termomecânico, para a obtenção de maiores níveis de resistência mecânica específica visando uma redução de massa. Para atender os parâmetros do processamento de pinos por atrito foi concebido um cilindro hidráulico de 40 kN e haste vazada, sendo seu interior constituído de um sistema rotativo (eixo e rolamentos), conforme mostrado na Figura 3.7. Na extremidade da haste foi acoplado um motor hidráulico, que transmite ao eixo 88 N.m de torque e 5.000 rpm. Deste modo, foi possível a obtenção simultânea de força axial e rotação.

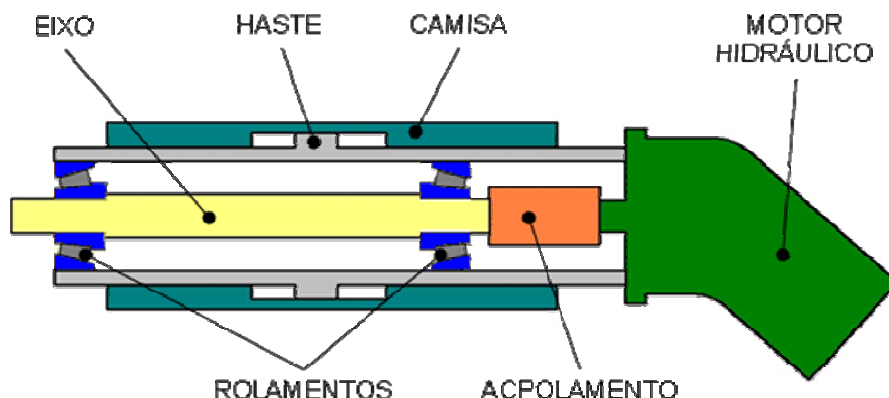


Figura 3.7: Concepção do cilindro de reparo portátil.

A patente da concepção do cilindro de reparo foi requerida em 2007 e publicada em 2009 sob o título “Equipamento Para Reparo de Estruturas Metálicas e Métodos de Funcionamento”, processo PI 0704190-0, no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

O projeto foi revisado pela empresa Engemovi, contratada pela Petrobras, que, além de apoiar a equipe do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia tecnicamente, também desenvolveu algumas partes do conjunto.

O acoplamento foi projetado para admitir desalinhamentos do eixo e deslocamentos radiais, com conceito puramente elástico. Para manter o alinhamento do eixo e suportar as cargas do processo foram selecionados rolamentos de rolo cônico, devido à alta capacidade de suportar cargas axiais.

O eixo foi projetado em aço inoxidável com tratamento térmico, sendo uma de suas extremidades ranhurada para receber o acoplamento e a outra extremidade rosqueada para encaixe dos diferentes mandris desenvolvidos para os processos.

O sistema de translação é composto por partes comuns de um cilindro hidráulico, isto é, haste, e cabeçote inferior e superior - que formam a camisa e vedações. Para dimensionar os componentes foi utilizada a teoria de resistência para tubos de parede espessa e também o método de elementos finitos.

O acoplamento, eixo e rolamentos são alojados dentro da haste vazada do cilindro e em sua extremidade é fixado o motor hidráulico, através de uma peça intermediária chamada de “apoio do motor”. Na extremidade oposta, uma tampa rosqueada ajusta a pressão de montagem dos rolamentos, evita a entrada de água e saída de graxa da haste com um retentor polimérico.

O método de fixação previsto para o cilindro foi através de parafusos de corpo retificado, solicitados por tensões de cisalhamento. Para fixação destes parafusos foram realizadas as respectivas furações nos cabeçotes. Por medida de segurança e facilidade de fixação, o sistema foi projetado de modo que apenas o cabeçote inferior suporte os esforços da operação. Apesar disto, os furos no cabeçote superior também podem ser utilizados como complemento da fixação ou simplesmente para alinhamento. A Figura 3.8 ilustra a montagem do cabeçote inferior com os parafusos de corpo retificado.

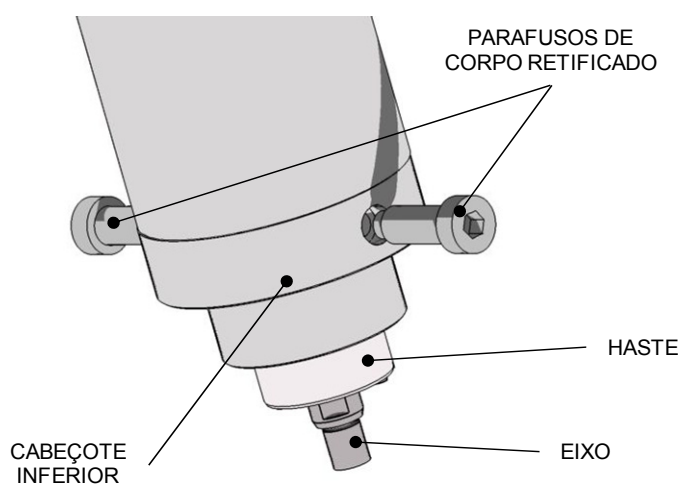


Figura 3.8: Montagem do cabeçote inferior com parafusos de corpo retificado.

Este tipo de fixação atende aplicações por compressão e tração, além de possibilitar o posicionamento em diferentes ângulos em relação a superfícies planas. A saída de óleo do cabeçote inferior foi transferida para o cabeçote superior para facilitar seu encaixe nas futuras estruturas de fixação.

Como a fixação do cilindro é realizada apenas pelos cabeçotes, a haste pode apresentar alguma rotação gerada pelo torque do consumível, que é transmitido através do eixo e do motor hidráulico. Este movimento foi bloqueado pelo “apoio do motor”, que é fixado na haste com um pino inserido radialmente. Duas chavetas posicionadas em seu diâmetro externo deslizam em rasgos existentes numa peça aparafusada ao cabeçote superior. A Figura 3.9 ilustra o sistema de travamento adotado.

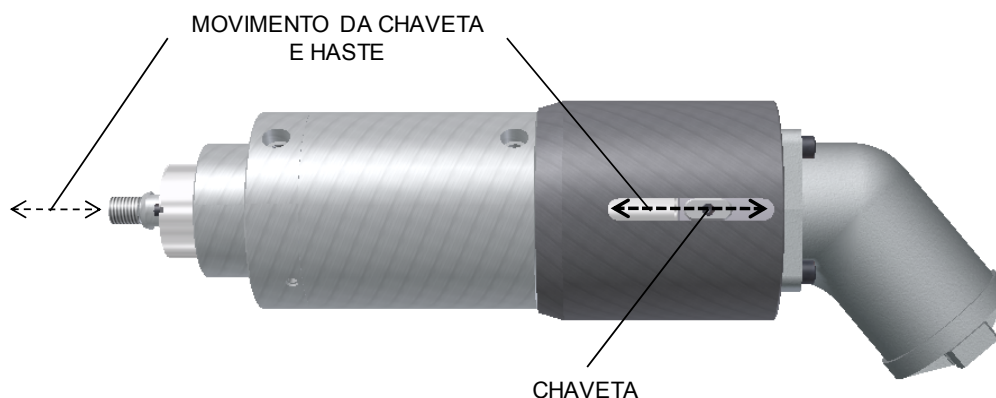


Figura 3.9: Sistema de restrição da rotação da haste.

3.3 Sistemas de Fixação

3.3.1 Sistema de Fixação em Dutos

Com o objetivo de aplicar a técnica de reparo por atrito em linhas de condução de óleo, gás e derivados, foi desenvolvida uma base de alumínio para fixar o cilindro de reparo.

Foi projetada uma placa onde são acoplados o cabeçote inferior e os parafusos. Ela possui um furo que alinha o cilindro de reparo portátil em relação à superfície do duto, de modo que sua posição esteja sempre perpendicular a esta. Os parafusos de corpo retificado são inseridos no corpo da placa, a fim de reagir aos esforços de processamento. Para o apoio nos dutos foram desenvolvidas bases que são fixadas na placa através de parafusos. A Figura 3.10 ilustra a montagem do conjunto.

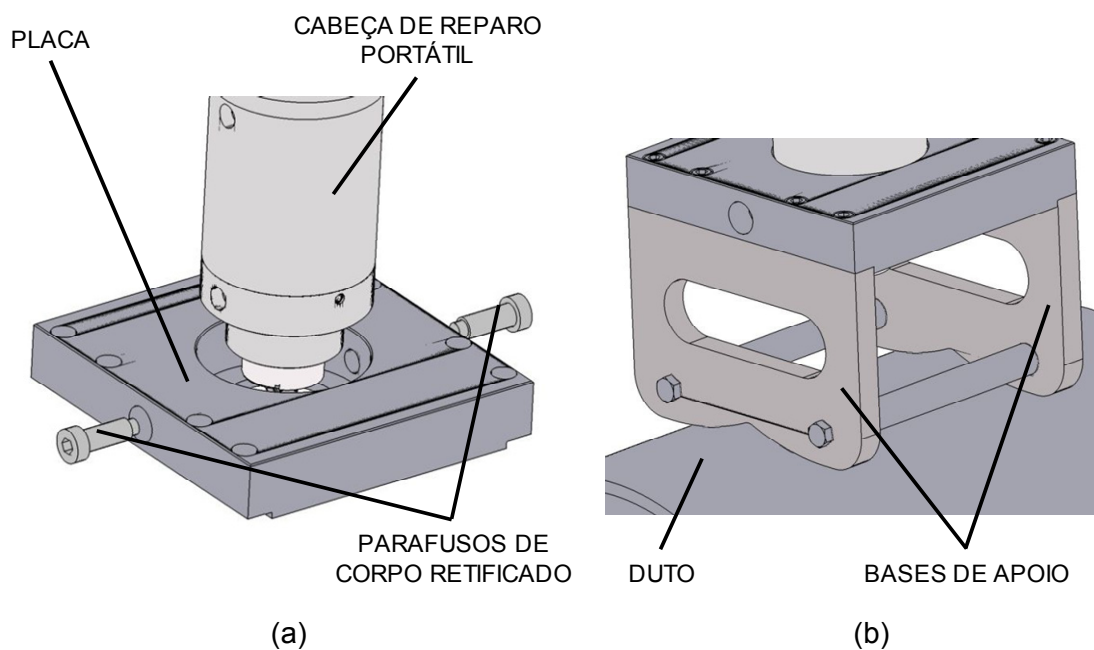


Figura 3.10: (a) montagem do cilindro de reparo portátil na base de fixação para dutos; (b) montagem das bases de apoio.

O perfil das bases foi projetado de modo a permitir o apoio em dutos de vários diâmetros, conforme ilustrado na Figura 3.11.

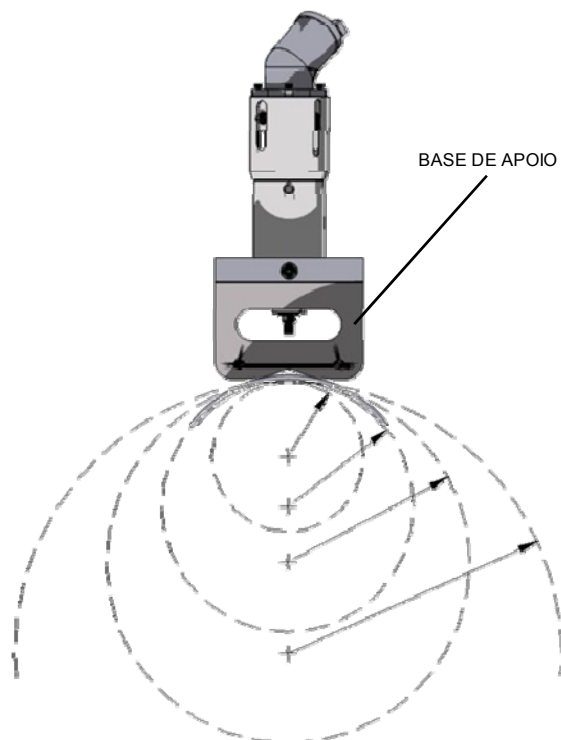


Figura 3.11: Base de apoio sobre vários diâmetros de dutos.

A fixação de todo o conjunto sobre o duto é realizada com a utilização de duas cintas de poliéster que envolvem a base e o duto, e são tensionadas através de catracas (Figura 3.12). Cada cinta foi especificada para suportar 40 kN. A razão de adquiri-las com o dobro da capacidade requerida para o ensaio foi o aumento da rigidez de fixação.



Figura 3.12: Cintas com catraca para auxiliar na fixação do cilindro de reparo em dutos.

3.3.2 Sistema de Fixação em Chapas Planas

O desenvolvimento do sistema de fixação do cilindro de reparo foi realizado mediante parceria com a empresa Engemovi.

Devido às altas forças envolvidas no processo de reparo de trincas por atrito, a fixação em superfícies planas foi concebida para funcionar em duas etapas:

a) Primeiramente é realizada a fixação do cilindro de reparo através de ventosas ligadas a um sistema de vácuo e, com esta fixação, são soldados, por atrito, parafusos na superfície a ser reparada utilizando baixas forças. Para isto, o sistema de ventosas foi dimensionado para suportar forças axiais de até 5 kN;

b) Posteriormente, o cilindro de reparo é posicionado sobre os parafusos anteriormente soldados, que são dimensionados para suportar os esforços do preenchimento (força axial de 40 kN e torque de 88 N.m).

Para atender as etapas, foi concebida uma estrutura constituída por braços e fusos mecânicos, adaptável para fixar o cilindro de reparo e oferecer duas possibilidades de fixação na superfície: sobre ventosas e sobre pinos roscados soldados por atrito.

A Tabela 3.2 lista as premissas definidas para o projeto.

Tabela 3.2: Premissas de projeto da fixação em chapas planas.

Capacidade de carga do sistema fixado por ventosas	➤ 5 kN
Capacidade de carga do sistema fixado por parafusos	➤ 40 kN
Distância mínima de uma parede	➤ 325 mm
Raio de curvatura mínimo	➤ 2 m
Erro máximo de planicidade	➤ 5 mm / Ø500 mm
Máxima rugosidade	➤ 200 µm
Vazão máxima de vazamento das ventosas	➤ 3,5 m³/h
Alimentação da unidade geradora de vácuo	➤ Elétrica ➤ Ar comprimido
Distância entre a unidade geradora de vácuo e base	➤ 10 m

O objetivo da estrutura é servir como base para fixação do cilindro de reparo e também portar as ventosas, através das quais, juntamente com o sistema de geração de vácuo, fixam todo o sistema na superfície a ser trabalhada. A Figura 3.13 mostra o modelo em CAD da estrutura com ventosas para fixação do cilindro de reparo portátil.

Foi selecionada uma liga de alumínio para a maioria dos componentes, com o objetivo de minimizar sua massa e facilitar o transporte e o manuseio.

Para fixação, ventosas com borracha de silicone e com lábios duplos foram especificadas com o objetivo de melhorar a vedação com a superfície e minimizar vazamentos.

Fusos de ajuste foram projetados para permitir a regulação da orientação do cilindro de reparo em relação à superfície de trabalho. Uma liga de bronze foi selecionada para reduzir o atrito e facilitar os ajustes durante a operação. Através dos fusos, juntamente com a alteração da distância entre as ventosas, é possível o ajuste da altura de trabalho com relação à superfície.

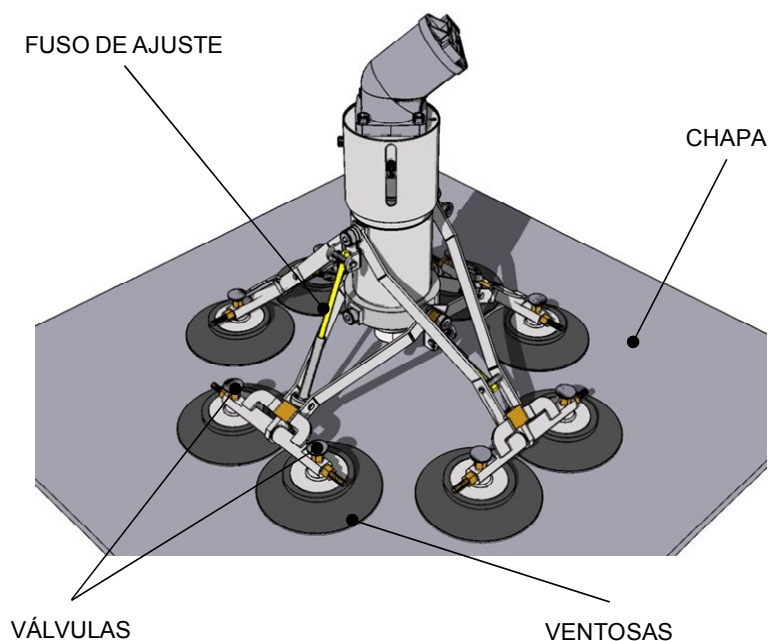


Figura 3.13: Estrutura com ventosas para fixação do cilindro de reparo portátil.

Uma unidade, a ser montada sobre um quadro com rodas, foi desenvolvida para geração do vácuo de sustentação das ventosas.

Esta unidade foi projetada para suportar a sucção de líquidos e gases. O sistema tem um pulmão com função capacitiva e de separação de líquido e vapor. Para líquido e vapor foram especificadas duas bombas específicas. Como redundância, foi selecionado um gerador de vácuo por ar comprimido com o objetivo de manter a base fixada em caso de interrupção da alimentação elétrica.

A Figura 3.14 ilustra a concepção do sistema.

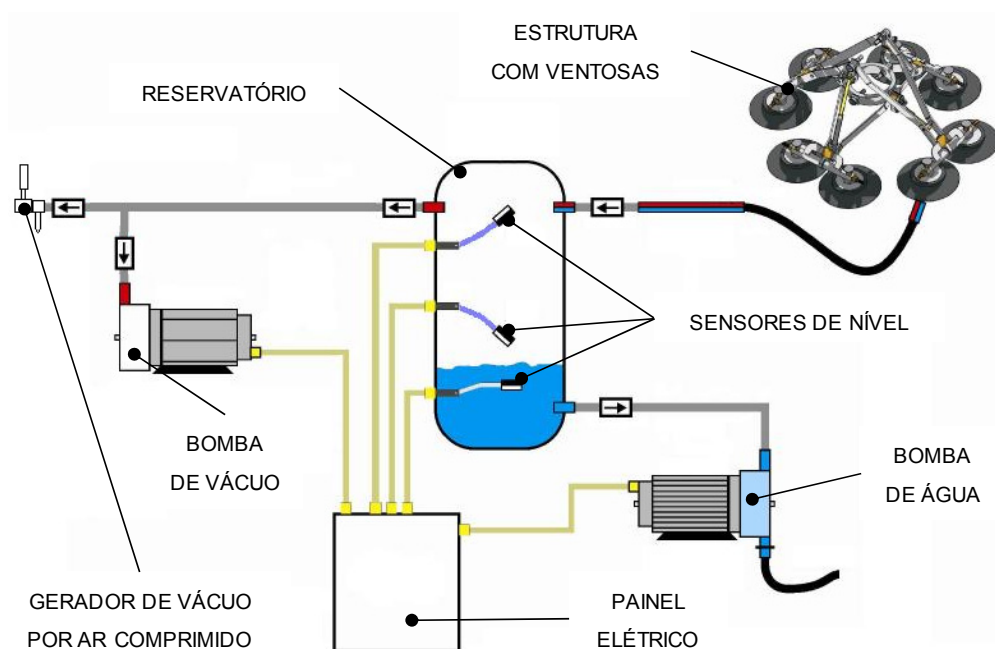


Figura 3.14: Concepção da unidade geradora de vácuo.

O projeto elétrico visou a alimentação e o comando das bombas. Também foi previsto um sistema paralelo de geração de vácuo através de ar comprimido. A lógica de comando das bombas foi baseada em um controle de nível para desligar a bomba de líquido, caso o nível atinja o ponto mínimo e para desligar a bomba de vapor caso o nível atinja o ponto máximo. Foi selecionada uma válvula solenóide para fazer a ligação do ar comprimido, na posição normalmente aberta, para, no caso de falta de alimentação elétrica, o sistema entrar imediatamente. Este dispositivo foi concebido para entrar em auxílio às bombas caso a pressão se eleve muito, o que comprometeria a capacidade de força das ventosas.

3.4 Acessórios

Para atendimento das diferentes operações de processamento por atrito, foram desenvolvidos mandris específicos a fim de fixar os consumíveis. Foi selecionado um aço ligado com tratamento térmico para obtenção de maior resistência mecânica e durabilidade das partes.

3.4.1 Mandril e Parafuso para Soldagem por Atrito

Como foi descrito anteriormente, a primeira fase da fixação do cilindro em superfícies planas será realizada através de ventosas, que auxiliarão na soldagem por atrito de pinos roscados. Estes, por sua vez, serão utilizados para suportar os esforços máximos do processamento.

Assim, foi projetado um pino roscado com uma ponta lisa e angular. Esta ponta sem rosca é a porção a ser consumida durante a soldagem por atrito, conforme pode ser observado na ilustração da Figura 3.15.

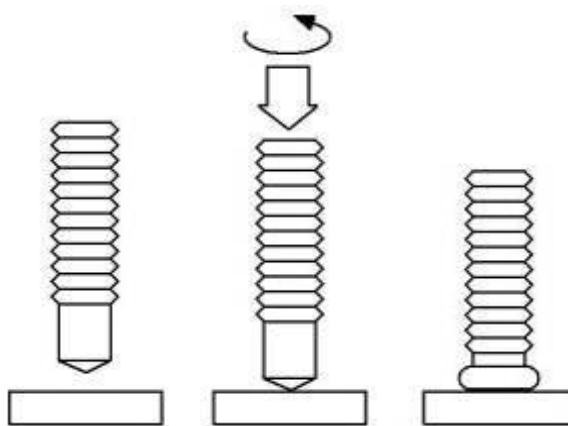


Figura 3.15: Ilustração do processo de solda por atrito de pinos roscados em superfícies planas.

Um mandril roscado foi concebido para fixar o pino durante o processo. Um colar foi inserido no pino para facilitar sua fixação no mandril e evitar que o material processado desloque em direção aos fios de rosca. A Figura 3.16 ilustra a sequência de acoplamento e soldagem concebido para o mandril e o pino roscado. Após a soldagem, o mandril deve ser girado em sentido oposto de modo a desenroscar-se do pino.

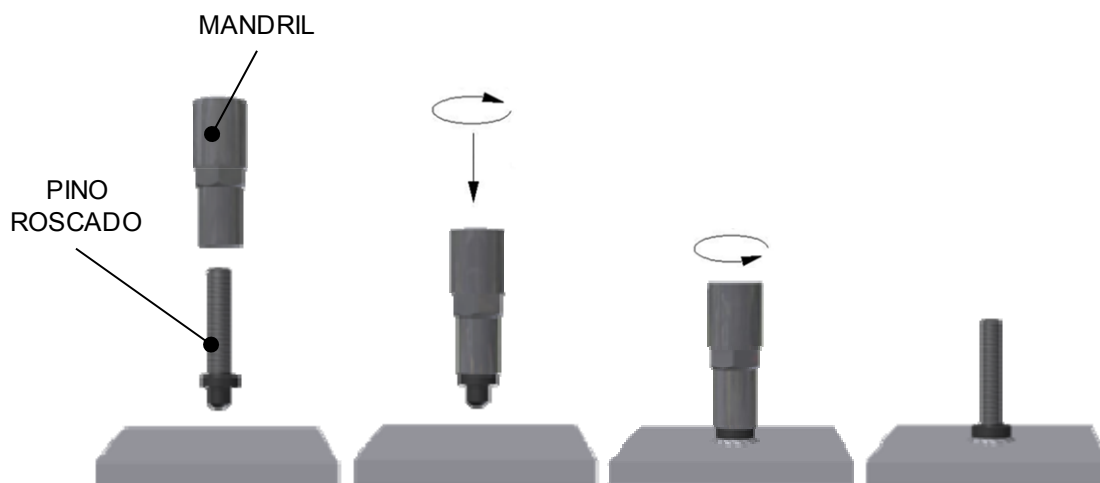


Figura 3.16: Ilustração da sequência de acoplamento e soldagem por atrito de pinos roscados em superfícies planas.

3.4.2 Mandril e Pino para FHPP

Para testes laboratoriais na UPPA1, é utilizada uma placa de três castanhas para sujeição de pinos a serem processados por atrito, cujo aperto não garante a transmissão do torque. Assim, um ponto de solda é colocado na lateral do pino para que uma das castanhas o arraste, e, com isto, o torque seja transmitido. A placa de três castanhas é um componente grande e pesado porque é adaptável a uma gama muito grande de diâmetros. Para este projeto, massa e dimensões elevadas causam inconvenientes no intuito de promover a compactação para aplicação em campo. Por este motivo, foi desenvolvido um sistema de fixação mais compacto. Antecipando a possibilidade de automação do processo, projetou-se um mandril magnético que é rosqueado na extremidade do eixo do cilindro e fixa o pino consumível através de um ímã. Um pino é responsável por suportar o torque gerado no processo (Figura 3.17).

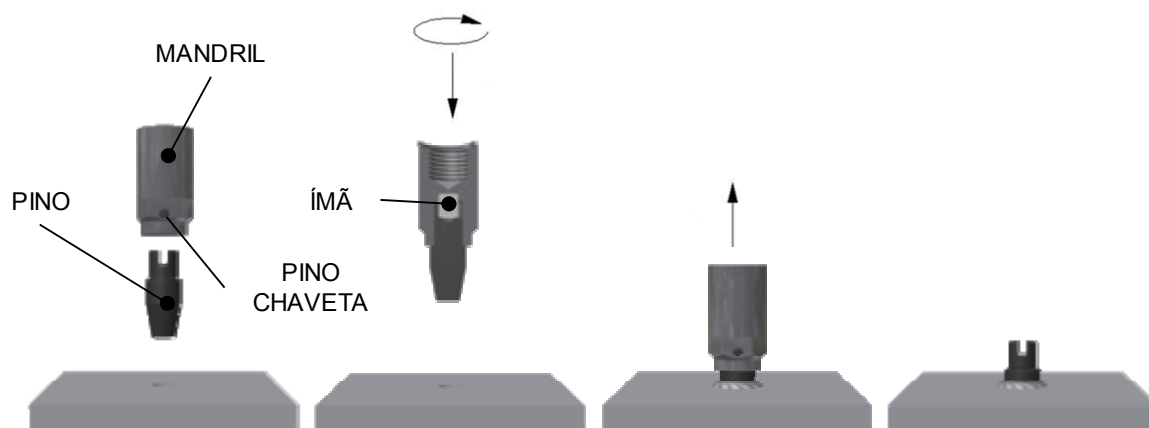


Figura 3.17: Conjunto de fixação de pinos consumíveis para FHP.

Com estas geometrias, o pino consumível pode ser facilmente posicionado no mandril e diretamente processado. Após o preenchimento, como o pino se encontra soldado à superfície, basta que o cilindro de reparo retorne à sua posição original para que haja o desacoplamento.

3.4.3 Mandril e Pino para FPPW

Para operações de preenchimento através da tração de pinos (FPPW), foi desenvolvido um mandril com rosca em sua extremidade. Os esforços de tração são suportados pela rosca e o torque é transmitido através de um pino (Figura 3.18).

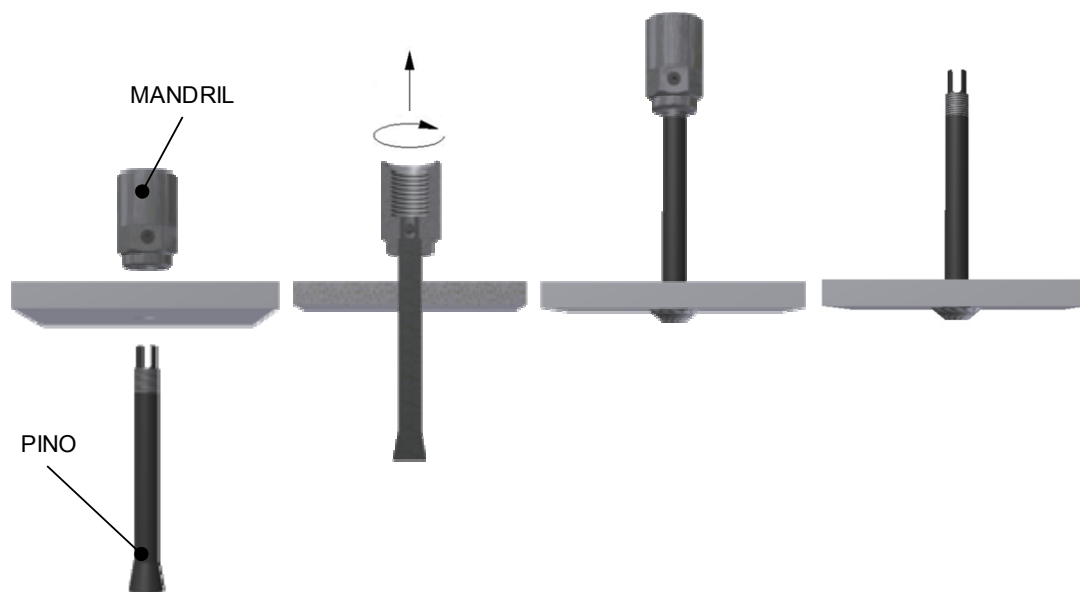


Figura 3.18: Conjunto de fixação de pinos consumíveis para preenchimento por tração (FPPW).

O pino consumível é inserido no mandril através do rosqueamento e, posteriormente, é posicionado o pino de travamento, que também é fixado no mandril através de uma rosca. Após o processamento, o travamento é retirado e o mandril desenroscado do consumível.

3.5 Instrumentação

3.5.1 Sensor de Rotação

A medição de rotação no cilindro de reparo da UPPA1 é realizada através de um sensor indutivo e uma roda dentada, através dos quais um sinal pulsado é gerado e posteriormente condicionado e processado pelo sistema de controle.

Para o cilindro de reparo portátil foi selecionado um sensor também indutivo, porém com menores dimensões. O sinal pulsado é gerado através de furos radiais posicionados ao longo do diâmetro externo do acoplamento.

O sensor indutivo é posicionado radialmente na peça de fixação do motor hidráulico através de um sistema de montagem com parafuso e o-ring de vedação. Um parafuso com um furo central (porta sensor) é inserido em um furo cônico. Um o-ring posicionado entre as partes, quando pressionado através do rosqueamento do porta sensor, deforma radialmente em direção ao centro do furo, forçado pela geometria cônica convergente. Posicionando o sensor no eixo central das peças, ele resiste à deformação da vedação e é fixado pela

pressão de contato. Ao mesmo tempo, esta pressão serve para vedar o sistema contra a entrada de água na haste do cilindro. A Figura 3.19 ilustra o sistema de fixação do sensor descrito anteriormente.

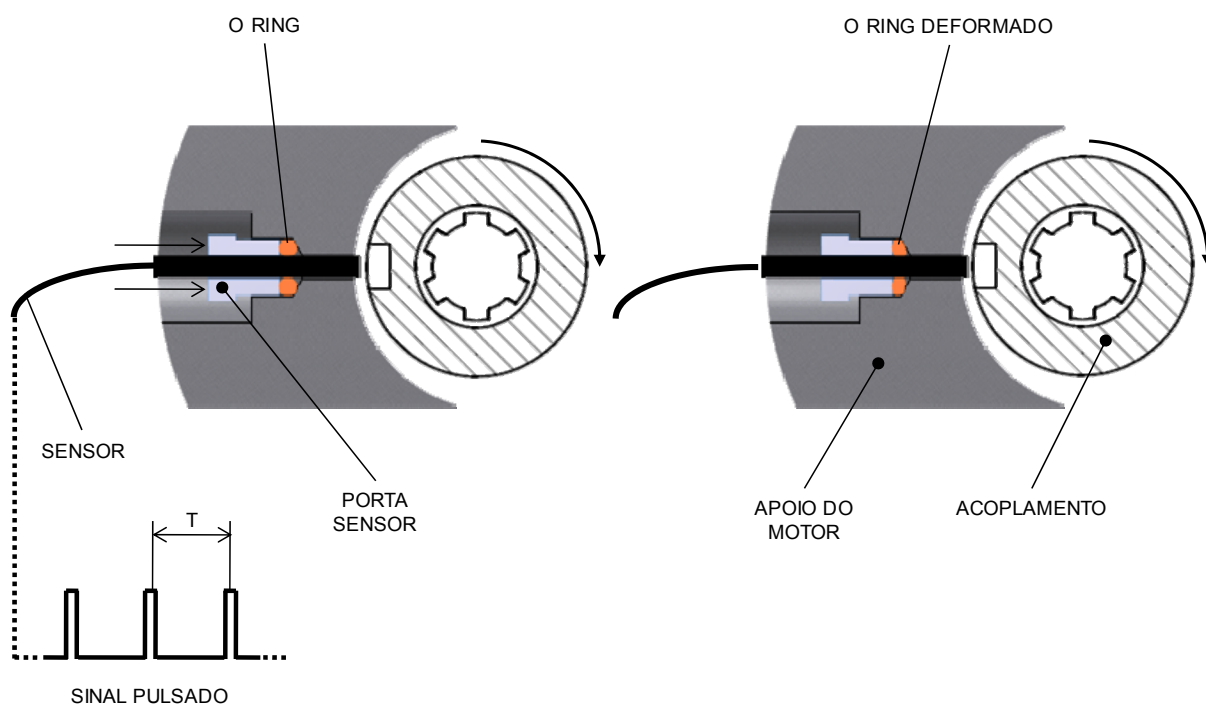


Figura 3.19: Sistema de fixação do sensor de rotação.

Foi prevista a utilização de vedante à base de silicone para realizar o isolamento da conexão elétrica do sensor para a submersão. Esta é uma solução simples e que atende a pressão de 3 bar.

3.5.2 Sensor de Deslocamento

Um sensor de deslocamento potenciométrico semelhante ao utilizado no cilindro de reparo da UPPA1 foi selecionado devido à sua alta precisão e também linearidade do sinal. Comparado a um LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) para um curso de 60 mm, suas dimensões são significativamente menores. Seu princípio de funcionamento é a variação da resistência interna de acordo com deslocamento linear de um cabo, enrolado em um tambor. Esta variação é lida por um sensor e processada por um condicionador de sinais. A Figura 3.20 ilustra o sensor e sua concepção.

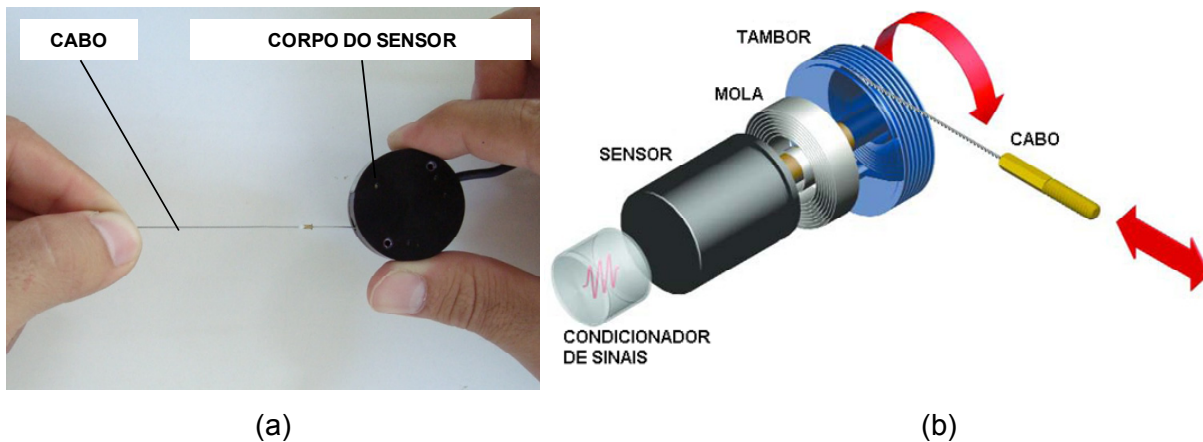


Figura 3.20: (a) sensor de deslocamento potenciométrico; (b) concepção do sensor.

Como não foram encontrados sensores com grau de proteção para imersão em água (IP68) foi projetado um dispositivo com vedações de borracha nitrílica para permitir tal operação. Desta forma, o sensor pode operar normalmente em até 3 bar.

O porta sensor funciona de maneira semelhante a um cilindro hidráulico, onde a haste desloca-se internamente à camisa, guiada por o-rings de vedação. As outras partes são soldadas de modo a não permitir passagem de água. Uma tampa com vedação protege o corpo do sensor, que é montado em um encaixe com sua geometria.

O porta sensor é fixado no apoio do motor e na camisa do cilindro, através dos quais o movimento relativo é medido. A Figura 3.21 ilustra a montagem.

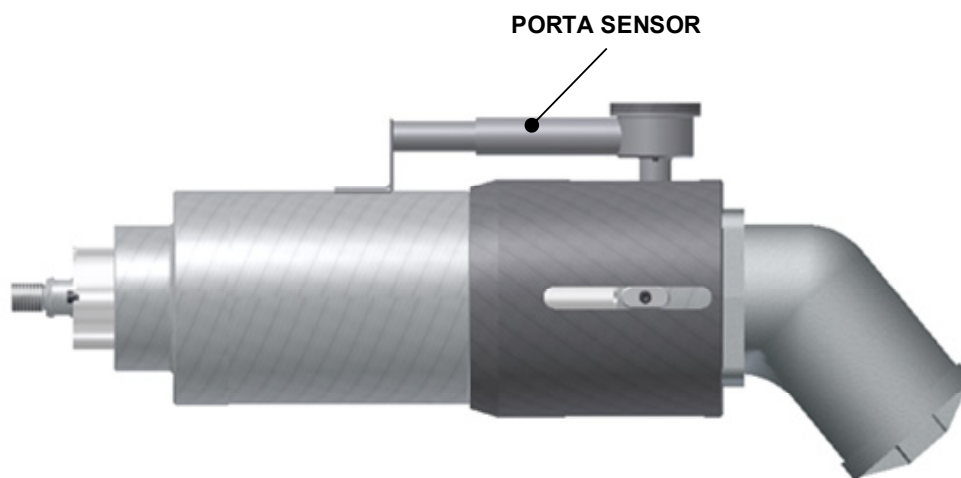


Figura 3.21: Montagem do porta sensor no cilindro.

CAPÍTULO 4

MONTAGEM DOS COMPONENTES

4.1 Montagem do Cilindro de Reparo Portátil

Os sistemas de rotação e translação foram montados pelo próprio fabricante do cilindro, de acordo com os desenhos técnicos fornecidos pela Universidade Federal de Uberlândia. Após a montagem foram realizados testes específicos de funcionamento, onde foi verificada a movimentação do sistema de translação de acordo com o fluxo de óleo especificado.

Foi experimentalmente encontrada também a faixa de pressão de funcionamento, cujos valores foram estabelecidos entre 8 bar e 200 bar. A estanqueidade das vedações foi testada com 260 bar de pressão (30% acima da pressão de funcionamento) e o sistema de rotação foi acionado através do motor hidráulico para verificação do alinhamento do eixo e rolamentos. Estes testes foram realizados na bancada do fornecedor do cilindro.

A massa e as dimensões finais do cilindro de reparo ficaram significativamente abaixo das premissas de projeto. O comprimento de 530 mm, incluindo o motor hidráulico, ficou 70 mm abaixo do especificado, e o diâmetro de 130 mm também ficou com 30 mm a menos. O valor da massa, que era o parâmetro mais preocupante, por se tratar de um projeto de um equipamento portátil, foi de 15 kg - equivalente a 35% a menos que o especificado. A superação das metas foi alcançada através da utilização de materiais especiais, com alta resistência mecânica e baixo peso. Além disto, a otimização do projeto realizada através do método de elementos finitos, utilizando um “*software*” comercial, permitiu a redução de massa em regiões de menor solicitação das peças. A utilização de rolamentos de rolos cônicos foi o item primordial para redução do diâmetro do cilindro.

O cilindro montado pode ser observado na Figura 4.1.

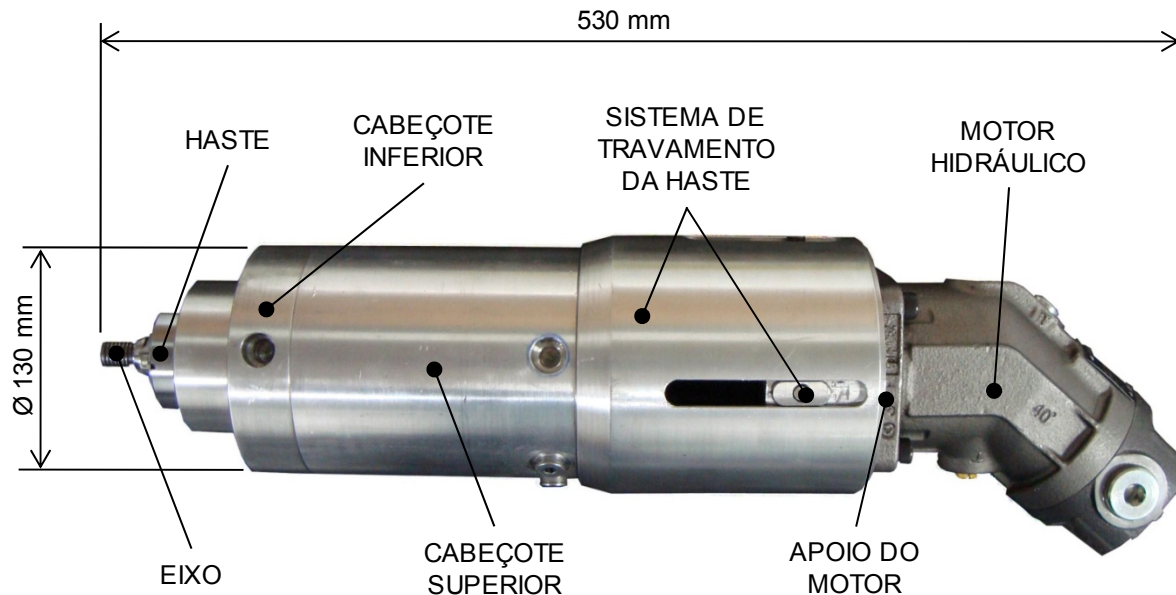


Figura 4.1: Cilindro de reparo portátil montado.

4.1.1 Ligação Hidráulica

Para alimentação hidráulica do cilindro de reparo foram selecionadas mangueiras com diâmetro mínimo recomendado pelo fabricante, com objetivo de minimizar a massa do conjunto.

Foi determinada uma distância de 10 m entre o cilindro de reparo portátil e o bloco de válvulas, o que ditou o comprimento das mangueiras adquiridas. A mangueira de dreno do motor foi ligada diretamente ao tanque da unidade hidráulica, pois seu fluxo hidráulico não exige controle através do bloco.

Foi identificado durante a montagem que a distância entre a saída e a entrada de óleo do motor causava uma interferência entre os sextavados das conexões. Assim, foi fabricado um prolongador para defasar as duas peças. Buchas de alumínio também foram fabricadas para vedar as conexões. A ligação hidráulica do motor pode ser observada na Figura 4.2.

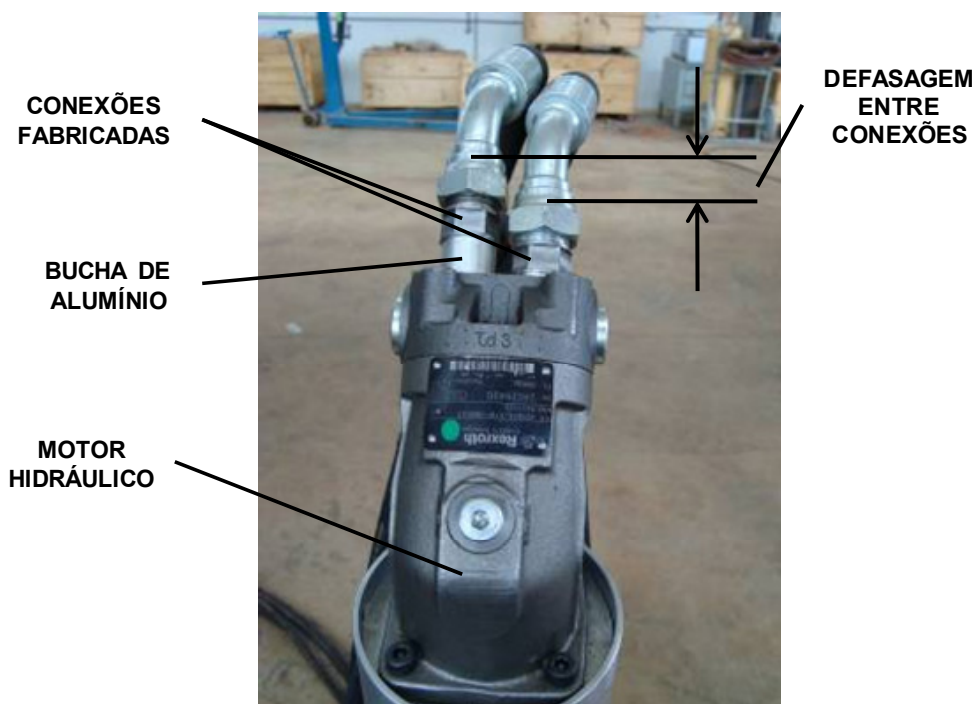


Figura 4.2: Detalhes da ligação hidráulica do motor.

Devido à diferença entre as bitolas já existentes na UPPA1, foi necessário fabricar algumas conexões para adaptar as novas mangueiras no bloco de válvulas. Para ligação do sistema de translação, foi necessário fabricar um conector para o terminal da mangueira na entrada flangeada do bloco. A Figura 4.3 mostra a ligação realizada.

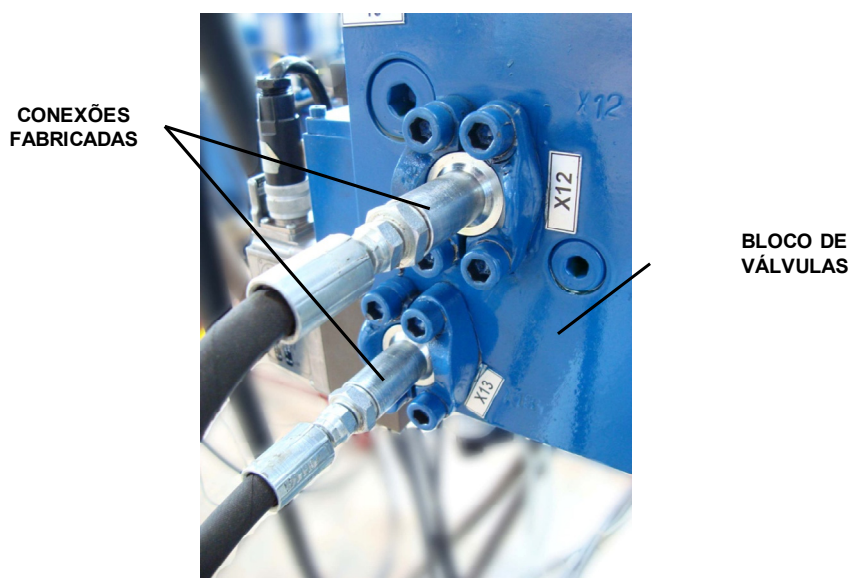


Figura 4.3: Ligação das mangueiras do sistema de translação no bloco de válvulas da UPPA1.

O processo foi finalizado com a retirada do ar de dentro do cilindro e do circuito hidráulico. A Figura 4.4 mostra o cilindro de reparo e suas ligações hidráulicas.

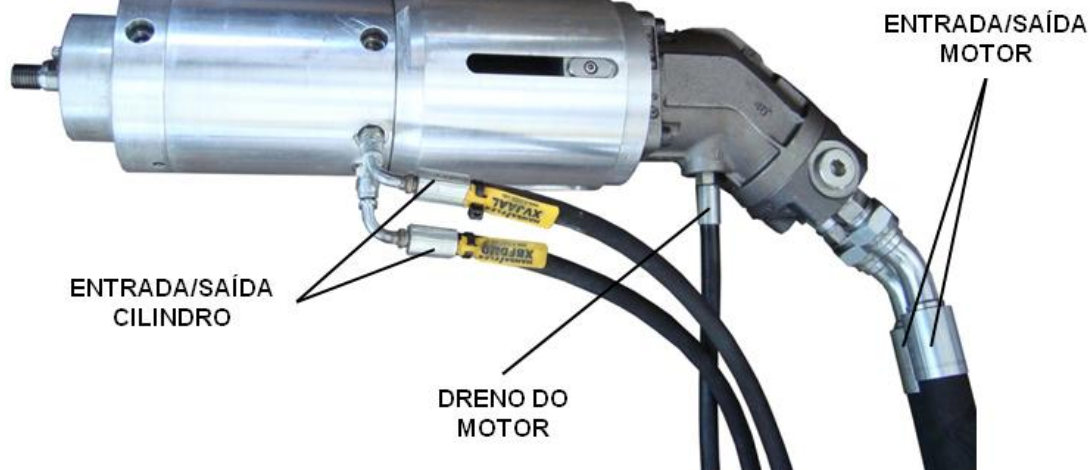


Figura 4.4: Ligações hidráulicas do cilindro de reparo portátil.

4.1.2 Instalação dos Sensores

O sensor indutivo foi posicionado radialmente na peça de fixação do motor hidráulico conforme projetado. A Figura 4.5 mostra o sensor montado no cilindro de reparo portátil.

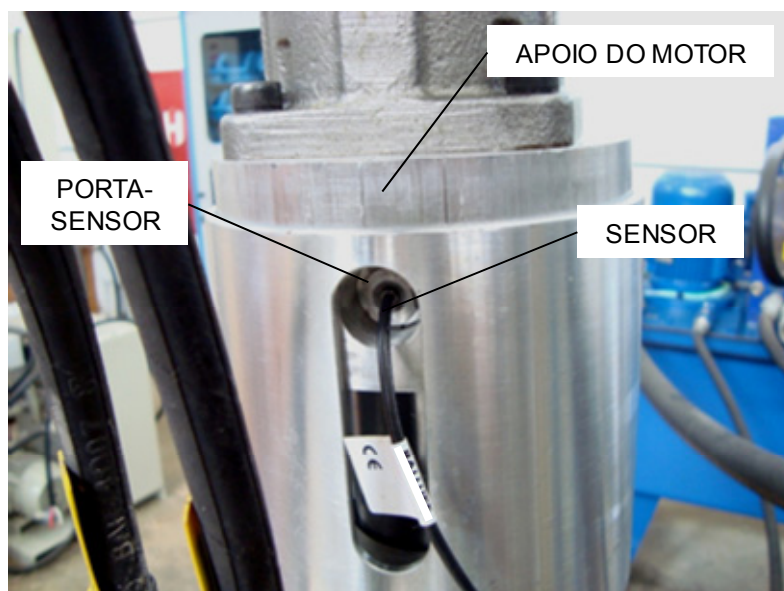


Figura 4.5: Sensor de rotação montado no cilindro de reparo portátil.

Antes da montagem do sensor de deslocamento em seu suporte (Figura 4.6), percebeu-se que atrito das vedações durante o movimento linear estava elevado. As

tolerâncias dimensionais foram trabalhadas, porém o atrito ainda ficou acima do aceitável. Com a retirada de mais material, havia o risco de comprometer a eficiência da vedação, portanto um reprojeto fez-se necessário.



Figura 4.6: Porta-sensor de deslocamento.

Assim, uma adaptação foi realizada para que os ensaios não fossem interrompidos (Figura 4.7). Foi utilizado um suporte, adquirido juntamente com o sensor, que foi colado na base de fixação para dutos, onde foram realizados os primeiros testes. O cabo foi fixado no apoio do motor.

Como o cilindro estava acoplado ao sistema de fixação para dutos, esta instalação atendeu ao processo, pois o sensor media o deslocamento entre o apoio do motor e a base de fixação. Apesar disto, os ensaios submersos não puderam ser realizados dentro deste trabalho, pois o sensor ficaria exposto à água, situação que o danificaria permanentemente.

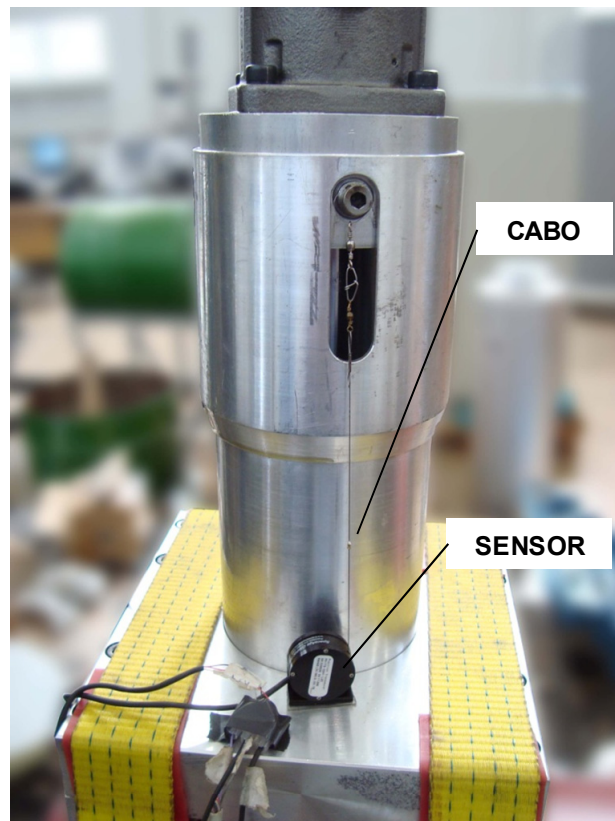


Figura 4.7: Montagem alternativa do sensor de deslocamento.

Como a mesma adaptação não pôde ser realizada no sistema de fixação em superfícies planas, os ensaios para esta modalidade foram realizados inicialmente sem o controle de malha fechada.

4.2 Montagem dos Dispositivos de Fixação

4.2.1 Sistema de Fixação em Dutos

O sistema foi confeccionado e montado antes do cilindro de reparo ter sido entregue. Contudo, a usinagem do furo central da base foi adiada para que ela fosse realizada a partir das dimensões reais do cabeçote inferior, minimizando assim os erros de ajuste dimensional e geométrico.

Após a chegada do cilindro de reparo portátil, as dimensões e tolerâncias foram aferidas e seus valores foram utilizados para a execução da furação da placa de fixação para dutos. Isto garantiu o ajuste fino do encaixe. A Figura 4.8 mostra sistema de fixação com o furo central já usinado. Sua massa final ficou em 10 kg.

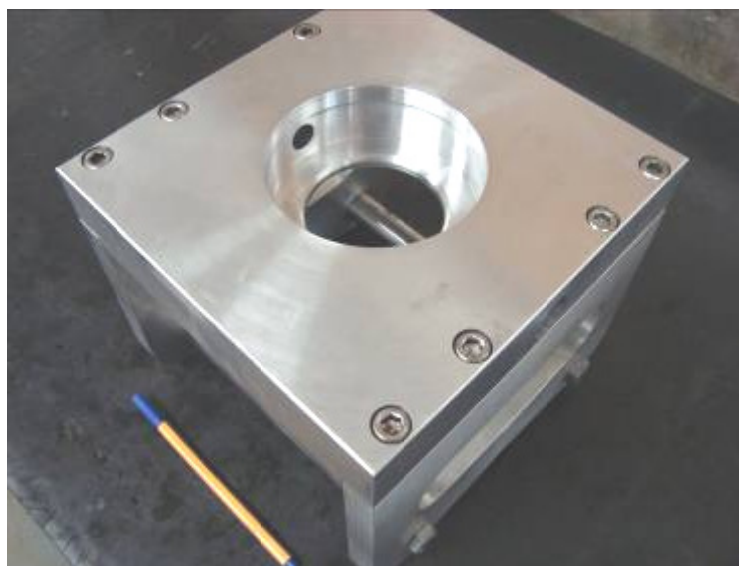


Figura 4.8: Sistema de fixação para dutos.

A partir de um duto disponível no Laboratório de Tecnologia e Desgaste - UFU foi construído um pórtico para ensaios. O objetivo foi possibilitar a realização de ensaios em superfícies planas e cilíndricas. Para isto foi retirada uma área do duto e soldada uma mesa plana, conforme pode ser observado na Figura 4.9.

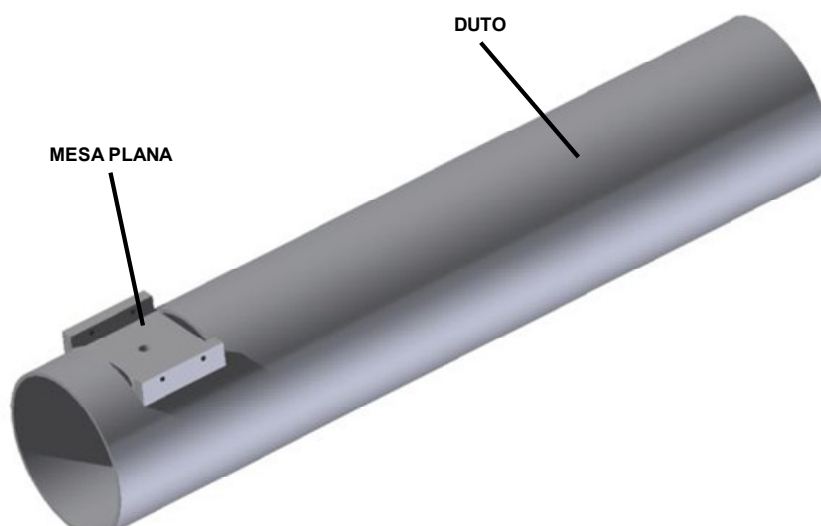


Figura 4.9: Duto para ensaios com mesa para amostras planas.

Para a montagem, a base foi posicionada sobre o pórtico de ensaios e as cintas foram atadas conforme a Figura 4.10. Foi utilizado um nível de bolha para manter o alinhamento em relação à mesa de ensaios.

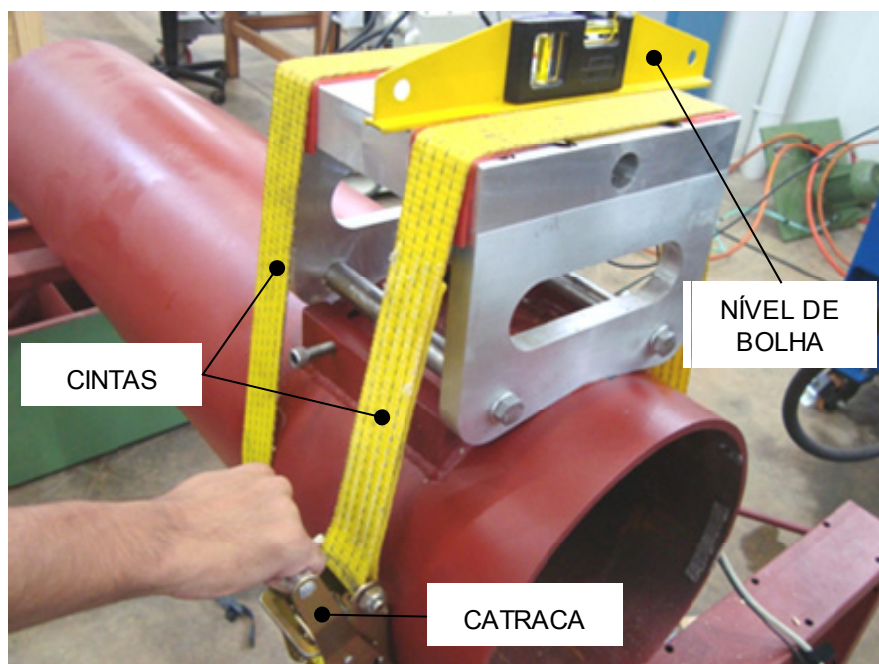


Figura 4.10: Sistema de fixação sobre duto de ensaios.

Posteriormente, o cilindro de reparo foi acoplado à base com os parafusos de corpo retificado. A Figura 4.11 apresenta a montagem completa do sistema.

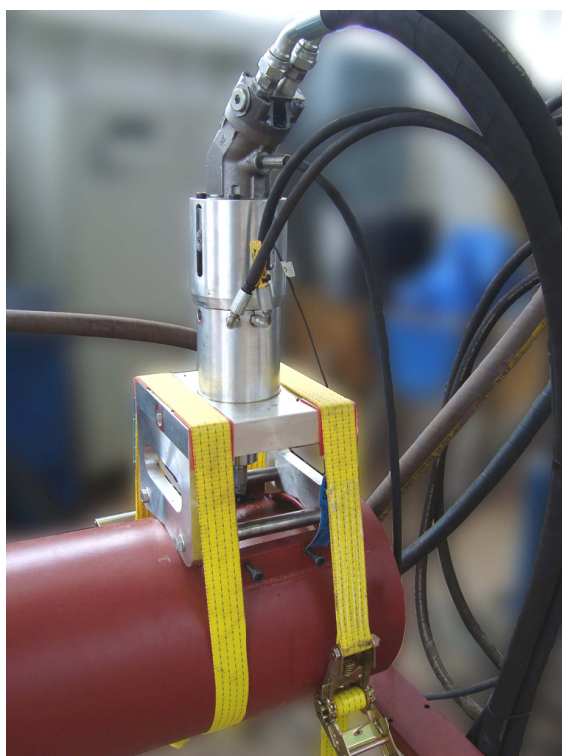


Figura 4.11: Cilindro de reparo e sistema de fixação para dutos montados sobre o duto de ensaios.

4.2.2 Sistema de Fixação em Superfícies Planas

Após a montagem da estrutura de ventosas, cilindro de reparo foi acoplado, conforme pode ser observado na Figura 4.12.

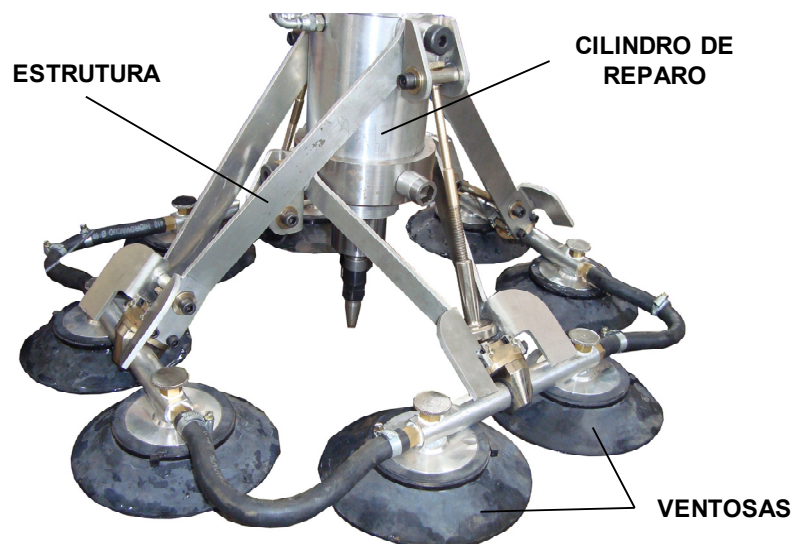


Figura 4.12: Montagem do cilindro de reparo sobre a estrutura com ventosas.

O conjunto do cilindro montado com a estrutura de ventosas ficou com uma massa aproximada de 26 kg.

A unidade geradora de vácuo foi montada sobre um quadro de alumínio com rodas para facilitar o transporte e manuseio. A estrutura, além da proteção de todo sistema de geração de vácuo, serviu também como porta-cabos/mangueiras para o transporte do conjunto, conforme pode ser observado na Figura 4.13.

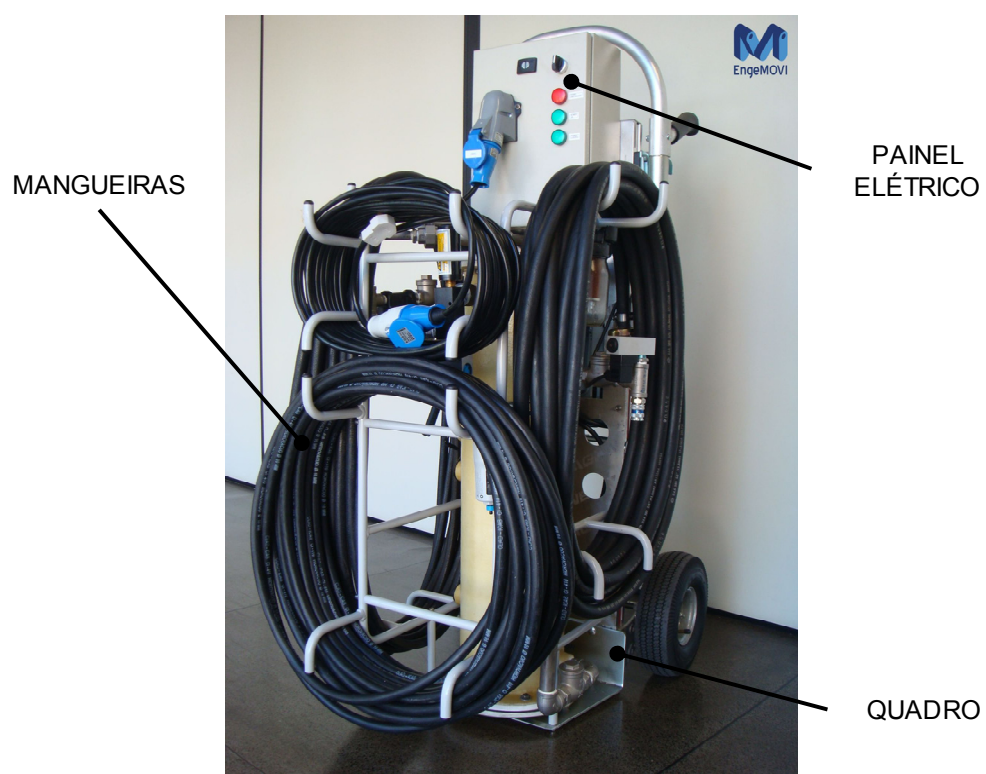


Figura 4.13: Unidade geradora de vácuo montada sobre o quadro de alumínio.

CAPÍTULO 5

TESTES DE VALIDAÇÃO

5.1 Testes Iniciais dos Dispositivos de Fixação

Antes de realizar os ensaios de validação, os dispositivos foram submetidos a testes iniciais para assegurar sua utilização nos ensaios.

Considerando que a carga axial é o parâmetro de maior relevância em termos de esforços comparado ao torque, os testes foram realizados com a aplicação de carga em um pino consumível sobre uma superfície de apoio, sem rotação.

A resistência ao torque dos dispositivos foi testada durante os ensaios de validação.

5.1.1 Testes do Sistema de Fixação para Dutos

Após realizada a montagem do cilindro de reparo no sistema de fixação para dutos, uma carga axial de compressão foi aplicada gradualmente, avançando-se o cilindro em direção à superfície. Quando a força atingiu 25 kN foi observado um alongamento das cintas e o sistema de fixação separou-se do plano do duto.

Foi analisada a substituição das cintas por correntes porém, devido a limitações financeiras e de prazo, as novas peças não puderam ser adquiridas. Portanto, os ensaios de validação para o sistema de fixação em dutos foram limitados a forças axiais máximas de 22 kN.

5.1.2 Teste do Sistema de Fixação em Superfícies Planas

A verificação do sistema de fixação em superfícies planas foi dividida em duas etapas. Primeiramente, foi testada estrutura acoplada nas ventosas e estas, por sua vez, ao sistema gerador de vácuo.

Posteriormente, a estrutura foi fixada em parafusos soldados em uma chapa plana e submetida, gradualmente, a cargas axiais de preenchimento.

5.1.2.1 Teste do Sistema Sobre Ventosas – 5 kN

As ventosas foram acopladas na estrutura juntamente ao cilindro de reparo e posicionadas sobre uma chapa de aço de ASTM A36, como pode ser observado na Figura 5.1. A superfície demonstrou boa representatividade a uma situação real de campo por possuir uma camada considerável de óxido.



Figura 5.1: Sistema de fixação por ventosas posicionado sobre chapa de testes.

O sistema de vácuo foi ligado fazendo com que as ventosas se assentassem na superfície. Foi observado um alto grau de vazamento em algumas das ventosas devido às irregularidades da camada de óxido. A fim de minimizá-lo, a superfície foi molhada com água e, assim, houve uma melhora considerável no desempenho da fixação.

Foi aplicada uma carga gradual de zero até 50 kN. Durante esta operação o sistema se mostrou estável. Na sequência, a carga foi aumentada lentamente. Ao atingir 80 kN, uma das ventosas soltou-se, causando o imediato desprendimento das demais ventosas.

Portanto, o sistema se mostrou apto a operar com 50 kN de força axial em superfícies planas e oxidadas, com uma margem de segurança de até aproximadamente 40% de aumento de carga conforme a necessidade da operação.

5.1.2.2 Teste do Sistema Sobre Parafusos Soldados - 40 kN

Na sequência, a estrutura foi posicionada sobre parafusos soldados à chapa de testes. Para os testes iniciais foram soldados segmentos de barras rosçadas de ABNT 1010 através de solda a arco elétrico (Figura 5.2), em substituição aos pinos roscados que serão utilizados no processo.

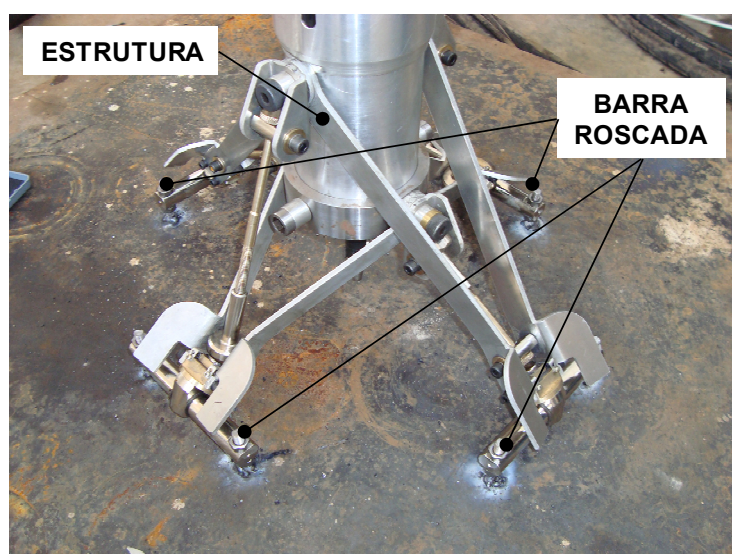


Figura 5.2: Estrutura fixada sobre parafusos soldados.

Foram soldados oito segmentos de modo a substituir as oito ventosas. Em cada segmento foram utilizadas duas porcas para fixar da estrutura. A porca inferior serviu de nivelamento e a porca superior de travamento, como pode ser observado na Figura 5.3.

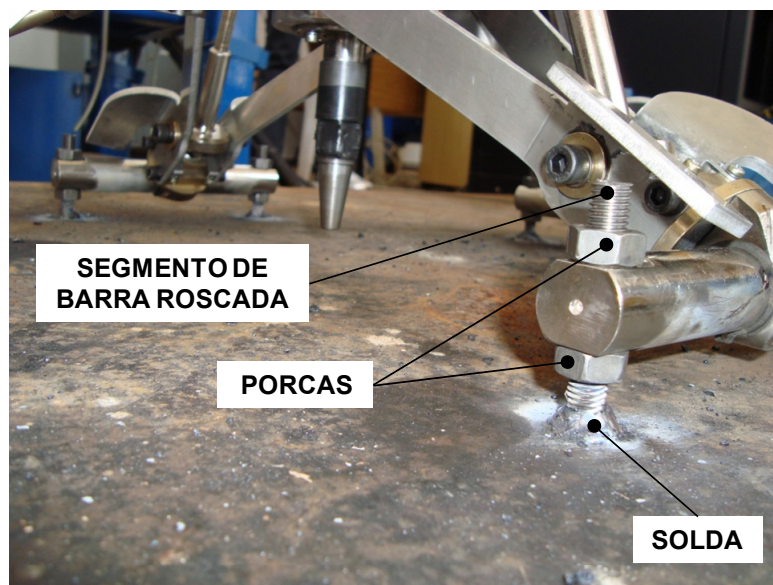


Figura 5.3: Detalhe da fixação da estrutura sobre as barras roscadas, soldadas a arco elétrico.

O sistema foi submetido gradativamente a um esforço axial através do avanço de um pino de FHPP em direção à chapa, sem rotação. Ao atingir 35 kN, uma das soldas se soltou causando a ruptura de um segundo ponto. A estrutura foi empenada, onde algumas hastes e fusos sofreram deformação plástica, conforme ilustrado na Figura 5.4.



Figura 5.4: Estrutura deformada devido ao rompimento das soldas.

A falta de penetração das soldas foi o motivo identificado para o rompimento. Após os reparos necessários, a estrutura foi remontada para novos testes.

Foi decidido, então, aguardar a fabricação dos pinos roscados. Após sua chegada, foram então soldados por atrito utilizando-se a fixação por ventosas. Este procedimento é apresentado no item 5.2, abaixo.

5.2 Ensaio de Soldagem por Atrito

Em uma etapa preliminar, foram realizados ensaios de soldagem por atrito na UPPA1, quando foram estudados alguns parâmetros e desenvolvida a geometria a ser utilizada nos testes apresentados a seguir.

Além disto, foram realizados ensaios de tração dos pinos soldados para obtenção da capacidade de ancoragem. Os resultados mostraram um valor mínimo de 27 kN de resistência sob esforços axiais de tração para pinos com rosca M10 de aço ASTM A36 soldados por atrito no mesmo material. As curvas de tração da Figura 5.5 representam os ensaios realizados em pinos soldados com compressão de 3, 5 e 10 kN e rotação de 5.000 rpm.

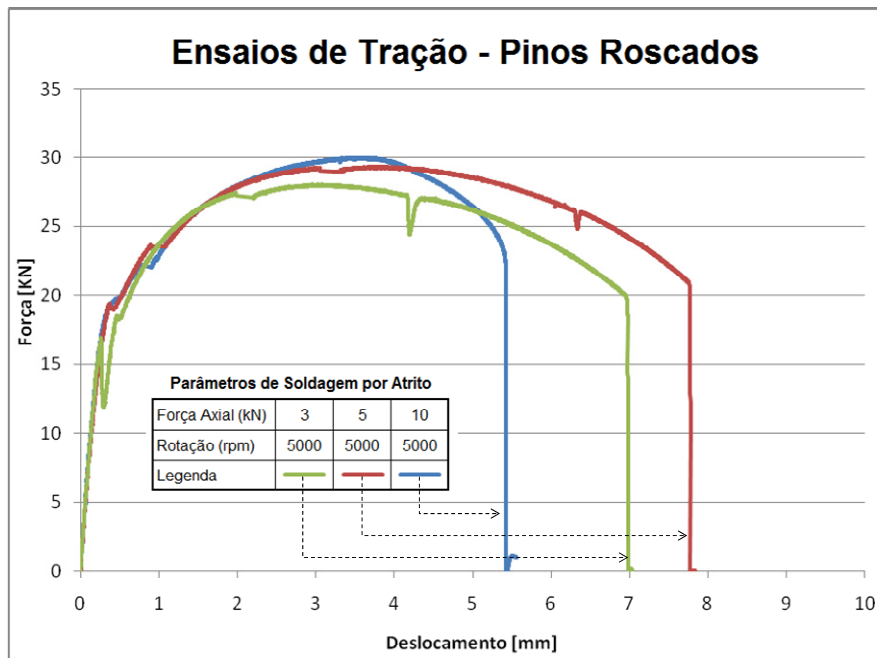


Figura 5.5: Curvas de ensaios de tração realizados em pinos roscados soldados por atrito.

Apesar dos resultados mostrarem uma tendência de aumento da capacidade de ancoragem com o aumento da força de soldagem, tal fato não pode ser afirmado pois o rompimento das amostras ocorreu no material de base, conforme pode-se observar na Figura 5.6.

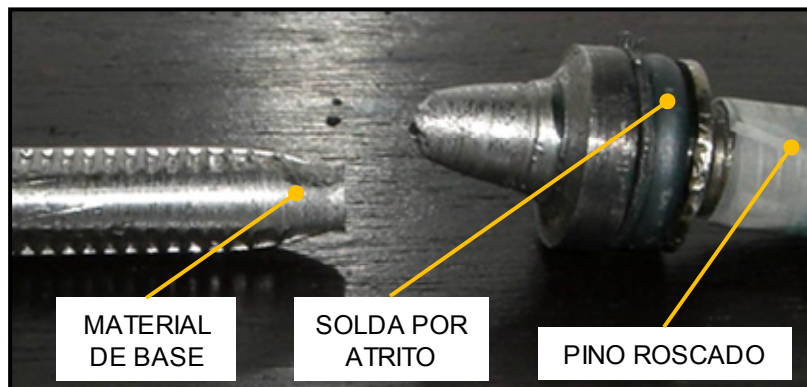


Figura 5.6: Amostra de ensaio de tração rompida no material de base.

Portanto, considerando que o sistema de fixação em chapas planas utiliza 8 pinos M10 soldados por atrito, a técnica pode ser aplicada com segurança.

5.2.1 Materiais, Geometrias e Parâmetros

O material utilizado para fabricação dos pinos roscados foi o ASTM A36, que é um aço estrutural frequentemente utilizado em plantas *offshore*. As soldagens foram realizadas sobre uma chapa de aço do mesmo material.

A geometria desenvolvida é apresentada na Figura 5.7. O pino é formado basicamente por uma parte roscada, um colar e uma extremidade cônica. A parte roscada é utilizada para fixação no mandril. O colar tem a função de suportar os esforços de soldagem a fim de não transferí-los para a rosca, como mostrado na Figura 3.16. Ele também impede que o material extrudado durante o processo atinja o mandril e possa eventualmente aderir à sua extremidade, dificultando a saída.

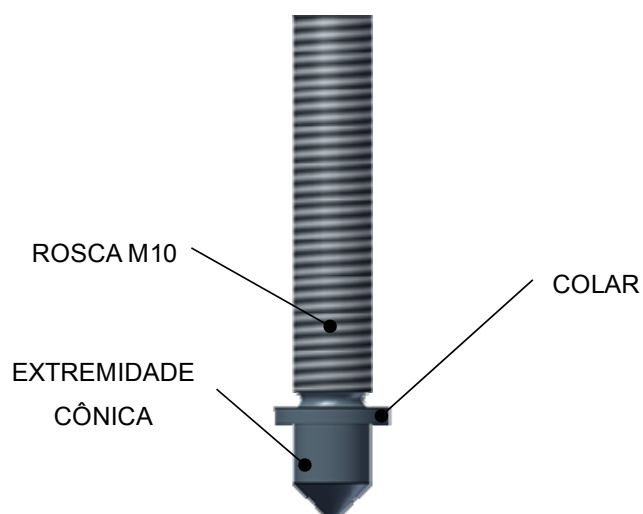


Figura 5.7: Pino roscado desenvolvido para soldagem por atrito.

A extremidade posterior ao colar é a porção consumida na soldagem. Sua conicidade auxilia numa transição mais suave do torque gerado no processo, até que o trabalho termomecânico atinja o maior diâmetro de soldagem. Em uma extremidade cilíndrica, as forças tangenciais geradas pelo atrito no início do processo podem causar uma pequena inclinação do pino. Com isto, a face de contato deixa de avançar perpendicularmente à superfície e a área de atrito se reduz, comprometendo a fase de aquecimento. Como consequência, falhas na interface soldada podem ser encontradas. Este fenômeno foi observado nos ensaios iniciais de soldagem por atrito e é ilustrado na Figura 5.8.

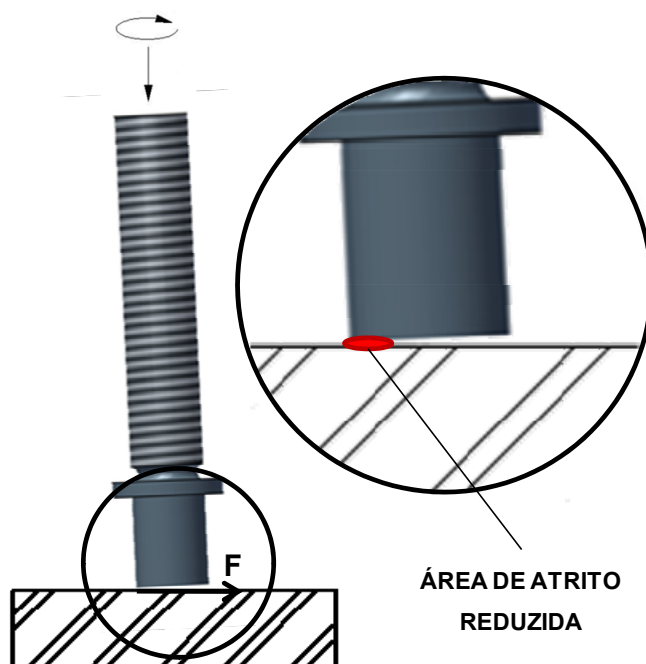


Figura 5.8: Redução da área de atrito devido à inclinação de um pino com ponta cilíndrica submetido às forças tangenciais da soldagem por atrito.

Portanto, reduzindo-se o diâmetro da extremidade através da conicidade, as forças tangenciais são menores no início do processo, o que evita a inclinação do pino. Assim, à medida que o comprimento é consumido, o calor é gerado de forma uniforme e resulta em uma solda sem defeitos.

Os pinos foram soldados na UPPA4 com 5 kN de força axial, 5.000 rpm e comprimento de queima de 7 mm. Estes parâmetros foram selecionados a partir dos ensaios realizados na UPPA1.

As posições para soldagem na chapa foram definidas a partir dos pontos de fixação da estrutura de ventosas, conforme ilustrado na Figura 5.9.

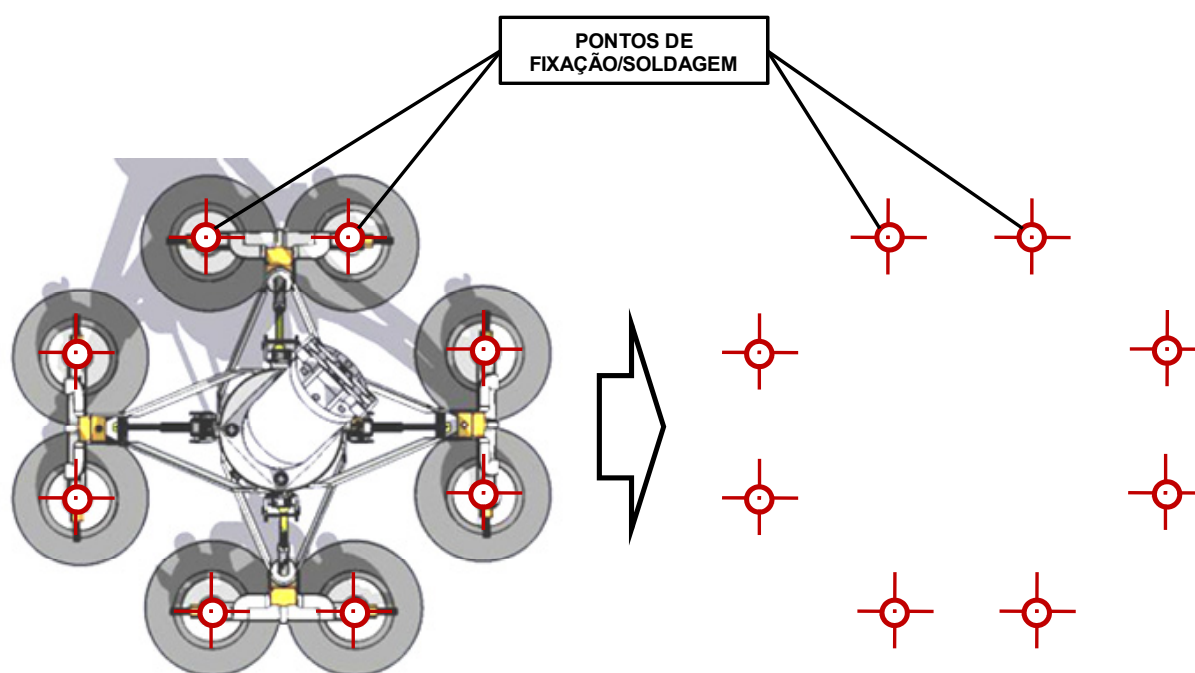


Figura 5.9: Processo de extração dos pontos de soldagem dos pinos roscados.

Os pontos foram marcados e puncionados para obtenção de uma marcação permanente. A camada de óxido não foi removida e não houve nenhum tratamento da superfície a ser trabalhada.

5.2.2 Resultados dos Ensaio de Soldagem por Atrito

A estrutura com ventosas foi posicionada manualmente sobre a chapa de acordo com a localização dos pontos de soldagem e assim foram soldados oito pinos roscados sobre a chapa. A Figura 5.10 mostra uma soldagem em processo e a Figura 5.11 apresenta a disposição dos oito pinos já soldados.



Figura 5.10: Processo de soldagem por atrito de um pino roscado.



Figura 5.11: Disposição de oito pinos roscados soldados por atrito.

5.3 Ensaio de FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*)

Após realizadas as soldagens por atrito, a estrutura foi posicionada sobre os pinos roscados e fixada com porcas.

Um bloco contendo um furo cônico foi soldado à chapa para a realização do preenchimento, como pode ser observado na Figura 5.12.

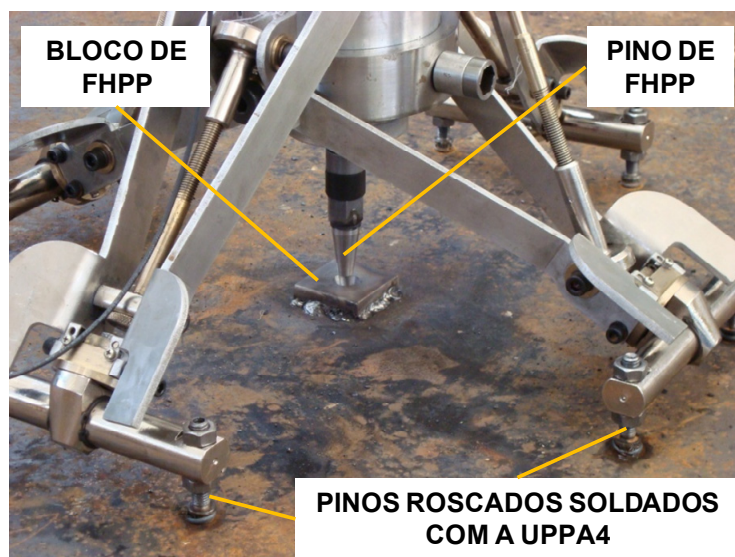


Figura 5.12: Montagem preparatória para o teste de FHPP.

5.3.1 Materiais, Geometrias e Parâmetros

Para fabricação do pino de preenchimento foi utilizado o aço ASTM A36, e o bloco foi retirado de uma chapa do mesmo material.

A geometria do conjunto pino e bloco foi especificada com referência ao trabalho de otimização realizado por Pires (2007). Por uma limitação no ajuste da altura da estrutura, foi necessário utilizar um bloco de 12,7 mm de espessura ao invés de 25,4 mm. A Figura 5.13 ilustra as geometrias do pino e do bloco utilizados no teste.

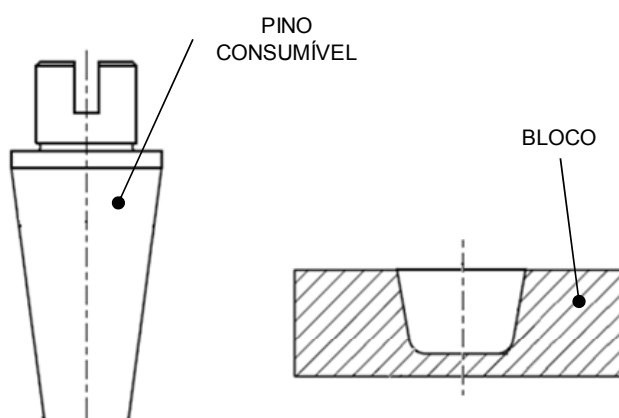


Figura 5.13: Geometrias utilizadas no ensaio de FHPP.

Foram planejados dois ensaios de preenchimento, sendo que o primeiro foi com força axial de 20 kN e rotação de 5.000 rpm e, no segundo, a força axial seria aumentada para 40 kN, mantendo-se a mesma rotação.

5.3.2 Resultados dos Ensaios de FHPP

O preenchimento com 20 kN e 5.000 rpm foi realizado com sucesso. A Figura 5.14 ilustra o processo sendo executado.



Figura 5.14: Ensaio de FHPP. Força axial de 20 kN e rotação de 5.000 rpm.

Durante o ensaio foi percebido que as partes da estrutura apresentavam uma acomodação devido ao esforço axial fazendo com que os pinos roscados sofressem uma leve flexão em direção ao eixo central da estrutura. Na tentativa de apertar mais os parafusos de corpo retificado que fixam o cilindro na estrutura, uma das roscas do cilindro rompeu por cisalhamento, impedindo assim a continuidade dos ensaios de FHPP com o sistema de fixação em superfícies planas.

Como o prazo final para finalização dos ensaios estava próximo, foi decidido prosseguir com os ensaios de FPPW no sistema de fixação para dutos.

5.4 Ensaios de FPPW (*Friction Pull Plug Welding*)

Estes ensaios foram realizados na mesa plana construída sobre o duto de testes. Ela possui um furo central que permite a passagem do pino consumível, inserido pelo lado

oposto, a fim de ser tracionado pelo cilindro de reparo. O bloco também é fixado pelo mesmo lado, através de parafusos. A montagem é ilustrada na Figura 5.15.

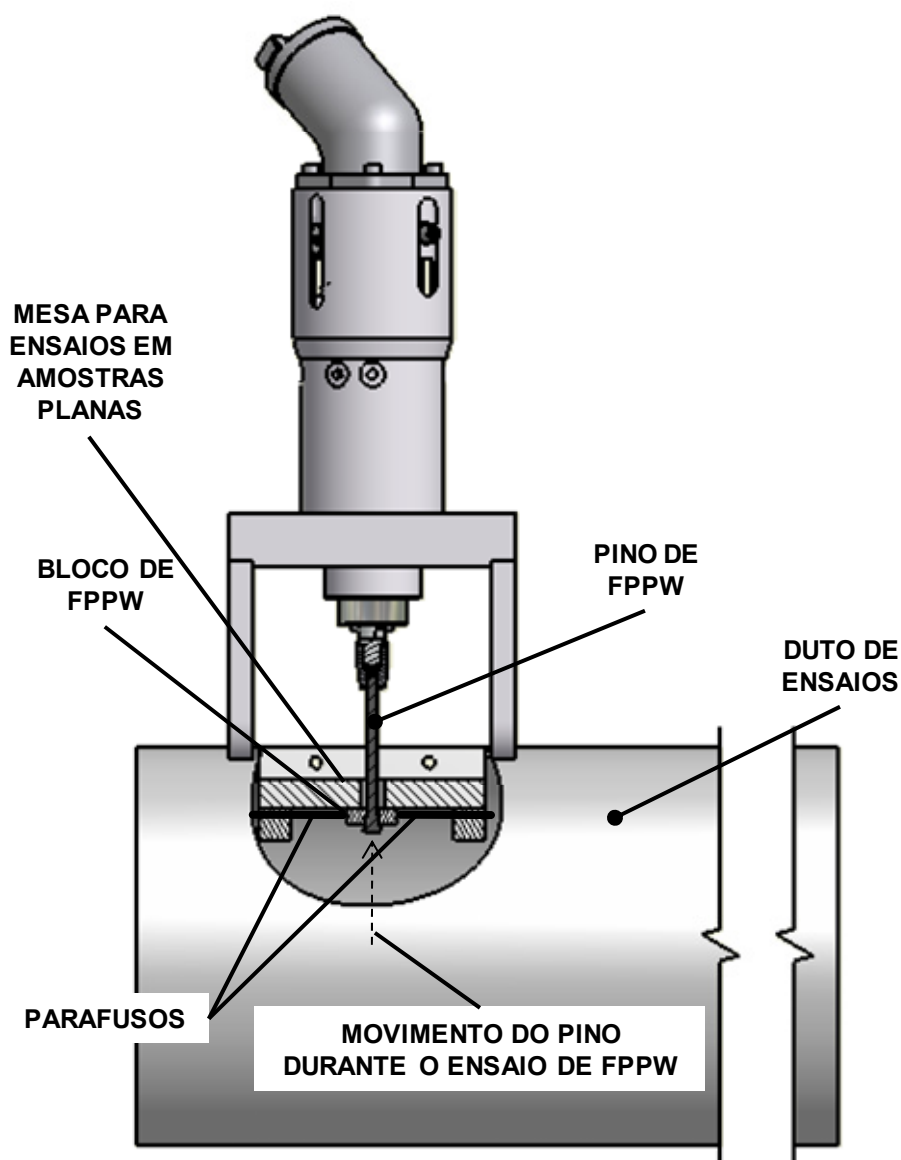


Figura 5.15: Montagem para ensaios FPPW.

5.4.1 Materiais, Geometrias e Parâmetros

Os pinos e blocos foram fabricados em aço ASTM A36 e suas geometrias sugeridas a partir dos ensaios de FHPP, visto que não havia bibliografia referente ao assunto.

Assim, foi assumida uma diferença de 4 graus entre a conicidade do pino e do bloco, de modo a induzir o processamento para início na extremidade do pino (diâmetro maior) e, posteriormente, evoluir para o corpo. Caso contrário, o calor gerado poderia facilitar o

rompimento do pino antes do processo ocorrer ao longo no furo. A Figura 5.16 ilustra as geometrias utilizadas.

Os parâmetros seleccionados para o primeiro ensaio foram 10 kN e 5.000 rpm.

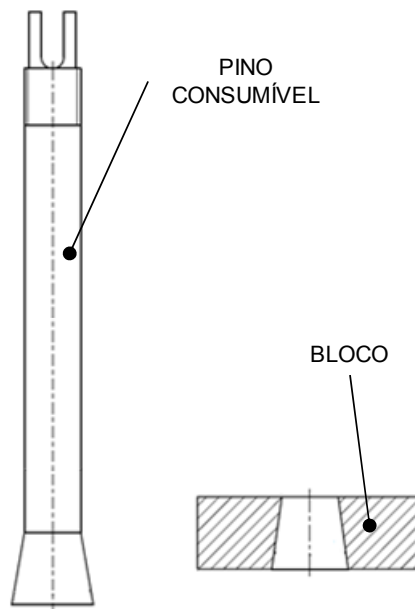


Figura 5.16: Geometrias utilizadas nos ensaios FPPW.

5.4.2 Resultados dos Ensaios de FPPW

No primeiro ensaio, logo no início do processamento, o pino rompeu na rosca de fixação e parte dele ficou presa dentro do mandril. Posteriormente, a carga axial foi reduzida para 6 kN porém, o rompimento se repetiu. A Figura 5.17 mostra o pino rompido na rosca ao lado de um pino original e um corte transversal de uma das amostras ensaiadas.



Figura 5.17: (a) pino original (esquerda) e pino rompido durante o ensaio (direita); (b) corte transversal de amostra do ensaio FPPW, 6 kN e 5.000 rpm.

Mesmo com o rompimento, o pino do segundo ensaio ficou preso no bloco, indicando que houve uma pequena porção de união metalúrgica entre as partes.

Após análise dos resultados iniciais, chegou-se à conclusão que o sistema de rosca não seria o ideal para fixação do pino. Foi projetado outro sistema utilizando rebaixos no pino. Porém, os ensaios serão realizados apenas após a apresentação deste trabalho.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Foi desenvolvido, ao longo deste trabalho, um cilindro portátil de reparo e soldagem por atrito, podendo operar com pinos consumíveis sob compressão ou tração. Foram também desenvolvidos acessórios para atender as respectivas operações, bem como sistemas e processos de fixação do cilindro em tubulações e superfícies planas. Dentre as etapas envolvidas, citam-se: concepção, projeto, acompanhamento da fabricação, instalação, montagem e ensaios preliminares de validação.

A seguir, são apresentadas, de forma sucinta, as conclusões mais relevantes obtidas ao longo da realização deste trabalho:

1. O cilindro de reparo portátil ficou com suas dimensões e sua massa dentro das metas definidas previamente. As dimensões finais foram: 530 mm de comprimento, 130 mm de diâmetro. A massa final, incluindo o motor hidráulico, foi de 15 kg. A utilização de rolamentos de rolos cônicos, ligas de alumínio e de aço inoxidável com tratamento térmico foi um elemento decisivo para a redução da massa do conjunto;
2. O diâmetro das mangueiras hidráulicas também foi minimizado para reduzir a massa do equipamento. Isto facilitou o manuseio do cilindro durante os testes;
3. A entrada de óleo hidráulico do cabeçote inferior foi transferida para o cabeçote superior de modo a deixar o diâmetro externo livre de conexões. Isto tornou mais simples os projetos dos sistemas de fixação e acoplamento do cilindro de reparo;
4. Foi desenvolvido um mandril magnético para operações de FHPP, e um sistema de encaixe rápido do pino, a fim de excluir a necessidade de utilização de ferramentas

especiais durante os reparos. O tempo de preparação dos ensaios foi reduzido significativamente com esta nova concepção;

5. Um sistema de fixação do cilindro em tubulações foi desenvolvido, e cintas de poliéster foram utilizadas para suportar as forças do processo FHPP. Apesar de apresentarem a resistência mecânica necessária, elas não são recomendadas para aplicação neste sistema devido à sua excessiva deformação elástica;
6. Foi desenvolvido um sistema de fixação do cilindro para superfícies planas através de ventosas, a fim de soldar pinos roscados por atrito, a serem utilizados posteriormente na ancoragem do equipamento durante operações de FHPP. A partir de testes realizados em uma chapa de aço ASTM A36 com camada de óxido considerável, foi observado que a capacidade de ancoragem do sistema de ventosas é melhor quando a superfície se encontra molhada;
7. A solda por atrito de pinos roscados M10 atrito suporta no mínimo 30 kN de tração quando realizada com parâmetros e geometrias otimizadas;

CAPÍTULO 7

TRABALHOS FUTUROS

A tecnologia de reparo de trincas por atrito vêm sendo desenvolvida através de várias frentes de trabalho de modo a ser transferida para o campo. Acredita-se que, alguns avanços finais no desenvolvimento do processo FHPP e melhorias nos dispositivos de fixação para superfícies planas, são os passos para a concretização deste objetivo.

Já o processo FPPW, pode-se dizer que ainda está em fase embrionária de estudo, e requer a otimização de geometrias e parâmetros, semelhante à realizada por Pires (2007).

7.1 Desenvolvimento da Costura por Atrito

Como já foi apresentado no Capítulo II deste trabalho, o processo FHPP inicia-se com a realização de um furo sobre o defeito. A execução destes furos vêm sendo desenvolvida paralelamente ao trabalho apresentado. Um programa criado e testado por Lima Filho (2008) foi adicionado ao sistema de controle da UPPA1 para realizar o avanço do cilindro com velocidades e rotações específicas. Juntamente ao programa, foram desenvolvidas brocas e fresas cônicas para confeccionar furos com as geometrias otimizadas por Pires (2007). Ferramentas de metal duro foram fabricadas, testadas e, posteriormente, o material foi alterado para o aço rápido, pois eram muito frágeis. Atualmente, as amostras de laboratório estão sendo produzidas com estas ferramentas, como mostra a Figura 7.1.

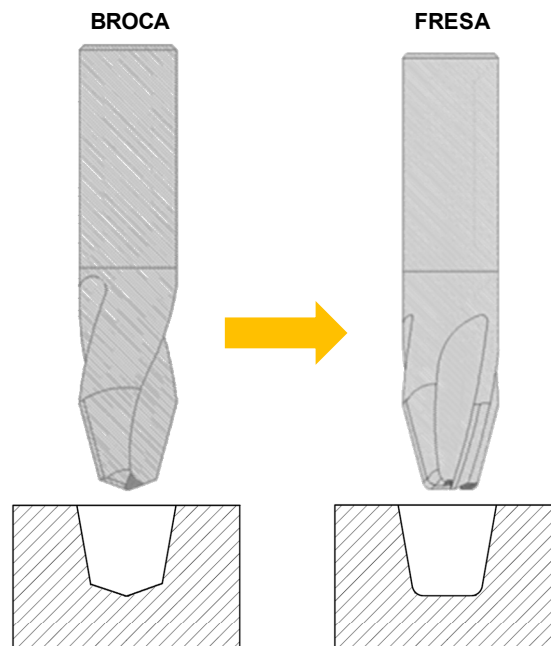


Figura 7.1: Processo de furação com as ferramentas desenvolvidas.

O próximo passo seria adaptá-las para fixação em um dos mandris já existentes, ou projetar um mandril para estas ferramentas a ser acoplado ao cilindro de reparo portátil.

Além disto, será necessário desenvolver uma ferramenta e um processo para retirar o restante do pino consumível, a fim de realizar o acabamento superficial após a operação de preenchimento. Uma das possibilidades discutidas é a utilização de uma fresa de topo para usinar o material no sentido vertical, de cima para baixo. Outra alternativa seria cortar o pino com um disco acoplado ao eixo do cilindro. Porém, isto implicaria em um movimento de translação no plano da superfície, exigindo o desenvolvimento de um novo sistema de fixação e movimentação.

7.2 Melhorias nos Sistemas de Fixação para Superfícies Planas

Como pôde ser observado ao longo da apresentação deste trabalho, o sistema de fixação para superfícies planas requer 8 soldagens de pinos roscados para cada preenchimento. Isto se torna inviável quando se trata da costura por atrito, que pode resultar em uma seqüência de vários preenchimentos. Por isto, foi discutida a possibilidade de soldar os pinos roscados em determinadas posições, de modo a permitir a fixação de trilhos, onde seria acoplada a estrutura de braços e fusos. Esta estrutura, por sua vez, poderia ser movimentada ao longo destes trilhos, a fim de acompanhar a direção da trinca e executar a costura por atrito. Esta concepção é apresentada na Figura 7.2.

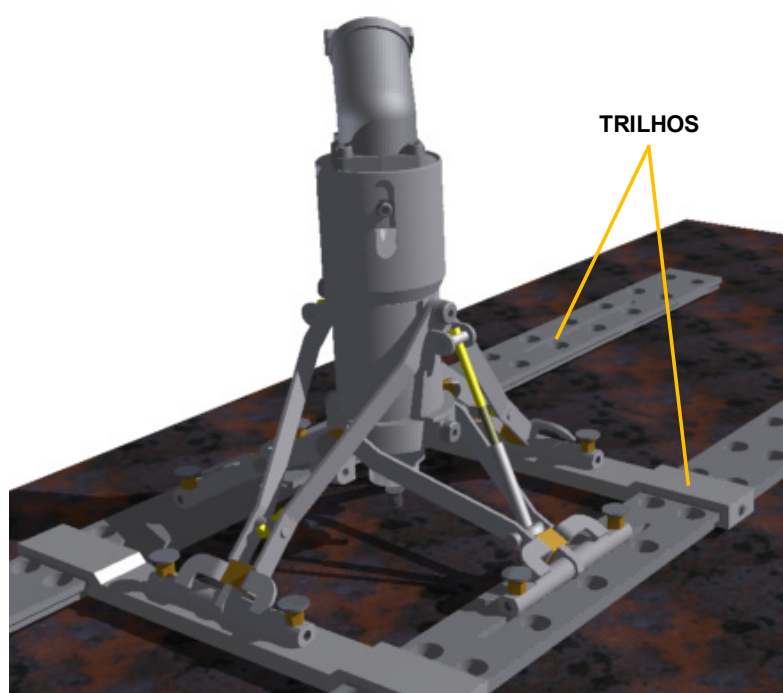


Figura 7.2: Sistema de fixação do cilindro de reparo portátil sobre trilhos.

Outra alternativa seria o desenvolvimento de um novo sistema, que já foi concebido por Cazenove (2008), para ser fixado também sobre pinos roscados, soldados por atrito com a utilização do sistema de ventosas. Além da translação do cilindro ao longo dos trilhos, ele também possibilita sua rotação, objetivando o reparo de trincas próximas às paredes das estruturas. A Figura 7.3 ilustra o sistema.

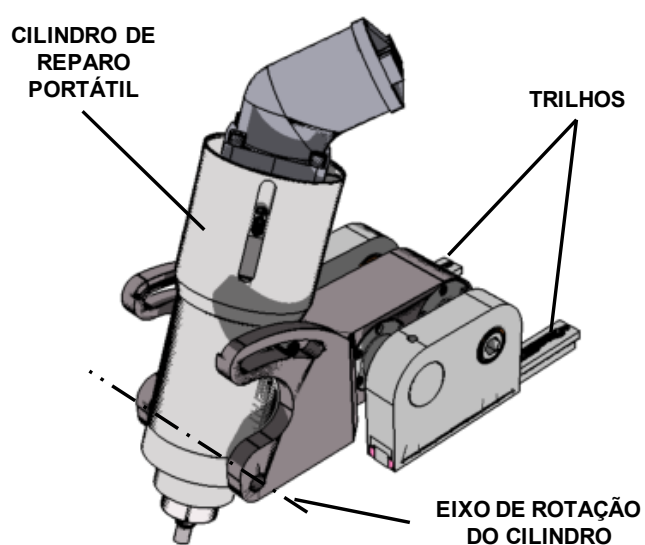


Figura 7.3: Sistema de fixação para superfícies planas concebido por Cazenove (2008).

Finalmente, após concluídas as etapas anteriores, restará a ser desenvolvido um processo de avaliação da qualidade do reparo, que poderá ser realizado através da técnica de ultrassom. Devido à complexidade geométrica das regiões de interface pino - substrato e pino - pino, e o eventual acesso a apenas um dos lados da superfície, o processo de avaliação também pode se tornar complexo, merecendo desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROZIAN, A.; GUL, B., Investigations of underwater FHPP for welding steel overlap joints. **Archives of civil and mechanical engineering**, Vol VII, No 2, 2007, p. 67-76.

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

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 8. ed. Miami, 1991. v. 2, (0-87171-354-3).

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.

CAZENOVE, J. **Sistema de fixação da cabeça de reparo por atrito UPPA IV**. 2008. 70p. Relatório de estágio supervisionado. Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

COLETTA, E. R.; CANTRELL, M. A., Friction pull plug welding: Dual chamfered plate hole. Lockheed Martin Corporation, Patent N°. US 6,230,958 B1, 2001.

CROSSLAND, B. Friction Welding - Recommended Practices for Friction Welding. In **Contemporary Physics**, v. 12, n. 6, p 559-574, 1971.

DELANY, F.; LUCAS, W.; THOMAS, W.; HOWSE, D.; ABSON, D. MULLIGAN, S.; BIRD, C. Advanced joining processes for repair in nuclear power plants. In: International Forum on Welding Technologies in Energy Engineering September 21 – 23, 2005, Shanghai, China.

ELLIS C. R. G. Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel. **Welding Journal**, p 183s-197s, Apr. 1972.

FERREIRA, V. J. A. **Influência da força axial e da rotação no processamento de pinos por atrito no aço ASTM A148 GR 115-95**. 2010. 49 p. Projeto de fim de curso. Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

FRANCO, C. T. **Efeito da força de processamento na qualidade do reparo por atrito utilizando pinos de aço AISI 316L e substratos similares e de ASTM A36**. 2009. 81 p. Projeto de fim de curso. Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

KAISER, M. J., World offshore energy loss statistics. **Energy Policy**, 35, 2007, p. 3496-3525.

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

LIMA FILHO, L. C. P. **Desenvolvimento de um programa para controle do processo de furação utilizando um equipamento de reparos por atrito**. 2008. 52p. Projeto de fim de curso. Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

LOTSBERG, I.; LANDET, E., Fatigue capacity of side longitudinals in floating structures. **Marine Structures**, 18, 2005, p. 25-42.

MEYER, A.; PAULY, D.; SANTOS, J.F.; PINHEIRO, G.; ROOS, A.; GIBSON, D.; BLAKEMORE, G.R. Considerations on robotic friction stitch welding for the repair of marine structures. In: 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 20, 2001, Rio de Janeiro, Brasil, **Proceedings of OMAE '01**, p. 145-151.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing**. 2004. 123 p. Dr.-Ing. Thesis an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2004.

MOAN, T.; GAO, Z.; AYALA-URAGA, E., Uncertainty of wave-induced response of marine structures due to long-term variation of extratropical wave conditions. **Marine Structures**, 18, 2005, p. 359-382.

NICHOLAS, E. D. **Friction Processing Technologies**. In: TWI, Connect, 1999.

PINHEIRO, G. A.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MEYER, A.; DOS SANTOS, J.F.; BLAKEMORE, G. R., Costura por Fricção: Fundamentos e Aplicações. 1º Cobef, abr. 2001.

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.

SALAMA, M. M.; LOTSBERG, I., OMAE-FPSO'04-0054 Fatigue performance of repaired FPSO details using stitch friction welding process. OMAE Speciality Symposium on FPSO Integrity, 2004, Houston, USA, **Proceedings of OMAE-FPSO**, p. 1-9.

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°. EP 0 602 072 B1, 1995.

THOMAS, W. M.; NICHOLAS, E. D., Emerging friction joining technology for stainless steel and aluminium applications. **IIW Asian Pacific Welding Congress**. February 1996. Auckland, New Zealand.

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

UNFRIED, J.; HERMENEGILDO, T. F.; PAES, M. T. P.; POPE, A. M.; RAMIREZ, A. J.,
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.
Tecnologia em Metalurgia e Materiais no V.6, N.2, Out./Dez.(São Paulo. Impresso), 2009.

Vill, V.I., **Friction Welding**. in Welding production, 1959. 10: p. 31-41.

Vill, V.I., **Friction Welding of Metals**, ed. I.P. Baykova. 1962, New York: American
Welding Society, Inc.