

**FERNANDO BUIATTI RODRIGUES**

**DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO  
DE SISTEMAS E ACESSÓRIOS MECÂNICOS  
DESTINADOS À AUTOMAÇÃO DE UM CILINDRO DE  
REPARO POR ATRITO PORTÁTIL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2016

**FERNANDO BUIATTI RODRIGUES**

**DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE SISTEMAS E  
ACESSÓRIOS MECÂNICOS DESTINADOS À AUTOMAÇÃO 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: Materiais e Processos de Fabricação.

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

**UBERLÂNDIA - MG**

**2016**

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

---

R696d Rodrigues, Fernando Buiatti, 1984-  
2016 Desenvolvimento, projeto e construção de sistemas e acessórios mecânicos destinados à automação de um cilindro de reparo por atrito portátil [recurso eletrônico] / Fernando Buiatti Rodrigues. - 2016.

Orientador: Sinésio Domingues Franco.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.69>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Atrito. 3. Usinagem. 4. Ferramentas. 5. Cilindros. 6. Hidráulica. I. Franco, Sinésio Domingues, 1962-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO  
NÚMERO DE ORDEM: 454  
DATA: 06/07/2016

Às quatorze horas do dia seis de julho de dois mil e dezesseis, no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste do Bloco 5F, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora, composta pelos Professores Dr. Sinésio Domingues Franco (orientador) e, Dr. Louriel Oliveira Vilarinho da Universidade Federal de Uberlândia, Dr. Marcelo Torres Piza Paes e o convidado MSc. Ricardo Reppold Marinho da Petrobras, sob a presidência do primeiro, desenvolver o processo de avaliação da dissertação intitulada "*Desenvolvimento, Projeto e Construção de Sistemas e Acessórios Mecânicos Destinados à Automação de um Cilindro de Reparo por Atrito Portátil*", apresentada pelo aluno **FERNANDO BUIATTI RODRIGUES**, matrícula número **11412EMC002**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Mestre. Após discorrer sobre seu trabalho, o candidato foi arguido pelos membros da Banca, diante das comunidades universitária e externa. Em seguida, a dissertação foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

- Aprovada com pequenas modificações
- Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador.
- Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca.
- Reprovada

conferindo ao aluno, em caso de aprovação, o título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação, Linha de Pesquisa: Tribologia e Materiais. As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 30 dias, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelo presidente e demais membros da Banca.

**Assinaturas:**

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco (orientador)

UFU

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

UFU

Prof. Dr. Marcelo Torres Piza Paes

Petrobras

Uberlândia, 06 de julho de 2016

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me proporciona fé, sabedoria, saúde e a vida digna. Aos meus pais Sebastião Rodrigues e Sueli Buiatti Rodrigues que se sacrificaram para garantir meus estudos e a minha educação. Às minhas irmãs Roberta Buiatti Rodrigues Cunha e Priscilla Buiatti Rodrigues pelo carinho, união, paciência e entusiasmo, à minha esposa, amiga e fiel companheira Mariana Silva Martins pelo amor, paciência e lealdade, aos meus cunhados Felipe Cunha do Nascimento e Adalberto Martins de Freitas Junior pelo afeto e companheirismo, aos meus avós Angelina Zanatta Buiatti e Jeronimo Buiatti que já partiram, mas deixaram um grande exemplo de vida e amor, e a todos os meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio. Findo dizendo que amo a todos, e que são fortemente presentes no meu coração.*

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho não seria possível sem a colaboração de diversas pessoas que participaram direta ou indiretamente, principalmente:

- A Deus, pela vida que me proporciona e aos caminhos que Ele me faz trilhar. Agradeço também pelas pessoas que o Senhor coloca em meu caminho, por me dar sempre forças para passar pelos desafios da vida, e às oportunidades de sempre aprender um pouco mais, dia após dia, ano após ano, crescendo com humildade, honestidade e amor;
- Agradeço imensamente aos meus pais Sebastião Rodrigues e Sueli Buiatti Rodrigues, por tudo que eles são e representam na minha vida. Exemplo de amor, humildade, paciência e perseverança. Os meus eternos agradecimentos;
- Agradeço as minhas irmãs Roberta Buiatti Rodrigues Cunha e a Priscilla Buiatti Rodrigues, pelos conselhos, pela admiração e companheirismo.
- A minha esposa Mariana Silva Martins, pela paciência, pelos cuidados, pelo amor que me proporciona. Minha companheira e amiga, que esteve sempre ao meu lado me dando forças para conclusão deste trabalho. Muito obrigado.
- A meu amigo, chefe, professor e orientador Sinésio Domingos Franco, pela oportunidade de realizar este trabalho. Obrigado pela confiança e por abrir espaço para fazer parte desta equipe, que sempre prospera para o crescimento do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD);
- Aos engenheiros do LTAD Henry Hwang e Denis Soares que deram grandes contribuições técnicas para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço em especial o Engenheiro Raphael Pires pela paciência e disposição nos momentos em que precisei para a realização de diversos ensaios e treinamento para a operação dos equipamentos utilizados neste trabalho e também ao Engenheiro Juliano Oséias pela ajuda na verificação desta dissertação;
- À técnica administrativa Sandra Aparecida Rocha Silva pela atenção e competência;
- Aos técnicos Flávio Soares Alves dos Santos, Afrânio Vieira e Paulo Victor Cunha pelo apoio, ajuda e companheirismo;
- À Petrobras pelo apoio financeiro, em especial aos engenheiros Marcelo Torres Piza, Francisco F. Ramos Neto e Ricardo Reppold Marinho pelo apoio e suporte para o desenvolvimento deste trabalho;
- Aos amigos do LTAD que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho;
- Finalmente, à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) pela oportunidade de concluir o mestrado em um dos melhores programas de pós-graduação do país.

RODRIGUES, F. B. **Desenvolvimento, Projeto e Construção de Sistemas e Acessórios Mecânicos Destinados à Automação de um Cilindro de Reparo por Atrito Portátil** 2016. 191f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## RESUMO

A soldagem a arco voltaico consiste em uma das técnicas mais utilizadas para o reparo de estruturas. No entanto, esta técnica apresenta uma série de inconvenientes e limitações, que não ocorrem no processamento por atrito, como no FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*). O processo de reparo FTPW é dividido em três importantes etapas. A primeira etapa consiste na usinagem de uma cavidade cônica não passante de geometria específica. A segunda etapa consiste no preenchimento desta cavidade, pela introdução coaxial de um pino cônico de geometria específica, submetido a rotação e força axial. A terceira e última etapa, consiste no fresamento do material do pino não processado e da rebarba (*flash*), obtendo assim a planicidade original da superfície. Este trabalho apresenta os desenvolvimentos introduzidos em uma unidade de reparo por atrito construída pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), habilitando-a a realizar todas as etapas (furação, preenchimento e fresamento) do reparo. Neste trabalho foram projetados ainda mandris e ferramentas especiais de usinagem. Os resultados obtidos mostraram que as implementações na unidade hidráulica permitiram a execução de todas as etapas do reparo por atrito. Análises macro e microscópicas mostraram que todos os preenchimentos realizados não apresentaram defeitos.

---

*Palavras-Chave: Reparo por atrito, Processo FTPW, Processo FPPW, Usinagem, Ferramentas, Unidade Hidráulica.*

RODRIGUES, F. B. **Development Design and Construction of Mechanical Systems and Accessories to Automate a Portable Friction Welding Head** 2016. 191p. Master of Science Dissertation at the Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia – Brazil.

## ABSTRACT

Arc welding is one of the most applied techniques to repair mechanical structures. However, it has different inconvenients and limitations that are not present on the friction processes as in FTPW (Friction Tapered Plug Welding). The FTPW comprises of three major steps: The first one is the drilling of a tapered blind hole with a specific geometry. Secondly, the hole is filled with a tapered plug coaxially introduced with rotation and axial load. The third and final step is the milling of the non processed rod and flash materials, thus obtaining the original surface flatness. This dissertation presents different developments made for a friction welding unit built at the Friction and Wear Technology Laboratory, enabling it to complete all major steps (drilling, filling and milling). Mandrels and special tools were also designed. The results showed that the redesigned hydraulic unit completed successfully all FTPW steps. Macro and microscopic analysis also showed free defects samples.

---

*Keywords: Friction Repair, FTPW Process, FPPW Process, Machining, Tools, Hydraulic Power Unit.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Trincas de fadiga e descontinuidades encontradas em tanques de navios de produção de petróleo (SOUZA, 2006). .....	2
Figura 1.2: Cilindro de reparo portátil (HWANG, 2010). .....	5
Figura 2.1: Desenho esquemático do processo de soldagem por atrito convencional (Direct Drive ou Continuous Drive) (AWS 1991 e PINHEIRO 2008): a) Rotação de uma das peças; b) Aplicação da Força de Compressão; c) Início da soldagem; d) Fim da soldagem. ....	8
Figura 2.2: Divisão das fases durante processamento de pinos por atrito (adaptado de MEYER, 2004). .....	12
Figura 2.3: Ilustração das etapas do processo FTPW (HWANG, 2010). ....	18
Figura 2.4: Esquema ilustrativo do processo FHPP (FREITAS, 2014). ....	19
Figura 2.5: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito FHPP (NICHOLAS, 1999). .....	20
Figura 2.6: Variação microestrutural característica do reparo por atrito, usando como pino consumível o aço ABNT 1010 e uma chapa de aço ASTM A36 (DOS SANTOS, 2013). ....	21
Figura 2.7: Ilustração das etapas do processo FPPW (HWANG, 2010). ....	22
Figura 2.8: Operação do processo de soldagem por atrito FPPW utilizado na indústria aeroespacial. ( <a href="http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120014529.pdf">http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120014529.pdf</a> , acesso dia 05/12/2015). .....	22
Figura 2.9: Processo de costura por atrito FTSW. a) Princípio do processo de costura por atrito (HWANG, 2010). b) Costura realizada com equipamento de baixo torque pertencente ao HZG (PINHEIRO, 2008). ....	23
Figura 2.10: a) Ilustração do processo de solda por atrito de pinos roscados em superfícies planas (HWANG, 2010); b) Parafuso prisioneiro soldado por atrito em um substrato de aço. ....	24
Figura 2.11: Equipamento de reparo portátil HMS 3000 (PINHEIRO, 2008). ....	25

Figura 2.12: Principais componentes da Unidade hidráulica da UPPAI.....	27
Figura 2.13: Cilindro de reparo acoplado ao pórtico e componentes diversos.....	27
Figura 2.14: Geometria Tipo A caracterizada como a melhor geometria para o processamento de pinos por atrito pelo método FTPW: A) Dimensões do pino consumível, B) Dimensões do furo cônico (PIRES, 2007). ....	28
Figura 2.15: Cilindro de reparo, destacando o motor hidráulico e o cilindro hidráulico (CAIXETA, 2011). ....	29
Figura 2.16: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPAIII) e seus principais componentes (GONTIJO, 2012). ....	31
Figura 2.17: A) Ilustração da Unidade de Processamento de pinos por Atrito 4 (UPPAIV). B) Cilindro de reparo (HWANG, 2010). ....	32
Figura 2.18: Concepção do cilindro de reparo da UPPAIV (HWANG, 2010). ....	33
Figura 2.19: Mecanismos auxiliares de fixação do Cilindro de Reparo da UPPAIV. a) Base de fixação com dois graus de liberdade para reparo de estruturas planas e inclinadas; b) Estrutura de fixação por ventosas para a inserção de pinos roscados; c) Estrutura para fixação da cabeça de reparo em dutos de petróleo.....	33
Figura 2.20: Equipamento soldagem por atrito MPF1000 da LAMEF/UFRGS. a) Modelo virtual. b) Foto do equipamento (MATTEI, 2011). ....	34
Figura 2.21: Máquina de soldagem por atrito NEI (LESSA, 2011). ....	35
Figura 2.22: Máquina Portátil de Solda por Atrito Contínua (PCFWM) ( <a href="http://www.mantacor.co.za">www.mantacor.co.za</a> – Acesso: 19/06/2016). ....	36
Figura 2.23: Estação de soldagem por atrito (LÓPEZ, 2010). ....	37
Figura 2.24: Carcaça do motor hidráulico danificada devido aos eventuais golpes de aríete no circuito do sistema de rotação (FORMOSO, 2012). ....	39
Figura 2.25: Imagem ilustrativa da geometria das ferramentas para a usinagem do furo cônico. a) Broca cônica; b) Fresa cônica (WALTER, 2009). ....	40

Figura 2.26: Lascamento da broca cônica durante o processo de usinagem utilizando uma furadeira vertical de bancada (LIMA FILHO, 2008).....	41
Figura 2.27: Teste realizado para a abertura do furo com a broca cônica. a) Broca reta comum de $\square 8,5\text{mm}$ ; b) Abertura do furo com a broca cônica; c) Furo cônico sem marcas de usinagem (LIMA FILHO, 2008).....	41
Figura 2.28: a) Furo cônico com superfície usinada irregular. b) Fresa cônica danificada (LIMA FILHO, 2008). ....	42
Figura 2.29: Representação das direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo no processo de furação, com as respectivas direções das velocidades de corte, avanço e efetiva de corte (LIMA FILHO, 2008).....	44
Figura 2.30: Terminologia das partes de uma broca cilíndrica (MITSUBISHI, 2016).....	44
Figura 2.31: Terminologia das partes de uma fresa de topo (MITSUBISHI, 2016). ....	45
Figura 3.1: Detalhe da rosca da ponta de eixo do cilindro de reparo portátil da UPPAIV mostrando a deformação plástica dos filetes de rosca devido ao aperto excessivo do mandril.....	50
Figura 3.2: Representação da conexão macho-fêmea do mecanismo de rosca da Sandvik® MSSC – M16. ....	51
Figura 3.3: Imagem ilustrativa do eixo do cilindro de reparo da UPPAX projetado com o mecanismo de fixação MSSC®.....	52
Figura 3.4: Comparação da seção de fresas de topo com diferentes posições e quantidades de arestas de corte (MITSUBISHI, 2016). ....	55
Figura 3.5: Imagem ilustrativa da broca cônica escalonada e da fresa cônica adaptadas com mecanismo de fixação MSSC®.....	57
Figura 3.6: Ilustração da geometria de afiação em “S” da aresta de corte da broca cônica escalonada (MITSUBISHI, 2016). ....	58
Figura 3.7: Mandril utilizado para a fixação de pinos consumíveis para o processo FTPW (HWANG, 2010).....	59

Figura 3.8: Conjunto de fixação de pinos consumíveis para preenchimento por tração (HWANG, 2010).....	60
Figura 3.9: Reparo por atrito pelo processo FTPW utilizando a UPPAIV. a) Pino consumível rompido ao lado de um pino novo. b) Corte transversal mostrando a união parcial do pino com o substrato (HWANG, 2010).....	60
Figura 3.10: Vista explodida do mandril para processo FPPW. a) Pino consumível; b) Mandril de Tração; c) Castanhas; d) Prisioneiro para remoção da castanha; e) Luva de proteção; f) Guias. ....	61
Figura 3.11: Pino consumível para processamento FPPW.....	62
Figura 3.12: Ilustração da sequência de acoplamento e soldagem por atrito de pinos roscados (HWANG, 2010).....	63
Figura 3.13: Mandril utilizado para o processamento de pinos roscados adaptado com rosca MSSC®.....	63
Figura 3.14: Material do pino não processado a ser removido pós-preenchimento.....	64
Figura 3.15: Fresa Sandvik Coromill® 390 adaptada utilizada para a remoção do material remanescente do pino consumível (SANDVIK, 2016).....	64
Figura 3.16: Ferramenta Coromill® 390 adaptada com rosca fêmea MSSC®.....	65
Figura 3.17: Síntese dos componentes e acessórios desenvolvidos para a UPPAX, possibilitando a execução de todas as operações do reparo por atrito.....	66
Figura 3.18: Esquema dos processos de furação, preenchimento e fresamento realizados pela UPPAX.....	67
Figura 3.19: Circuito hidráulico original e atual do sistema de rotação. ....	69
Figura 3.21: Representação esquemática da válvula de segurança crossover. ....	73
Figura 3.22: Circuito original e atual do sistema de acionamento do cilindro hidráulico. ....	74
Figura 3.23: Layout mostrando o arranjo dos principais componentes da unidade hidráulica original (UPPAI).....	79

Figura 3.24: Vista frontal e lateral do novo layout da unidade hidráulica. ....	80
Figura 3.26: Vista superior da unidade hidráulica. ....	81
Figura 3.27: Componentes e acessórios da UPPAX. a) Broca cônica escalonada, b) fresa cônica, c) fresa de topo, d) mandril para processamento de pinos roscados, e) mandril para fixação de pinos consumíveis pelo método FTPW, f) mandril para a fixação de pinos consumíveis pelo método FPPW e g) eixo do cilindro de reparo. ....	82
Figura 3.28: Montagem do novo eixo adaptado com a rosca MSSC®.....	83
Figura 3.29: Motor hidráulico e cilindro hidráulico montados provisoriamente para realização do comissionamento. ....	84
Figura 3.30: Skid da máquina contemplando todos os componentes da unidade hidráulica.	84
Figura 3.31: Inspeção realizada na parte externa do reservatório de óleo. a) Verificação do aperto das conexões hidráulicas e dos cabos de segurança, b) Verificação do aperto das conexões hidráulicas na válvula crossover, c) verificação do funcionamento dos sensores de ensujamento, d) Verificação da montagem de todos os conectores elétricos e conexões hidráulicas do bloco de válvulas. ....	85
Figura 3.32: Unidade de processamento de pinos consumíveis X – UPPAX. ....	86
Figura 3.33: Suporte instalado para sustentar o peso das mangueiras hidráulicas. ....	87
Figura 4.1: Esquema resumindo as várias etapas realizadas no desenvolvimento deste trabalho. ....	89
Figura 4.2: Geometria dos materiais utilizados nos ensaios. A) Dimensões dos substratos; B) Dimensões dos pinos consumíveis (Geometria do tipo A – PIRES (2007)). ....	92
Figura 4.3: Substratos CP1 a CP6 marcadas com punção de ponta cônica para alinhamento com o eixo do cilindro de reparo da UPPAX. ....	95
Figura 4.4: Etapa de furação dos substratos. a) Ferramentas de usinagem – Broca cônica escalonada e fresa cônica, b) Furação com a broca cônica, c) Furo usinado com a broca cônica, d) Furação com a fresa cônica, e) Furo cônico usinado. ....	95
Figura 4.5: Representação gráfica dos desvios de circularidade (SOUZA et al., 2011). ....	97

Figura 4.6: Máquina de medir por coordenadas utilizada nas medições geométricas (ângulo e profundidade) e de desvios de forma do furo cônico (circularidade).....	98
Figura 4.7: Esquema dos procedimentos realizados para as medições de avaliação do furo cônico. ....	99
Figura 4.8: Amostra embutida e preparada metalograficamente para medições do raio de concordância. ....	100
Figura 4.9: Procedimento utilizado para a medição do raio de concordância em uma imagem com escala de 500 $\mu\text{m}$ (amostra CP6). ....	101
Figura 4.10: Interferômetro ótico utilizado nas medições dos perfis e superfícies de rugosidade.....	102
Figura 4.11: Ilustração dos cortes realizados na amostra CP6 para a medição da rugosidade. A) Amostra utilizada para a medição dos perfis de rugosidade na superfície lateral do furo cônico. B) Amostra utilizada para a medição dos perfis de rugosidade na superfície do fundo do furo cônico.....	103
.....	104
Figura 4.12: Posições de medição dos perfis de rugosidade na superfície lateral do furo cônico. ....	104
Figura 4.13: Posições de medição dos perfis de rugosidade na superfície do fundo do furo cônico. ....	105
Figura 4.14: Etapa de preenchimento. a) Estrutura utilizada para a fixação dos substratos para a realização dos ensaios, b) Detalhe de fixação dos substratos, c) Substrato processado, d) Substratos CP1 a CP5 processados. ....	106
Figura 4.15: Dimensões dos corpos-de-prova de tração conforme recomendações da norma ASTM E8/E8M - 15a.....	107
Figura 4.16: Procedimento de usinagem dos corpos de prova de tração. A) Dimensões dos substratos, B) Posição de usinagem do furo cônico, C) Posição de usinagem do punção, D) Amostras de tração com gap de usinagem de 0,72 mm, D) Amostras para ensaio de tração. ....	108

Figura 4.17: Máquina de eletroerosão a fio Marca AgieCharmilles Modelo FW 2U. ....	109
Figura 4.18: Esquema de nomenclatura dos corpos-de-prova de tração. ....	109
Figura 4.19: Máquina de tração utilizada para a realização dos ensaios. ....	110
Figura 5.1: Sinais adquiridos durante o Teste 1, utilizando a broca cônica escalonada (Rotação de 1.782 rpm e Vf de 0,5 mm/s). ....	113
Figura 5.2: Usinagem do furo realizado com a broca cônica escalonada. ....	114
Figura 5.3: Sinais adquiridos durante o Teste 1 utilizando a fresa cônica (Rotação de 1.273 rpm e Vf de 0,5 mm/s). ....	115
Figura 5.4: Sinais adquiridos durante o Teste 2 utilizando a fresa cônica (Rotação de 1.273 rpm e Vf de 0,3 mm/s). ....	116
Figura 5.5: Sinais adquiridos durante o Teste 3 utilizando a fresa cônica (Rotação de 1.273 rpm e Vf de 0,1 mm/s). ....	117
Figura 5.6: Usinagem do furo realizado com a fresa cônica. ....	117
Figura 5.7: Imagem da superfície lateral do furo cônico (CP6). ....	119
Figura 5.8: Imagem da superfície do fundo do furo (CP6). ....	119
Figura 5.9: Geometria do furo cônico Tipo A (PIRES, 2007). ....	120
Figura 5.10: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP1. ....	122
Figura 5.11: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP2. ....	122
Figura 5.12: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP3. ....	123
Figura 5.13: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP4. ....	123
Figura 5.14: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP5. ....	124

Figura 5.15: Valores médios de RSm com os respectivos desvios padrão, medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6. ....	126
Figura 5.16: Valores médios de Ra com os respectivos desvios padrão medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6. ....	126
Figura 5.17: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP1 (Parâmetros de ensaio: Força: 1° Estágio: 15 kN e no 2° Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1° Estágio: 3 mm e no 2° Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN). ....	129
Figura 5.18: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP2 (Parâmetros de ensaio: Força: 1° Estágio: 15 kN e no 2° Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1° Estágio: 3 mm e no 2° Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN). ....	130
Figura 5.19: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP3 (Parâmetros de ensaio: Força: 1° Estágio: 15 kN e no 2° Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1° Estágio: 3 mm e no 2° Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN). ....	130
Figura 5.20: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP4 (Parâmetros de ensaio: Força: 1° Estágio: 15 kN e no 2° Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1° Estágio: 3 mm e no 2° Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN). ....	131
Figura 5.21: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP5 (Parâmetros de ensaio: Força: 1° Estágio: 15 kN e no 2° Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1° Estágio: 3 mm e no 2° Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN). ....	131
Figura 5.22: Curvas de rotação, força, comprimento de queima, torque e potência obtidas em um ensaio exploratório de reparo por atrito com rotação de 5.000 rpm, comprimento de queima de 8 mm, tempo de forjamento de 10 s e força de 40 kN. ....	132
Figura 5.23: Corpos-de-prova para ensaios de tração fabricadas na máquina de eletroerosão a fio. ....	133



Figura 5.24: Posição de fratura dos corpos-de-prova de tração do metal base (ASTM A36). .....	134
Figura 5.25: Corpos-de-prova de tração da amostra CP1 com fratura no metal base.....	135
Figura 5.26: Corpos-de-prova de tração da amostra CP2 com fratura no metal base com exceção da amostra CP2-5 que apresentou fratura na região de interface Pino-bloco.....	136
Figura 5.27: Corpos-de-prova de tração da amostra CP3 com fratura no metal base.....	136
Figura 5.28: Detalhes da região de fratura do corpo-de-prova de tração longitudinal CP2-5. .....	139
Figura 5.29: Fractografia do corpo-de-prova CP2-5; em destaque as regiões analisadas 1 e 2, analisadas com maiores aumentos. ....	139
Figura 5.30: Fractografia da região 1 do corpo de prova CP2-5, mostrando os mecanismos de fratura dúctil (microcavidades rasas) e frágil (clivagem). a) Ampliação de 400 vezes da região 1 (Fig. 5.29); b) ampliação de a) mostrando as regiões com microcavidades; c) ampliação de b) mostrando as regiões com clivagem.....	140
Figura 5.31: Fractografia mostrando detalhe da Região 1 da Fig. 5.29, com inclusões de MnS em diversos formatos. a) Vista geral; b) detalhes indicando a região “1” analisada por EDS; c) espectro de EDS mostrando a presença de MnS na região analisada.....	141
Figura 5.32: Fractografia da região 2 do corpo-de-prova CP2-5 (Fig. 5.29). a) Vista geral; b) ampliação de a); c) região com microcavidades rasas (setas em amarelo) e a clivagem (setas em vermelho); d) espectro de EDS mostrando baixos níveis de Enxofre e Manganês. .....	142
Figura 5.34: Imagem da macrografia da amostra CP5.....	143
Figura 5.35: Regiões de análise micrográfica. ....	143
Figura 5.36: Micrografias do reparo executado no substrato CP5: (1.1) interface superior lateral direita, (1.2) imagem anterior ampliada; (2.1) interface intermediária lateral direita; (2.2) imagem anterior ampliada.....	144

Figura 5.37: Micrografias do reparo executado no substrato CP5: (3.1) interface inferior lateral direita, (3.2) imagem anterior ampliada; (4.1) interface inferior central; (4.2) imagem anterior ampliada..... 145

Figura 7.1: Desgaste por deslizamento causado na superfície externa da base de fixação do motor hidráulico. .... 150

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetro utilizados para a furação do furo cônico na UPPAI (LIMA FILHO, 2008).....	53
Tabela 3.2: Características e aplicações de fresas de topo com diferentes números de corte (MITSUBISHI, 2016).....	56
Tabela 3.3: Velocidades máximas de deslocamento do eixo do cilindro de reparo da UPPAX para cada ferramenta de usinagem.....	76
Tabela 3.4: Lista de componentes fabricados para a UPPAX.....	82
Tabela 4.1: Tabela de composição química dos materiais utilizados (% em peso). ....	91
Tabela 4.2: Parâmetros de operação das ferramentas de usinagem da UPPAX, fornecidos pelo fabricante. ....	93
Tabela 4.3: Parâmetros de usinagem utilizados para a realização dos ensaios preliminares .....	94
Tabela 4.4: Parâmetros utilizados na etapa de preenchimento dos substratos. ....	96
Tabela 4.5: Graus de tolerância-padrão (IT). ....	101
Tabela 5.1: Máximas valores de forças e torque registrados durante a realização dos testes preliminares de usinagem.....	118
Tabela 5.2: Resultados das medições de profundidade dos furos cônicos.....	120
Tabela 5.3: Resultados das medições do ângulo dos furos cônicos.....	121
Tabela 5.4: Resultados das medições do raio de concordância na amostra CP6. ....	121
Tabela 5.5: Tolerâncias fundamentais (ABNT NBR 6158). ....	125
Tabela 5.6: Número de classe de rugosidade Ra para superfície. (Fonte: ISO 1302:1992).....	128
Tabela 5.7: Valores de Ra para processo de fabricação (DE MARCO FILHO, 1996). ....	128

Tabela 5.8: Resultado do ensaio de tração para o metal base. .... 134

Tabela 5.9: Resultado do ensaio de tração da junta soldada FTPW. .... 137

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\Delta l$  – Comprimento de deslocamento axial entre as partes [mm]
- $d$  – Diâmetro final da peça [mm]
- $f$  – Avanço [mm/volta]
- $F$  – Força axial [N]
- $L_f$  – Comprimento final [mm]
- $L_i$  – Comprimento inicial [mm]
- $l_r$  – Comprimento de amostragem ou *cut-off* [mm]
- $l_{rf}$  – Percurso final [mm]
- $l_{ri}$  – Percurso inicial [mm]
- $l_t$  – Percurso total de medição [mm]
- $M_t$  – Torque resistivo [Nm]
- $N$  – Potência consumida de soldagem [kW]
- $n$  – Rotação [rpm]
- $P$  – Profundidade de corte [mm]
- $P_c$  – Potência requerida [kW]
- $Q$  – Taxa de remoção de cavaco [cm<sup>3</sup>/min]
- $R_a$  – Desvio aritmético médio do perfil em avaliação [ $\mu\text{m}$ ]
- $R_{ku}$  – Fator de achatamento do perfil em avaliação
- $R_q$  – Desvio médio quadrático do perfil em avaliação [ $\mu\text{m}$ ]
- $R_{sk}$  – Fator de assimetria do perfil em avaliação
- $R_t$  – Altura total do perfil [ $\mu\text{m}$ ]
- $R_z$  – Altura máxima do perfil [ $\mu\text{m}$ ]
- $t$  – Tempo de Processamento [s]
- $V_c$  – Velocidade de corte [m/min]
- $V_f$  – Velocidade de Avanço [mm/min]
- $X_S$  – Elementos de perfil de rugosidade
- $\Delta P$  – Perda de pressão [MPa]
- $\sigma_e$  – Limite de escoamento [MPa]
- $\sigma_R$  – Limite de resistência [MPa]

## 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*

CLP – Controlador Lógico Programável

CP – Corpo de prova

EDS – *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*

FEG – *Field Emission Gun*

FHPP – *Friction Hydro Pillar Processing*

FPPW – Friction Pull Plug Welding

FPSO – *Floating, Production, Storage and Offloading*

FSW – *Friction Stir Welding*

FTPW – *Friction Tapered Plug Welding*

FTSW – Friction Tapered Stitch Welding

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

IT – *International Tolerance*

LTAD – Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer* (Transformador Diferencial Variável Linear)

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MM3C – Máquina de Medir a três Coordenadas

MMC – Máquina de Medir por Coordenadas

PF – Perfil fundo

PID – Controlador proporcional-integral-derivativo

PL – Perfil longitudinal

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

UPPA – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito

ZTA – Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1. Soldagem por Atrito</b> .....	<b>7</b>
2.1.1. <i>Introdução</i> .....	7
2.1.2. <i>Geração de Energia e Liberação de Calor</i> .....	9
2.1.3. <i>Parâmetros de Soldagem que Influenciam a Qualidade Final da Junta Soldada</i>	9
2.1.4. <i>Fases do Processo</i> .....	11
2.1.5. <i>Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito</i> .....	15
<b>2.2. Tipos de Soldagem por Atrito com Pinos Consumíveis</b> .....	<b>16</b>
2.2.1. <i>Processo FTPW e FHPP</i> .....	18
2.2.2. <i>Processo FPPW (Friction Pull Plug Welding)</i> .....	22
2.2.3. <i>Processo FTSW (Friction Tapered Stitch Welding)</i> .....	23
2.2.4. <i>Soldagem de Pinos Roscados por Atrito (Friction Stud Welding)</i> .....	23
<b>2.3. Equipamentos Desenvolvidos para a Exploração da Técnica de Soldagem por Atrito</b> .....	<b>24</b>
2.3.1. <i>Equipamento Comercial Desenvolvido para Reparo de Estruturas por Atrito</i> ....	25
2.3.2. <i>Equipamentos Desenvolvidos em Laboratório</i> .....	26
<b>2.4. Problemas no Travamento do Sistema de Rotação Durante o Reparo por Atrito</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5. Problemas de Usinagem do Furo Cônico Utilizando a UPPAI</b> Erro! Indicador não definido.	
<b>2.6. Conceitos de Usinagem e Terminologias das Ferramentas de Usinagem</b> .....	<b>42</b>

<b>CAPÍTULO III: PROJETO DE SISTEMAS E ACESSÓRIOS MECÂNICOS DESTINADOS À AUTOMAÇÃO DE UM CILINDRO DE REPARO POR ATRITO PORTÁTIL .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1 Idealização do Projeto.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2 Projeto de Acessórios para a Automação da Unidade de Processamento por Atrito X (UPPAX).....</b>	<b>49</b>
3.2.1 <i>Projeto do mecanismo de fixação dos componentes e acessórios do cilindro de reparo da UPPAX.....</i>	<i>49</i>
3.2.2 <i>Projeto mecânico das ferramentas de usinagem do furo cônico – Etapa de Furação .....</i>	<i>52</i>
3.2.3 <i>Projeto mecânico dos mandris de fixação dos pinos consumíveis – Etapa de Preenchimento .....</i>	<i>58</i>
3.2.4 <i>Projeto da ferramenta de usinagem para etapa de fresamento.....</i>	<i>64</i>
3.2.5 <i>Síntese dos componentes e acessórios desenvolvidos para a UPPAX.....</i>	<i>65</i>
<b>3.3 Reestruturação da Unidade Hidráulica .....</b>	<b>68</b>
3.3.1 <i>Projeto de reestruturação da unidade hidráulica.....</i>	<i>68</i>
3.3.2 <i>Projeto estrutural da unidade hidráulica.....</i>	<i>79</i>
<b>3.4 Fabricação, Montagem e Integração dos Componentes da UPPAX .....</b>	<b>81</b>
3.4.1 <i>Fabricação dos Componentes e Acessórios da UPPAX.....</i>	<i>81</i>
3.4.2 <i>Montagem do Novo Eixo do Cilindro de Reparo .....</i>	<i>83</i>
3.4.3 <i>Comissionamento, Integração e Startup da Unidade Hidráulica.....</i>	<i>83</i>
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE VALIDAÇÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>4.1. Resumo Metodológico .....</b>	<b>89</b>
<b>4.2. Materiais e Especificação das Amostras .....</b>	<b>91</b>
4.2.1. <i>Especificação e Análise de Composição Química das Amostras .....</i>	<i>91</i>
4.2.2. <i>Dimensionamento do Substrato e do Pino Consumível.....</i>	<i>92</i>



<b>4.3. Definição dos Parâmetros de Processo</b> .....	<b>93</b>
4.3.1. <i>Definição dos Parâmetros de Usinagem do Furo Cônico – Etapa de Furação</i> ..	93
4.3.2. <i>Definição dos Parâmetros de Processamento do Pino Consumível – Etapa de Preenchimento</i> .....	96
<b>4.4. Procedimentos de Medição</b> .....	<b>97</b>
4.4.1. <i>Medições do Perfil Geométrico do Furo Cônico</i> .....	97
4.4.2. <i>Medições de Rugosidade</i> .....	102
<b>4.5. Etapa de Preenchimento das Amostras</b> .....	<b>105</b>
<b>4.6. Ensaio Mecânico de Tração</b> .....	<b>106</b>
4.6.1. <i>Caracterização, dimensionamento, usinagem e preparação dos corpos de prova para ensaio de tração</i> .....	106
4.6.2. <i>Procedimentos de ensaio de tração</i> .....	110
<b>4.7. Análise Macro e Microscópica da Junta Soldada</b> .....	<b>111</b>
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>112</b>
<b>5.1. Resultados dos Ensaios de Usinagem do Furo Cônico</b> .....	<b>112</b>
5.1.1. <i>Definição dos parâmetros de usinagem – Testes preliminar</i> .....	112
5.1.2. <i>Processo de usinagem do furo cônico – Etapa de Furação</i> .....	118
<b>5.2. Desvios de Forma dos Furos Cônico</b> .....	<b>119</b>
<b>5.3. Parâmetros de Rugosidade</b> .....	<b>125</b>
<b>5.4. Preenchimento das Amostras</b> .....	<b>129</b>
<b>5.5. Resultados dos Ensaios de Tração</b> .....	<b>133</b>
<b>5.6. Resultados da Análise Macro e Micrográfica da Junta Soldada</b> .....	<b>143</b>

<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO.....</b>	<b>146</b>
<b>CAPÍTULO VII: TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>149</b>
<b>CAPÍTULO VIII: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>152</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>160</b>
APÊNDICE I - Resultados dos parâmetros de Rugosidade $Rq$ , $Rt$ , $Rz$ , $Rsk$ , $Rku$ .....	160
APÊNDICE II – Perfis de Rugosidade .....	162

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A prática de reparos de descontinuidades presentes em estruturas de aço através da soldagem, principalmente de estruturas de parede espessas e de difícil soldabilidade, é um problema crítico e de elevada complexidade para os setores da indústria de óleo e gás (PAES; 2013). Os custos de manutenção destas estruturas somam valores extremamente elevados na indústria de produção de petróleo, sendo necessário a utilização de processos de limpeza para remoção de hidrocarbonetos para evitar riscos de explosão. Os custos com manutenção de estruturas *offshore*, são em média, vinte vezes maior do que os gastos de manutenções convencionais de estruturas *onshore* (CAIXETA, 2011). Desse modo, a busca por técnicas que visem o aumento da eficiência e da qualidade de reparo é uma medida imperativa.

Nesse contexto, alguns equipamentos mecânicos, como tubulações rígidas, estruturas de plataforma de petróleo, tanques de armazenamento de óleo e água (lastro) de navios de produção de petróleo tipo FPSO (*“Floating, Production, Storage and Offloading”*), casco de FPSO, sistemas de ancoragem, *Turrets* de FPSO, estruturas do *flare*, *lança e acessórios de guindastes* estão sujeitos à formação de descontinuidades estruturais, como a nucleação e a propagação de trincas, causadas em grande medida pela flutuação das tensões ou cargas de fadiga, que podem levar à ruptura de componentes mecânicos e causar sérios acidentes.

Algumas dessas descontinuidades surgem muitas vezes em função das cargas operacionais (carregamentos frequentes e operações *off-loading*) e do conjunto local das condições meteorológicas ou meteo-oceanográficas a que estes equipamentos são submetidos.

Essas solicitações mecânicas são intensificadas pelo movimento das ondas que introduzem cargas significativas nas estruturas, resultando, assim, no surgimento de trincas de fadiga em conexões soldadas (LOTSBERG; LANDET, 2005). A Figura 1.1 mostra a presença de trincas originadas em regiões onde se tem a presença de concentradores de tensão, de dimensões relativamente grandes, nas paredes de tanques de armazenamento em plataformas móveis de produção de petróleo tipo FPSO (PAES, 2013).



Figura 1.1: Trincas de fadiga e discontinuidades encontradas em tanques de navios de produção de petróleo (SOUZA, 2006).

Devido ao surgimento destas discontinuidades em estruturas de aço, muitas vezes é necessária a realização da parada de produção para a execução de procedimentos complicados e onerosos para o reparo destas estruturas.

Dentre os principais fatores contribuintes nas paradas de produção estão os danos causados pela falha de sistemas ou estruturas por fadiga (TEBBET *et al.*, 1988), que levam à necessidade da prática de manutenção corretiva.

Estatísticas apontam que, entre 1970 e 2004, a América do Norte, Europa e Extremo Oriente tiveram o maior número de incidentes e prejuízos da indústria *offshore* do mundo, contribuindo com 80% de um total de aproximadamente US\$34 bilhões, sendo as falhas mecânicas, explosões e incêndios as principais causas do prejuízo (KAISER, 2007).

Na prática, observa-se que para evitar a ocorrência de falhas mecânicas causados pela presença de trincas e descontinuidades, o reparo desses defeitos é principalmente praticado por processos convencionais de soldagem por arco voltaico (MINERALS MANAGEMENT SERVICE, 2000), que constituem-se de técnicas já consagradas para o reparo de estruturas metálicas e de outros componentes mecânicos.

O processo de soldagem a arco voltaico é um processo que visa a união localizada de materiais similares ou não, de forma permanente, baseada na ação de forças em escala atômica semelhantes às existentes no interior dos materiais, sendo o método mais importante de união permanente de peças usadas industrialmente.

Todavia, reparos realizados por soldagem a arco voltaico podem apresentar inconvenientes importantes de natureza metalúrgica, como trincas induzidas pelo hidrogênio, trincas de solidificação, formação de fases frágeis, inclusões de escória e porosidade no cordão de solda. Além disso, para a realização segura da soldagem convencional por arco voltaico é necessário a completa remoção de hidrocarbonetos presentes em locais de grande risco de explosão conhecidas como áreas classificadas (PAES, 2013).

Buscando técnicas inovadoras e mais eficientes para o reparo de estruturas mecânicas, surge como alternativa a técnica de soldagem por atrito. Esse processo ocorre totalmente no estado sólido, o qual evita o surgimento de problemas gerados devido à adsorção de gases, que causam trincas e poros nos cordões de solda. Além disso, a temperatura atingida durante o processo é abaixo da temperatura de fusão dos materiais envolvidos, que elimina os defeitos de solidificação. Juntamente, é desnecessário a utilização de metal de adição, fluxo e/ou gás protetor, que resulta na ausência de fumos. Essa técnica também permite a união de metais dissimilares, de difícil ou até mesmo impossíveis de serem soldados por outros processos, além de promover soldas com formação de uma estreita ZTA (LESSA, 2011).

A soldagem por atrito, portanto, quando comparada com a soldagem por arco voltaico apresenta melhorias na qualidade da solda, além de grande potencialidade de aplicação em sistemas com risco de explosão, como as verificadas em dutos, terminais de bombeamento e estocagem de petróleo (PIRES, 2007).

Atualmente existem diferentes técnicas de reparo por atrito, destacando-se aqui o processamento por atrito de pinos cilíndricos denominada de FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*), e o processamento por atrito de pinos com formato cônico, denominada de

FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*), desenvolvidas em 1990 por Andrews e Mitchel (1990).

Os processos FHPP e FTPW consistem basicamente no preenchimento de um furo não passante por intermédio da introdução 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 produzido na interface, ocorre a diminuição do limite de escoamento dos materiais envolvidos. Com o aumento da temperatura, o pino é mantido em uma condição viscoplástica, promovendo a formação de um fluxo plástico de material a elevada temperatura ao longo da interface.

Os processos FHPP e FTPW são técnicas de reparo que ocorrem totalmente no estado sólido, evitando problemas gerados pela adsorção de gases, tais como porosidades e trincas assistidas pelo hidrogênio. Adicionalmente, o efeito da pressão hidrostática não se apresenta como um fator limitante, como ocorre nas juntas soldadas a arco elétrico, de modo que a soldagem por atrito pode ser realizada dentro d'água em qualquer profundidade (PAES, 2013).

O processo de reparo de trincas por atrito está relacionado basicamente à realização de três etapas fundamentais. Primeiramente é realizada a etapa de furação para a abertura de uma cavidade cilíndrica ou cônica, perpendicular à superfície onde se pretende fazer o reparo. Em seguida, é realizada a etapa de preenchimento, onde o furo é preenchido por intermédio da introdução coaxial de um pino consumível de geometria definida. Nessa etapa, o processamento do pino é mantido até promover o completo preenchimento da cavidade e, conseqüentemente, a sua união metalúrgica com o substrato. Na terceira e última etapa, denominada de etapa de acabamento, é realizada a remoção do material do pino não processado, conferindo a planicidade da superfície original da estrutura reparada.

Dada a importância desse processo para as empresas do setor de produção de óleo e gás, foi desenvolvido recentemente pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPAIV), composto por um cilindro de reparo portátil (Figura 1.2), com capacidade de força axial de 40 kN, capaz de gerar rotações de até 5.000 rpm. O equipamento foi projetado para operar em ambiente submerso (água do mar), até 30 metros de profundidade (3 bar), com massa de aproximadamente 15 kg. Este equipamento foi desenvolvido tendo em vista a portabilização e a aplicação da técnica de reparo por atrito em campo (HWANG, 2010).



Figura 1.2: Cilindro de reparo portátil (HWANG, 2010).

O cilindro de reparo portátil foi projetado para o reparo de estruturas através da compressão (FTPW - *Friction Tapered Plug Welding*) e tração (FPPW - *Friction Pull Plug Welding*) de pinos.

Os resultados obtidos através da técnica de reparo por atrito com a cabeça de reparo portátil são encorajadores, o que despertou o interesse no desenvolvimento de soluções inovadoras de sistemas e componentes destinados à automação da técnica de reparo de trincas por atrito para aplicação em situações de campo.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e validar componentes e acessórios para o cilindro de reparo portátil tornando-o capaz de realizar todas as etapas operacionais do processo de reparo por atrito. Para isso, é necessário o desenvolvimento de mandris e de ferramentas de usinagem especiais destinadas a cada etapa do processo, sendo elas: Etapa de furação, etapa de preenchimento e a etapa de acabamento superficial. Além disso, é fundamental a reestruturação e a modernização de uma unidade hidráulica já existente no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, para que a mesma possa operacionalizar o cilindro de reparo nas diferentes etapas do processo. O conjunto de ferramentas de usinagem, mandris, cilindro de reparo e unidade hidráulica será denominada de Unidade de Processamento de Pinos por Atrito X, ou UPPAX.

Esta dissertação está estruturada em oito capítulos, organizados da seguinte forma:

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o processo de soldagem por atrito, dos tipos de soldagem por atrito que utilizam pinos consumíveis, de alguns equipamentos já desenvolvidos para a exploração da técnica de soldagem por atrito, de problemas do sistema de rotação durante o processamento de pinos por atrito, de problemas de utilizar um cilindro de reparo (UPPAI) para realização do processo de

usinagem do furo cônico e de alguns conceitos de usinagem para melhor compreensão e identificação das terminologias utilizadas neste trabalho.

No Capítulo III é apresentado o projeto de sistemas e acessórios mecânicos destinados à automação de um cilindro de reparo por atrito portátil. Na sequência é apresentado o projeto dos componentes e acessórios da UPPAX e do projeto de modernização e reestruturação da unidade hidráulica. Além disso, é apresentado a fabricação, montagem e comissionamento dos componentes da UPPAX, incluindo a integração do cilindro de reparo na unidade hidráulica.

No Capítulo IV é apresentada a metodologia experimental adotada para a avaliação das etapas do processo FTPW, seguindo a ordem: Apresentação do resumo metodológico, uma completa descrição e especificação dos materiais utilizados nos ensaios, dimensionamentos dos substratos e do pino consumível, definição dos parâmetros de usinagem do furo cônico e dos parâmetros de processamento do pino consumível. Além disso, são descritos os procedimentos adotados para as medições geométricas do furo cônico e das medições dos perfis de rugosidade. Posteriormente, as amostras contendo as cavidades cônicas foram processadas por atrito, de onde foram fabricados os corpos de prova para ensaio mecânico de tração e as amostras para análise macro e micrográfica.

No Capítulo V são apresentados os resultados obtidos concomitantemente com a discussão sobre os mesmos, seguindo a sequência de realização das atividades mencionadas no Capítulo IV.

O Capítulo VI traz as conclusões finais e as contribuições advindas dos resultados experimentais.

O Capítulo VII são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e continuação da projeto.

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

Ao final, há um conjunto de apêndices com informações adicionais e complementares sobre tópicos discutidos ao longo da dissertação e com os dados experimentais levantados no presente trabalho.



## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo trata de alguns temas importantes para a compreensão deste trabalho e para a posterior discussão dos resultados, tais como: soldagem por atrito, tipos de soldagem por atrito com pinos consumível (etapas do processo de reparo de trincas por atrito), apresentação de alguns equipamentos desenvolvidos para a exploração da técnica de reparo por atrito, relatos de problemas com o travamento do sistema de rotação durante o processamento do pino consumível e problemas identificados durante a usinagem de furos cônicos utilizando um cilindro de reparo. Por fim, é apresentado alguns conceitos de usinagem para melhor compreensão durante a leitura dessa dissertação.

#### **2.1. Soldagem por Atrito**

##### *2.1.1. Introdução*

A técnica de soldagem por atrito rotacional é conhecida desde o final do século XIX, tendo sido comercialmente desenvolvida pela União Soviética (VILL, 1962). Na década de 50, cientistas da ex-União Soviética e da ex-Tchecoslováquia lideraram as pesquisas e desenvolvimentos em soldagem por atrito. Nessa época, a técnica de soldagem por atrito havia sido aplicada à indústria para recuperação de componentes desgastados. Autores mencionam que o emprego da técnica em escala industrial ocorreu pelo ano de 1956, através da patente do russo A.I.Chudinov (MACEDO, 2011). Durante este período, foi desenvolvido o primeiro equipamento de soldagem por atrito na ex-União Soviética, pela

VNIIESO (Instituto de Pesquisas Científicas para Equipamentos de Soldagem) (MEYER, 2003).

A técnica de soldagem por atrito é um processo de união em estado sólido onde a junta soldada é obtida exatamente no local onde ocorre o movimento relativo entre as partes, submetendo as peças envolvidas, ou apenas uma delas, a elevadas cargas de compressão e de forjamento. Esta técnica se baseia na transformação da energia mecânica fornecida a uma das peças em energia térmica, proveniente do calor gerado pelo atrito das superfícies em contato (AWS, 1991). A Figura 2.1 ilustra o método de soldagem por atrito rotativo (*Direct Drive* ou *Continuous Drive*), onde uma das partes permanece fixa, enquanto a outra gira em torno do eixo de revolução (Fig. 2.1.a). Em seguida, as peças são colocadas em contato e uma força axial é aplicada a uma das peças, iniciando o processo (Fig. 2.1.b). O atrito entre as superfícies produz o aquecimento, levando a uma temperatura na qual os materiais em contato se plastificam. Nesta etapa é formado um colar incandescente (*flash*), rico em impureza (lubrificantes, filmes de óxidos, inclusões, etc.), presentes entre as superfícies em contato (Fig. 2.1.c). No final do processo a rotação é interrompida e uma força axial de maior intensidade é aplicada objetivando consolidar e aumentar a adesão da junta formada (Fig. 2.1.d). Nessa etapa, ocorre a difusão atômica na região de interface, formando uma forte ligação metalúrgica entre as partes (ELMER, 1993).

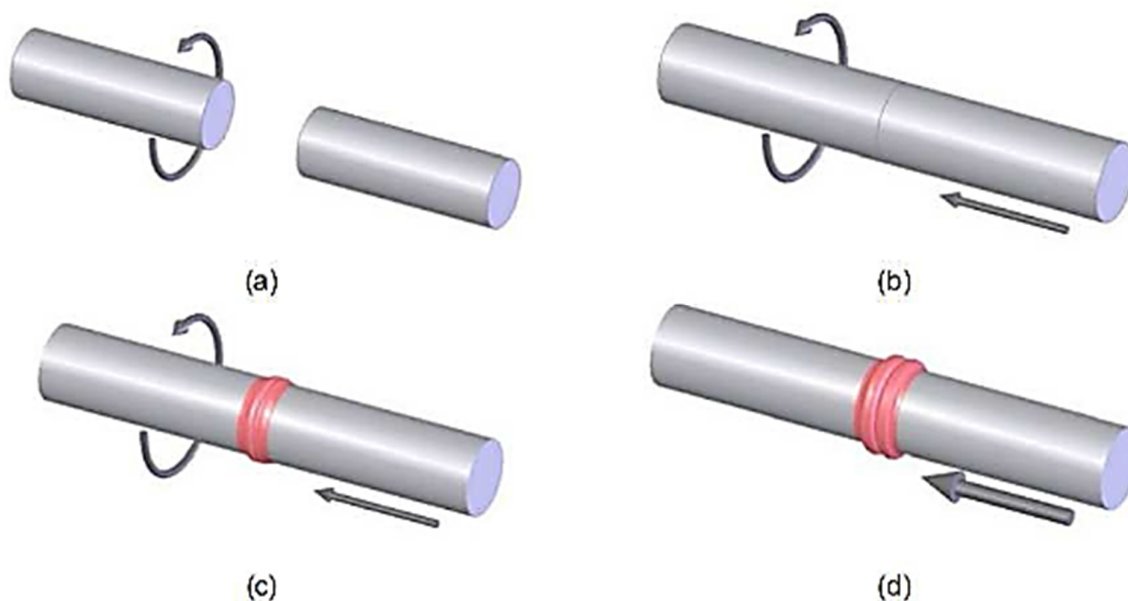


Figura 2.1: Desenho esquemático do processo de soldagem por atrito convencional (*Direct Drive* ou *Continuous Drive*) (AWS 1991 e PINHEIRO 2008): a) Rotação de uma das peças; b) Aplicação da Força de Compressão; c) Início da soldagem; d) Fim da soldagem.

### *2.1.2. Geração de Energia e Liberação de Calor*

O processo termomecânico da soldagem por atrito está relacionado ao contato entre as asperidades superficiais dos materiais envolvidos. Durante a aproximação das superfícies metálicas, o contato físico inicial ocorre entre um pequeno número de asperidades. Nesse momento, a área de contato real é representada apenas por alguns pontos e as ligações, quando formadas, oferecem baixa resistência mecânica. Quando uma carga extrema é imprimida sobre esse contato, as asperidades penetram com maior intensidade. Quando as peças envolvidas apresentam durezas diferentes, pode haver maior penetração do corpo de maior dureza em relação ao de menor dureza.

Ao submeter superfícies em contato a um movimento tangencial relativo, as deformações entre as asperidades são intensificadas e somadas aos fenômenos de cisalhamento. Desta forma, surgem grandes níveis de deformação plástica localizada em uma camada superficial de pequena espessura. A resistência mecânica a estas deformações depende da resistência mecânica dos materiais envolvidos. (PAES, 2013)

A energia mecânica consumida durante a soldagem por atrito é transformada em energia térmica, devido ao calor gerado pela força de atrito, forças de adesão e às deformações plásticas que surgem durante o processo. A fonte de calor é mantida através de uma camada ativa de material viscoso de baixa espessura que fica bem próximo da superfície em contato.

O processo de soldagem por atrito apresenta seis variáveis, sendo: Velocidade de rotação ( $n$ ); força axial de soldagem ( $F$ ); torque resistivo ( $Mt$ ); tempo de processamento ( $t$ ); potência consumida de soldagem ( $N$ ) e o comprimento de deslocamento axial entre as partes a partir do contato entre elas ( $\Delta l$ ), também denominada de comprimento de queima.

### *2.1.3. Parâmetros de Soldagem que Influenciam a Qualidade Final da Junta Soldada*

Os principais parâmetros do processo de soldagem por atrito, como mencionado anteriormente, são: força axial, velocidade de rotação, taxa de queima, tempo de aquecimento, tempo de desaceleração e força de forjamento (PIRES, 2007). Os três primeiros parâmetros são os mais importantes para o processo, sendo eles descritos abaixo:

**Força axial:** A força axial é um parâmetro de significativa relevância para o processo de soldagem por atrito. Este parâmetro influencia diretamente no controle do gradiente de

temperatura da junta soldada, na potência requerida e o comprimento de queima (PIRES, 2007). A carga aplicada deve ser mantida em valores que permitam manter as superfícies em íntimo contato, de forma a minimizar a presença de partículas contaminantes na região de interface, além de romper o filme de óxidos para, então, promover a ligação metálica (AWS, 1991). Valores muito elevados da força axial podem levar a dificuldades no controle do processo, devido ao aumento das taxas de deformação plástica na região de contato e, conseqüentemente, a uma elevada taxa de consumo do material (ELLIS, 1972). A força axial atua de maneira preponderante nos tempos de preenchimento, ou seja, quanto maior for esse parâmetro, menor será o tempo de processamento, propiciando, além disso, a diminuição da energia total de soldagem, em decorrência dos curtos tempos de processamento (PIRES, 2007). Para a obtenção de uma junta soldada com boas propriedades mecânicas é recomendado o emprego de forças axiais mais elevadas, assim, obtêm no final do processo, uma microestrutura refinada, evitando a formação de ferrita de Widmanstätten, proporcionando um relativo ganho nas propriedades de dureza, tração e tenacidade (AWS, 1991).

**Velocidade de rotação:** Este parâmetro apesar de possuir uma grande faixa de variação, não provoca perturbações sensíveis na qualidade da solda (AWS, 1991). Segundo Vill (1962 citado por MEYER, 2002) existem velocidades de rotação ótimas para cada combinação de materiais e aplicações. Para velocidades de rotação mais altas, as interações entre as asperidades são acompanhadas por uma ação de polimento entre as superfícies em atrito. Este comportamento pode estar relacionado às condições viscoplástica do material interfacial, que ocasiona um maior tempo de aquecimento para estabelecer a condição plástica ideal, o qual favorece a propagação de calor e o aumento da ZTA (Zona Termicamente Afetada). Velocidades rotacionais mais elevadas levam ao aumento do volume de material aquecido e, conseqüentemente, à perda de propriedades mecânicas, tais como dureza e limite de resistência mecânica. Este fato decorre do maior tempo de soldagem e do maior tempo de permanência sob efeito de elevadas temperaturas, resultando na formação de grãos maiores e a formação de uma microestrutura mais grosseira. Para velocidades rotacionais mais baixas, tem-se um menor aporte térmico e, conseqüentemente, um menor aquecimento na região periférica das superfícies em atrito. Além disso, rotações mais baixas podem acarretar em elevadas taxas de resfriamento e, conseqüentemente, a formação de uma microestrutura com dureza elevada. Segundo Paes (2013), a faixa de velocidade tangencial recomendada para processo de soldagem por atrito difere entre a escola russa e ocidental. Os valores ótimos para aços C-Mn são entre 1 a 2 m/s de acordo com a escola europeia oriental (Rússia e Ucrânia) (VILL, 1962 e LEBEDEV;

CHERNENKO, 1992) e de 2,5 a 3,5 m/s de acordo com a escola ocidental e Japão (ANDREWS, 2005).

**Taxa de queima:** Este parâmetro mede a velocidade de deslocamento axial devido ao consumo do comprimento das peças em contato. Além de ser um parâmetro utilizado no controle do ciclo de soldagem, ou seja, que define o início e o fim do processo, é também um parâmetro que influencia na qualidade de união. Segundo Lebedev e Chernenko (1992), elevadas forças axiais e baixas velocidades de rotação propiciam taxas de queima mais elevadas. Isso ocorre devido à maior interação entre as superfícies em contato, resultando em um maior torque e, conseqüentemente, uma maior taxa de queima. O aumento das taxas de queima tendem a desenvolver maiores valores de limite de resistência, devido ao menor tempo de soldagem, que impõe maior taxa de resfriamento na junta soldada (ELLIS; NICHOLAS, 1968). Segundo Andrews e Beamish (2005), o aumento do comprimento de queima reflete diretamente no aumento do tempo de soldagem e da energia total consumida durante o processo, exibindo pouca influência, entretanto, na taxa média de geração de calor. Um incremento no comprimento de queima, resulta no maior consumo de material e maior tempo de soldagem, resultando na formação de microestrutura mais grosseira.

#### *2.1.4. Fases do Processo*

A divisão do processo de soldagem por atrito é uma das formas de descrever os ciclos de soldagem por atrito e os mecanismos relacionados ao processo. Na literatura a divisão mais comum é a de quatro fases, proposta por Neumann e Schober, Pauly, Böhme e Hermann, Nentwig (citado por MEYER 2002). A Figura 2.2 mostra as fases de uma soldagem por atrito convencional, mostrando as quatro fases presentes no processo.

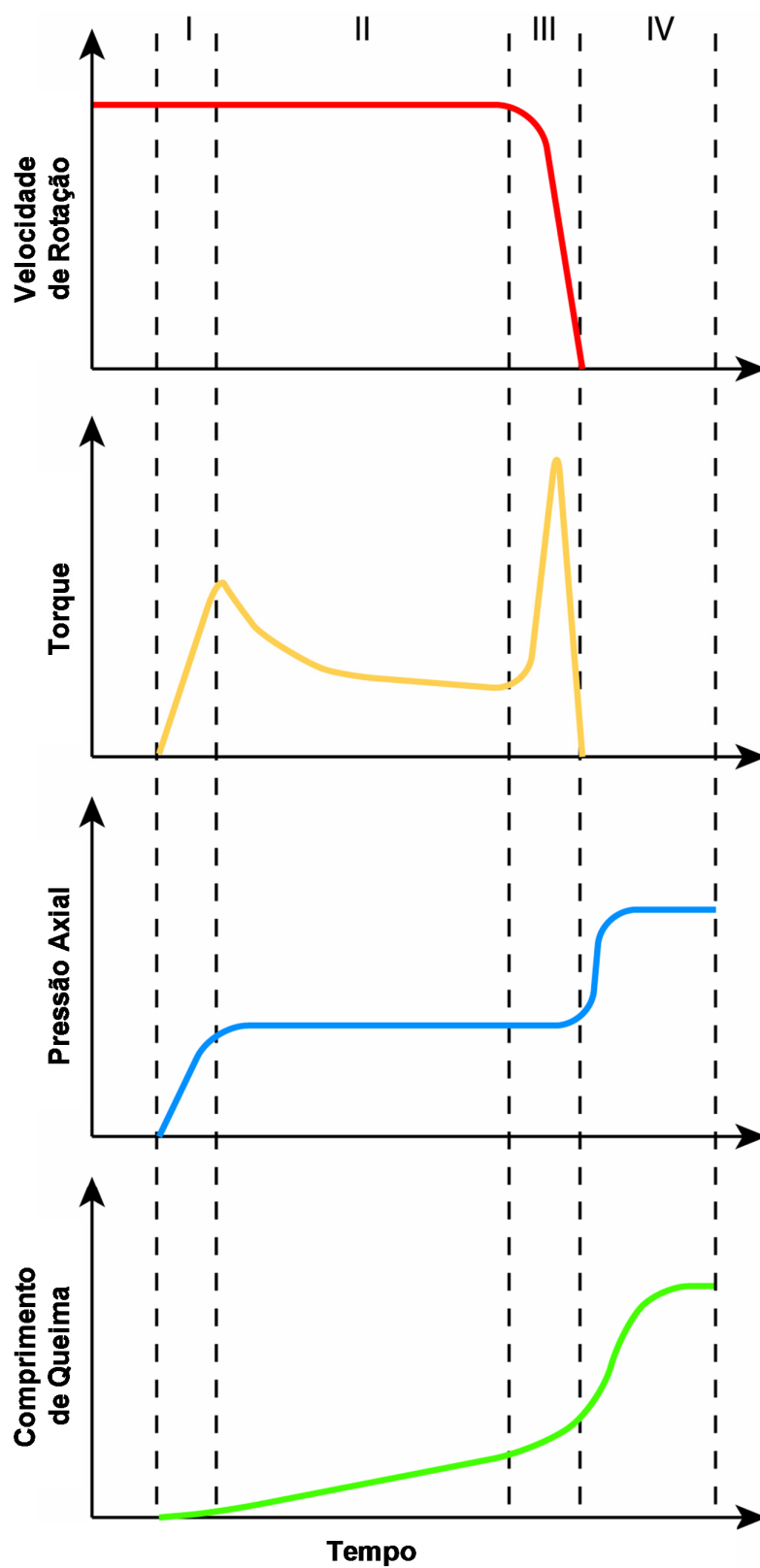


Figura 2.2: Divisão das fases durante processamento de pinos por atrito (adaptado de MEYER, 2004).

Na primeira fase (Fase I), denominada de fase de atrito, ocorre a interação entre as superfícies em contato. Nesta fase a área de contato superficial é pequena, e uma severa deformação plástica é imposta devido à aplicação de uma elevada carga axial (MEYER, 2004), resultando no “alisamento ou planificação” das superfícies em contato, seguida por eventos de microadesão (CROSSLAND, 1971). Como resultado desta deformação, novas superfícies são expostas, levando a uma condição de deslizamento a seco (“sem lubrificação”). O aquecimento local na interface surge devido ao cisalhamento das junções adesivas, formando filmes de cisalhamento, que liberam energia na forma de calor. A temperatura pode chegar a valores muito próximas da temperatura de fusão do material. Segundo Crossland (citado por MEYER 2002), durante o processamento o calor é dissipado levando à plastificação do material, resultando na destruição das camadas de óxidos e remoção das superfícies contaminadas devido à dinâmica do processo e às altas forças radiais, fenômeno este conhecido como hidroextração. 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 e CHERNENKO, 1992). A extração das camadas de óxidos e lubrificantes deixa a superfície limpa, aumentando consideravelmente o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, o torque.

Na segunda fase (Fase II), denominada fase de aquecimento, ocorre o aumento da temperatura do material plastificado na forma de anel obtido na fase I. Esse material altamente plastificado é, então, conduzido para zonas de menor temperatura da área de atrito, e, devido ao rápido resfriamento do material, um maior atrito é novamente produzido nestas zonas em particular e a área em forma de anel é ampliada em direção ao centro rotacional (NICHOLAS, 1995). A temperatura do material na área de atrito, diminui da zona periférica para a zona central, devido à redução da deformação radial, causada pela menor velocidade relativa. A temperatura do processo é estabilizada quando o efeito de autoajuste é mantido. Este efeito é explicado da seguinte forma: com o aumento da temperatura, o material torna-se cada vez mais plástico, reduzindo o torque resistivo. O material plastificado apresenta baixa resistência à deformação, sendo facilmente comprimido para fora das superfícies em atrito (BLAKEMORE, 1999).

À medida que a temperatura do material e a quantidade de material comprimido aumentam, ocorre a redução da resistência mecânica, sendo o material direcionado para fora da área de atrito formando uma rebarba, denominada *flash*. O processo se repete à medida que a espessura da camada plastificada diminui, fazendo com que as áreas frias entrem em atrito, aquecendo e formando regiões altamente plastificadas. O processo

continua enquanto houver equilíbrio de temperatura e zona plastificada, resultando em material comprimido para formação do *flash*. O equilíbrio destas ações, resulta na saturação do calor na área de atrito e zonas periféricas, fazendo com que o campo de temperatura estabilize, reduzindo as superfícies em contato e o torque resistivo devido o atrito. Deste ponto em diante tem-se a taxa de queima praticamente constante. A Fase II termina quando o processo alcança o comprimento de queima pré-ajustado. (MEYER, 2004).

Na terceira fase (Fase III), denominada fase de frenagem ou desaceleração, ocorre a diminuição da velocidade rotacional, resultando no aumento da resistência ao cisalhamento devido à redução da taxa de deformação do material, e, conseqüentemente, o aumento considerável do torque, atingindo seu segundo pico (CROSSLAND, 1971). Quando a rotação se aproxima de zero, a geração de calor é reduzida bruscamente, resultando na redução da temperatura da junta e, conseqüentemente, no surgimento das ligações metálicas para a formação da junta soldada. Após a interrupção da rotação, inicia-se o processo de recristalização do material e a formação de uma microestrutura refinada (PINHEIRO, 2008 e PAES, 2011).

Na quarta fase (Fase IV), denominada fase de adesão, é aplicada uma força de forjamento que promove a formação de uma união homogênea ao longo de toda a seção da junta. Vale lembrar que o processo de união metálica inicia-se na fase de aquecimento (Fase II), porém a união não é homogênea ao longo da superfície de contato (VILL, 1959, citado por MEYER, 2004). Apesar de ser aceito o fato de o forjamento melhorar significativamente as propriedades mecânicas da solda, alguns experimentos mostram soldas de qualidade obtidas sem o aumento da força após cessada a rotação (ELLIS, 1972). Com a aplicação da força de forjamento, ocorre um aumento significativo do comprimento de queima, e qualquer material plastificado existente é extrudado para fora da região de interface (CROSSLAND, 1971). À medida em que a junta soldada começa a resfriar, inicia-se o processo de recristalização estática, recuperação e um processo lento de fluência. No final do processo, as tensões internas são consideravelmente eliminadas, resultando na melhora das propriedades mecânicas, como resistência mecânica e tenacidade da junta soldada (PAES, 2011).



### 2.1.5. Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito

A seguir são apresentadas as vantagens e as limitações do processo de soldagem por atrito em relação ao processo de soldagem convencional a arco elétrico, citadas por: Ellis (1972), Nicholas (1984), Blakemore (1993 e 1999), Pinheiro (2001), Meyer (2003) e Pires (2007).

➤ **Vantagens do processo:**

- Não é necessário a utilização de fluxo e/ou gás protetor;
- Na maioria dos casos, não é necessária a realização do processo de limpeza das superfícies, uma vez que o processo é considerado autolimpante, pois tende a destruir, deslocar e, finalmente, remover camadas superficiais contendo impurezas, os quais ficam misturadas no material extrudado (*flash*);
- O processo é considerado limpo, sem a emissão de gases tóxicos nocivos à saúde do operador, além de ser um processo seguro devido à menor quantidade de faúlhas e radiação, não oferecendo risco com problemas elétricos envolvendo altas tensões;
- Formação de uma estreita ZTA;
- O processo pode ser automatizado, possibilitando a produção seriada de soldas com elevado controle de qualidade, além do equipamento poder ser operado a longas distâncias, adequado para aplicação em áreas classificadas e de difícil acesso pelo operador;
- Não requer operadores com habilidades manuais específicas;
- O processo ocorre dentro da fase sólida, com a completa ausência de problemas associados a fenômenos de solidificação, tais como: porosidade, segregação e adsorção de Hidrogênio;
- Permite a união de metais dissimilares, que são difíceis ou impossíveis de serem soldados através de outros processos;

- O processo preenche alguns requisitos para ser implementado para o uso em atmosferas explosivas, sendo atrativa sua aplicação na indústria petrolífera, além da possibilidade da realização de soldas sem a necessidade de paradas de produção;
- Na grande maioria dos casos, a resistência da solda é superior à dos metais de base.

➤ **Limitações do processo:**

- É necessário um sistema com alta rigidez de fixação devido às elevadas cargas axiais aplicadas (axial e transversal);
- É necessário que pelo menos uma das partes a serem soldadas seja simétrica em um de seus eixos;
- O processo é limitado a juntas de topo planas ou angulares (cônicas);
- O material de uma das partes deve ser passível de 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. Tipos de Soldagem por Atrito com Pinos Consumíveis**

A seguir são citados os seguintes tipos de processos de soldagem por atrito mencionados pela AWS (1991)<sup>1</sup>, COLLETA (2001)<sup>2</sup>, MEYER (2003)<sup>3</sup>, NICHOLAS (2003)<sup>4</sup>, DOS SANTOS (2005)<sup>5</sup>, PAN (2005)<sup>6</sup>, AMANCIO (2007)<sup>7</sup>, JAMSHIDINIA (2008)<sup>8</sup> e HUANG (2009)<sup>9</sup>. Na sequência, os processos FHPP, FTPW, FPPH, FTSW e soldagem de pino por atrito são descritos com mais detalhes por serem as técnicas correlacionadas a este trabalho.

➤ **Tipos de processos de soldagem por atrito:**

- ✓ ***Friction Hydro Pillar Processing – FHPP***<sup>3</sup>;
- ✓ ***Friction Tapped Plug Welding – FTPW***<sup>4</sup>;
- ✓ ***Friction Pull Plug Welding – FPPW***<sup>2</sup>;
- ✓ ***Friction Tapered Stitch Welding – FTSW***<sup>4</sup>;
- ✓ **Soldagem de Pinos Roscados por Atrito (*Friction Stud Welding*)**<sup>5</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito por Costura (*Friction Stitch Welding*)<sup>3</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito por Arraste Contínuo ou por Inércia (*Rotary Drive Friction Welding*)<sup>1</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito Linear (*Linear Friction Welding*)<sup>5</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito Radial (*Radial Friction Welding*)<sup>1</sup>;
- ✓ Deposição por Atrito (*Friction Surfacing*)<sup>4</sup>;
- ✓ Endurecimento por Transformação por Atrito (*Friction Transformation Hardening*)<sup>4</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito com Costura Contínua (*Friction Seam Welding*)<sup>4</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito com Mergulho (*Friction Plunge Welding*)<sup>4</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito com Terceiro Corpo (*Third-body Friction Welding*)<sup>4</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito Linear/Angular (*Linear/Angular Friction Welding*)<sup>4</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito Orbital (*Orbital Friction Welding*)<sup>4</sup>;
- ✓ Brasagem por Atrito (*Friction Brasing*)<sup>4</sup>;
- ✓ Extrusão por Atrito (*Friction Extrusion*)<sup>4</sup>;
- ✓ Deposição por Atrito e Mistura (*Friction Stir Cladding*)<sup>8</sup>;
- ✓ Rebitagem por Atrito (*Fricriveting*)<sup>7</sup>;
- ✓ União por Atrito por “Bit” (*Friction Bit Joining*)<sup>9</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito por Ponto e Mistura Mecânica (*Friction Spot Welding*)<sup>6</sup>;
- ✓ Soldagem por Atrito por Ponto e Mistura Mecânica em Translação (*Friction Stir Spot Welding*)<sup>5</sup>.

### 2.2.1. Processo FTPW e FHPP

O processo “*Friction Tapered Plug Welding*” (FTPW) é uma derivação do processo de soldagem por atrito apresentada por Andrews e Mitchell em 1990 e desenvolvida pelo TWI (*The Welding Institute*), com o objetivo de realizar reparos de estruturas *offshore* em condições subaquáticas (PIRES, 2007). Andrews e Mitchell demonstraram a viabilidade do reparo de trincas em aços C-Mn, preenchendo cavidades passantes usando a técnica FTPW ao ar e dentro d’água (ANDREWS, 1990). Os resultados obtidos foram promissores, motivando novos projetos de pesquisa para o desenvolvimento de tecnologias, objetivando o estudo das variantes do processo no reparo de cavidades não passantes (NICHOLAS, 1995), além de projetos de automatização da técnica no intuito de atender a indústria do setor de óleo e gás.

A técnica FTPW consiste em remover o metal defeituoso através da furação e utilizar a soldagem por atrito para o preenchimento de uma cavidade cônica com um pino cônico consumível. A Figura 2.3 ilustra as etapas do preenchimento FTPW.

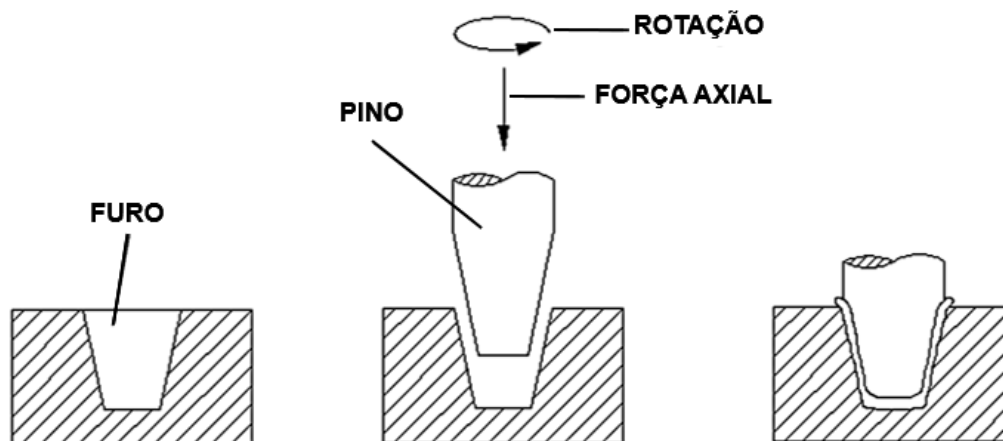


Figura 2.3: Ilustração das etapas do processo FTPW (HWANG, 2010).

O processamento de pinos por atrito conhecido como FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*) é um processo derivado da técnica FTPW (LESSA, 2011), desenvolvida pelo TWI na década de 90, o qual foi patenteado por Thomas e outros em 1993 (THOMAS e NICHOLAS, 1993) (ver Fig. 2.4). Esse processo de soldagem de pinos por atrito foi desenvolvido para unir e reparar estruturas metálicas ferrosas ou não ferrosas (THOMAS e NICHOLAS, 1996).

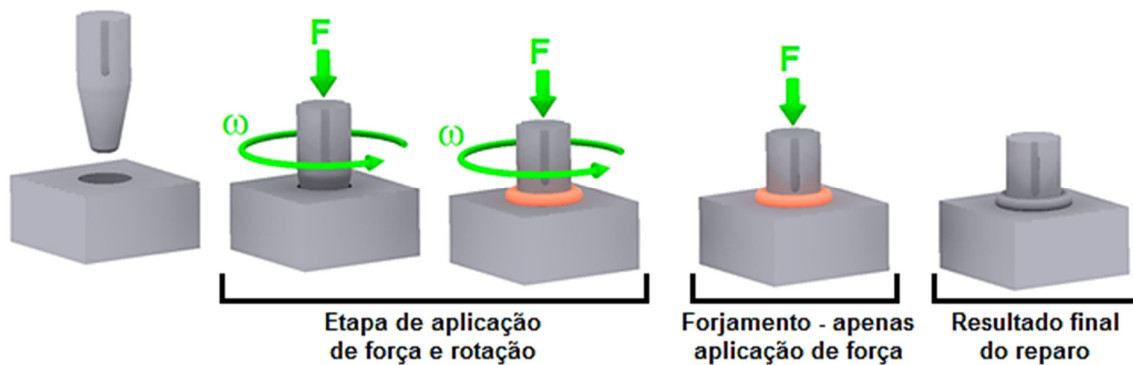


Figura 2.4: Esquema ilustrativo do processo FHPP (FREITAS, 2014).

Para a realização do processo FHPP/FTPW é necessária a realização de três etapas fundamentais: Primeiramente, tem-se a **Etapa de Furação**, onde é usinado um furo cego na estrutura na região a ser reparada, sendo a geometria do furo cilíndrica para a realização do processo FHPP ou cônica para a realização do processo FTPW. Em seguida, é executada a **Etapa de Preenchimento**. Nesta etapa ocorre a soldagem por atrito, em que um pino consumível de formato cilíndrico (FHPP) ou cônico (FTPW) é rotacionado e simultaneamente introduzido coaxialmente, com elevada força axial de compressão contra o fundo do furo pré-usinado na estrutura, a qual é mantida em um sistema de fixação rígido e estático. Devido ao contato estabelecido entre o pino e a superfície do fundo da cavidade é gerado calor pela ação do atrito, resultando no aquecimento de ambas as superfícies. Este aquecimento causa a redução do limite de escoamento de ambos os materiais envolvidos (pino e cavidade). Esse efeito térmico acarreta a formação de um fluxo visco-plástico em alta temperatura, resultante das forças existentes, que se propaga axialmente ao longo da seção do consumível (pino) ou pela interface pino-cavidade, promovendo assim o completo preenchimento do furo (PIRES, 2007). Ao final do processo, a rotação é interrompida e a força axial é mantida ou até mesmo incrementada por um certo intervalo de tempo, para a realização da fase de forjamento, concluindo o processo de soldagem. Na etapa final, denominada neste trabalho de **Etapa de Acabamento** ou **Fresamento**, é realizada a usinagem do material do pino não processado e do material deformado plasticamente em forma de anel (*flash*), no intuito de obter a planicidade da superfície original.

Na etapa de preenchimento, a medida que o pino toca o fundo da cavidade é produzido um fluxo viscoplástico ao longo de planos de cisalhamento na base do consumível. Através da combinação da força axial e velocidade rotacional, os planos de cisalhamento são induzidos a mover na direção axial do consumível, de forma que o material de adição entre em contato com a parede interna da cavidade promovendo o

preenchimento do furo e conseqüentemente a união metalúrgica do metal base e do pino consumível. A Figura 2.5 ilustra o processamento de pinos por atrito FHPP.

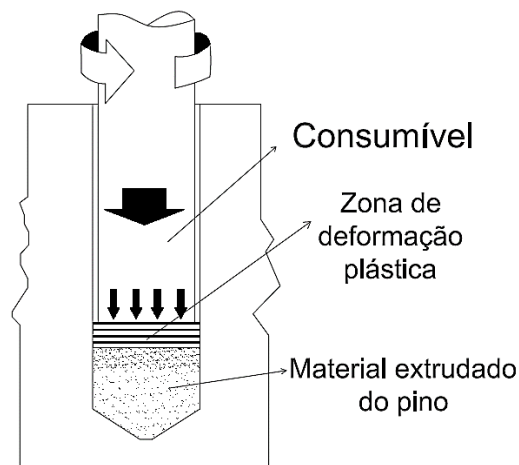


Figura 2.5: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito FHPP (NICHOLAS, 1999).

O furo com perfil cilíndrico (FHPP) é em geral preferido para as condições de reparo em estruturas de parede espessa, enquanto que o perfil cônico (FTPW) tende a ser mais usual para estruturas de parede mais finas. Utilizar o perfil cônico para o reparo de trincas de grande espessura, ter-se-ia excessivo aumento da área de contato entre pino e o bloco. Isso impactaria na utilização de equipamentos de maior potência, inviabilizando a utilização do processo em campo, pela dificuldade de transporte do equipamento até o local de trabalho (PAES, 2013).

Segundo Meyer (2003), a geometria cônica favorece a decomposição da força axial em uma componente normal à interface pino/cavidade, que intensifica as condições de fluxo plástico e as uniões metalúrgicas. As propriedades mecânicas, microestruturais e as características metalúrgicas são dependentes das diferenças na duração do processo de soldagem e do ciclo termomecânico. Além disso, o perfil cônico favorece a formação de juntas soldadas com cargas axiais mais elevadas, que intensifica a qualidade da união, sem contudo ocasionar um colapso por flexão do pino promovido por um aquecimento excessivo (MEYER, 2003).

Durante o processamento, a região de interface pino/bloco sofre um significativo trabalho a quente, resultando na formação de uma microestrutura refinada e tratada termicamente (BLACKEMORE, 1999), caracterizada pela formação de ferrita acicular e martensita, oriunda dos resultados das altas taxas de resfriamento, que resulta em maiores

durezas próximos a interface. A microestrutura na região da ZTA no bloco é caracterizada pela presença de ferrita alotriomórfica (ferrita de contorno de grão) e ferrita de Widmanstätten mais grosseira que cresce para o interior do grão a partir da ferrita alotriomórfica (DOS SANTOS, 2013). A Figura 2.6 mostra a variação microestrutural característica encontrada em um pino ABNT 1010 e um bloco ASTM A36 após reparo por atrito.

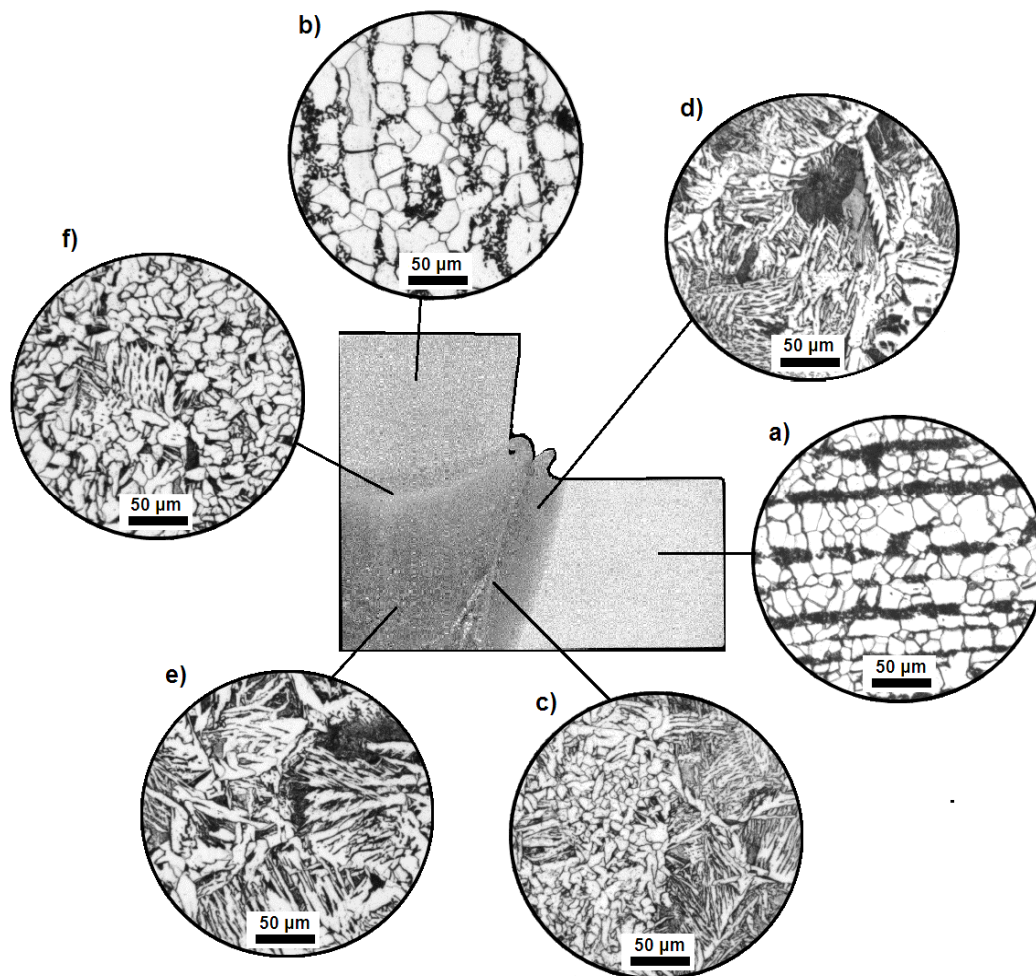


Figura 2.6: Variação microestrutural característica do reparo por atrito, usando como pino consumível o aço ABNT 1010 e uma chapa de aço ASTM A36 (DOS SANTOS, 2013).

As regiões em destaque na Fig. 2.6 são identificadas como:

- (a) e (b) Material base da chapa e do pino;
- (c) Linha de união entre pino e chapa;
- (d) Zona Termicamente Afetada (ZTA) na chapa;
- (e) Região Termomecanicamente Afetada;
- (f) Material forjado com grãos finos na região de transformação.

### 2.2.2. Processo FPPW (*Friction Pull Plug Welding*)

A técnica conhecida como *Friction Pull Plug Welding* (também conhecida como FPW – *Friction Plug Welding*) é uma derivação do processo de reparo de trincas por atrito FHPP, patenteada por TAKESHITA *et. al.* (2001). O processo ocorre no estado sólido onde um pino é rotacionado e simultaneamente tracionado contra uma cavidade pré-usinada na estrutura.

O processo FTPW e FPPW se diferem apenas na força aplicada no pino, ou seja, enquanto a primeira técnica comprime o pino consumível contra a cavidade presente na estrutura, a outra técnica traciona o pino contra uma cavidade cônica, estando o diâmetro maior da cavidade do lado oposto à cabeça de reparo. Os dispositivos de fixação do cilindro de reparo para realização da técnica FPPW são mais simples, uma vez que as forças reativas são de compressão. A Figura 2.7 ilustra as etapas da técnica FPPW.

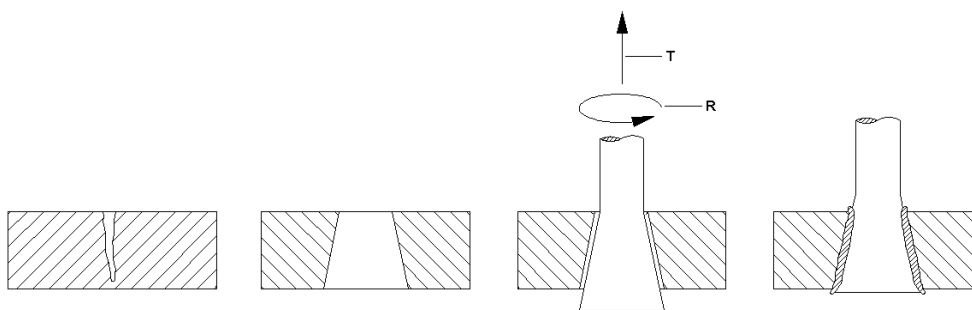


Figura 2.7: Ilustração das etapas do processo FPPW (HWANG, 2010).

O processo FPPW é utilizado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para o fechamento do furo terminal deixado pelo processo FSW (*Friction Stir Welding*) em ligas de Alumínio (Fig. 2.8).

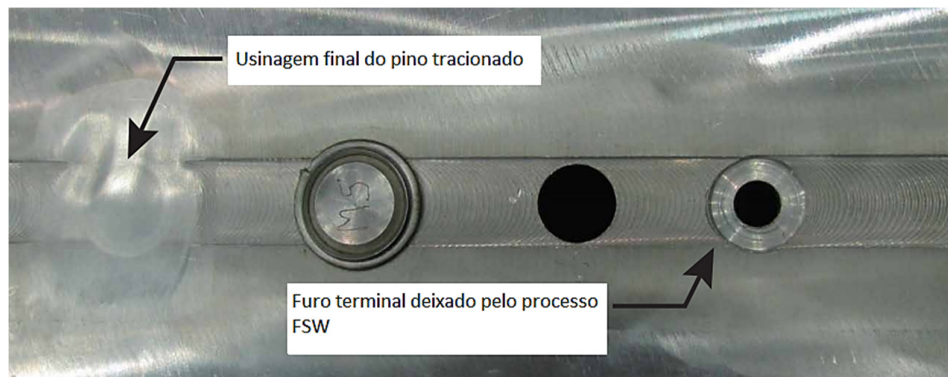


Figura 2.8: Operação do processo de soldagem por atrito FPPW utilizado na indústria aeroespacial. (<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120014529.pdf>, acesso dia 05/12/2015).



Hwang (2010) desenvolveu um mandril com sistema de fixação com rosca para a realização do processo FPPW em estruturas de aço. O mandril desenvolvido não funcionou adequadamente, uma vez que os pinos rompiam por cisalhamento na região da rosca. O autor concluiu que o sistema de rosca seria inviável para fixação dos pinos consumíveis. No Capítulo 3 deste trabalho será detalhado o desenvolvimento de um mandril com uma nova concepção de sistema de fixação do pino consumível.

### 2.2.3. Processo FTSW (*Friction Tapered Stitch Welding*)

O processo de costura por atrito ou FTSW é uma variação do processo FHPP/FTPW. Quando uma descontinuidade presente no material progride, causa a formação e o crescimento de trincas, resultando no surgimento de defeitos superficiais na estrutura. O processo FTSW nada mais é do que a própria técnica potencializada para o reparo de trincas por atrito. Esta consiste na realização de sobreposições de uma sequência de processamentos de pinos por atrito, de modo a reparar os defeitos planares presentes em estruturas mecânicas, efetivando-se, assim, o completo preenchimento ou restauração da região de interesse. Esta operação pode ser observada na Fig. 2.9.

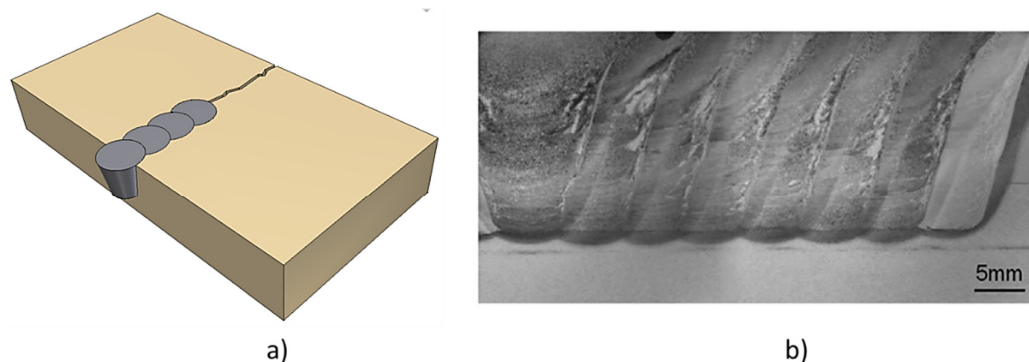


Figura 2.9: Processo de costura por atrito FTSW. a) Princípio do processo de costura por atrito (HWANG, 2010). b) Costura realizada com equipamento de baixo torque pertencente ao HZG (PINHEIRO, 2008).

### 2.2.4. Soldagem de Pinos Roscados por Atrito (*Friction Stud Welding*)

O processo de soldagem de pinos roscados, consiste de uma técnica em que um parafuso prisioneiro é submetido a elevada rotação e ao mesmo tempo uma força axial é aplicada sobre o pino contra uma superfície de aço. Devido o atrito, as superfícies em

contato geram calor, até atingir uma temperatura que resulta na deformação plástica sob pressão na região de interface. As impurezas são expelidas para as regiões periféricas formando uma união metalúrgica.

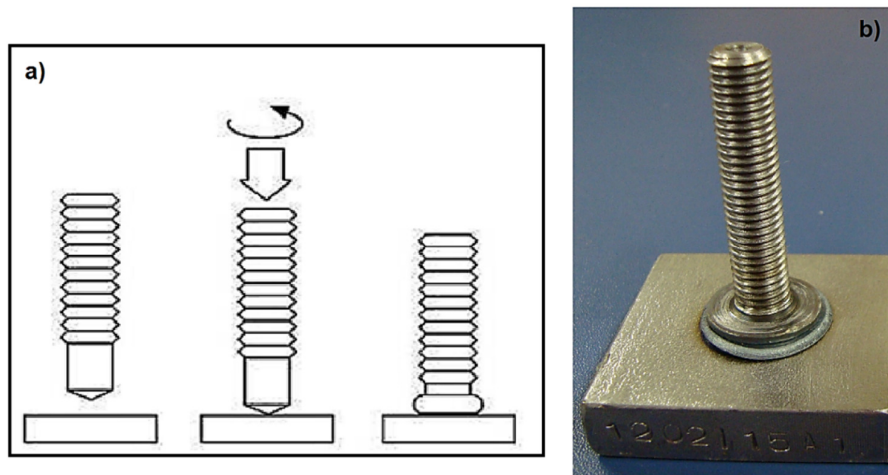


Figura 2.10: a) Ilustração do processo de solda por atrito de pinos roscados em superfícies planas (HWANG, 2010); b) Parafuso prisioneiro soldado por atrito em um substrato de aço.

### 2.3. Equipamentos Desenvolvidos para a Exploração da Técnica de Soldagem por Atrito

A linha de pesquisa na área de soldagem por atrito foi iniciada em 2003 nas Universidades Federais do Brasil (PAES, 2013). Desde então, foram desenvolvidos vários equipamentos para realização de ensaios em laboratório. Como destaque deste trabalho, foi desenvolvido em projeto mais recente, um cilindro de reparo portátil, capaz de realizar os processos de soldagem FHPP e FTPW. Esse projeto foi um passo dado objetivando levar a tecnologia de soldagem por atrito para o reparo de estruturas no campo. Assim como o cilindro de reparo, foram desenvolvidos dispositivos de ancoragem para o reparo de estruturas planas e dutos de petróleo (HWANG, 2010).

A seguir são descritos equipamentos desenvolvidos para a realização de processos de reparo por atrito, dentre eles, equipamentos de uso comercial e outros de laboratório utilizados para a exploração da técnica. O equipamento de reparo por atrito portátil (UPPAIV), o qual sustentou a continuidade desse trabalho, é apresentado no inciso “D” do item 2.3.2.

### 2.3.1. Equipamento Comercial Desenvolvido para Reparo de Estruturas por Atrito

A empresa escocesa *Circle Technical Services Ltd.* com o apoio da GKSS (*Forschungszentrum Geesthacht GmbH*) foi a pioneira no desenvolvimento de um cilindro portátil subaquático com propósito para reparos por atrito de estruturas em campo. O equipamento denominado HMS 3000 possui 600 mm de comprimento e 160 mm de diâmetro e é acionado hidráulicamente com uma potência de 50 kW, capaz de aplicar uma força axial de até 40 kN e rotação de até 8000 rpm (MEYER, 2003). A peça rotativa é fixada no equipamento através de um conector. O ciclo de soldagem é controlado eletricamente, e as funções da máquina são acessadas através de um monitor (MEYER, 2001).

O equipamento HMS 3000 é constituído por uma unidade hidráulica, um carretel de mangueiras e um container de solda por atrito. A Figura 2.11 mostra o equipamento HMS 3000.

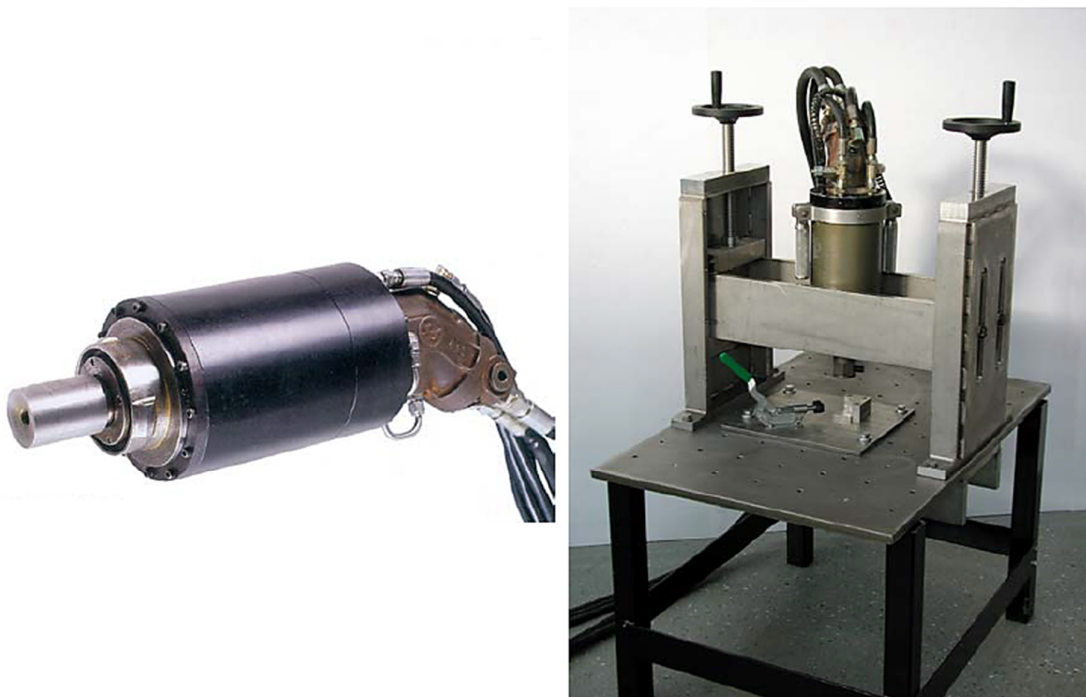


Figura 2.11: Equipamento de reparo portátil HMS 3000 (PINHEIRO, 2008).

No período de 1999-2004, estudos adicionais foram realizados pelo HZG (*Helmholtz-Zentrum Geesthacht Centre for Materials and Coastal Research*, Alemanha), utilizando o HMS 3000 capaz de realizar a solda por atrito do tipo FTPW e FHPP (MEYER, 2002).

O HMS 3000 foi utilizado para o reparo de estruturas no Mar do Norte e a oeste de *Shetland* a 395 m de profundidade (BLACKEMORE, 1999).

O HMS 3000 também foi utilizado pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para o estudo da viabilidade do processo alternativo de deposição e reparos em defeitos superficiais de componentes ou estruturas fabricadas em aço de alto teor de carbono, utilizando o processo de soldagem de deposição superficial (*Friction Surfacing*) (MACEDO, 2011).

### 2.3.2. Equipamentos Desenvolvidos em Laboratório

#### **A) Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPAI)**

A primeira Unidade de Processamento de Pinos por Atrito, também denominada de UPPAI, foi desenvolvida pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) (SOUZA, 2006). Esta parceria foi motivada pelos resultados obtidos nas linhas de pesquisa sobre a técnica de reparo por atrito, e alavancada no intuito de desenvolver e aperfeiçoar a tecnologia para aplicação no reparo de estruturas em campo.

A UPPAI consiste de um equipamento de acionamento hidráulico, com cilindro de haste vazada, capaz de processar pinos com força unidirecional de compressão de até 50 kN e rotações de até 8.000 rpm (SOUZA, 2006). A UPPAI é equipada por cinco componentes fundamentais: Unidade hidráulica, bloco de válvulas, cilindro de reparo, pórtico de sustentação e sistema de controle.

A unidade hidráulica é composta por um reservatório com capacidade de 400 litros e três sistemas moto-bomba

O bloco de válvula (Fig. 2.12) é constituído por um conjunto de componentes hidráulicos (válvulas servossolenóides, válvulas direcionais de acionamento elétrico, válvulas limitadoras de pressão, válvulas de retenção e transdutores de pressão) responsáveis pelo controle do fluxo e pressão do óleo que suprem o cilindro de reparo.



Figura 2.12: Principais componentes da Unidade hidráulica da UPPAI.

O cilindro de reparo (Fig. 2.13) é constituído de um motor hidráulico de pistão axial com torque de no máximo 57 Nm. Sensores são utilizados para o monitoramento e transmissão dos dados de deslocamento do êmbolo e rotação do eixo ao sistema de controle. Na ponta do eixo é acoplado uma placa de castanhas para a fixação dos pinos consumíveis (SOUZA, 2006).

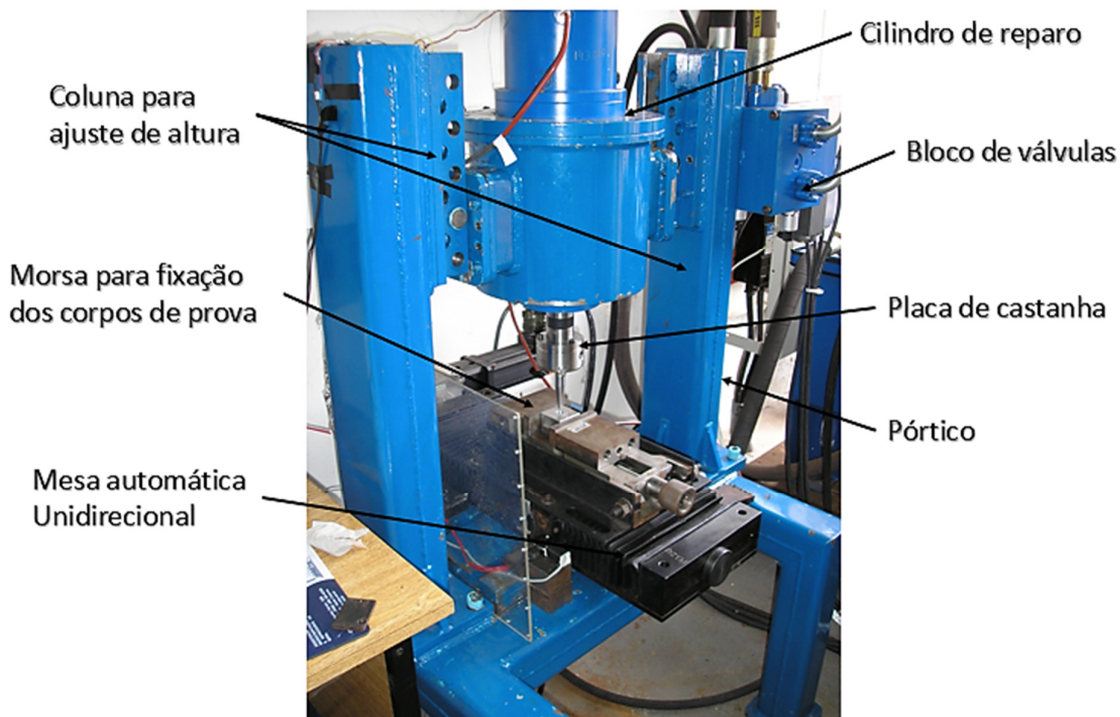


Figura 2.13: Cilindro de reparo acoplado ao pórtico e componentes diversos.

O sistema de controle é realizado via *hardware* utilizando cartões analógicos com algoritmo de controle PID. Os sinais gerados pelos sensores instalados no cilindro de reparo e no bloco de válvulas são enviados através de sinais analógicos, por intermédio da placa de aquisição de dados. Estes dados são processados por um computador e corrigidos pelo sistema de malha fechada que atua em tempo real nas válvulas proporcionais (SOUZA, 2006). Assim, o sistema monitora e controla a força aplicada, a velocidade de rotação, o torque e o deslocamento do êmbolo durante o processamento. O comprimento de queima do pino consumível é o parâmetro que determina o final do ensaio. A UPPAI foi utilizada nos trabalhos realizados por Pires (2007) com objetivo de otimizar os parâmetros de processo de reparo por atrito, correlacionados à diferentes tipos de geometrias de pinos e furos, com foco de reparos sem a presença de defeitos. Nesse trabalho, foram propostos cinco tipos de geometrias de pinos e furos e um planejamento fatorial para realização dos ensaios, variando a geometria e os parâmetros de processo (força axial, rotação e comprimento de queima). Pires (2007) concluiu que a qualidade do reparo depende fortemente dos parâmetros de processo, sendo a força axial o parâmetro preponderante no tempo de processamento, ou seja, quanto maior for esse parâmetro menor é o tempo de processamento. Pires conclui que a geometria do “Tipo A” é a mais adequada para o processamento de pinos por atrito (Fig. 2.14).

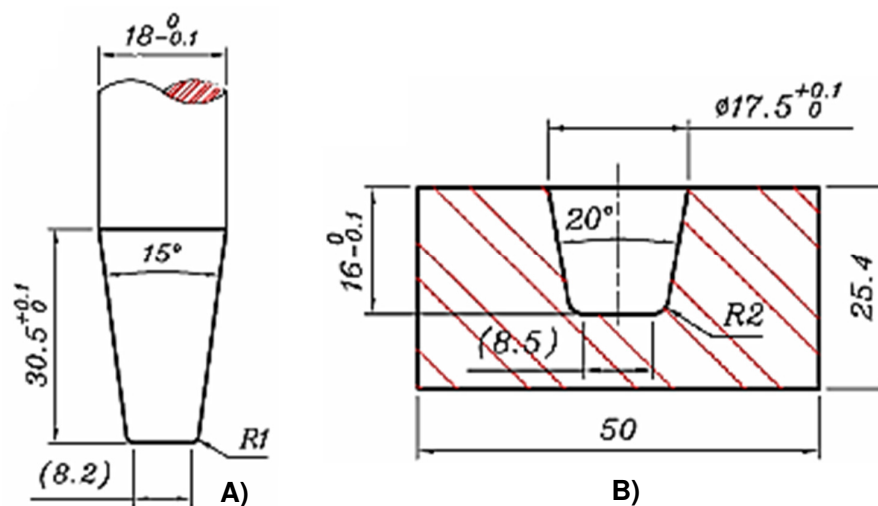


Figura 2.14: Geometria Tipo A caracterizada como a melhor geometria para o processamento de pinos por atrito pelo método FTPW: A) Dimensões do pino consumível, B) Dimensões do furo cônico (PIRES, 2007).

O mesmo equipamento foi utilizado por Franco (2009), no seu trabalho de conclusão de curso, para a avaliação do efeito da força de processamento na qualidade de reparo de trincas por atrito no aço inoxidável austenítico 316L e aço carbono ASTM A36. Pares de

materiais pino/bloco foram fabricados conforme a geometria do tipo “A” proposto no trabalho realizado por Pires (2007). Franco (2009) concluiu que a geometria do tipo “A” resultou em excelentes uniões metalúrgicas ao longo de toda a interface pino/bloco.

### **B) Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 2 (UPPAII)**

Em função dos resultados dos trabalhos desenvolvidos por Pires (2007) e à necessidade de explorar o parâmetro de “Força Axial” no processo de reparo de pinos por atrito, foi desenvolvida a segunda Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPAII) pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia com o apoio da Petrobras.

O projeto da UPPAII é similar à concepção da UPPAI, porém uma versão mais robusta. Podem-se destacar duas partes principais do cilindro de reparo: Motor hidráulico e cilindro de acionamento como são mostrados na Fig. 2.15. A UPPAII possui capacidade máxima de força axial de 245 kN e rotação de até 2.500 rpm (CAIXETA, 2011).

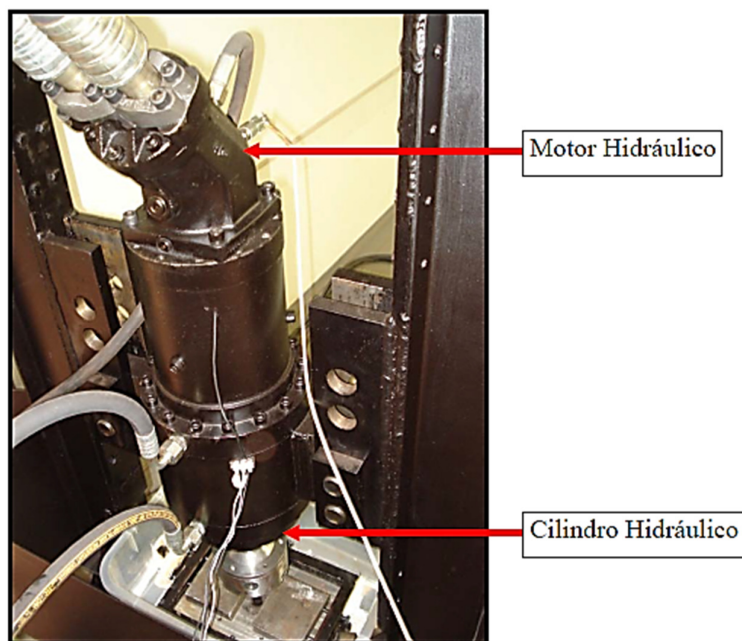


Figura 2.15: Cilindro de reparo, destacando o motor hidráulico e o cilindro hidráulico (CAIXETA, 2011).

Uma unidade hidráulica foi especialmente desenvolvida para o acionamento do cilindro de reparo, contendo um reservatório com capacidade de 630 l, três sistemas moto-bomba e bloco de válvulas.

O motor hidráulico da cabeça de reparo é acionado por um conjunto moto-bomba composto por um motor diesel MWM com potência de 215 CV acoplado a uma bomba de pistão axial variável de disco inclinado com capacidade máxima de vazão de 180 l/min e pressão máxima de operação de 350 bar. O cilindro da cabeça de reparo é acionado por um conjunto moto-bomba composto por um motor elétrico de potência de 10 CV acoplado a uma bomba de pistão axial variável de disco inclinado com capacidade máxima de vazão de 12 l/min e pressão máxima de operação de 290 bar.

O bloco de válvulas é montado no próprio *skid* da unidade hidráulica, sendo responsável pelo controle de pressão e vazão de óleo para operacionalização do cilindro de reparo. Para representar a aplicabilidade do processo de reparo por atrito no campo, foram instaladas comprimentos longos de mangueiras hidráulicas, de tal forma que o reservatório juntamente com seus motores e bombas fiquem a uma distância de até 60 metros do bloco de válvulas e do cilindro de reparo (CAIXETA, 2011).

Todos os componentes eletrônicos responsáveis pelo acionamento e controle da unidade hidráulica estão montados em um painel elétrico instalado sobre a mesma plataforma da unidade hidráulica. Essa alternativa garante maior flexibilidade e facilidade para o transporte e manuseio do equipamento.

A UPPAII foi utilizada no trabalho de dissertação realizado por Caixeta (2011). Neste trabalho foi realizado a otimização dos parâmetros de processamento de pinos por atrito (força axial, velocidade de rotação e comprimento de queima) e a realização de ensaios para validação e definição das faixas operacionais do equipamento. Os resultados mostraram que o equipamento é operacional para a faixa de rotação de 2.000 a 2.500 rpm (CAIXETA, 2011).

### **C) Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPAIII)**

A terceira versão da Unidade de processamento de Pinos por Atrito, ou simplesmente UPPAIII, foi desenvolvida pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia. Esta versão foi projetada especificamente para realização de ensaio em laboratório (HWANG, 2010). As principais diferenças desta unidade em relação às versões anteriores está na forma construtiva do equipamento e na maior capacidade de força axial de 500 kN. O sistema de rotação e de translação são independentes, ambos montados em uma mesma estrutura, ou seja, não existe um cilindro



de reparo como apresentado nas versões anteriores. A Figura 2.16 mostra a montagem e a disposição dos componentes da UPPAIII.

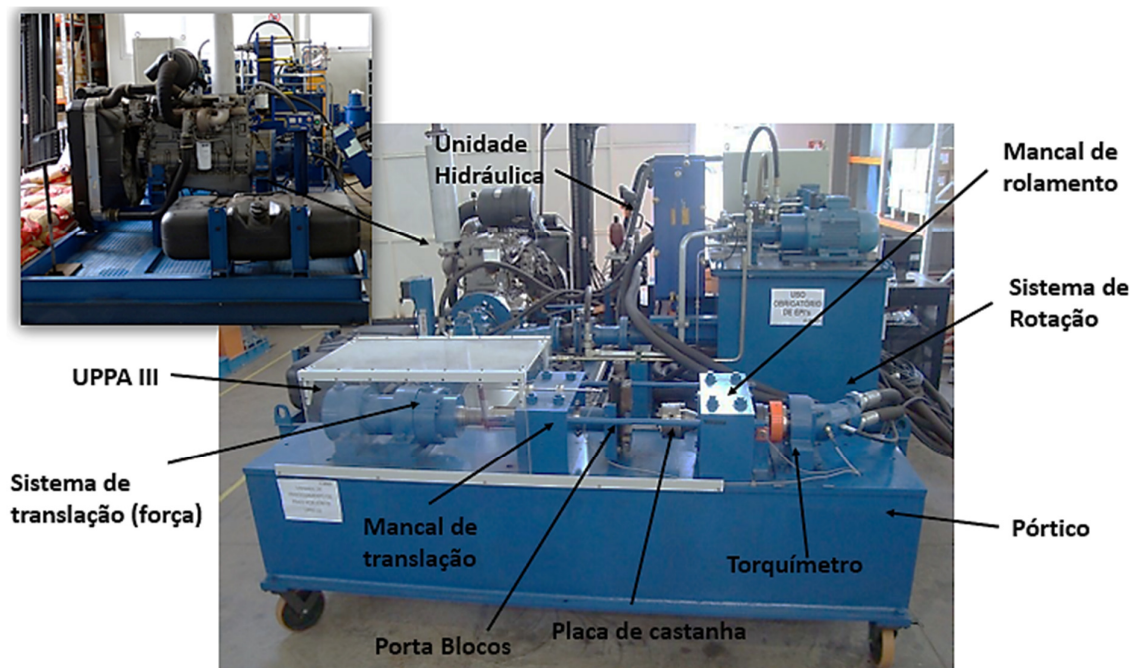


Figura 2.16: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPAIII) e seus principais componentes (GONTIJO, 2012).

#### D) Unidade de Processamento de Pinos por Atrito IV (UPPAIV)

Haja vista que o processo de reparo de trincas por atrito consiste de uma técnica alternativa e de grande interesse à indústria de óleo e gás, além de ser uma técnica promissora com grande potencial de aplicação em campo para a recuperação de estruturas, motivou o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste a conceber, projetar e construir a quarta Unidade de Processamento de Pinos por Atrito, também denominada de UPPAIV. O cilindro de reparo é portátil, capaz de atender às operações de soldagem e reparo por atrito através da compressão (FTPW – *Friction Tapered Plug Welding*) e tração (FPPW - *Friction Pull Plug Welding*) de pinos consumíveis. O equipamento é hermeticamente selado, sendo adequado para uso em imersão contínua em água do mar a uma profundidade de até 30 metros (3 bar). A Figura 2.17 mostra os componentes da UPPAIV e uma foto do cilindro de reparo portátil. A patente da concepção da UPPAIV foi requerida em 2007 e concedida em 2014 sob o título "Equipamento para Reparo de Estruturas Metálicas e Métodos de

Funcionamento", processo PI 0704190-0, no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) (HWANG, 2010).

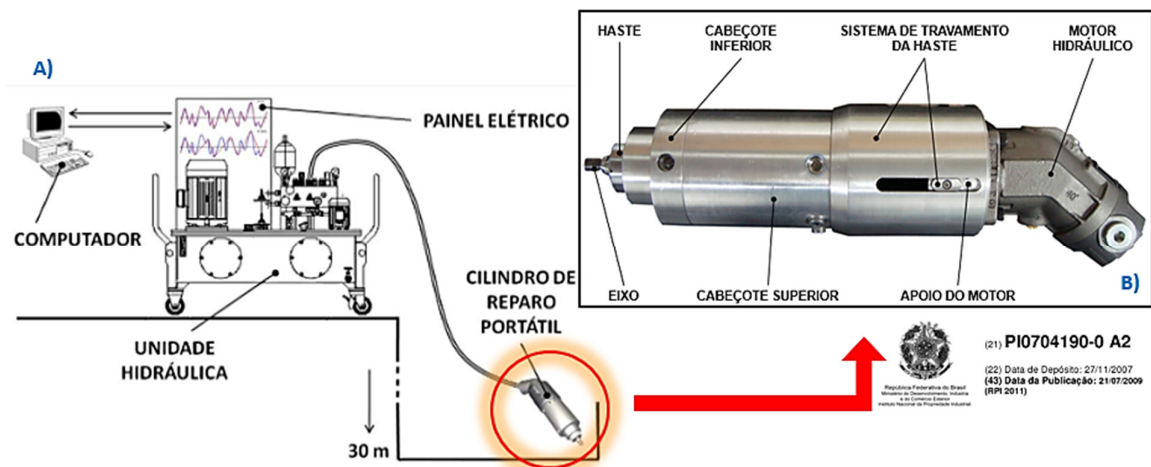


Figura 2.17: A) Ilustração da Unidade de Processamento de pinos por Atrito 4 (UPPAIV). B) Cilindro de reparo (HWANG, 2010).

As principais diferenças da UPPAIV em relação às versões anteriores é a redução significativa do peso do cilindro de reparo e o implemento da capacidade de reparos através da tração de pinos para realização do processo FPPW. O cilindro de reparo é constituído por um motor hidráulico de pistões axiais de 16 cc, capaz de transmitir uma rotação de até 5.500 rpm e torque máximo de 88 Nm. O motor está acoplado a um cilindro hidráulico de haste vazada com capacidade de força axial de 40 kN, sendo seu interior constituído por um conjunto de sistemas rotativos (eixo, rolamentos e acoplamento), conforme ilustrado na Fig. 2.18. O cilindro é composto por dois cabeçotes que contêm a haste. Através dos cabeçotes é possível fazer a fixação do cilindro de reparo nas estruturas auxiliares de fixação. Na Figura 2.19 são apresentadas as estruturas auxiliares de fixação até então desenvolvidos para a ancoragem do cilindro de reparo.

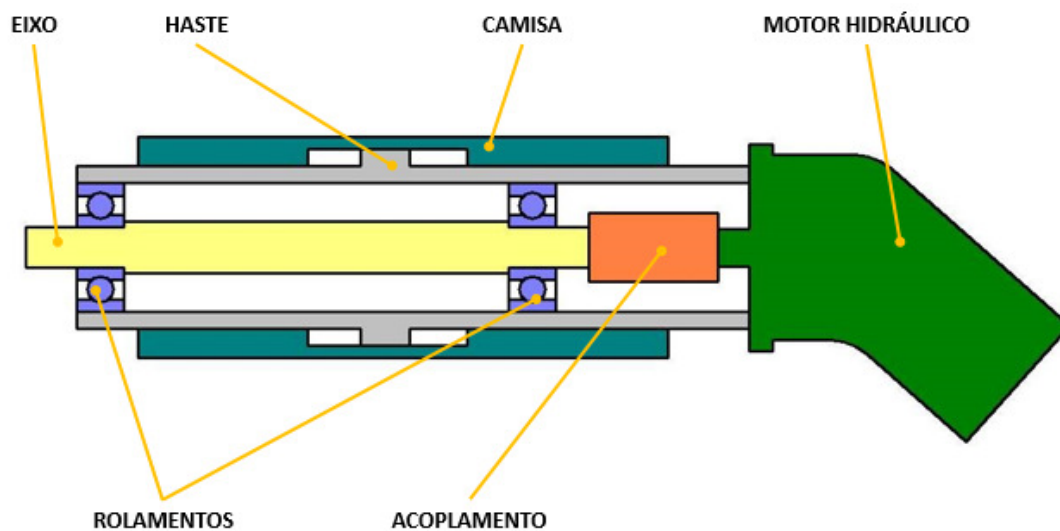


Figura 2.18: Concepção do cilindro de reparo da UPPAIV (HWANG, 2010).

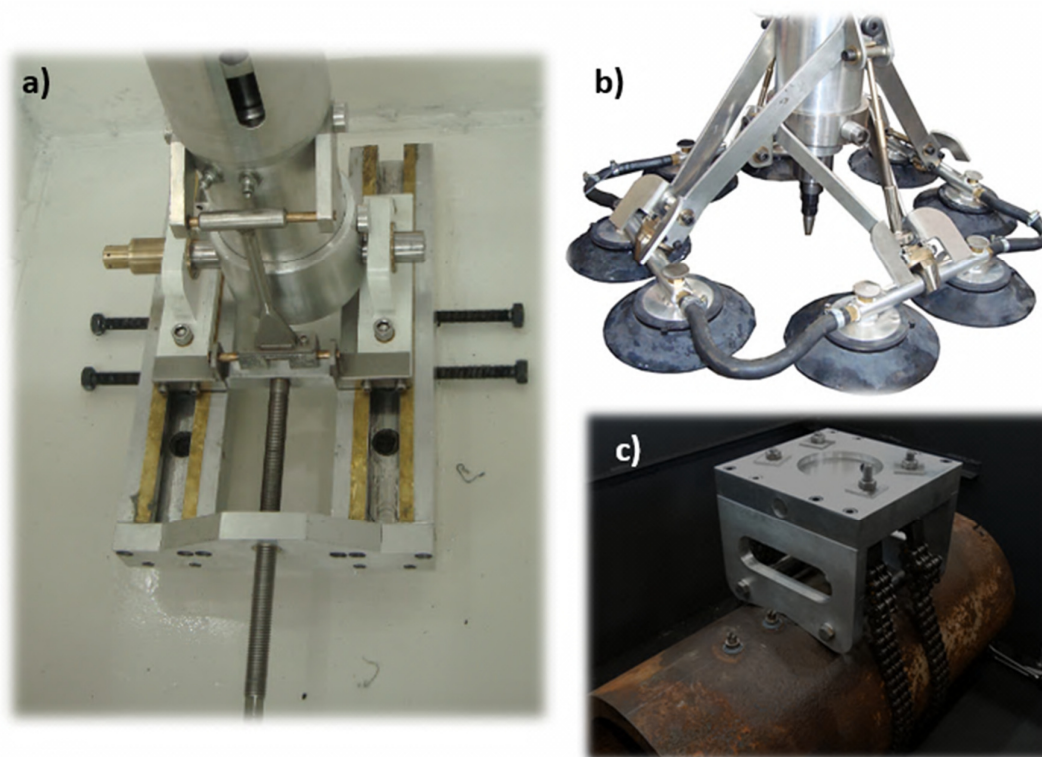


Figura 2.19: Mecanismos auxiliares de fixação do Cilindro de Reparo da UPPAIV. a) Base de fixação com dois graus de liberdade para reparo de estruturas planas e inclinadas; b) Estrutura de fixação por ventosas para a inserção de pinos roscados; c) Estrutura para fixação da cabeça de reparo em dutos de petróleo.

A UPPAIV é um equipamento que atende a necessidade de realização de ensaios FTPW e FPPW em laboratório. Para a utilização do equipamento em campo requer todavia, não apenas o desenvolvimento de dispositivos de fixação, mas também do desenvolvimento de sistemas e componentes específicos para a automação da técnica, afim de tornar o equipamento com a potencialidade de realizar todas as etapas operacionais do processo de reparo por atrito, sendo elas: Furação, preenchimento e fresamento.

### E) Outros equipamentos de soldagem por atrito

Outros equipamentos de reparo por atrito foram encontrados em institutos de pesquisa, como a máquina de soldagem por atrito (MPF1000), desenvolvido no Laboratório do Departamento de Metalurgia (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento MPF1000 (Fig. 2.20) é capaz de realizar soldagens com múltiplas possibilidades na programação, voltado para o desenvolvimento de pesquisas e descobertas de novos métodos e processos de união de materiais. O equipamento tem capacidade de realizar reparos em furos cegos com forças axiais tanto de compressão como tração de até 1.000 kN com velocidade máxima de deslocamento de 15 mm/s e rotação de até 1.500 rpm (MATTEI, 2011).

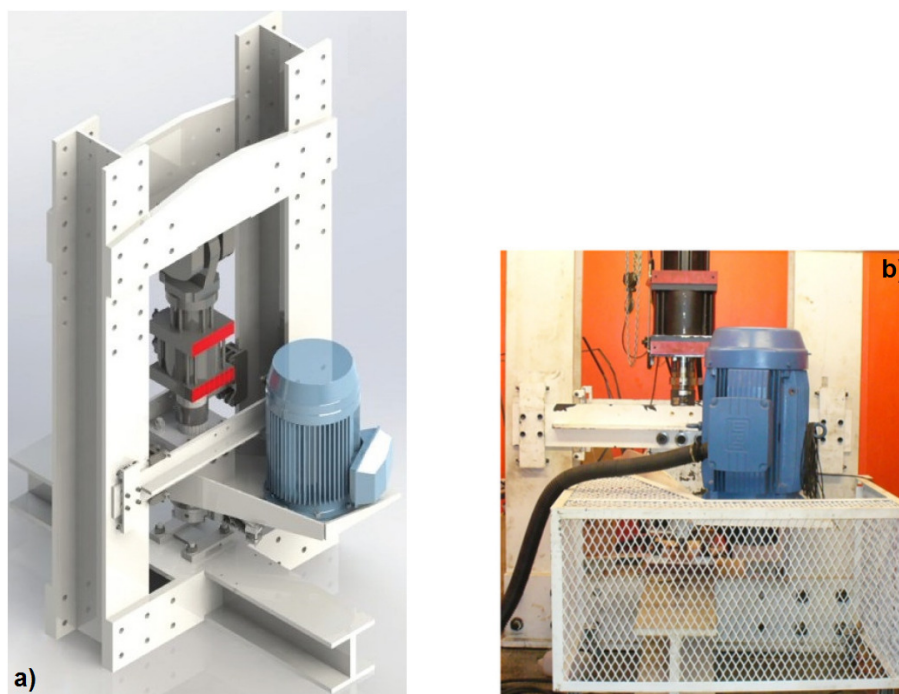


Figura 2.20: Equipamento soldagem por atrito MPF1000 da LAMEF/UFRGS. a) Modelo virtual. b) Foto do equipamento (MATTEI, 2011).

O centro de pesquisa da TWI em Cambridge – Inglaterra menciona uma máquina de soldagem por atrito NEI – John Thompson, modelo FW-13 (Fig. 2.21), com potência máxima de 43 kW e uma força axial limite de 480 kN e 7 toneladas de peso.

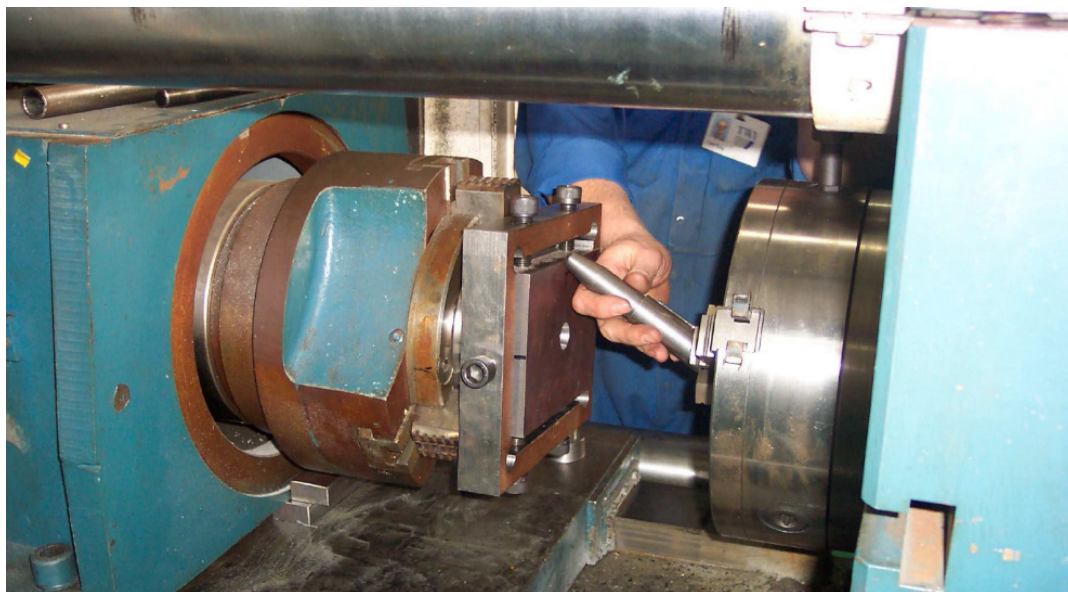


Figura 2.21: Máquina de soldagem por atrito NEI (LESSA, 2011).

Outro equipamento foi encontrado na Universidade Metropolitana Nelson Mandela, na África do Sul em Porto Elizabeth (DOS SANTOS, 2013). Trata-se de uma máquina portátil de solda por atrito contínua (*Portable Continuous Friction Welding Machine – PCFWM*; Fig. 2.22) que utiliza a técnica *Friction Taper Stud Welding (FTSW)*. O equipamento, segundo os autores, pode ser operado remotamente a uma distância de até 30 metros e tem capacidade de força axial de 40 kN e rotação máxima de 5.000 rpm com deslocamento máximo do eixo 100 mm.

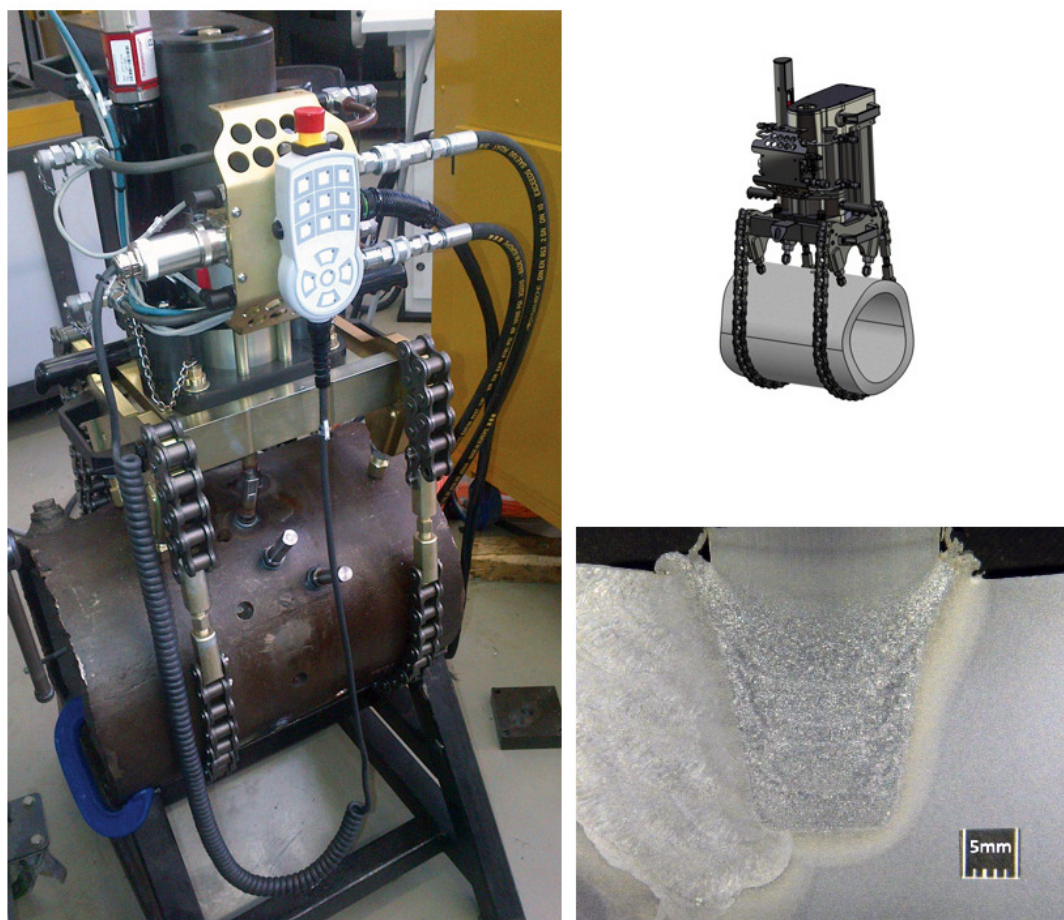


Figura 2.22: Máquina Portátil de Solda por Atrito Contínua (PCFWM) ([www.mantacor.co.za](http://www.mantacor.co.za) – Acesso: 19/06/2016).

#### 2.4. Problemas no Travamento do Sistema de Rotação Durante o Reparo por Atrito

A geometria do pino consumível e do furo, e os valores de rotação e força adotados para o processo de reparo por atrito são principais fatores responsáveis pela variação do torque durante o processamento, que podem levar à instabilidade da rotação e, conseqüentemente, o travamento. No início do processo, quando há o primeiro contato entre o pino e o bloco, há um aumento significativo do torque, estando nesta etapa a maior probabilidade de ocorrer o travamento do sistema de rotação, impedindo a completa execução do ensaio (FREITAS, 2014).

Desde os primeiros trabalhos realizados na UPPAI, há relatos de ocorrência de travamentos do motor hidráulico durante a realização dos ensaios. Souza (2006) descreve ocorrências de travamentos na UPPAI para ensaios com rotação de 5.000 rpm e força de 5 kN, equivalente a 10% da capacidade de carga do equipamento. Caixeta (2011) indica travamentos na UPPAI na tentativa de realização de ensaios com rotação inicial abaixo de 1.800 rpm, independentemente do valor de força. Trabalhos realizados por Borges (2011) descreve a ocorrência de travamentos em quase todos os ensaios FTPW utilizando a UPPAIII, mesmo utilizando a rotação máxima do equipamento de 1.700 rpm e 25% da capacidade de força máxima (400 kN). O travamento do sistema de rotação ocorreu em todos os ensaios utilizando forças maiores que 100 kN.

López (2010) descreve situações de travamento do motor de uma máquina de soldagem por atrito durante a realização de ensaios FHPP com capacidade de força axial de tração e compressão de 50 kN, rotação máxima de 8.100 rpm e torque de 50 Nm. A Figura 2.23 mostra o equipamento de soldagem por atrito desenvolvido por López (2010).

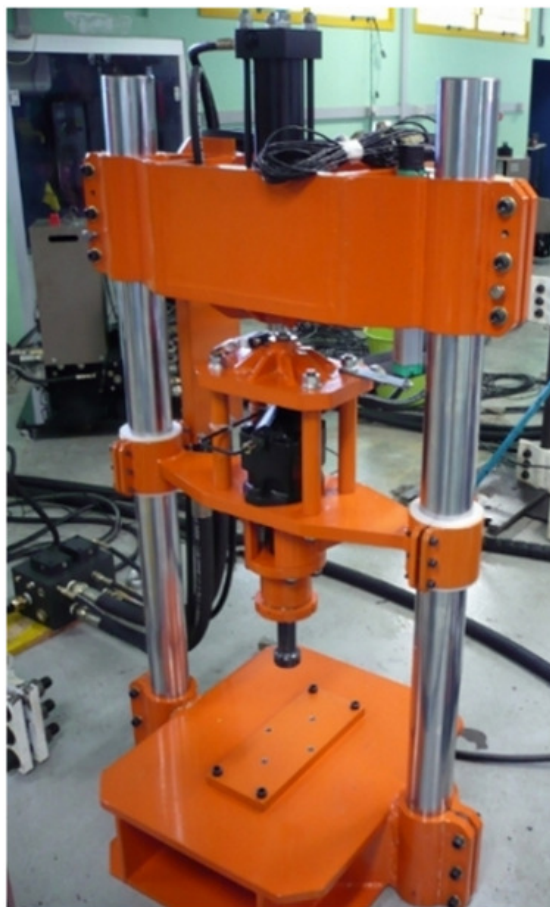


Figura 2.23: Estação de soldagem por atrito (LÓPEZ, 2010).

Durante o processamento do pino consumível, quanto maior a força aplicada maior é a demanda de torque, que assume valores máximos durante a fase inicial do processo, como mencionado na Seção 2.1.3. O aumento do torque durante o processamento do pino reflete na rotação, e, conseqüentemente, na redução do aporte térmico, fazendo com que os materiais do pino e do substrato tenham a temperatura reduzida. Essa redução de temperatura aumenta as forças de atrito durante a rotação relativa entre as partes, demandando uma maior energia consumida pelo motor hidráulico, e, conseqüentemente, o aumento do torque. Esse processo em cadeia resulta em uma variação da rotação, levando à sua instabilidade e ao aumento progressivo do torque, induzindo o travamento do motor de forma abrupta e com mínimas chances de recuperação do sistema de rotação.

Dos trabalhos realizados na UPPAIV, Formoso (2012) afirmou que, mesmo com rotação inicial de 5.000 rpm e força de 20 kN, equivalente a 50% da capacidade de carga do equipamento, foi suficiente para provocar o travamento do sistema de rotação. No momento dos travamentos, um forte impacto era absorvido pelos componentes hidráulicos gerados pelo golpe de aríete. Os intensos golpes não só ocorriam no travamento do sistema, mas também nas paradas no final de cada processo.

Durante o desenvolvimento do projeto da unidade hidráulica da UPPAI não foram considerados os possíveis travamentos do sistema de rotação durante a realização do processo de reparo por atrito. Adicionalmente, no final de cada processo, a válvula proporcional do sistema de rotação era fechada instantaneamente, o que resultava na interrupção brusca da vazão do fluxo hidráulico gerando o golpe de aríete em todo o sistema. Dessa forma, toda a energia hidráulica acumulada no sistema de rotação era absorvida pelos componentes da unidade hidráulica.

A unidade hidráulica utilizada na UPPAI foi a mesma utilizada para o acionamento do cilindro de reparo portátil da UPPAIV. Um histórico que marcou a ocorrência envolvendo golpes de aríete foi o rompimento da carcaça de um motor hidráulico durante a realização de um ensaio utilizando o cilindro de reparo da UPPAIV. Nesse caso, foram realizadas modificações a fim de aumentar a capacidade de torque do motor hidráulico, na tentativa de diminuir a ocorrência de travamentos. Para aumentar a potência do motor hidráulico, foi necessário aumentar a pressão da linha do sistema de rotação de 280 bar (28 MPa) para 300 bar (30 MPa). Esse ajuste na pressão resultou em um ganho de aproximadamente 10% na capacidade de torque do motor hidráulico. Após a realização de alguns testes, novos travamentos ocorreram, até que acidentalmente ocorreu o rompimento da carcaça do motor hidráulico. A Figura 2.24 mostra a região de fratura do motor hidráulico.



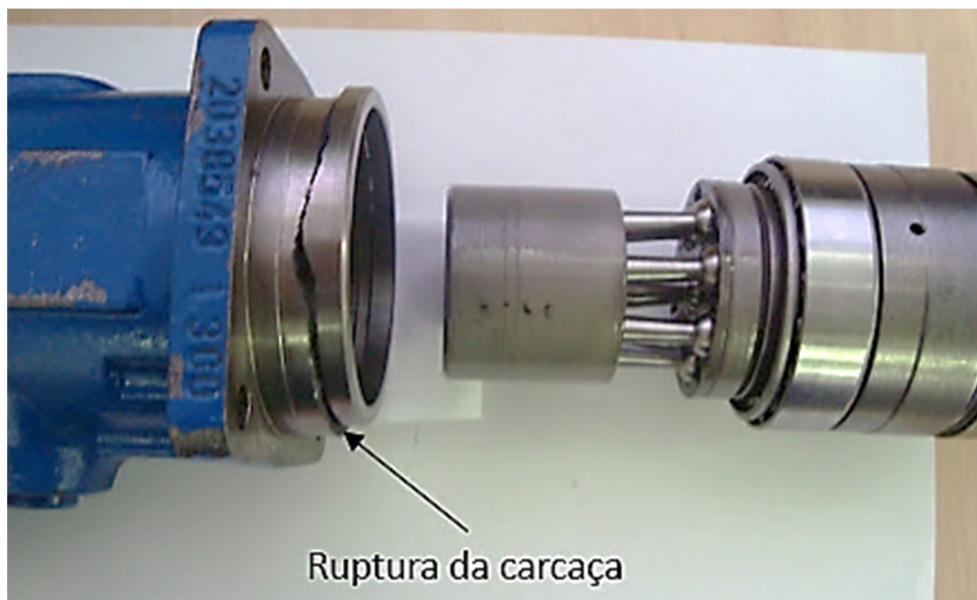


Figura 2.24: Carcaça do motor hidráulico danificada devido aos eventuais golpes de aríete no circuito do sistema de rotação (FORMOSO, 2012).

## 2.5. Problemas de Usinagem do Furo Cônico Utilizando a UPPAI

Os processos FHPP, FTPW e FPPW iniciam-se com a usinagem de um furo sobre regiões de estruturas que contêm defeitos ou descontinuidades. Trabalhos foram realizados por Lima Filho (2008) no desenvolvimento de um programa para o controle de processo de furação utilizando um equipamento de reparo por atrito. Lima Filho (2008) utilizou ferramentas especiais para a usinagem de furos cônicos não passantes destinados ao processo FTPW. O objetivo foi desenvolver ferramentas de usinagem especiais e utilizar o cilindro de reparo da UPPAI para a abertura de furos cônicos conforme as dimensões do “Tipo A”, proposta por Pires (2007). A Figura 2.14 mostra as dimensões do furo cônico “Tipo A”, utilizada para a realização do processo FTPW na UPPAI.

A fim de se obter um reparo de qualidade, é fundamental que a usinagem do pino e do furo obedeça de forma rigorosa as dimensões de projeto, para que, durante o processamento do pino, seja obtido o aporte térmico ideal para a formação de juntas soldadas isentas de defeitos.

Inicialmente, Lima Filho (2008) adquiriu duas brocas e duas fresas, ambas fabricadas em metal duro com geometria helicoidal cônica para a usinagem do furo, conforme apresentado na Fig. 2.25. Por se tratar de ferramentas de usinagem específicas, foi necessário o projeto sob medida dessas ferramentas. A Figura 2.25 ilustra essas ferramentas, sendo a broca cônica projetada com dois cortes helicoidais à direita, com arestas de corte defasadas de  $180^\circ$  e com ângulo de ponta de  $140^\circ$ . Já a fresa cônica possui quatro cortes helicoidais à direita, com arestas de corte defasadas de  $90^\circ$  e ângulo de ponta plana com raio de canto de 2 mm.

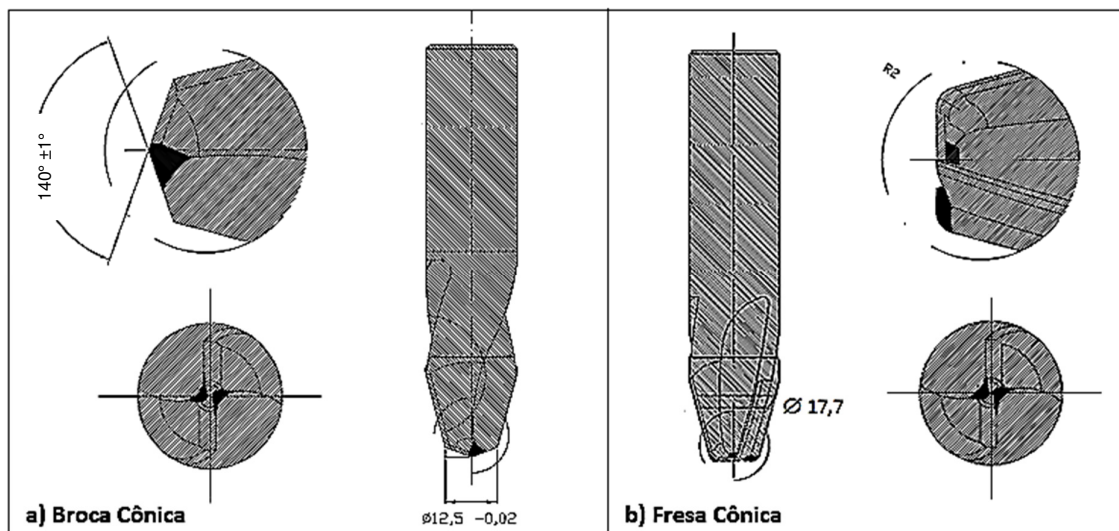


Figura 2.25: Imagem ilustrativa da geometria das ferramentas para a usinagem do furo cônico. a) Broca cônica; b) Fresa cônica (WALTER, 2009).

Os primeiros testes de furação do furo cônico foram realizados em máquinas-ferramentas convencionais, com objetivo de conhecer os parâmetros corretos de usinagem das ferramentas (velocidade de rotação e velocidade de avanço), e ter esses valores como referência antes de utilizar a UPPAI.

O primeiro equipamento utilizado foi uma furadeira vertical de bancada para testar os parâmetros iniciais de usinagem informados pelo fabricante. Durante o processo de furação com a broca cônica o equipamento vibrou excessivamente a ponto de causar o lascamento de uma das arestas de corte da ferramenta, conforme pode ser observado na Fig. 2.26 (LIMA FILHO, 2008).



Figura 2.26: Lascamento da broca cônica durante o processo de usinagem utilizando uma furadeira vertical de bancada (LIMA FILHO, 2008).

Na constatação da falta de rigidez da furadeira de bancada, outros testes foram realizados em um equipamento de maior rigidez, dessa vez usando um centro de usinagem (LIMA FILHO, 2008). Foi utilizada uma broca reta comum de diâmetro de 8,5 mm, com o objetivo de usinar um furo inicial, minimizando assim a quantidade de material removido pela broca cônica. Nessa configuração, a broca cônica foi menos solicitada devido à redução de material removido e o furo foi realizado com sucesso. A Figura 2.27 mostra a sequência utilizada até a abertura do furo com a broca cônica.

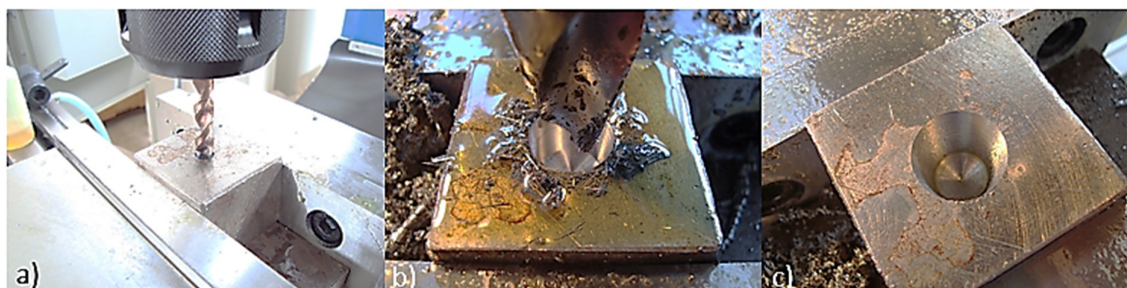


Figura 2.27: Teste realizado para a abertura do furo com a broca cônica. a) Broca reta comum de  $\varnothing 8,5\text{mm}$ ; b) Abertura do furo com a broca cônica; c) Furo cônico sem marcas de usinagem (LIMA FILHO, 2008).

Durante a calibração do furo com a fresa cônica, a estrutura da máquina vibrou danificando uma das arestas de corte da ferramenta (LIMA FILHO, 2008). No entanto, a furação prosseguiu até o final. A superfície do furo apresentou várias marcas de usinagem provocadas pela vibração da máquina-ferramenta. A Figura 2.28 mostra as imperfeições de usinagem e a fresa cônica danificada.

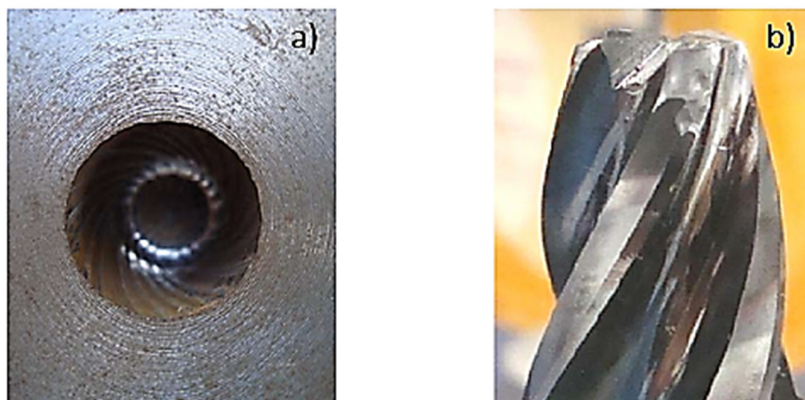


Figura 2.28: a) Furo cônico com superfície usinada irregular. b) Fresa cônica danificada (LIMA FILHO, 2008).

Lima Filho (2008) executou a usinagem dos furos utilizando as ferramentas de metal duro e a UPPAI. O acabamento superficial obtido foi semelhante à usinagem mostrada na Fig. 2.28. A qualidade de usinagem dos furos obtidos nos testes não foi satisfatória para o processo de reparo de trincas por atrito, devido à presença das marcas de usinagem formadas na superfície do furo

## 2.6. Conceitos de Usinagem e Terminologias das Ferramentas de Usinagem

Antes de descrever o projeto das ferramentas de usinagem é importante rever, de forma resumida, alguns conceitos para melhor entendimento e identificação das terminologias utilizadas neste trabalho.

**Movimento de corte:** movimento entre a ferramenta e a peça, que na ausência do movimento de avanço resulta apenas uma remoção de cavaco durante uma única rotação da ferramenta.

**Movimento de avanço:** movimento entre a peça e a ferramenta, que, junto com o movimento de corte, gera uma remoção repetida ou contínua do cavaco durante várias rotações da ferramenta.

**Movimento efetivo de corte:** resultado dos movimentos de corte e de avanço realizados simultaneamente.

**Movimento de profundidade:** movimento entre a peça e a ferramenta no qual a espessura da camada de material a ser retirada é determinada de antemão.

**Velocidade de corte ( $V_c$ ):** é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação ( $n$ ) da peça no ponto de contato da ferramenta a uma profundidade de corte definida, onde os momentos de corte e de avanço ocorrem simultaneamente. A velocidade de corte é calculada através da equação 2.1:

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.1)$$

**Avanço ( $f$ ):** é a velocidade de deslocamento de uma ferramenta em cada volta de 360° de uma peça em mm/rotação. Este parâmetro deve ser escolhido levando em consideração o material, a ferramenta e a operação que será executada na usinagem. Este parâmetro é fornecido pelo fabricante das ferramentas, levando em consideração as variáveis acima citadas, testadas em laboratório.

**Velocidade de avanço ( $V_f$ ):** é o produto do avanço ( $f$ ) pela rotação da ferramenta ( $n$ ). Em outras palavras, é o movimento entre a peça e a ferramenta que juntamente com o movimento de corte origina a retirada contínua de cavaco. A velocidade de avanço é determinada pela equação 2.2.

$$V_f = f * n \quad (2.2)$$

**Velocidade efetiva de corte ( $V_e$ ):** é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção efetiva de corte. Esse parâmetro é determinado pela equação 2.3.

$$\vec{V}_e = \vec{V}_c + \vec{V}_f \quad (2.3)$$

A Figura 2.29 ilustra de maneira esquemática os movimentos e as respectivas velocidades de corte, avanço e efetiva de corte em uma operação de furação.

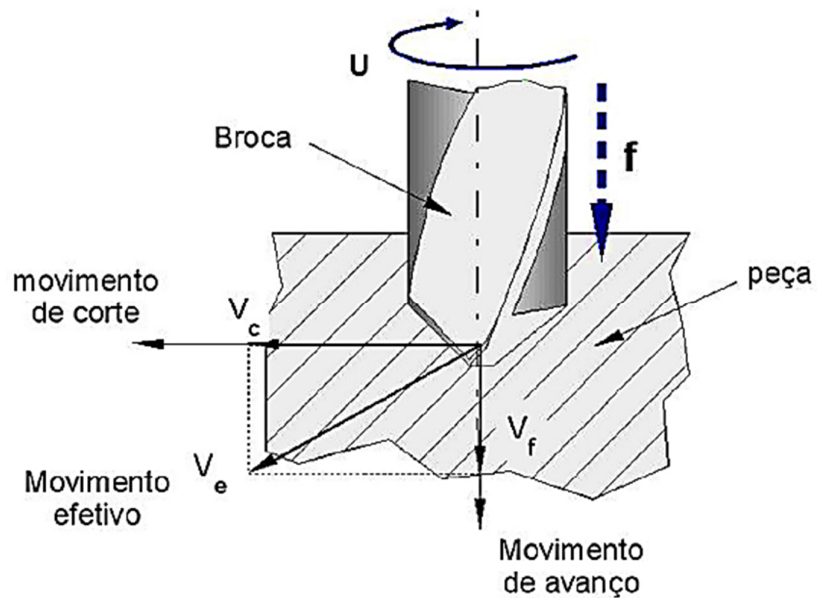


Figura 2.29: Representação das direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo no processo de furação, com as respectivas direções das velocidades de corte, avanço e efetiva de corte (LIMA FILHO, 2008).

As Figuras 2.30 e 2.31 ilustram as terminologias das principais partes de uma broca cilíndrica e de uma fresa de topo. Os mesmos termos são válidos para ferramentas com formato cônico.

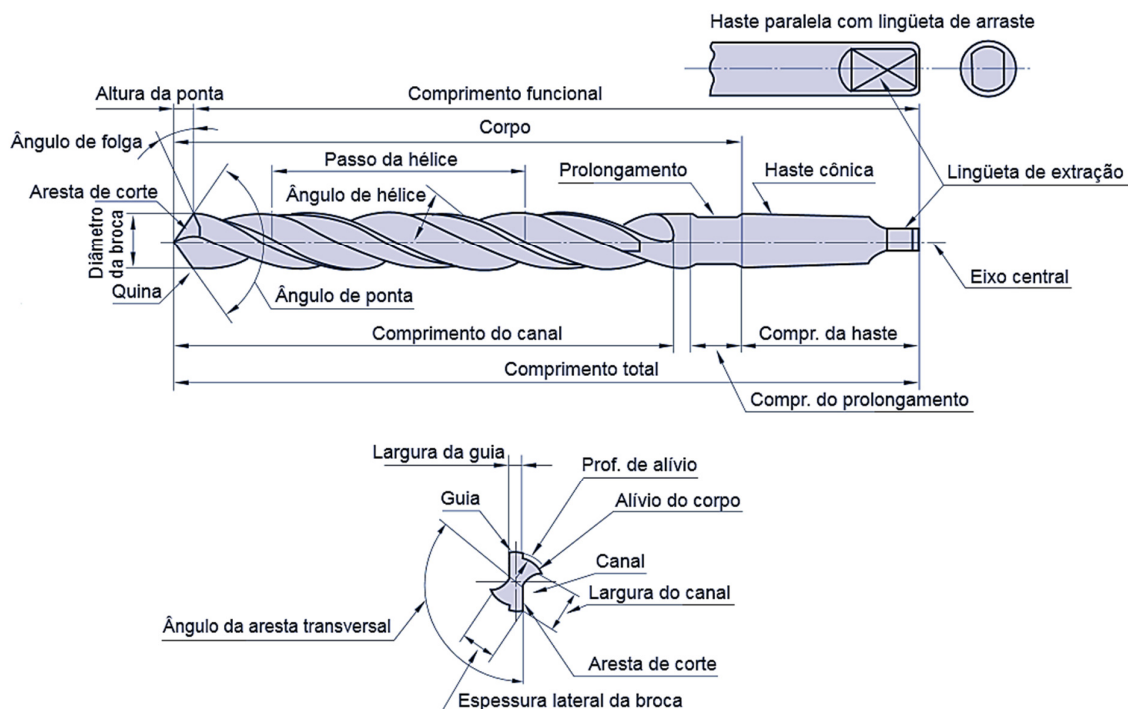


Figura 2.30: Terminologia das partes de uma broca cilíndrica (MITSUBISHI, 2016).

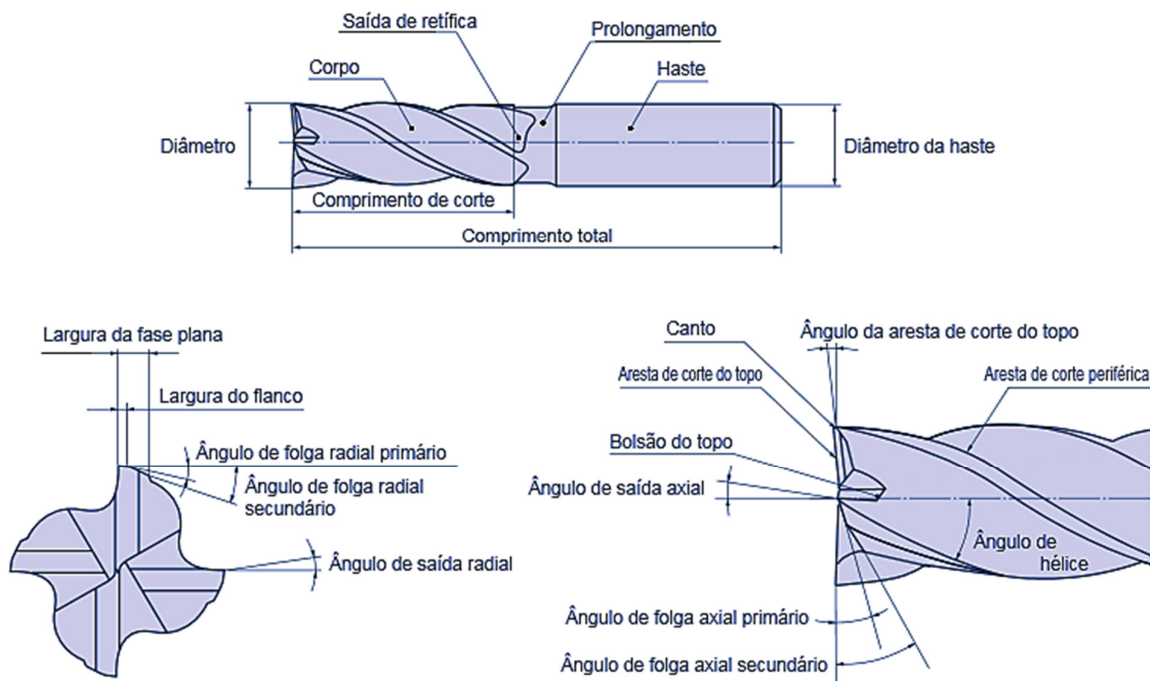


Figura 2.31: Terminologia das partes de uma fresa de topo (MITSUBISHI, 2016).

Segue abaixo a descrição de alguns termos indicados nas Figuras 2.30 e 2.31 (MITSUBISHI, 2016):

**Ângulo de hélice:** é a inclinação do canal conforme a direção axial da broca que corresponde ao ângulo de saída. O ângulo de saída de uma broca varia conforme a posição da aresta de corte e diminui bastante conforme a circunferência atinge o centro. O ângulo de hélice tem um importante papel no desprendimento do cavaco. Deve ser determinado de acordo com o material a ser usinado. Quanto mais duro o material menor deve ser o ângulo de hélice.

**Comprimento do canal:** é determinado pela profundidade do furo, comprimento do mancal e reafiação.

**Ângulo de ponta:** é o ângulo formado por dois ângulos de guia ou de corte em ambas as arestas em relação ao eixo da broca. O ângulo de ponta de  $118^\circ$  é padrão para usinagem de aços macios a moderados, alumínio, latão e ferro fundido. Para usinagem em materiais mais resistentes, é comum achatar o ângulo da ponta a um ângulo interno de  $135^\circ$  ou mais, assim, tem-se uma maior resistência mecânica na extremidade da ferramenta.

**Espessura do núcleo:** é um elemento importante que determina a rigidez e a expulsão de cavaco de uma broca. Uma pequena espessura do núcleo é utilizada onde se

tem baixo esforço de corte, baixa rigidez, boa expulsão de cavacos, sendo utilizado para materiais de boa usinabilidade. Maiores espessuras de núcleos são indicados onde exige grande esforço de corte, alta rigidez da máquina-ferramenta e onde a expulsão de cavacos é ruim, sendo ideais para usinagem de materiais de alta dureza e de furos passantes.

**Guia:** consiste a extremidade da ferramenta que determina o diâmetro da broca e suas funções. Quanto maior a largura da guia menor será o coeficiente de atrito e menores serão os esforços durante a usinagem, por outro lado, quanto maior a largura da guia, maiores os coeficientes de atrito durante a usinagem, e melhor a precisão de corte.



## **CAPÍTULO III**

### **PROJETO DE SISTEMAS E ACESSÓRIOS MECÂNICOS DESTINADOS À AUTOMAÇÃO DE UM CILINDRO DE REPARO POR ATRITO PORTÁTIL**

Nesse capítulo é apresentado o desenvolvimento das ferramentas de usinagem, bem como as adaptações dos mandris e do cilindro de reparo portátil. Adicionalmente, é abordada a reestruturação de uma unidade hidráulica já existente no laboratório com objetivo de automatizar o cilindro de reparo portátil na realização de todas as etapas operacionais, necessárias para o reparo de trincas não passantes em estruturas de aço, utilizando para isso o processo FTPW.

#### **3.1 Idealização do Projeto**

Com os trabalhos desenvolvidos sobre o processo de reparo por atrito, e a busca da melhoria dos processos de soldagem e técnicas afins, foi construída a Unidade de Processamento de Pinos por Atrito portátil (UPPAIV), sendo essa caracterizada como o primeiro passo no sentido de levar a tecnologia para o campo. No entanto, é necessário desenvolver soluções inovadoras no intuito de otimizar e automatizar o processo de reparo de trincas e de descontinuidades por atrito utilizando o cilindro de reparo portátil da UPPAIV.

Para isso, faz-se necessário o desenvolvimento de sistemas e acessórios para automação do processo de reparo por atrito, visando a solução de um sério problema presente em estruturas *offshore*, em especial daqueles componentes submetidos a intensos esforços

cíclicos e na recuperação de estruturas já instaladas, que venham a necessitar de reparos com características especiais.

Uma das possíveis causas que provocaram danos nas ferramentas de usinagem e que afetaram a qualidade de usinagem do furo cônico nos trabalhos de Lima Filho (2008) foi a baixa rigidez do cilindro de reparo da UPPAI. Em máquinas-ferramentas a rigidez é um fator de extrema importância uma vez que a deflexão sob a carga exerce grande impacto sobre a precisão de usinagem (SKF, 2016). Dentre os fatores que influenciam diretamente na rigidez do equipamento, estão: rigidez dos rolamentos, rigidez do eixo, comprimento de projeção das ferramentas, rigidez do mancal, quantidade de rolamentos, posição e ajustes dos rolamentos.

Apesar de Lima Filho (2008) ter conseguido a usinagem do furo cônico na UPPAI, a qualidade de usinagem dos furos obtidos nos testes não foi satisfatória para o processo de reparo de trincas por atrito, devido à presença das marcas de usinagem formadas na superfície do furo. Estas imperfeições e irregularidades superficiais podem comprometer a continuidade do processamento do pino consumível, influenciando na variação do torque e, conseqüentemente, na formação de reparos com defeitos de preenchimento.

As marcas de usinagem mostradas na Fig. 2.28 podem ter sido provocadas por uma série de fatores, tais como:

- Seleção de parâmetros incorretos de usinagem;
- Ângulo de posição ou ataque das ferramentas;
- Forças de usinagem;
- Geometria das arestas de corte;
- Problema por falta de rigidez do sistema de fixação da ferramenta de usinagem;
- Comprimento de projeção excessivo da ferramenta;
- Afição da aresta de corte;
- Falta de rigidez da máquina-ferramenta.

Há relatos que a usinagem do furo cônico seria obtida sem problemas aumentando-se o número de ferramentas intermediárias (relatório interno do LTAD). Essa alternativa reduziria as forças de usinagem sobre as ferramentas, porém tornaria o processo de furação trabalhoso e demorado, aumentando bastante o tempo para realização de um único reparo. Uma solução viável para obtenção de uma usinagem de qualidade seria o desenvolvimento de ferramentas com características especiais com propósito de otimizar a técnica de reparo trincas por atrito.

O primeiro passo, sendo o foco desta dissertação, está relacionado com o desenvolvimento de ferramentas de usinagem e acessórios para o cilindro de reparo da UPPAIV destinados ao processo de reparo de trincas não passantes pelo método FTPW.

Para que a UPPAIV seja capaz de realizar as três principais etapas do processo de reparo de trincas por atrito (Furação, Preenchimento e Fresamento) de forma rápida, precisa, confiável e economicamente viável, foi necessária a reestruturação e modernização da unidade hidráulica utilizada para o acionamento do cilindro de reparo. Assim o objetivo é que a UPPAIV seja capaz de reparar estruturas com qualidade, principalmente trincas não passantes, que se estendem ao longo de toda, ou quase toda, espessura de chapas de aço de estruturas da indústria de óleo e gás. Esta nova versão da UPPAIV será denominada UPPAX (Unidade de Processamento de Pinos por Atrito X).

Neste trabalho foi adicionada a concepção, o projeto e o desenvolvimento de um mandril com objetivo de explorar a técnica de reparo por atrito de trincas passantes pelo processo conhecido como FPPW.

### **3.2 Projeto de Acessórios para a Automação da Unidade de Processamento por Atrito X (UPPAX)**

#### *3.2.1 Projeto do mecanismo de fixação dos componentes e acessórios do cilindro de reparo da UPPAX*

Antes de apresentar o projeto das ferramentas de usinagem e dos mandris de fixação dos pinos consumíveis, destaca-se um problema identificado no mecanismo utilizado para a fixação dos mandris desenvolvidos para o cilindro de reparo da UPPAIV. A fixação dos mandris desenvolvida por Hwang (2010) é baseada em uma rosca métrica M16 com passo de 2 mm. Este tipo de conexão não funcionou conforme previsto, uma vez que após a realização de uma sequência de ensaios, as altas energias cinéticas envolvidas durante o processamento do pino consumível, ocasionavam o aperto excessivo do mandril no eixo, levando ao travamento desse componente, dificultando a sua remoção. Os procedimentos operacionais de montagem e desmontagem do mandril levaram à degradação dos filetes de

rosca dos componentes envolvidos. A Figura 3.1 mostra a ponta do eixo do cilindro de reparo danificada com alguns filetes de rosca deformados.

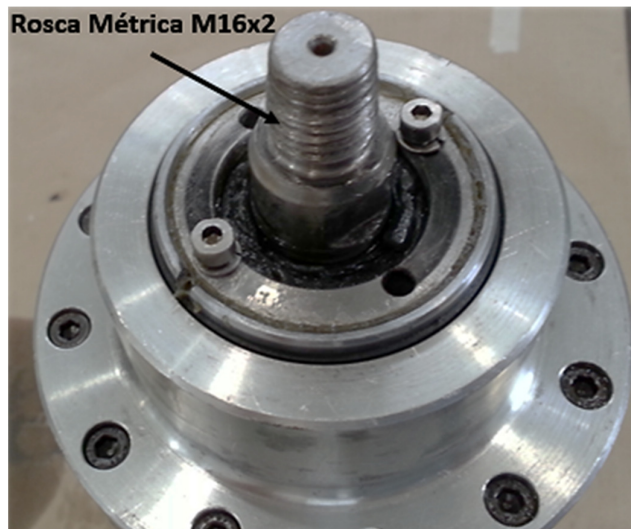


Figura 3.1: Detalhe da rosca da ponta de eixo do cilindro de reparo portátil da UPPAIV mostrando a deformação plástica dos filetes de rosca devido ao aperto excessivo do mandril.

Devido ao maior número de intervenção do operador na substituição dos componentes necessários para a realização de todas as etapas do processo de reparo por atrito, surge a necessidade de se modificar o mecanismo de fixação dos mandris da UPPAIV por outro que garanta rigidez de montagem, alinhamento, segurança e facilidade de manuseio. Ainda mais, processos de usinagem exigem mecanismos rígidos de fixação das ferramentas para se atingir um bom desempenho no processo de usinagem, minimizando assim os erros dimensionais e geométricos e a própria qualidade da superfície dos furos.

A região de interface entre a ferramenta e o eixo do equipamento é o ponto onde ocorre a maior concentração de esforços entre a peça e a máquina. Esta interface deve garantir, além da rigidez, requisitos gerais de corte, com condições ótimas de concentricidade. Do mesmo modo, o sistema de fixação deve permitir uma troca fácil e rápida das ferramentas e dos demais componentes utilizados no processo de reparo por atrito.

Com objetivo de definir um novo sistema para a fixação das ferramentas e dos mandris da UPPAX, foram realizadas várias consultas em empresas especializadas.

Optou-se então por utilizar a rosca MSSC<sup>®</sup>, que consiste em um sistema de fixação rígido obtido por uma rosca cilíndrica, autocentrante, que mantém firme o componente contra a face do suporte axial e também contra o suporte radial. A rosca MSSC<sup>®</sup> apresenta como

principais vantagens: a praticidade e a rapidez na substituição das ferramentas; a rigidez de montagem eliminando assim a existência de qualquer folga; ameniza a tendência de ocorrer travamentos na rosca; e é versátil, possibilitando a otimização para um sistema de troca automática dos componentes (SANDVIK, 2016).

O dimensionamento da rosca MSSC<sup>®</sup> foi realizado para suportar os esforços durante as etapas de usinagem e as elevadas cargas geradas durante o processamento do pino consumível na etapa de preenchimento. Esse mecanismo de fixação deve atender às condições críticas de operações de soldagem e reparo por atrito através da técnica de compressão e tração (FTPW e FPPW) do pino consumível, sob cargas de até 40 kN, torque de 88 Nm e rotação de até 5.500 RPM.

Com auxílio de um software de elementos finitos foi determinado o diâmetro da rosca MSSC<sup>®</sup> que atende as cargas críticas desenvolvidas no processo FTPW e FPPW. Assim, foi selecionada a rosca métrica paralela M16 com passo de 2 mm. Segue abaixo a Fig. 3.2, ilustrando a geometria da rosca MSSC<sup>®</sup> especificada para o eixo e demais componentes e acessórios da UPPAX.

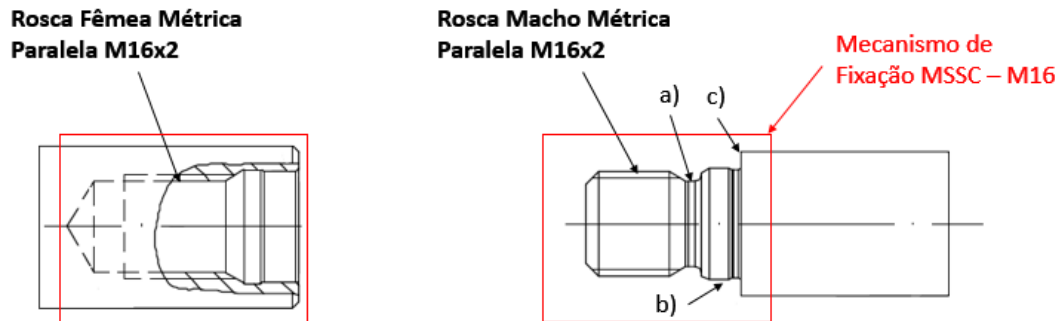


Figura 3.2: Representação da conexão macho-fêmea do mecanismo de rosca da Sandvik<sup>®</sup> MSSC – M16.

O mecanismo de fixação MSSC<sup>®</sup> apresenta na extremidade uma rosca métrica paralela M16 com passo de 2 mm, e uma região retificada (ver item “b” da Fig. 3.2) de maior área de seção transversal onde é realizado o alinhamento dos componentes montados na extremidade do eixo. Na região de transição (ver item “a” da Fig. 3.2) entre a rosca M16 e a seção de maior diâmetro, pode ser observada uma geometria composta por chanfros e raios específicos. Essa transição tem por finalidade suavizar a mudança de seção e evitar regiões de concentração de tensões durante a aplicação de carga torcional. Por fim, a face plana retificada (ver item “c” da Fig. 3.2) tem a função de limitar o avanço do componente montado na ponta do eixo, impedindo a concentração de carga axial sobre os filetes da rosca, além de

atuar no alinhamento e a rigidez de montagem do componente. A Figura 3.3 ilustra o eixo do cilindro de reparo da UPPAX adaptado com o novo mecanismo de fixação.



Figura 3.3: Imagem ilustrativa do eixo do cilindro de reparo da UPPAX projetado com o mecanismo de fixação MSSC®.

### *3.2.2 Projeto mecânico das ferramentas de usinagem do furo cônico – Etapa de Furação*

As ferramentas de usinagem utilizadas por Lima Filho (2008) consistem de ferramentas cônicas helicoidais fabricadas em metal duro, com diâmetro maior do cone de 20 mm. O metal duro, apesar de na prática apresentar uma relação de custo/benefício melhor que o aço rápido, não é adequado para ser utilizado em máquinas-ferramenta de baixa rigidez. Este material apresenta alta dureza, e, conseqüentemente, pouca tenacidade, necessitando de máquinas e dispositivos de fixação robustos para evitar vibrações excessivas que podem danificar a ferramenta precocemente.

Um fator importante que pode ter contribuído pelo baixo desempenho das ferramentas utilizadas por Lima Filho (2008), consiste na forma de afiação utilizada na extremidade das ferramentas. A forma adequada de afiação reduz os esforços de corte gerados durante a usinagem, proporcionando melhor estabilidade da ferramenta (SOUZA, 2011).

Avárias da aresta de corte (lascamentos, deformação plástica, trincas longitudinais e transversais) podem ocorrer por solicitações térmicas e mecânicas excessivas e também com o uso de parâmetros incorretos de usinagem. Elevadas forças de corte podem induzir a lascamentos e microlascamentos da aresta ou da quina da ferramenta (SOUZA, 2011). Outro

fator que pode provocar o lascamento é a interrupção do corte durante a usinagem, sobretudo na usinagem de materiais tenazes, que formam cavacos que facilmente se soldam na face da broca (SOUZA, 2011). O processo de usinagem com corte interrompido pode levar à fadiga térmica e mecânica da cunha de corte da ferramenta (SOUZA, 2011). As rápidas variações da força de usinagem podem levar ao surgimento de trincas transversais que se propagam até a fratura da ferramenta.

A velocidade de rotação ( $n$ ) e a velocidade de avanço ( $V_f$ ) são parâmetros que devem ser selecionados adequadamente para obtenção de um bom acabamento superficial, além de contribuir para a vida útil da ferramenta e precisão dimensional requerida. Depois que os parâmetros tabelados são testados, eles são quase sempre ajustados para valores maiores ou menores, visando adequá-los a uma situação especial. A Tabela 3.1 indica os parâmetros de usinagem utilizados por Lima Filho (2008) para a abertura do furo cônico.

Tabela 3.1: Parâmetro utilizados para a furação do furo cônico na UPPAI (LIMA FILHO, 2008).

<b>Parâmetro de Usinagem</b>	<b>Broca cilíndrica: Diâmetro 8,5 mm</b>	<b>Diâmetro maior da Broca e Fresa cônica (Ø20 mm)</b>	<b>Média</b>
<b>Velocidade de avanço (mm/s)</b>	2,08	2,75	2,42
<b>Rotação (rpm)</b>	2.500	1.100	1.800

Foi utilizado fluído de corte, nesse caso óleo lubrificante, em todas as operações de usinagem realizadas por Lima Filho (2008). Em virtude da grande área de contato entre a ferramenta e a peça, ocorre a grande possibilidade de vibração indesejada na peça ou na máquina. Uma alternativa para diminuir a vibração foi adicionar óleo lubrificante ao invés de fluído refrigerante. Essa opção não só reduz o atrito da ferramenta com a superfície do furo, como também lubrifica os cavacos que estão sendo produzidos, e ao mesmo tempo direcionados pelas estrias helicoidais para fora do furo.

O uso de óleo lubrificante para o processo de reparo por atrito é impraticável, uma vez que essa técnica pode ser realizada em ambiente submerso, impossibilitando a utilização de fluídos que contêm aditivos nocivos ao meio ambiente e a saúde do operador. Portanto, é ideal que a ferramenta de usinagem opere a seco, abrindo mão dos benefícios oferecidos pelo uso do fluído de corte. O único fluído de corte seria a água para operações de reparo por atrito em ambiente submerso.

Cada elemento ou parte de uma máquina possui uma frequência natural de oscilação, sendo esta frequência uma propriedade intrínseca do sistema que depende basicamente da sua distribuição de massa e rigidez. Quando a frequência de uma das forças geradas pelo

funcionamento de uma máquina é igual a uma de suas frequências naturais, ocorre a ressonância e a amplitude da vibração nessa frequência será significativamente amplificada. Portanto, para evitar essa situação, os equipamentos são projetados de tal forma a trabalhar em regiões distantes de suas frequências naturais. Normalmente as faixas de trabalho encontram-se em altas rotações e as frequências naturais estão nas baixas rotações (NSK, 2004).

Em um sistema com um grau de liberdade, a frequência natural é reduzida pela metade quando se aumenta a massa do sistema em quatro vezes (NSK, 2004). Dessa forma, reduzir a massa de um sistema é um problema quando o assunto é rigidez. A grande dificuldade é conseguir obter usinagens de boa qualidade utilizando o cilindro de reparo portátil, sabendo que este possui uma massa de 15 kg, aproximadamente 5 vezes menor que a massa do cilindro de reparo da UPPAI utilizada por Lima Filho (2008).

O cilindro de reparo portátil da UPPAIV foi fabricado utilizando materiais de alta resistência mecânica e baixa densidade. Aumentar a rigidez do cilindro de reparo implicaria no desenvolvimento de um novo equipamento, sendo, portanto inviável para realização deste trabalho. Dessa forma, a alternativa foi o desenvolvimento de ferramentas especiais de usinagem com soluções estratégicas visando garantir uma usinagem rápida, segura e estável, de forma a assegurar a precisão de usinagem requerida para o processo de reparo por atrito.

Assim, para a realização da etapa de furação foram selecionadas apenas duas ferramentas de usinagem, a saber: uma broca cônica do tipo escalonada para a remoção da maior quantidade de material, e uma fresa cônica com a função de alargar o furo, conferindo a este as dimensões finais, conforme apresentado na Fig. 2.14 b.

As brocas escalonadas, também conhecidas como brocas múltiplas, são utilizadas para a abertura de furos com dois ou mais diâmetros, simultaneamente. Essas ferramentas são ideais para furação onde se exige grande remoção de material, devido à presença de várias arestas de corte ao longo do comprimento longitudinal da ferramenta (SOUZA, 2011). Essas ferramentas são especialmente afiadas para execução de furos complexos em apenas uma única operação, tendo como principal objetivo o aumento da produtividade, realizando furos de diâmetros menores e maiores, reduzindo o tempo de parada para a troca de ferramentas.

O uso da broca cônica escalonada para abertura inicial do furo cônico representa uma evolução importante para o processo de reparo por atrito na medida em que se elimina a utilização da broca cilíndrica comum de diâmetro de 8,5 mm, utilizada por Lima Filho (2008) para aliviar a quantidade de material removida pela broca cônica.



Foram fabricadas duas brocas escalonadas e duas fresas, ambas de geometria cônica produzidas em materiais distintos, sendo uma em aço rápido e outra em metal duro. A broca cônica escalonada foi fabricada com duas arestas de corte defasadas de  $180^\circ$ , com ângulo de ponta de  $140^\circ$  (ângulo interno). Esse ângulo atribui à ferramenta uma quina mais resistente, proporcionando a ferramenta maior resistência ao lascamento e ao aquecimento. A extremidade da ferramenta confere o diâmetro menor do furo cônico de 12,5 mm e as arestas presentes ao longo do comprimento da ferramenta fazem com que os esforços de corte sejam significativamente reduzidos, tornando-a ideal para operação de desbaste.

A seleção da quantidade de arestas de corte de uma ferramenta de usinagem está diretamente relacionada com: à forma de escoamento de cavaco, os esforços de corte, a rigidez da ferramenta, a qualidade de acabamento e o material da peça a ser usinada (MITSUBISHI, 2016). A Figura 3.4 ilustra as seções transversais de fresas de topo com quantidades diferentes de arestas de corte. Para materiais frágeis, por exemplo, a melhor indicação é o uso de ferramentas com maiores números de arestas de corte, pois os cavacos produzidos apresentam menores dimensões, interferindo menos na região de interface ferramenta-peça, influenciando em menor proporção na qualidade da superfície usinada (MITSUBISHI, 2016).

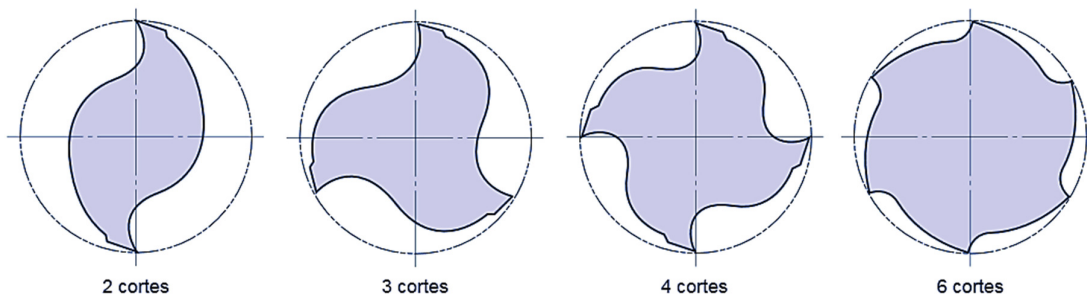


Figura 3.4: Comparação da seção de fresas de topo com diferentes posições e quantidades de arestas de corte (MITSUBISHI, 2016).

A Tabela 3.2 apresenta as vantagens e desvantagens das fresas de topo com diferentes quantidades de arestas de corte com suas respectivas aplicações no processo de usinagem.

Tabela 3.2: Características e aplicações de fresas de topo com diferentes números de corte (MITSUBISHI, 2016).

		2 Arestas de Corte	3 Arestas de Corte	4 Arestas de Corte	6 Arestas de Corte
<b>Característica</b>	<b>Vantagem</b>	- Escoamento de cavaco é excelente. - Indicada para mergulho. - Baixo esforço de corte.	- Escoamento de cavaco é excelente. - Indicada para mergulho.	- Alta rigidez	- Alta rigidez. - Durabilidade superior da aresta de corte.
	<b>Desvantagem</b>	- Baixa Rigidez	Diâmetro não é fácil de medir.	- Baixo escoamento de cavaco.	- Baixo escoamento de cavaco.
<b>Aplicação</b>		- Rasgo, contorno, mergulho, etc. - Amplo campo de aplicação.	Rasgo, contorno. Desbaste e acabamento.	- Pequenos rebaixos, contornos. - Acabamento.	- Material com alta dureza. - Pequenos rebaixos, contorno.

Para se obter a geometria e o acabamento final do furo cônico do processamento por atrito, foi fabricada uma fresa cônica com duas arestas de corte defasadas de 180°. Embora essa seja uma ferramenta de baixa rigidez, por outro lado, o volume de material a ser usinado é significativamente menor se comparado com o volume de material removido pela broca cônica. Dessa forma, a fresa cônica será utilizada apenas para remover as marcas de usinagem deixadas pelas arestas de corte da broca cônica escalonada e usinar o raio de concordância de 2 mm no fundo do furo cônico.

Ferramentas com menor número de arestas de corte permitem um melhor escoamento do cavaco e, conseqüentemente, menores esforços são exigidos durante o processo de usinagem. Outra vantagem consiste no fato do custo de fabricação de uma ferramenta com duas arestas de corte ser consideravelmente menor que o de uma fresa contendo três arestas de corte. A Figura 3.5 ilustra a concepção das ferramentas utilizadas para a usinagem dos furos cônicos não passantes do processo FTPW. A figura da esquerda ilustra a broca cônica escalonada e a da direita a fresa cônica, ambas adaptadas com o mecanismo de fixação MSSC®.

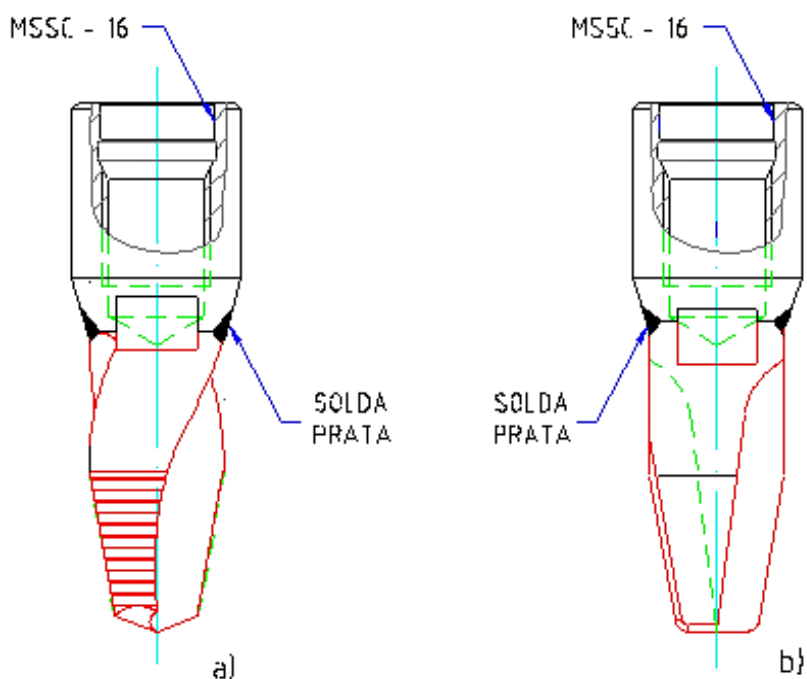


Figura 3.5: Imagem ilustrativa da broca cônica escalonada e da fresa cônica adaptadas com mecanismo de fixação MSSC®.

O corpo das ferramentas de usinagem é constituído por dois tipos de materiais, sendo o material do *blank* de metal duro ou de aço rápido, e a parte que contém o mecanismo de fixação MSSC® fabricado em aço inoxidável com tratamento térmico. O *blank* e o aço inoxidável foram unidos por brasagem utilizando “solda” prata (Fig. 3.5).

O desempenho das ferramentas de usinagem evoluiu significativamente com o surgimento de novos procedimentos de afiação (SOUZA, 2011). Uma seleção adequada da geometria de afiação proporciona um melhor rendimento da usinagem, além de reduzir os esforços de corte no processo de furação e garantir uma melhor qualidade dos furos. Dentre os vários tipos de afiação, a escolhida para a broca cônica escalonada foi a afiação em “S”, também denominada de *Spiral Point Drill* (CARDOSO, 2014). A Figura 3.6 ilustra a geometria de afiação em “S”. Essa afiação apresenta a aresta transversal com ponta em espiral em forma de “S” e gera ângulos de saída menos negativos ao longo da aresta de corte. Testes realizados com esse tipo de afiação mostraram uma redução de até 30% na força de avanço, redução dos erros geométricos, redução de rebarbas na entrada e na saída dos furos produzidos, além de uma redução no calor gerado na extremidade da ferramenta, o que contribui para um aumento considerável do tempo de vida da ferramenta (CASTILLO, 2005).



Figura 3.6: Ilustração da geometria de afiação em “S” da aresta de corte da broca cônica escalonada (MITSUBISHI, 2016).

### *3.2.3 Projeto mecânico dos mandris de fixação dos pinos consumíveis – Etapa de Preenchimento*

Este tópico foi dividido em três subitens. No subitem “a” é apresentado o mandril utilizado para o processamento de pinos por atrito pelo método FTPW, utilizado para a etapa de preenchimento do furo cônico. No subitem “b” é apresentado o desenvolvimento de um mandril para a exploração da técnica de reparo de trincas passantes através da tração do pino consumível (método FPPW). No subitem “c” é apresentada a modificação do mandril empregado para a fixação de parafusos roscados, utilizados para a ancoragem de estruturas auxiliares de fixação do cilindro de reparo.

#### **a) Mandril para o processo FTPW**

Hwang (2010) desenvolveu um mandril com um sistema compacto e simples para fixação dos pinos consumíveis. A concepção do mandril, denominado de mandril magnético, viabilizava a possibilidade de automação do processo de reparo por atrito. O mandril era montado no eixo do cilindro de reparo da UPPAIV através de uma rosca métrica. A Figura 3.7 mostra a forma como o pino de adição é fixado ao mandril. Um ímã é responsável por dar suporte à força peso do pino, e uma chaveta é responsável por transmitir o torque gerado durante o processamento do pino consumível.

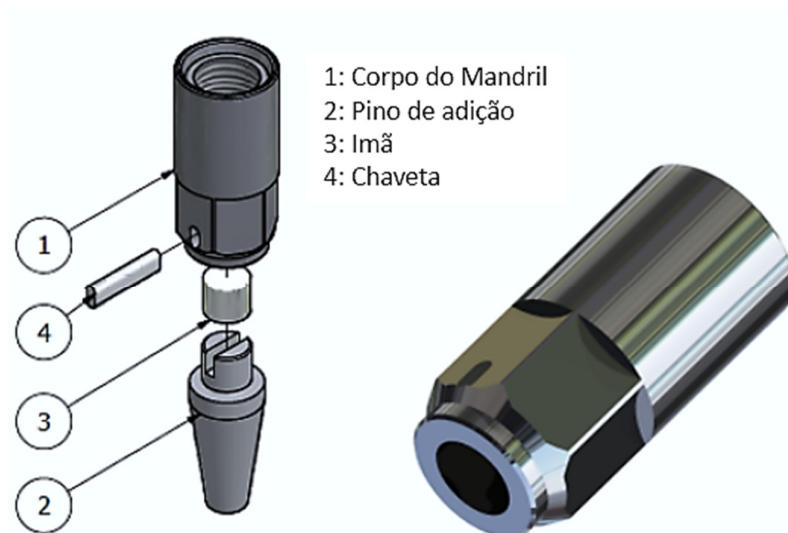


Figura 3.7: Mandril utilizado para a fixação de pinos consumíveis para o processo FTPW (HWANG, 2010).

Deste modo, o mandril utilizado para o reparo de trincas por atrito pelo método de compressão do pino consumível (FTPW) é funcional e apto para a troca automática do consumível. Assim, a concepção do mandril foi mantida, e o mesmo foi apenas adaptado com o novo mecanismo de fixação da MMSC®.

#### **b) Mandril para o processo FPPW**

A UPPAX é capaz também de realizar reparos pelo método da tração do pino consumível. Esse processo foi relativamente pouco explorado, e atualmente trabalhos de pesquisa e desenvolvimento são realizados na busca de soluções que possibilitem a utilização da UPPAX para o reparo de trincas passantes. Essa atividade é um desafio para o presente projeto, quanto ao desenvolvimento de um mandril e de um sistema de fixação do pino consumível que atenda as cargas mecânicas oriundas do processamento do pino consumível.

Hwang (2010) desenvolveu um conceito de mandril e pino consumível para a realização de ensaios FPPW, afim de estudar a viabilidade desse processo na UPPAIV. Assim, foi projetado um mandril com rosca métrica na extremidade para a montagem e fixação de pinos consumíveis de haste roscada. Os esforços de tração eram suportados pelos filetes de rosca e o torque era transmitido através de um pino chaveta. A Figura 3.8 ilustra a forma como o pino consumível era fixado ao mandril.

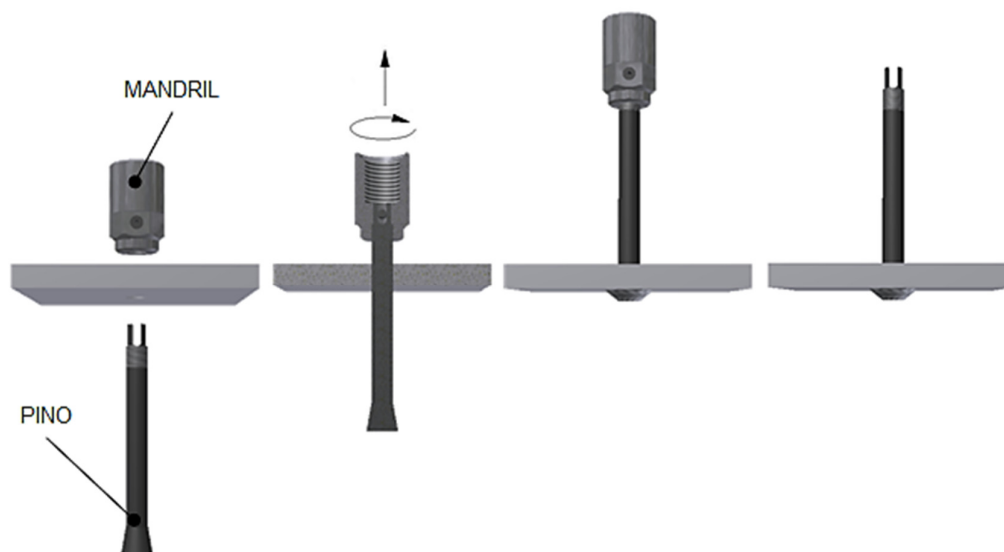


Figura 3.8: Conjunto de fixação de pinos consumíveis para preenchimento por tração (HWANG, 2010).

Nessa concepção, o pino é montado no mandril através de seu rosqueamento, posteriormente é inserido um pino radial que tem função de pino chaveta, que também é fixado no mandril através de uma rosca. Após o processamento, o pino chaveta precisa ser retirado e o mandril ser desenroscado do consumível.

Na realização do primeiro ensaio, ocorreu o rompimento do pino consumível na região da rosca de fixação. Mesmo com o rompimento, o pino ficou preso no bloco, indicando que houve alguma união metalúrgica entre as partes. A Figura 3.9 mostra o pino rompido na região da rosca ao lado de um pino original, e o corte na seção transversal do substrato, indicando a união parcial do pino no furo.

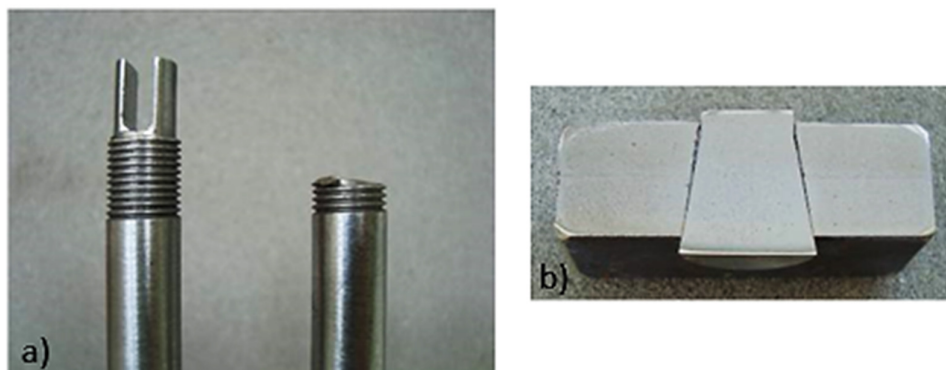


Figura 3.9: Reparo por atrito pelo processo FTPW utilizando a UPPAIV. a) Pino consumível rompido ao lado de um pino novo. b) Corte transversal mostrando a união parcial do pino com o substrato (HWANG, 2010).

Para suprir essa deficiência, foi desenvolvido um novo mandril para exploração da técnica de reparo por atrito de trincas passantes. A concepção do mandril utiliza castanhas para fixação do pino, com função de suportar as cargas axiais de tração. O novo sistema é mostrado na Fig. 3.10. O pino (a) é introduzido na região de abertura do mandril (b), as castanhas (c) são inseridas na abertura radial do mandril para que o travamento do pino seja estabelecido. A luva de proteção (e) tem a função de impedir a projeção das castanhas para fora do mandril devido à ação da força centrífuga provocada pela elevada rotação durante o processamento do pino. Os canais presentes na parte externa do corpo do mandril têm a função de direcionar os pinos guias (f) da luva de proteção até a posição de travamento. Os furos roscados presentes nas castanhas têm função de auxiliar a remoção destes componentes no final do processo. Essa é uma concepção inovadora, devendo ser objeto de patente.

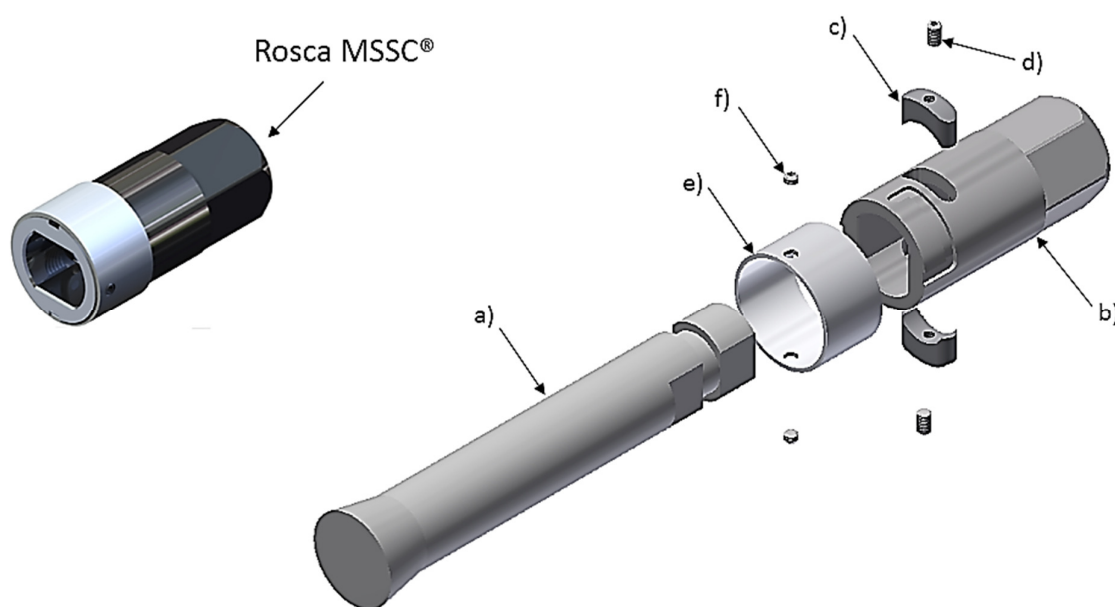


Figura 3.10: Vista explodida do mandril para processo FPPW. a) Pino consumível; b) Mandril de Tração; c) Castanhas; d) Prisioneiro para remoção da castanha; e) Luva de proteção; f) Guias.

O torque é transferido do mandril para o pino consumível através de dois rebaixos no diâmetro superior do pino e a força axial é transferida por um colar realizado na cabeça do pino (Fig. 3.11).

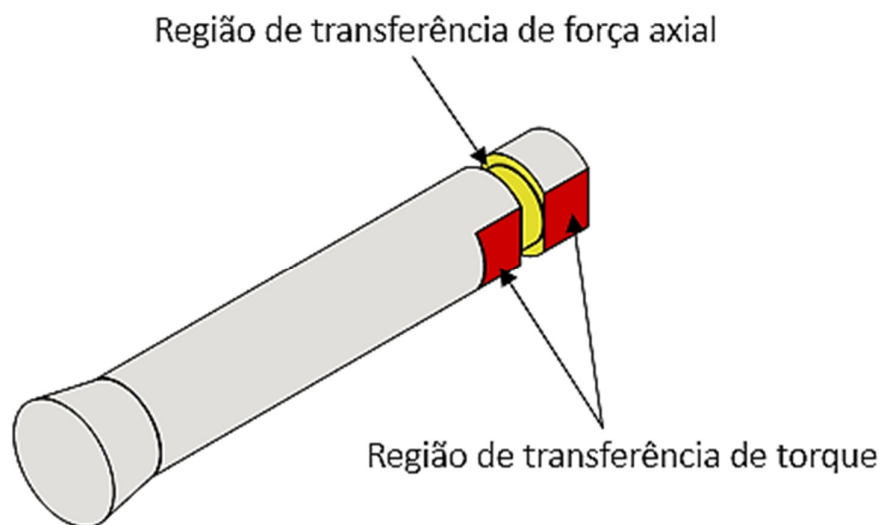


Figura 3.11: Pino consumível para processamento FPPW.

Foi utilizado um *software* comercial de simulação pelo método de análise de elementos finitos para o projeto e dimensionamento do mandril e do “colar” presente na cabeça do pino consumível. Os resultados da simulação mostraram uma tensão cisalhante elevada de 1.039 MPa na castanha, localizada na região de transição pino/mandril. Este problema foi solucionado através da especificação de um aço de elevada temperabilidade, tratado termicamente.

### c) Mandril para fixação de pinos roscados

No trabalho desenvolvido por Hwang (2010), foi projetado um mandril utilizado para o processamento de pinos roscados de ponta cônica lisa. Estes pinos são diretamente processados em superfícies planas, sem a necessidade de remoção da camada de óxido e nenhum outro tratamento superficial. Os pinos são utilizados para a ancoragem de estruturas auxiliares de fixação do cilindro de reparo. Na Figura 3.12 é ilustrada a geometria do pino roscado e a sequência de acoplamento e processamento do pino sob uma superfície plana.

O colar presente no corpo do pino tem função de suportar os esforços de soldagem a fim de não transferi-los para a rosca, além de bloquear o escoamento do material processado até os fios de rosca. Após o processamento, o sentido de giro do motor é invertido para a desacoplagem do pino roscado.



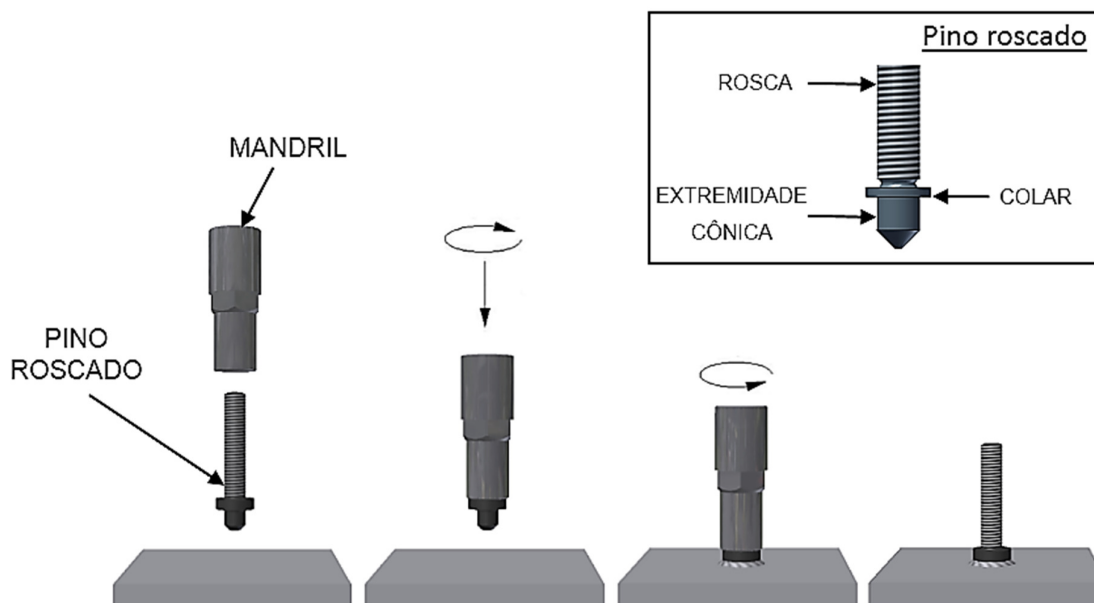


Figura 3.12: Ilustração da sequência de acoplamento e soldagem por atrito de pinos roscados (HWANG, 2010).

Os resultados apresentados por Hwang (2010) mostraram que o mandril para o processamento de pinos roscados é apto e funcional. Pinos com rosca métrica M10 fabricados no material ASTM A36 apresentaram resistência a esforços axiais de tração de até 27 kN, quando processados a uma rotação de 5.000 rpm e força axial de 10 kN. Assim, a única alteração realizada neste mandril foi a substituição da rosca utilizada para a fixação no eixo do cilindro de reparo da UPPAX. A Figura 3.13 ilustra o mandril utilizado para o processamento de pinos roscados adaptado com rosca MSSC®.

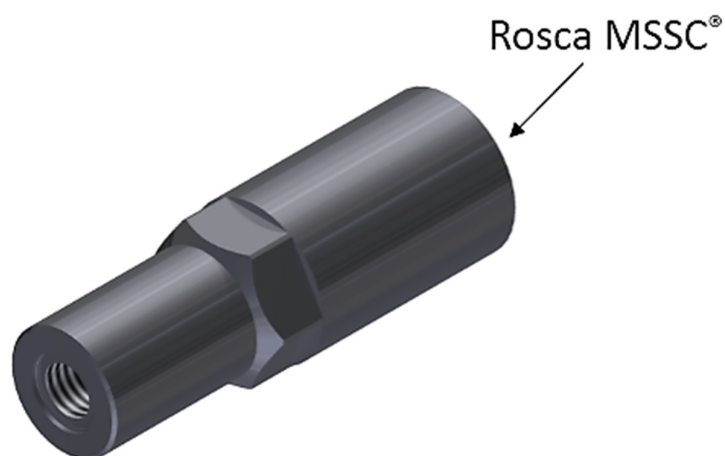


Figura 3.13: Mandril utilizado para o processamento de pinos roscados adaptado com rosca MSSC®.

### 3.2.4 Projeto da ferramenta de usinagem para etapa de fresamento

Após o processamento do pino consumível é necessário remover o material remanescente, constituído pelo material do pino não processado e pelo material deformado plasticamente (*flash*). A Figura 3.14 mostra o material que deve ser removido após o processamento de cada pino consumível.

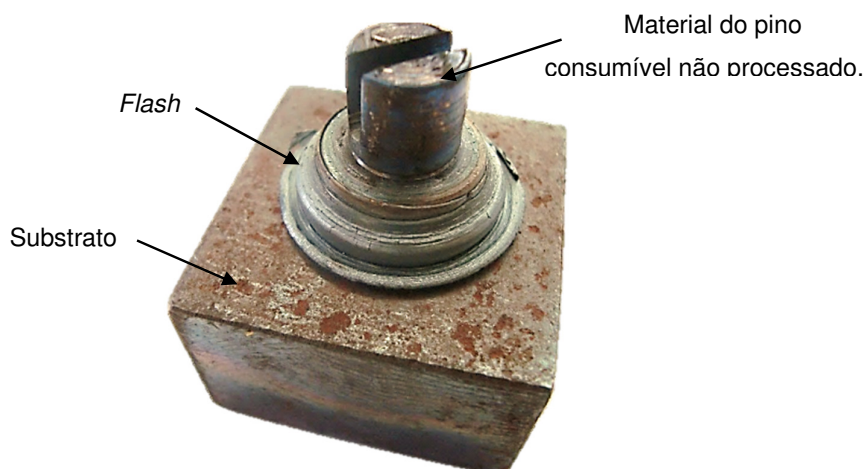


Figura 3.14: Material do pino não processado a ser removido pós-preenchimento.

Para a realização da usinagem do material remanescente, foi utilizado uma ferramenta de topo de uso comercial. A ferramenta selecionada faz parte da linha de produtos da Sandvik Coromill® 390, composta por duas pastilhas de metal duro para baixas forças de corte. A ferramenta apresenta como principais benefícios a capacidade de usinar maiores profundidades de corte, nesse caso de até 10 mm, além de propiciar um excelente acabamento superficial, rapidez de usinagem e versatilidade na remoção do material (SANDVIK, 2016). A Figura 3.15 ilustra a fresa utilizada para a remoção do material remanescente do processo de reparo por atrito.

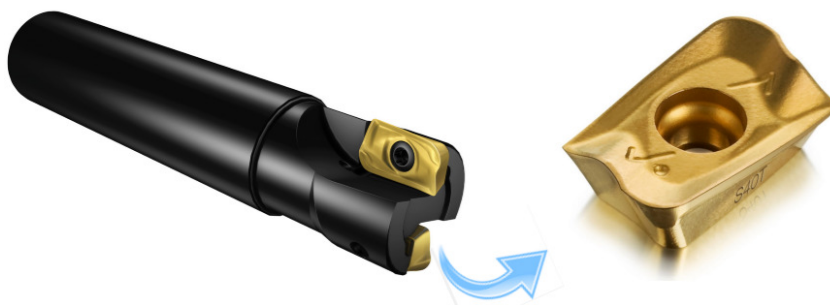


Figura 3.15: Fresa Sandvik Coromill® 390 adaptada utilizada para a remoção do material remanescente do pino consumível (SANDVIK, 2016).

A ferramenta foi adaptada com a rosca fêmea MSSC<sup>®</sup>, possibilitando a montagem na extremidade do eixo principal do cilindro de reparo da UPPAX. A Figura 3.16 ilustra o *blank* da ferramenta Coromill<sup>®</sup> 390, brasada por meio de “solda” prata em um componente de aço inoxidável martensítico contendo a rosca MSSC<sup>®</sup>.

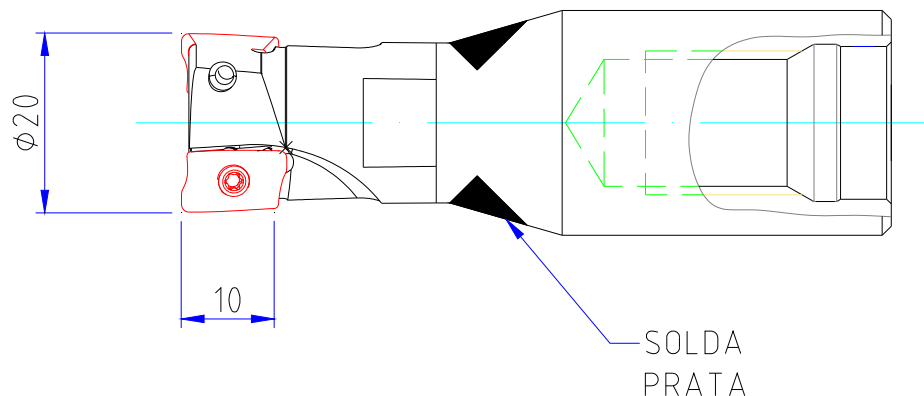


Figura 3.16: Ferramenta Coromill<sup>®</sup> 390 adaptada com rosca fêmea MSSC<sup>®</sup>.

Como já mencionado, a ferramenta Coromill<sup>®</sup> 390 consiste de uma fresa de topo, e sua operação requer a movimentação lateral do cilindro de reparo. Por esse motivo, os testes de usinagem com a fresa de topo não serão apresentados neste trabalho, uma vez que o sistema de ancoragem do cilindro de reparo disponível no laboratório não permite a realização de operações desse tipo. Em virtude do que foi mencionado, está sendo desenvolvido um robô inovador a nível mundial para o posicionamento e deslocamento de uma plataforma móvel, com seis graus de liberdade de elevada rigidez. Esta plataforma será utilizada para a ancoragem do cilindro de reparo da UPPAX, de tal forma a realizar com destreza os movimentos necessários para a realização de todas as etapas operacionais do processo de reparo por atrito (etapa de furação, preenchimento e fresamento).

### 3.2.5 Síntese dos componentes e acessórios desenvolvidos para a UPPAX

A Figura 3.17 ilustra o esquema geral dos mandris e das ferramentas da UPPAX utilizadas no processo de reparo de trincas por atrito.

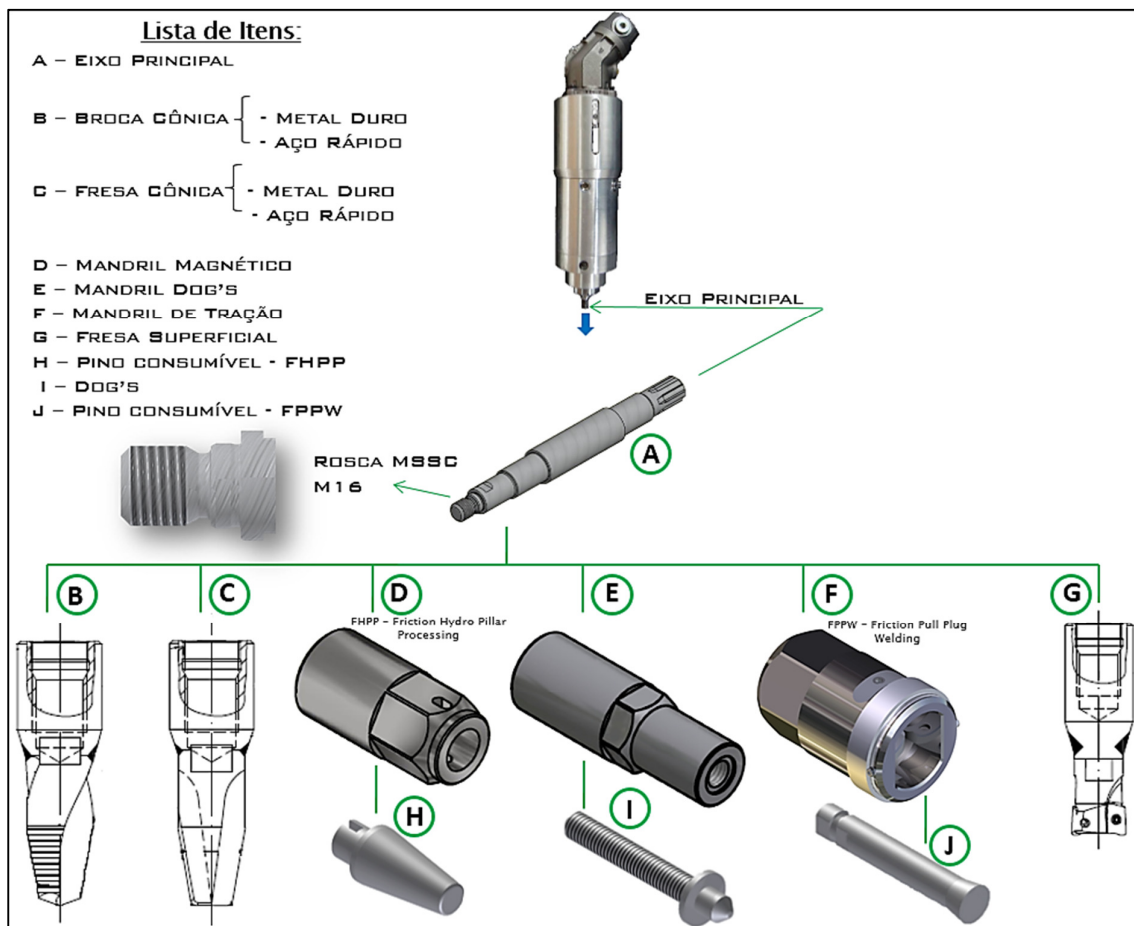


Figura 3.17: Síntese dos componentes e acessórios desenvolvidos para a UPPAX, possibilitando a execução de todas as operações do reparo por atrito.

A Figura 3.18 representa esquematicamente as etapas operacionais da UPPAX para realização do reparo por atrito em furos não passantes FTPW (*Friction Tapered Plug Welding*).

O furo é iniciado com uma broca cônica escalonada (Esquema a), b) e c) – Fig. 3.18). Em seguida, a fresa cônica retifica a superfície do furo, conferindo-lhe o acabamento final com geometria específica, para uma profundidade final de 16 mm (Esquema d), e) e f) – Fig. 3.18).

Após a abertura do furo cônico é realizado o processamento do pino consumível (esquema g) e h) – Fig. 3.18).

A etapa final consiste em eliminar todo o material do pino consumível não processado, além do *flash* formado. Nesta etapa é utilizada a fresa de topo com pastilhas de metal duro, que proporciona o acabamento superficial da superfície reparada (esquema i) e j) – 3.18).

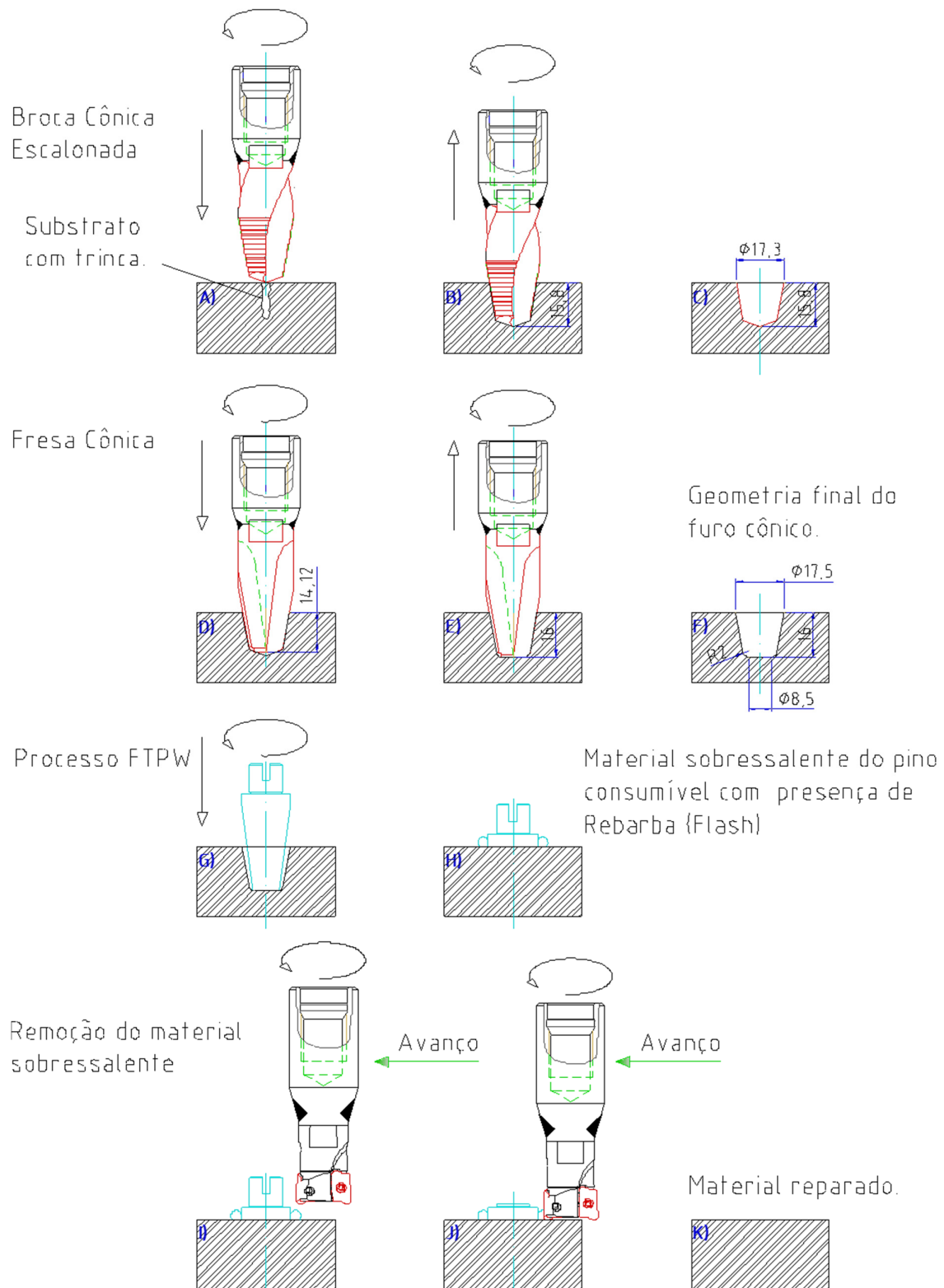


Figura 3.18: Esquema dos processos de furação, preenchimento e fresamento realizados pela UPPAX.

### 3.3 Reestruturação da Unidade Hidráulica

Neste item são apresentados os principais fatores que levaram à reestruturação da unidade hidráulica já existente no laboratório, além da caracterização de todos os componentes e acessórios hidráulicos instalados, destinados a operacionalizar o cilindro de reparo em todas as etapas do processo de reparo por atrito apresentado nas seções anteriores.

#### 3.3.1 Projeto de reestruturação da unidade hidráulica

A unidade hidráulica tem a função de prover energia tanto ao motor hidráulico, quanto à haste hidráulica do cilindro de reparo, além de possuir um sistema eletrônico que monitora a pressão e o controle do fluxo hidráulico demandado durante o processamento do pino consumível. A seguir listam-se os fatores que levaram à necessidade de se reestruturar a unidade hidráulica.

Em função dos problemas identificados na unidade hidráulica, foram introduzidas melhorias com o objetivo de:

- Controlar a rotação do motor hidráulico da UPPAIV em altas e baixa velocidades, permitindo a realização de todas as operações de reparo por atrito (furação, preenchimento e fresamento para remoção de restos do pino);
- Proteger os componentes mecânicos contra os golpes de aríete;
- Equipar a unidade hidráulica com componentes de segurança para o operador da máquina;
- Melhorar o sistema de filtragem do óleo hidráulico;
- Melhorar o sistema de refrigeração do óleo hidráulico;
- Aumentar a pressão do sistema de força. É importante mencionar que no projeto original da unidade hidráulica, a pressão máxima disponível para o sistema de força era de 120 bar (12 MPa), insuficiente para alcançar a capacidade de carga máxima UPPAIV de 40 kN, que requer para isso, uma pressão de 200 bar (20 MPa) na câmara do cilindro.

Foi realizada uma revisão de todo o projeto da unidade hidráulica, sendo os itens modificados descritos a seguir. Para uma melhor compreensão, este tópico foi dividido em quatro subitens. O subitem I refere-se às modificações realizadas no circuito hidráulico do sistema de rotação, o subitem II refere-se às modificações realizadas no circuito hidráulico do sistema de acionamento do cilindro hidráulico da UPPAX, o subitem III refere-se às modificações realizadas no sistema de recirculação e o subitem IV aos demais componentes hidráulicos substituídos e reaproveitados.

### I. Circuito hidráulico do sistema de rotação

Para melhor entendimento, o projeto hidráulico original e o atual do sistema de rotação são apresentados na Fig. 3.19.

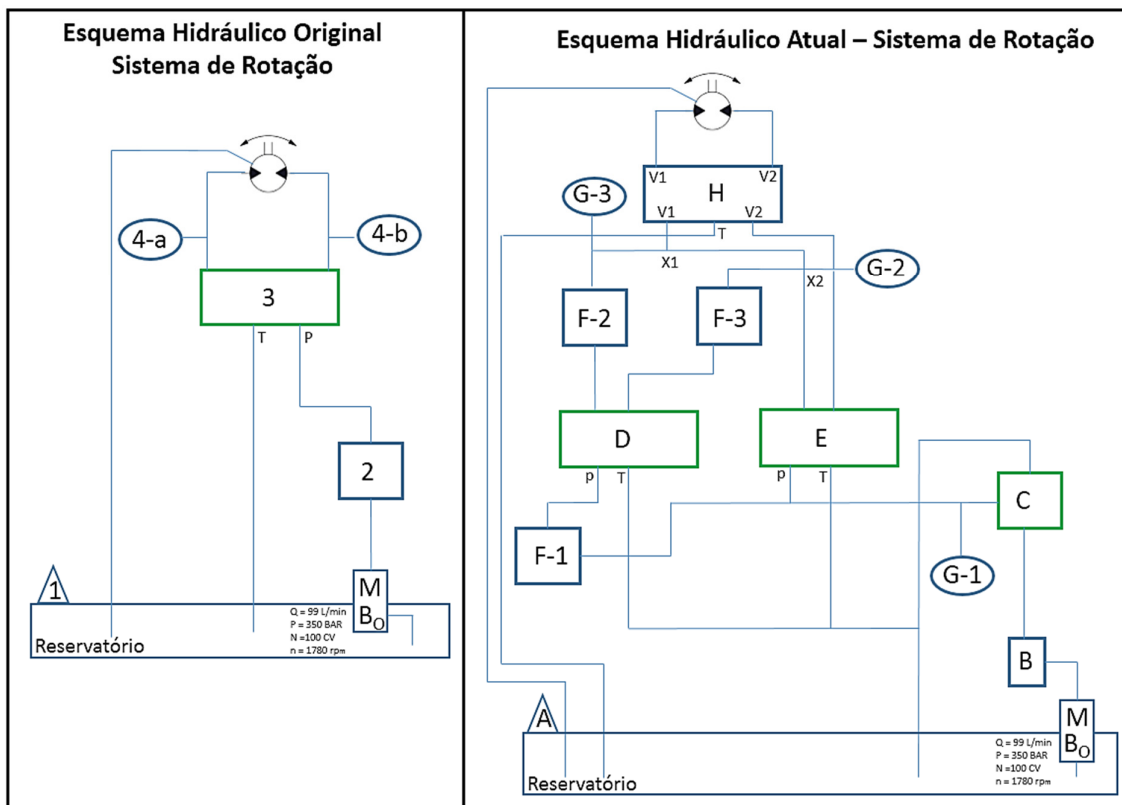


Figura 3.19: Circuito hidráulico original e atual do sistema de rotação.

### I.1. Substituição da válvula direcional proporcional do sistema de rotação

A válvula direcional proporcional do sistema de rotação (Posição 3 da Fig. 3.19) é uma válvula linear de um estágio, como mostrado na Fig. 3.20. Para o motor hidráulico do cilindro de reparo da UPPAI, a válvula trabalha na faixa linear compreendida entre 0 e 80% da abertura desta válvula.

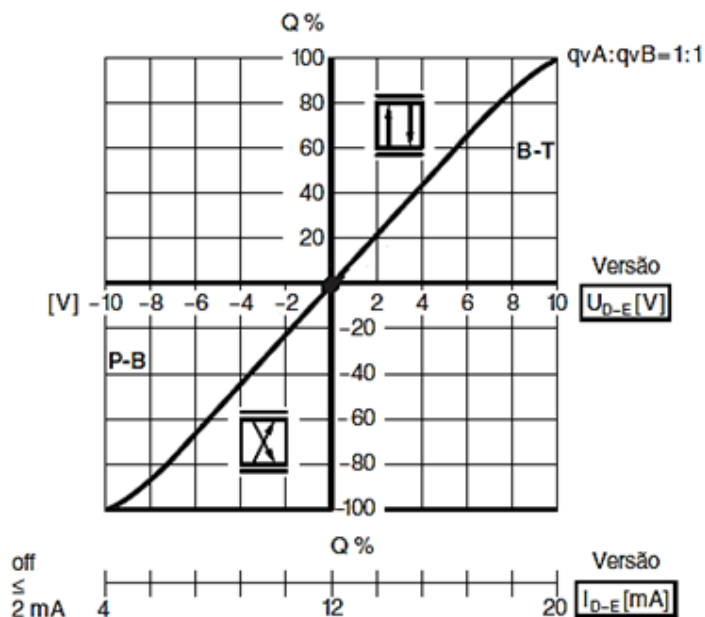


Figura 3.20: Curva característica da válvula direcional proporcional do sistema de rotação (Q – Vazão em % e U – Sinal de comando em volts.)

Com o propósito de reaproveitar a válvula proporcional do sistema de rotação, não foi possível controlar o motor hidráulico de maior cilindrada em altas rotações, em virtude da instabilidade da rotação do motor hidráulico durante os testes. As vazões necessárias para as rotações praticadas no processo de reparo por atrito fazia com que o motor trabalhasse na região de instabilidade da válvula, ou seja, na faixa compreendida entre 80% e 100% da abertura da válvula, dificultando o controle do sistema de rotação.

Com a necessidade de se utilizar um motor de maior potência na UPPAX, foi necessário selecionar uma válvula direcional proporcional compatível para o controle desse motor em baixas e altas rotações. Para tal, a unidade hidráulica foi adaptada com duas válvulas direcionais proporcionais, sendo uma para controlar o motor em condições de baixa rotação, praticadas durante a realização das etapas de usinagem do processo de reparo por atrito (furação e fresamento), e outra válvula para controlar o motor em condições de alta rotação, praticadas durante o processamento do pino consumível (etapa de preenchimento).



Para controlar o motor hidráulico em baixa rotação foi especificada a mesma válvula direcional proporcional que operava o motor hidráulico da UPPAI. Entretanto, a válvula original não pôde ser reaproveitada devido a problemas irreparáveis identificados pelo fabricante. Essa válvula foi substituída por outra nova indicada na posição “D” da Fig. 3.19.

Para o controle do motor hidráulico em alta rotação foi selecionado uma válvula servossolenóide com eletrônica integrada. A perda de carga dessa válvula é sete vezes menor que a perda de carga da válvula especificada para o sistema de baixa rotação. Dessa forma, a válvula especificada para o sistema de alta rotação permite um melhor aproveitamento do torque do motor hidráulico. A válvula proporcional para o controle de alta rotação é indicada na posição “E” da Fig. 3.19.

### **I.2. Válvula limitadora de pressão do sistema de rotação**

Na concepção original da unidade hidráulica, a regulagem da pressão da linha do sistema de rotação era realizada manualmente (posição 2 da Fig. 3.19). No atual projeto foi inserida uma válvula limitadora de pressão pilotada, com capacidade máxima de pressurização de 350 bar (35 MPa). Essa válvula é identificada pela posição “C” da Fig. 3.19.

Com essa válvula é possível ajustar a pressão de forma automática para a realização das diferentes etapas operacionais da UPPAX. Nas etapas de usinagem (furação e fresamento), o torque requerido no motor hidráulico é muito inferior ao torque necessário durante a etapa de preenchimento. Assim, a pressão poderá ser ajustada de acordo com o torque necessário para realização de cada etapa operacional da UPPAX. Essa alternativa viabiliza a redução do consumo de energia elétrica, além de possibilitar uma despressurização da linha do sistema de rotação de forma gradativa e controlada, diminuindo assim a presença dos golpes de aríete sempre que houver a parada do sistema.

### **I.3. Filtro de pressão**

A unidade hidráulica original apresentava apenas um único sistema de filtragem, ligado ao sistema de recirculação. Com objetivo de melhorar a eficiência de filtragem do óleo hidráulico, foram adicionados dois filtros de pressão, sendo um instalado no sistema de rotação (Posição “B” da Fig. 3.19) e outro instalado no sistema de acionamento do cilindro hidráulico (Posição

“J” da Fig. 3.22). Um sistema de filtragem mais eficiente evita falhas e simultaneamente aumenta a durabilidade dos componentes mecânicos da unidade hidráulica.

As válvulas proporcionais da unidade hidráulica são os componentes críticos que determinam o grau de contaminação do óleo. O máximo grau de contaminação admissível do fluido hidráulico exigido pelo fabricante é 18/16/13, conforme a classe de pureza ISO 4406 ou NAS 7. Em outras palavras, 1 ml da amostra do óleo deve conter de 1.300 a 2.500 partículas maiores ou iguais a 4  $\mu\text{m}$ , entre 320 a 640 partículas maiores ou iguais a 6  $\mu\text{m}$  e entre 40 e 80 partículas maiores ou iguais a 14  $\mu\text{m}$ .

Os filtros de pressão especificados para a unidade hidráulica retêm partículas de até 6  $\mu\text{m}$ . Esses filtros são equipados com sensor de ensujamento, a fim de monitorar a saturação do elemento filtrante, indicando o aumento do diferencial de pressão ou da pressão acumulada no filtro.

O filtro de pressão do sistema de rotação atribui uma perda de carga de 1 bar (0,1 MPa) na condição de máxima vazão de 99 l/min. Já o filtro de pressão do sistema de acionamento do cilindro hidráulico, oferece uma perda de carga de aproximadamente 0,36 bar (0,036 MPa) na condição de máxima vazão (4,5 l/min). Ou seja, ambos os filtros resultam em uma baixa perda de carga para o sistema.

#### **I.4. Válvula de segurança *crossover***

A válvula *crossover* tem a função de proteger o motor hidráulico e demais componentes da unidade hidráulica contra choques ou picos de pressão (golpe de aríete), causados pela mudança de direção ou paradas bruscas durante a operação do equipamento. Além disso, esta válvula é equipada com válvulas de retenção que têm a função de prevenir a cavitação. Essa válvula é indicada pela posição “H” Fig. 3.19.

Caso ocorra a queda de energia elétrica durante a operação do equipamento, as válvulas direcionais de acionamento elétrico (Posição F-1, F-2 e F-3 da Fig. 3.19) retornarão à posição normal fechado, bloqueando o fluxo de óleo, e por consequência, causando o golpe de aríete. Nessa situação, o choque será absorvido pela válvula *crossover* instalada no bloco de válvulas, que alivia a pressão de forma instantânea, direcionando a descarga do fluxo de óleo para o reservatório. A pressão ajustada na válvula *crossover* para depressurização do sistema é realizada manualmente pelo operador, sempre numa pressão acima da máxima pressão de operação do sistema. Outra situação de atuação da válvula *crossover* ocorre no

momento do travamento do eixo do cilindro de reparo durante a realização de uma determinada operação. Nessa condição tem-se um pico de pressão na entrada do motor hidráulico que é absorvido pela válvula *crossover*.

A Figura 3.21 mostra o esquema hidráulico da válvula *crossover* com as posições de instalação na unidade hidráulica. As conexões V1 e V2 (em vermelho) representam as posições de montagem dos pontos A e B do motor hidráulico (Fig. 3.21). Já as conexões V1 e V2 (em verde) indicam as posições de montagem dos pontos X1 e X2 do bloco de válvulas. O derivação “T” (Fig. 3.21) tem a função de garantir que a carcaça do motor hidráulico esteja sempre cheia de óleo.

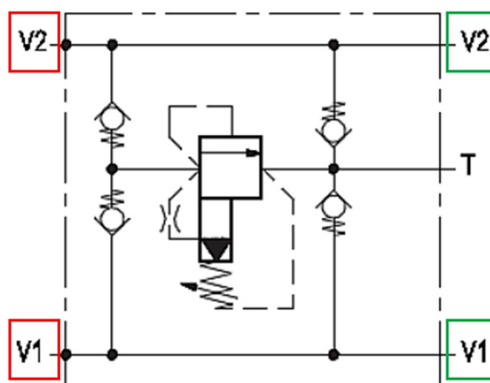


Figura 3.21: Representação esquemática da válvula de segurança *crossover*.

### I.5. Válvulas direcionais de acionamento elétrico do sistema de rotação

Para a nova configuração do sistema de rotação foi necessária a instalação de três válvulas direcionais de acionamento elétrico. As válvulas são todas de assento acionadas por solenoide, identificadas pelas posições F-1, F-2 e F-3 da Fig. 3.19.

A válvula limitadora de pressão (Posição “C” da Fig. 3.19) pode ser ajustada para operar com pressão de até 350 bar (35 MPa). Esta pressão é compatível com a pressão máxima de operação da válvula proporcional do sistema de alta rotação (Posição “E” da Fig. 3.19), porém, superior à pressão máxima de operação da válvula proporcional do sistema de baixa rotação de 315 bar (31,5 MPa) (Posição “D” da Fig. 3.19). As três válvulas direcionais de acionamento elétrico funcionam em sincronismo, ou seja, são desativadas para o bloqueio da válvula Posição “D”, quando a válvula da Posição “E” estiver em operação, e são acionadas quando a válvula da Posição “D” entra em operação e a válvula da Posição “E” é desativada.

## I.6. Motobomba do sistema de rotação

O motor e a bomba de alimentação do sistema de rotação foram reaproveitados da unidade hidráulica original. O acionamento da bomba é realizado por um motor elétrico com potência de 100 CV e rotação de 1.780 rpm. A bomba acoplada nesse motor tem capacidade de bombear uma vazão de 99 L/min a uma pressão de 350 bar (35 MPa).

## II. Circuito de acionamento do cilindro hidráulico

Para melhor entendimento, os circuitos hidráulicos original e atual do sistema de acionamento do cilindro hidráulico são apresentados na Fig. 3.22.

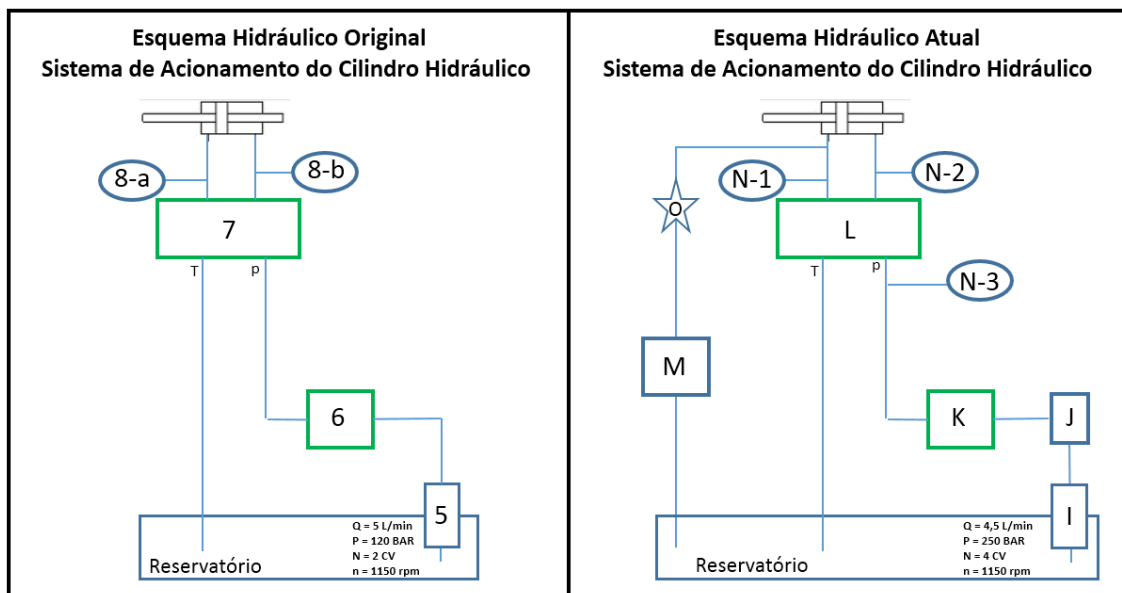


Figura 3.22: Circuito original e atual do sistema de acionamento do cilindro hidráulico.

### II.1. Válvulas limitadora de pressão e direcional proporcional do sistema de acionamento do cilindro hidráulico

As modificações no projeto do circuito de acionamento do cilindro hidráulico da UPPAX foram realizadas com o intuito de melhorar o controle de força e avanço e aumentar a capacidade de aplicação de carga do cilindro hidráulico. Anteriormente, o sistema hidráulico de força e avanço era controlado diretamente por apenas uma válvula direcional proporcional (Posição 7 da Fig. 3.22). A pressurização do sistema era realizada por uma válvula reguladora

de pressão de ajuste manual (Posição 6 da Fig. 3.22), montada à jusante da válvula direcional proporcional.

No novo projeto foi inserida uma válvula limitadora de pressão proporcional de acionamento direto (Posição “K” da Fig. 3.22). Essa válvula é acionada através de um solenóide proporcional, permitindo o ajuste automático da pressão através do sinal de comando elétrico. Assim, ajustes na pressão poderão ser realizadas de forma automática para realização das diferentes etapas operacionais da UPPAX.

A força requerida na haste hidráulica da UPPAX para a realização das etapas de usinagem (furação e fresamento) é muito inferior à força requerida para a etapa de preenchimento (processo de reparo de trincas). Com a válvula limitadora proporcional, a pressão será ajustada de acordo com a força necessária para execução de cada etapa operacional, reduzindo o consumo de energia elétrica, além de possibilitar uma despressurização da linha do sistema de força de forma gradativa e controlada.

Para o controle da velocidade de deslocamento da haste do cilindro hidráulico, foi utilizada a mesma especificação da válvula direcional proporcional do projeto hidráulico original (Posição 7 e “L” da Fig. 3.22), porém substituída por uma nova. A válvula permite o controle de pressão e vazão e, conseqüentemente, o controle da força atuante no eixo do cilindro de reparo da UPPAX. Por meio desta válvula é possível limitar a vazão máxima do fluido hidráulico, sendo possível através dela limitar a velocidade máxima de queima do pino consumível (*Burn-off rate* máxima), e limitar a velocidade de avanço das ferramentas de usinagem durante o processo de furação e fresamento.

A introdução da válvula limitadora de pressão proporcional permite controlar a força e o avanço do cilindro hidráulico da UPPAX de forma independente. Dessa forma, o controle de força passa a ser realizado através da válvula limitadora de pressão proporcional (Posição “K” da Fig. 3.22) e o controle de avanço passa a ser realizado através da válvula direcional proporcional (Posição “L” da Fig. 3.22). Além disso, com essa nova estrutura é possível controlar a pressão de alimentação do sistema em um nível que garante a segurança das ferramentas de usinagem, evitando que elas sejam danificadas.

## II.2. Motobomba do circuito de acionamento do cilindro hidráulico

O cilindro hidráulico da UPPAX foi projetado para aplicar uma carga máxima no eixo de 40kN quando submetido a uma pressão de 20 MPa (200 bar). No circuito hidráulico original a pressão máxima era de 12 MPa (120 bar), insuficiente para gerar a carga de 40 kN.

Assim, foi realizada a substituição do conjunto motobomba do circuito de acionamento do cilindro hidráulico com o intuito de aumentar a pressão do sistema e, conseqüentemente, a capacidade de aplicação de força do cilindro de reparo da UPPAX. O conjunto motobomba (Posição "I" da Fig. 3.22) é capaz de gerar o dobro da potência hidráulica em relação ao original. Essa pressão foi calculada considerando as perdas de carga da válvula direcional proporcional, mangueiras e conexões, com importância de garantir a pressão no cilindro de 20 MPa (200 bar) e, conseqüentemente, a força de 40kN.

## II.3. Válvula direcional para baixa velocidade de deslocamento do cilindro hidráulico da UPPAX

A velocidade de deslocamento do cilindro hidráulico e a rotação do motor hidráulico são os principais parâmetros a serem controlados para a realização das etapas de usinagem do furo cônico. Com os parâmetros de usinagem das ferramentas, foram realizados os cálculos das velocidades máximas de deslocamento do eixo da UPPAX, representadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Velocidades máximas de deslocamento do eixo do cilindro de reparo da UPPAX para cada ferramenta de usinagem.

Ferramenta	Avanço $f$ [mm/rot]	Rotação $n$ [rpm]	Velocidade de avanço $V_f$ [mm/s]
Broca Metal Duro	0,14	1782	4,16
Broca Aço Rápido	0,07	1485	1,73
Fresa Metal Duro	0,14	1273	2,97
Fresa Aço Rápido	0,07	987	<b>1,15</b>
Fresa de acabamento Superficial	0,1	5400	9 (Longitudinal)

Como pode ser observado na Tabela 3.3, a fresa cônica de aço rápido é a ferramenta que limita a menor velocidade de deslocamento do êmbolo da UPPAX de 1,15 mm/s, essa velocidade deve ser controlada afim de não danificar a ferramenta durante o processo de

furação. Para obter esta velocidade no eixo da UPPAX é necessária uma vazão de óleo hidráulico de 0,1336 L/min, ou seja, aproximadamente 134 cm<sup>3</sup>/min.

Desconhecendo a capacidade de operar a válvula direcional proporcional (Posição “L” da Fig. 3.22) na condição da mínima vazão desejada ( $\approx 134$  cm<sup>3</sup>/min), foi inserida no circuito uma derivação no sentido de avanço do êmbolo, com a função de desviar parte do fluxo de óleo proveniente da bomba para o reservatório, proporcionando menor fluxo de óleo hidráulico no êmbolo da UPPAX. Com essa solução, torna-se possível obter maior controlabilidade da válvula direcional proporcional na condição de mínima velocidade de deslocamento requerida para o êmbolo da UPPAX.

Foi calculada a área transversal de um giclê instalado no bloco de válvulas, que proporciona a vazão mínima necessária para o desvio do fluxo de óleo hidráulico do circuito de avanço do êmbolo da UPPAX para o reservatório. O giclê foi instalado na posição “O” da Fig. 3.22.

No circuito de instalação do giclê foi inserida uma válvula direcional de acionamento elétrico (Posição “M” da Fig. 3.22) para a abertura e fechamento automático da passagem do fluxo de óleo hidráulico. A posição desta válvula é normal aberta, assim, durante a etapa de reparo por atrito, esta é acionada, bloqueando a passagem do fluxo de óleo pela derivação (giclê), fazendo com que todo o óleo bombeado possa ser direcionado no sentido de avanço do êmbolo da UPPAX. Uma válvula de retenção instalada no circuito à montante do giclê garante o escoamento do óleo hidráulico apenas em um sentido, impedindo qualquer refluxo quando a válvula direcional estiver desabilitada.

### **III. Circuito de recirculação e filtragem do óleo hidráulico**

O circuito de recirculação tem a função de filtrar o óleo hidráulico e resfriá-lo com auxílio de um trocador de calor de placas. No projeto hidráulico original o trocador de calor era ineficiente para o resfriamento do óleo.

Para resolver esse problema, foi ampliado de 33 para 55 o número de placas do trocador de calor. Levando em consideração as propriedades e os parâmetros de escoamento do fluido de resfriamento (água) e o aumento de 66% da área de troca térmica do trocador, resultou no cálculo da nova vazão do sistema de recirculação de 38 L/min, ou seja, aproximadamente 36% superior a vazão do circuito original. Foi instalado uma nova bomba de engrenagem com a vazão requerida e um novo filtro de retorno, capaz de reter partículas de até 6  $\mu$ m.

## **IV. Outros componentes hidráulicos substituídos e reaproveitados**

### **IV.1. Substituição do filtro de ar**

Para filtragem e desumidificação do ar de aspiração da unidade hidráulica foi instalado um filtro de ar de sílica gel (Posição “A” da Fig. 3.19). Este filtro garante ao reservatório a inspiração e aspiração de ar seco, além de filtrar partículas sólidas de até 10  $\mu\text{m}$ , evitando a contaminação do óleo hidráulico e a aceleração do processo de oxidação do óleo devido a condensação de vapor d’água.

### **IV.2. Substituição dos transdutores de pressão**

O controle de rotação do motor hidráulico e da velocidade de avanço do cilindro está relacionado com o controle de vazão de óleo que passa por esses componentes. Isso porque a vazão de óleo que passa pelas válvulas direcionais proporcionais é a mesma que passa pelo motor e pelo cilindro hidráulico, e esta é diretamente proporcional à sua rotação e a velocidade de deslocamento do cilindro hidráulico.

Foram adicionados dois transdutores de pressão no novo projeto hidráulico com objetivo de calcular a vazão de óleo que passa pelas válvulas direcionais proporcionais, sendo um posicionado antes das válvulas direcionais proporcionais do sistema de rotação (Posição “G-1” da Fig. 3.19) e o outro posicionado antes da válvula direcional proporcional (Posição “N-3” da Fig. 3.22) do sistema de acionamento do cilindro hidráulico. Esses transdutores foram adicionados para o monitoramento da vazão de óleo hidráulico através da medição da diferença de pressão por aresta das respectivas válvulas proporcionais.

### **IV.3. Bloco de válvulas**

Um novo bloco de válvulas foi fabricado para a inserção de todas as válvulas mencionadas anteriormente, além de modificado o local de instalação do bloco que antes era realizado na estrutura de sustentação do cilindro hidráulico da UPPAI. O local de instalação do novo bloco de válvulas será apresentado no Item 3.3.2.



#### IV.4. Componentes reaproveitados

Da unidade hidráulica original, foram reaproveitados o reservatório de óleo de 400 L, o sistema motobomba do sistema de rotação, o motor elétrico do sistema de recirculação e o trocador de calor. Todos os outros componentes foram substituídos, inclusive as mangueiras hidráulicas. Para a nova unidade hidráulica, foram instaladas mangueiras que permitem o cilindro de reparo operar a uma distância de até 20 metros da unidade hidráulica.

##### 3.3.2 Projeto estrutural da unidade hidráulica

Na configuração original da unidade hidráulica, os principais componentes (bloco de válvulas, painel elétrico e o reservatório) eram arranjados em locais diferentes. A Figura 3.23 mostra a disposição dos principais componentes da unidade hidráulica.

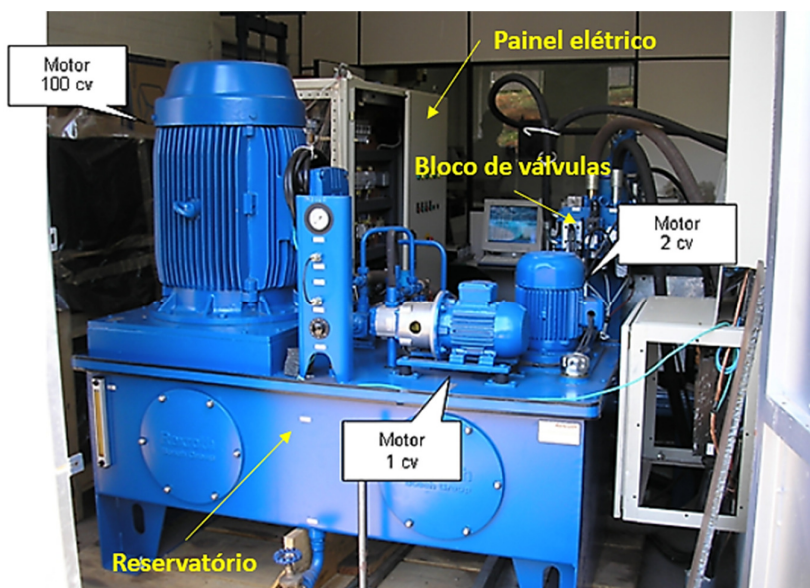


Figura 3.23: *Layout* mostrando o arranjo dos principais componentes da unidade hidráulica original (UPPAI).

Com o objetivo de levar a técnica de reparo por atrito para o campo, uma das dificuldades é o transporte da unidade hidráulica e seus acessórios. Assim, foi desenvolvida uma estrutura no intuito de inserir todos os componentes da unidade sobre uma mesma base, tornando-a mais compacta.

O reservatório de óleo e todos os componentes integrantes da unidade hidráulica foram montados sobre um mesmo *skid* com rodízios, conferindo maior flexibilidade no trabalho de

manuseio do equipamento. As Figuras 3.24 a 3.26 ilustram o esquema de arranjo de montagem dos componentes integrantes da nova unidade hidráulica.

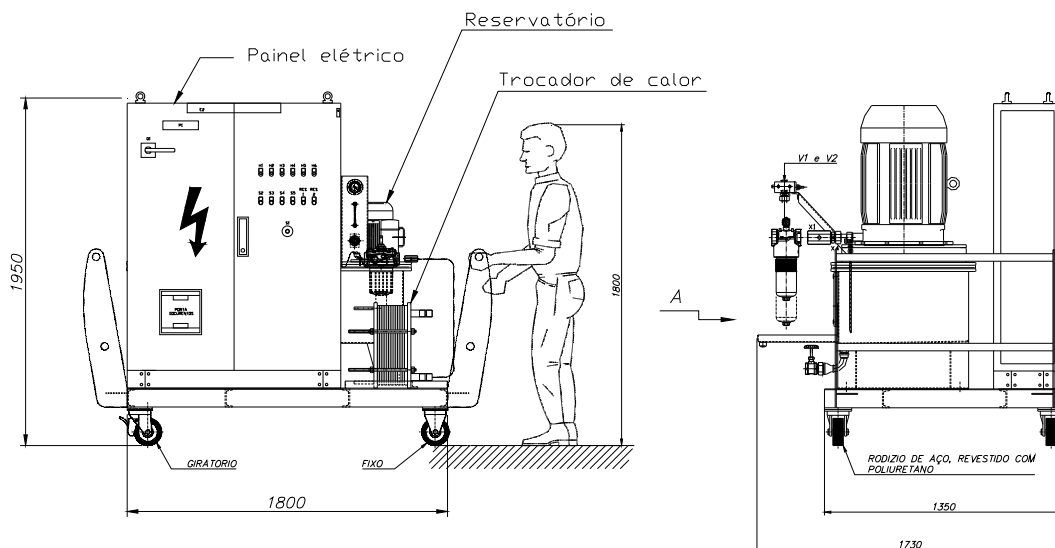


Figura 3.24: Vista frontal e lateral do novo *layout* da unidade hidráulica.

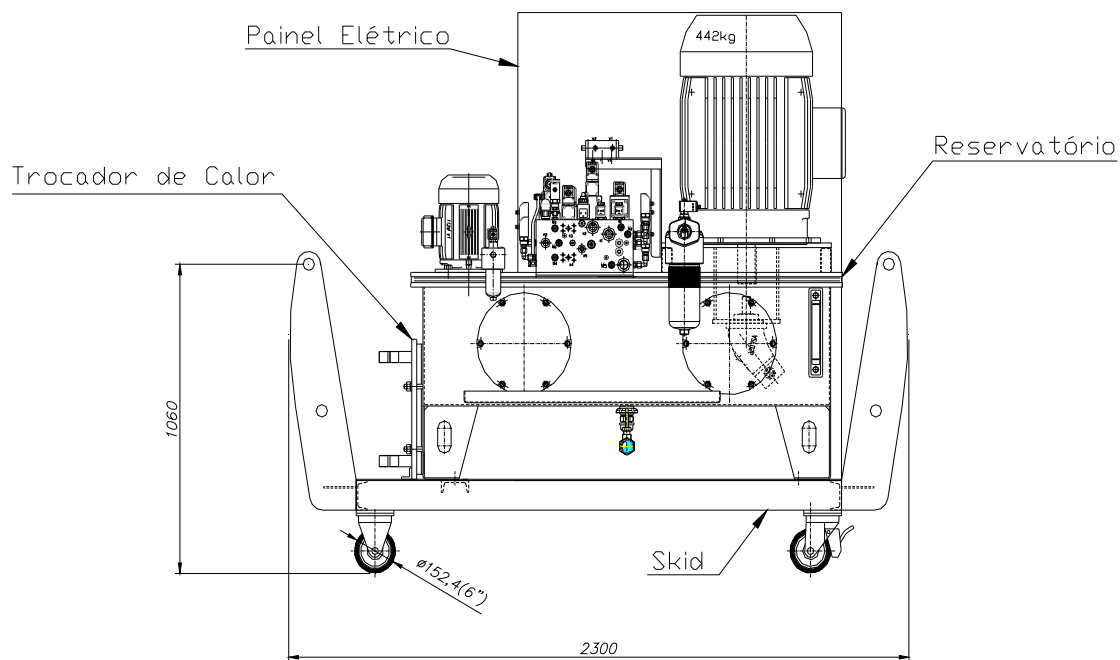


Figura 3.25: Vista posterior da unidade hidráulica.

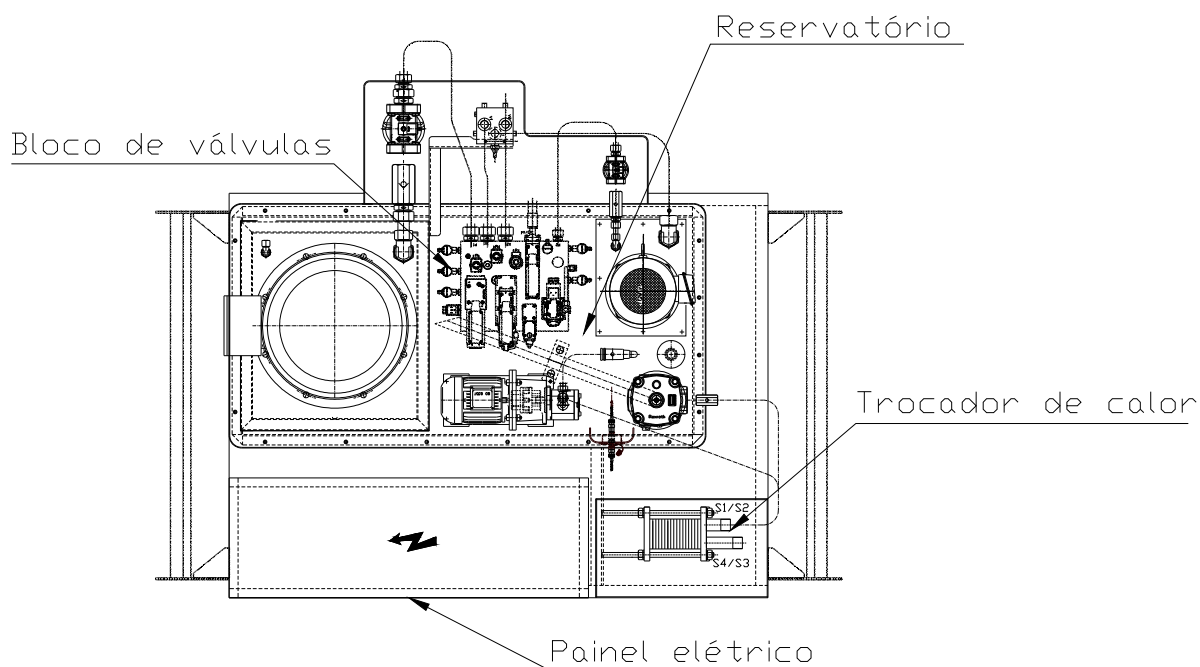


Figura 3.26: Vista superior da unidade hidráulica.

### 3.4 Fabricação, Montagem e Integração dos Componentes da UPPAX

Neste item é apresentada a fabricação dos mandris e das ferramentas de usinagem destinadas ao processo de reparo de trincas por atrito. É apresentada também, a fabricação do novo eixo e a sua montagem no cilindro de reparo da UPPAX. Por fim, são descritos os procedimentos realizados antes e depois da entrega da unidade hidráulica, além da integração com o cilindro de reparo.

#### 3.4.1 Fabricação dos Componentes e Acessórios da UPPAX

Apesar da complexidade dimensional das ferramentas de usinagem, dos mandris e do eixo, todos os componentes foram fabricados seguindo minuciosamente as dimensões e tolerâncias especificadas nos desenhos técnicos. A Tabela 3.4 mostra a relação de componentes e a Fig. 3.27 mostra os componentes da UPPAX já fabricados.

Tabela 3.4: Lista de componentes fabricados para a UPPAX.

Item	Descrição	Quantidade
1	Broca Cônica – Metal Duro	1
	Broca Cônica – Aço Rápido	1
	Fresa Cônica – Metal Duro	1
	Fresa Cônica – Aço Rápido	1
	Fresa de topo	1
2	Eixo Principal	1
3	Mandril para Fixação dos Pinos Roscados	1
4	Mandril Magnético para Fixação dos Pinos Consumíveis	2
5	Mandril de Tração	1

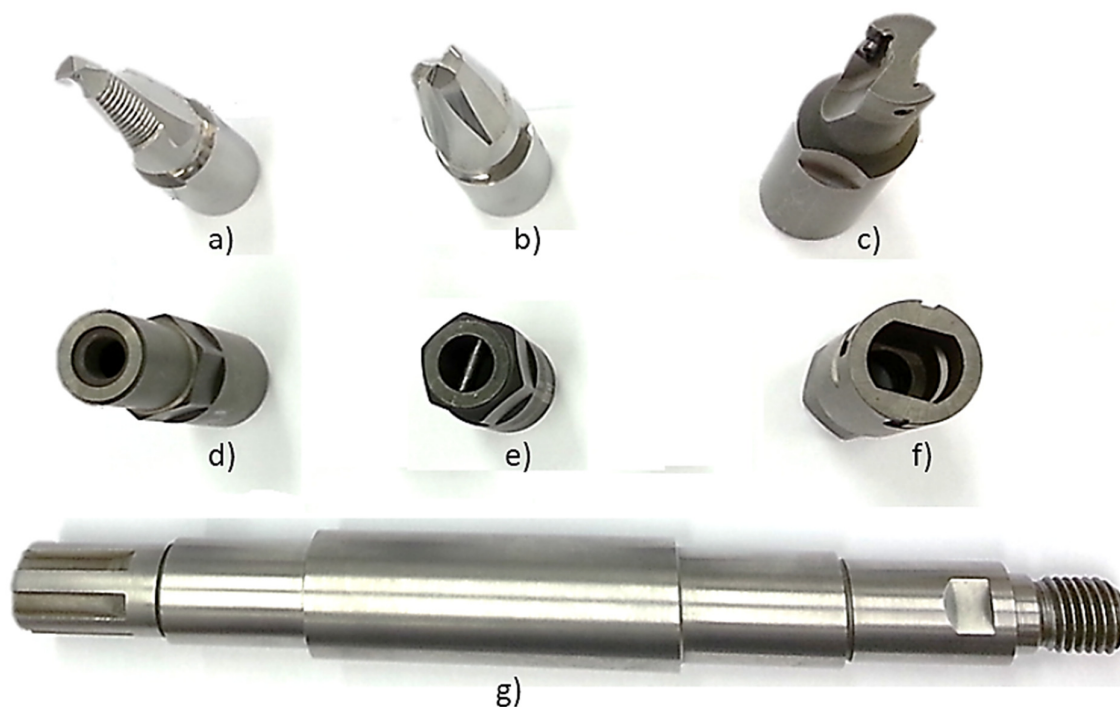


Figura 3.27: Componentes e acessórios da UPPAX. a) Broca cônica escalonada, b) fresa cônica, c) fresa de topo, d) mandril para processamento de pinos roscados, e) mandril para fixação de pinos consumíveis pelo método FTPW, f) mandril para a fixação de pinos consumíveis pelo método FPPW e g) eixo do cilindro de reparo.

### 3.4.2 Montagem do Novo Eixo do Cilindro de Reparo

Para a montagem do eixo principal do cilindro de reparo, foi realizada também a substituição de todos os rolamentos deste equipamento. Os rolamentos foram substituídos utilizando métodos e ferramentas adequadas de desmontagem no intuito de preservar a integridade do equipamento e evitar danos.



Figura 3.28: Montagem do novo eixo adaptado com a rosca MSSC®.

### 3.4.3 Comissionamento, Integração e Startup da Unidade Hidráulica

Para a realização dos testes iniciais de verificação de desempenho, foram montados provisoriamente no circuito, um motor hidráulico e um cilindro hidráulico. Assim, todas as válvulas foram verificadas e testadas individualmente, além dos componentes eletrônicos (chaves contadoras, disjuntores, CLP, botoeiras, etc.) do painel elétrico e sensores do equipamento (transdutores de pressão, indicadores de enrijamento e sensor de temperatura). A pressão das válvulas limitadoras de pressão foi ajustada conforme especificado no projeto hidráulico.

A Figura 3.29 mostra o motor hidráulico e o cilindro hidráulico utilizados provisoriamente para a realização do comissionamento. Os principais componentes da unidade hidráulica foram montados sobre um mesmo *skid*, conforme pode ser observado na Fig. 3.30.

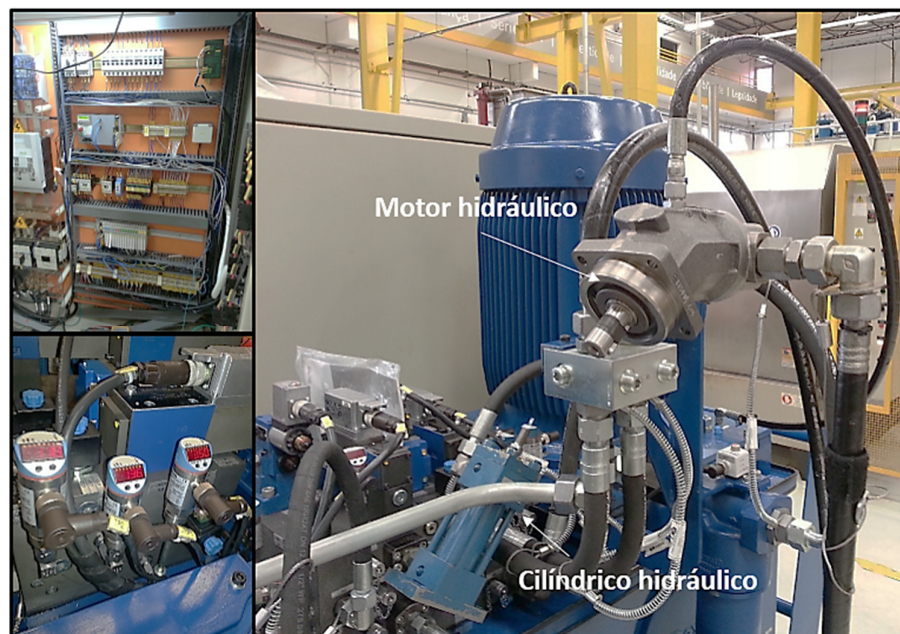


Figura 3.29: Motor hidráulico e cilindro hidráulico montados provisoriamente para realização do comissionamento.



Figura 3.30: *Skid* da máquina contemplando todos os componentes da unidade hidráulica.

A Figura 3.31 ilustra algumas das inspeções realizadas após o recebimento da unidade hidráulica no LTAD. Foi realizado a integração da unidade hidráulica através da montagem das mangueiras hidráulicas no cilindro de reparo. Todas as mangueiras foram instaladas com os cabos de segurança. Após a integração, o reservatório foi abastecido com óleo hidráulico. A Figura 3.32 ilustra a integração do cilindro de reparo com a unidade hidráulica que conjuntam a UPPAX.

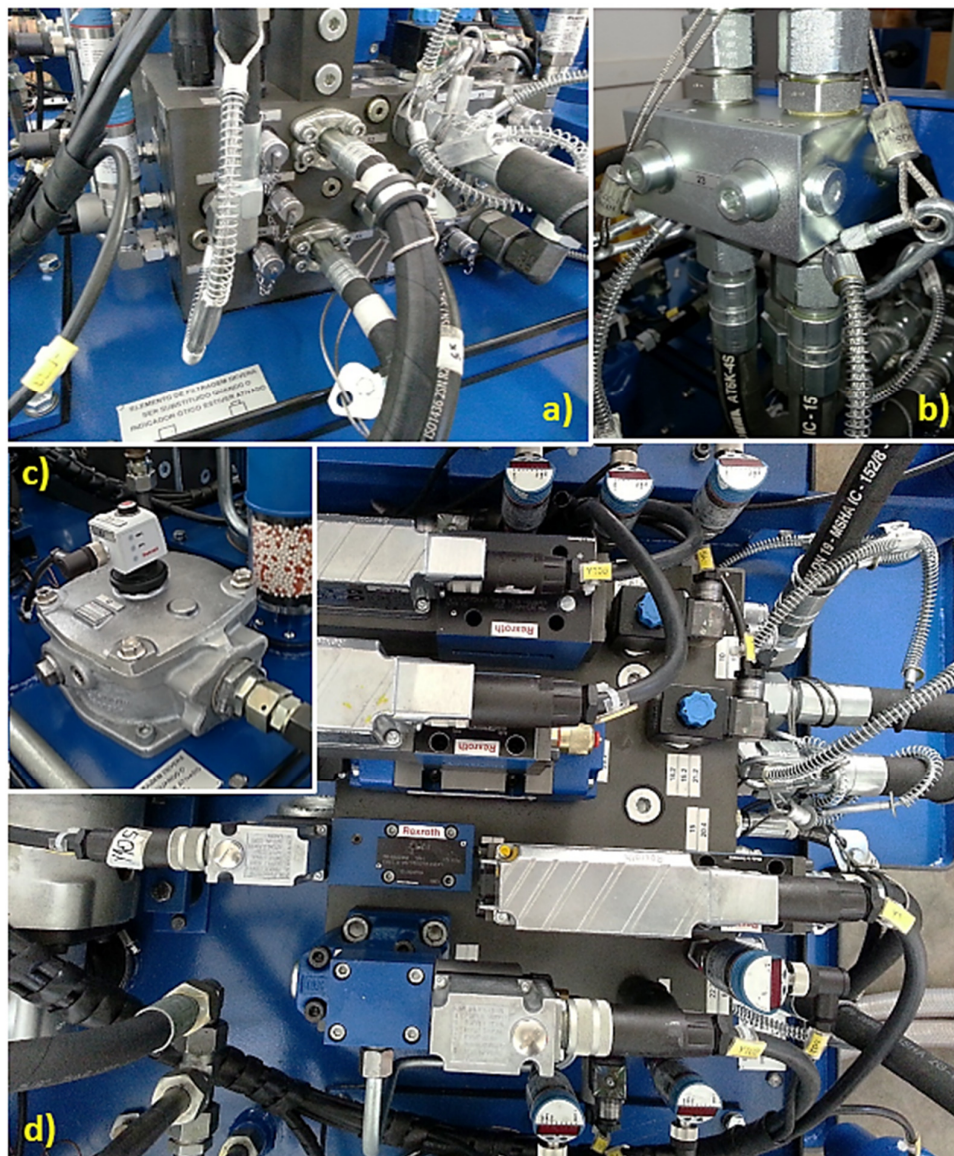


Figura 3.31: Inspeção realizada na parte externa do reservatório de óleo. a) Verificação do aperto das conexões hidráulicas e dos cabos de segurança, b) Verificação do aperto das conexões hidráulicas na válvula *crossover*, c) verificação do funcionamento dos sensores de enjuntamento, d) Verificação da montagem de todos os conectores elétricos e conexões hidráulicas do bloco de válvulas.



Figura 3.32: Unidade de processamento de pinos consumíveis X – UPPAX.

Para reduzir os esforços provocados pelo peso das mangueiras hidráulicas, foi instalado um “braço” de apoio conforme pode ser observado na Fig. 3.33.





Figura 3.33: Suporte instalado para sustentar o peso das mangueiras hidráulicas.

Antes de realizar os testes de funcionamento, foram realizados procedimentos para a retirada de todo o ar presente nas mangueiras e nos circuitos hidráulicos. Em seguida, vários testes foram realizados com o sistema de rotação e com o sistema de acionamento do cilindro hidráulico, e todos eles funcionaram conforme o previsto. As válvulas e sensores foram testados individualmente, e as válvulas redutoras de pressão foram verificadas e ajustadas conforme a pressão indicada no projeto hidráulico.

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE VALIDAÇÃO**

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais adotados para a validação da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito X na realização das etapas de furação e de preenchimento utilizando o processo FTPW. A efetivação destas etapas valida o projeto de reestruturação da unidade hidráulica apresentado no Capítulo 3.

Inicialmente é apresentada a especificação dos materiais do metal base e do pino consumível, além do dimensionamento destes componentes utilizados para a realização dos ensaios de usinagem do furo cônico e preenchimento da cavidade pelo processo FTPW. Antes de realizar os ensaios, foram definidos os parâmetros de usinagem do furo cônico e os parâmetros de processamento do pino consumível. Para a avaliação da qualidade de usinagem do furo cônico foram realizadas medições geométricas e de rugosidade. Por fim, foi realizado o processamento do pino consumível pelo método FTPW nas cavidades usinadas. A caracterização da junta soldada foi analisada através de ensaios de tração e por estudos macroscópicos e microscópicos na região de interface pino-bloco.

## 4.1. Resumo Metodológico

Para validar o projeto de otimização da UPPAX, foi desenvolvido um procedimento experimental com propósito de: avaliar a qualidade dimensional e de rugosidade da usinagem dos furos cônicos produzidos com as ferramentas desenvolvidas; validar o projeto de reestruturação da unidade hidráulica; executar ensaios de preenchimento dos furos cônicos usinados e analisar a qualidade da junta soldada pelo processo FTPW através de ensaios de tração, análises macrográficas e micrográficas. A Figura 4.1 apresenta resumidamente os procedimentos experimentais adotados neste trabalho.

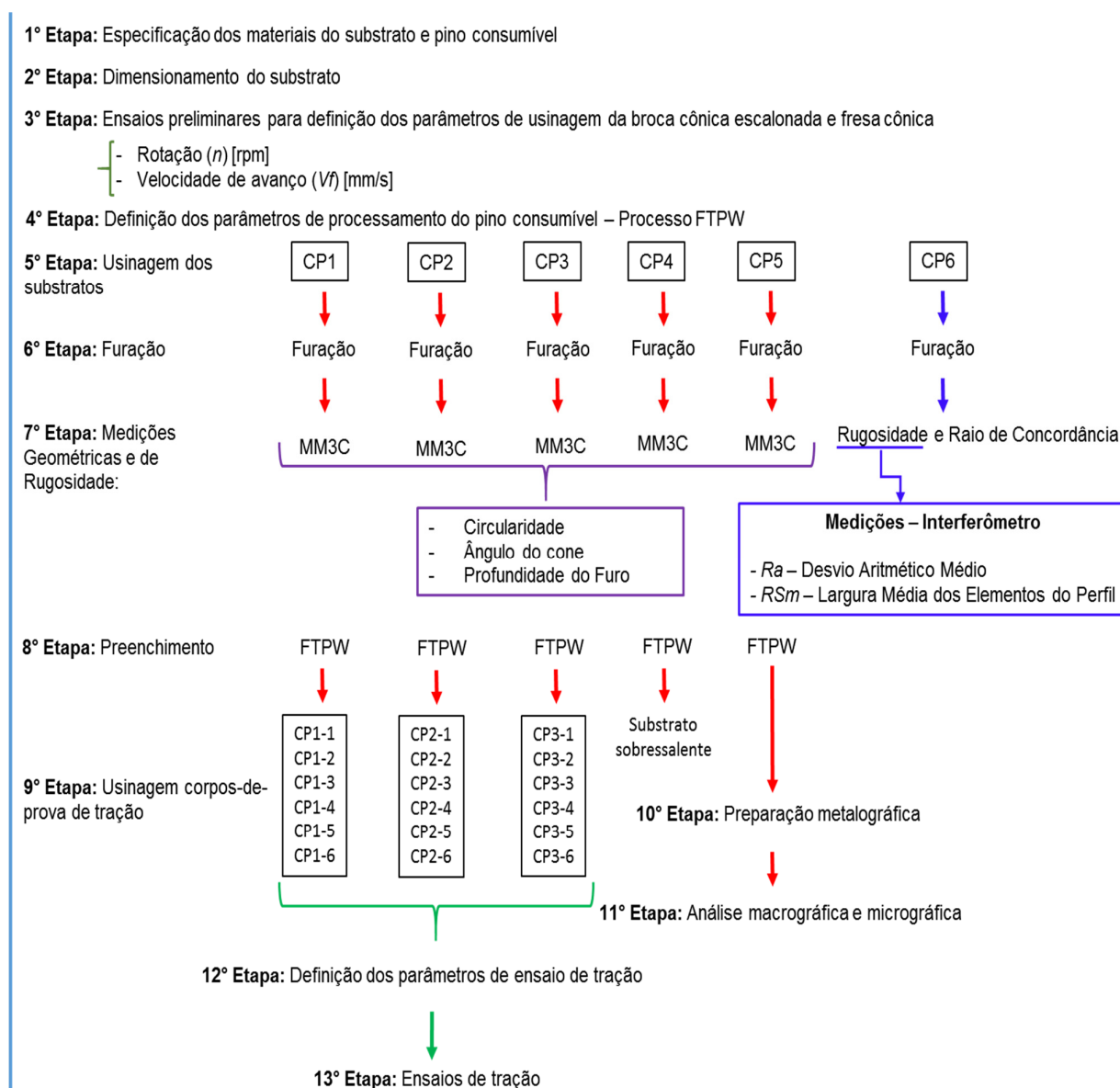


Figura 4.1: Esquema resumindo as várias etapas realizadas no desenvolvimento deste trabalho.

Os procedimentos experimentais executados neste trabalho têm o propósito de:

- Avaliar a qualidade dimensional e de rugosidade da usinagem dos furos cônicos produzidos com as ferramentas desenvolvidas;
- Validar o projeto de reestruturação da unidade hidráulica;
- Executar ensaios de preenchimento dos furos cônicos usinados;
- Analisar a qualidade da junta soldada pelo processo FTPW através de ensaios de tração, análises macrográficas e micrográficas.

A etapa de fresamento (remoção do material remanescente) não será apresentada neste trabalho, uma vez que o dispositivo utilizado para a ancoragem do cilindro de reparo não permite a realização de movimentos laterais, impossibilitando o uso da fresa de desbaste lateral a qual depende deste movimento.

Como pode ser observado na Figura 4.1, para a validação das ferramentas de usinagem do furo cônico, foram fabricadas seis amostras do metal base (substrato). Os substratos foram identificados seguindo a sequência CP1 a CP6. Após a usinagem do furo cônico, os substratos CP1 a CP5 foram avaliados geometricamente em uma máquina de medir a três coordenadas (MM3C) e o substrato CP6 foi utilizado para a realização das medições de rugosidade e do raio de concordância do furo cônico.

O preenchimento das amostras CP1 a CP5 foi realizado pela técnica FTPW. A partir das amostras CP1, CP2 e CP3 foram obtidos os corpos-de-prova para realização dos ensaios de tração. O substrato CP5 foi utilizado para a realização das análises macroscópicas e microscópicas com objetivo de avaliar e caracterizar a junta soldada. O substrato CP4 foi mantido como material de reserva, para uma possível eventualidade.

Neste trabalho não foram realizados os cálculos de incerteza de medição associados aos valores apresentados, visto que os resultados são apenas indicativos para análise do comportamento das grandezas que servirão de referência para realização de trabalhos futuros.

Os tópicos a seguir descrevem detalhadamente a metodologia e os procedimentos experimentais utilizados para a validação do projeto de otimização da UPPAX descritas anteriormente.

## 4.2. Materiais e Especificação das Amostras

### 4.2.1. Especificação e Análise de Composição Química das Amostras

O material dos substratos foi obtido a partir de uma chapa de aço-carbono ASTM A36 de 1" (25,4 mm) de espessura e os pinos consumíveis foram fabricados a partir de barras cilíndricas de um aço-carbono designado por PBS.

A composição química destes materiais é apresentada na Tab. 4.1, sendo determinada via técnica de espectrometria por emissão óptica.

Tabela 4.1: Tabela de composição química dos materiais utilizados (% em peso).

Elemento	Substrato ASTM A36	Pino PBS
<b>C</b>	0,13	0,176
<b>Si</b>	0,19	0,209
<b>Mn</b>	0,94	1,458
<b>P</b>	0,014	0,015
<b>S</b>	0,008	0,008
<b>Al</b>	-	0,03
<b>Cr</b>	0,02	-
<b>Mo</b>	0,01	0,006
<b>Ni</b>	0,01	0,002
<b>V</b>	-	0,074
<b>Ti</b>	-	0,001
<b>Nb</b>	-	0,003
<b>Co</b>	-	0,005
<b>Fe</b>	-	98,01
<b>CE<sup>1</sup></b>	<b>0,29</b>	<b>0,44</b>

$${}^1\text{CE} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15 \text{ (API 5L - 2007)}$$

O aço-carbono ASTM A36 é um dos aços estruturais mais utilizados e conhecidos na indústria, classificado como um aço de média resistência mecânica. Conforme a Tabela 2 da norma ASTM A36/A36 M – 05 (2007), sua composição química varia em torno de no máximo 0,25% de C, 0,8 a 1,2% de Mn, máximo de 0,04% de P, máximo de 0,05% de S,

máximo de 0,4% de Si e mínimo de 0,2% de Cu, estando os percentuais informados na Tab. 4.1 dentro da faixa dos valores de concentração citados pela norma.

O material PBS utilizado para a fabricação dos pinos consumíveis foi obtido através de barras cilíndricas laminadas a quente, de 30 mm de diâmetro, de acordo com a norma BS970-3 150M19, originalmente classificado como EN14.

#### 4.2.2. Dimensionamento do Substrato e do Pino Consumível

O dimensionamento do substrato foi definido em função das dimensões dos corpos-de-prova para ensaios de tração, ficando no final com 100 mm de comprimento, 60 mm de largura e 25,4 mm (1") de espessura. A usinagem dos substratos foi realizada de tal forma que sua direção longitudinal ficasse na mesma direção de laminação da chapa, como mostrado na Fig. 4.2 a.

Os pinos consumíveis utilizados neste trabalho têm dimensões correspondentes às da geometria do tipo A, proposta por Pires (2007), como mostrado no item "b" da 4.2.

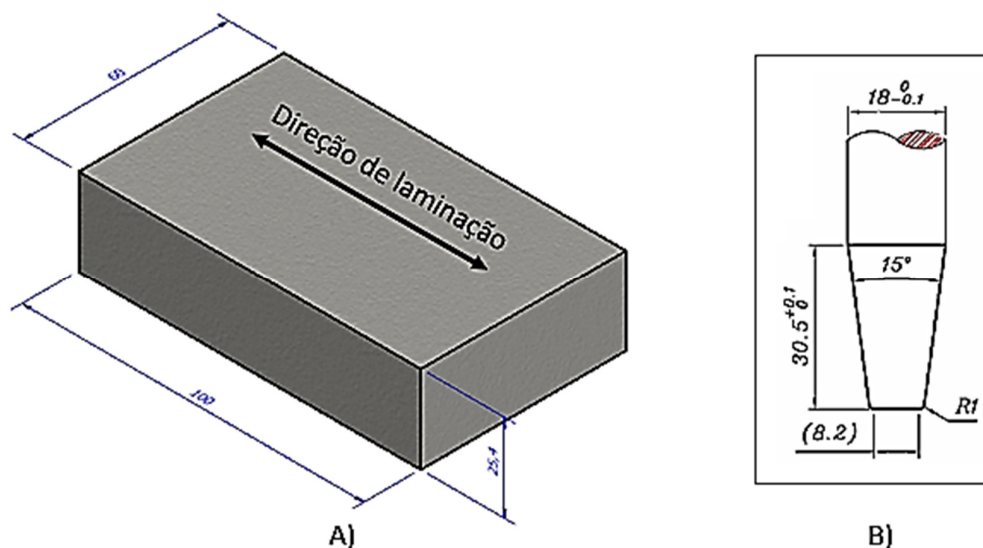


Figura 4.2: Geometria dos materiais utilizados nos ensaios. A) Dimensões dos substratos; B) Dimensões dos pinos consumíveis (Geometria do tipo A – PIRES (2007)).

### 4.3. Definição dos Parâmetros de Processo

#### 4.3.1. Definição dos Parâmetros de Usinagem do Furo Cônico – Etapa de Furação

Para avaliar a usinagem do furo cônico, e, conseqüentemente, validar o projeto de reestruturação da unidade hidráulica foram utilizadas as ferramentas de metal duro.

Com objetivo de preservar a integridade das ferramentas de metal duro, foram realizados testes preliminares de usinagem, a fim de selecionar de forma cautelosa e produtora os valores de rotação ( $n$ ) e velocidade de avanço ( $V_f$ ). Para a realização desses testes foram utilizados corpos de provas do mesmo material dos substratos CP1 a CP6.

A Tabela 4.2 mostra os parâmetros de usinagem fornecidos pelo fabricante das ferramentas, adequados para a usinagem de aços C-Mn. Os valores informados pelo fabricante servem de referência para uma escolha dos parâmetros de usinagem. Por se tratar de testes preliminares, os parâmetros foram ajustados ao longo dos testes.

Tabela 4.2: Parâmetros de operação das ferramentas de usinagem da UPPAX, fornecidos pelo fabricante.

Parâmetro de Usinagem	Broca Cônica Metal Duro	Broca Cônica Aço Rápido	Fresa Cônica Metal Duro	Fresa Cônica Aço Rápido	Fresa Acabamento Superficial
Velocidade de corte – $V_c$ [m/min]	70	70	70	70	340
Profundidade de corte axial – $P$ [mm]	23,54	23,54	16	16	1
Avanço – $f$ [mm/rotação]	0,14	0,07	0,14	0,07	0,1
Rotação – $n$ [rpm]	1782	1485	1273	987	5400
Taxa de remoção – $Q$ [cm <sup>3</sup> /min]	30,62	18	43	20	10,82
Potência requerida – $P_c$ [kW]	0,77	1,1	1,07	1,2	0,27
Momento de torção – $M_c$ [Nm]	4,10	7,2	8,04	8,7	0,48
Velocidade de Avanço $V_f$ [mm/s]	4,16	1,73	2,97	1,15	9 (Longitudinal)

Foram realizados três testes para a definição dos parâmetros de operação das ferramentas de usinagem. Durante a execução dos testes, os mesmos tiveram seus respectivos gráficos de posição, torque, velocidade de avanço, força, potência consumida e velocidade de rotação da ferramenta, todos armazenados e plotados em função do tempo.

O principal objetivo dos testes preliminares foi determinar os parâmetros de usinagem (avanço, profundidade de corte, rotação e velocidade de avanço) das ferramentas de metal duro, a fim de obter furos cônicos com dimensões desejadas com qualidade superficial aceitável.

A Tabela 4.3 mostra os parâmetros utilizados para a realização dos testes preliminares de usinagem do furo cônico. Pode-se observar que a rotação foi mantida para todos os testes, conforme a máxima velocidade recomendada pelo fabricante, sendo de 1.782 rpm para a broca cônica escalonada de metal duro e de 1.273 rpm para a fresa cônica de metal duro (Tab. 4.2). O único parâmetro modificado foi a velocidade de avanço ( $V_f$ ), nesse caso expresso em mm/s.

Tabela 4.3: Parâmetros de usinagem utilizados para a realização dos ensaios preliminares

<b>Broca Cônica Escalonada</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>
Rotação $n$ [rpm]	1.782	1.782	1.782
Velocidade de avanço $V_f$ [mm/s]	0,5	0,5	0,5
Profundidade de corte $P$ [mm]	15,2	15,2	15,2
<b>Fresa Cônica</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>
Rotação $n$ [rpm]	1.273	1.273	1.273
Velocidade de avanço $V_f$ [mm/s]	0,5	0,3	0,1
Profundidade de corte $P$ [mm]	16	16	16

Após a determinação dos parâmetros de usinagem e dos conhecimentos adquiridos dentro das realizações dos ensaios preliminares, foram realizadas as usinagens dos furos cônicos nos seis substratos. Os substratos foram identificados com as siglas CP1 a CP6. A Fig. 4.3 mostra os substratos marcados com punção de ponta cônica para facilitar o alinhamento da posição de furação com o eixo do cilindro de reparo da UPPAX (Fig. 4.3).



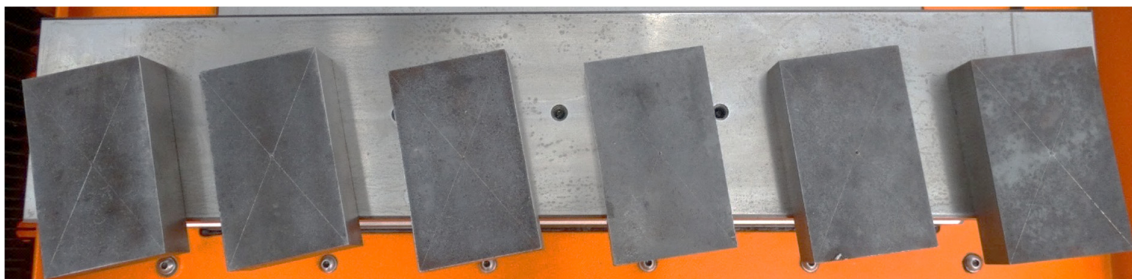


Figura 4.3: Substratos CP1 a CP6 marcadas com punção de ponta cônica para alinhamento com o eixo do cilindro de reparo da UPPAX.

A Figura 4.4 ilustra as ferramentas desenvolvidas para a usinagem do furo cônico, e a sequência realizada para a usinagem de todos os substratos. A usinagem foi realizada a seco, com uso de ar comprimido de baixa vazão para eliminar os cavacos produzidos durante o processo de furação.

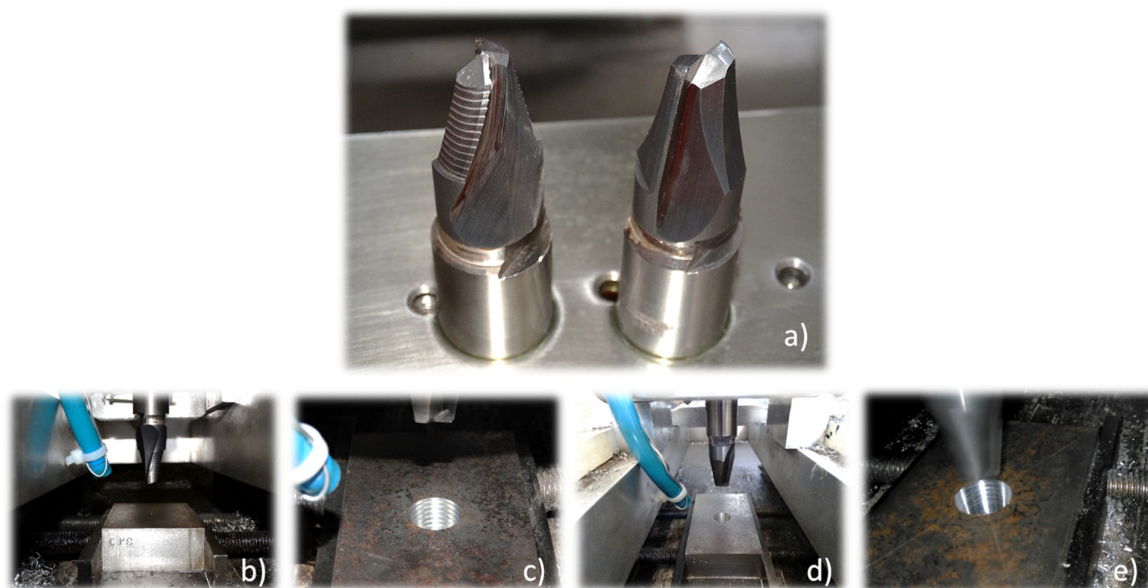


Figura 4.4: Etapa de furação dos substratos. a) Ferramentas de usinagem – Broca cônica escalonada e fresa cônica, b) Furação com a broca cônica, c) Furo usinado com a broca cônica, d) Furação com a fresa cônica, e) Furo cônico usinado.

Com o objetivo de melhorar o acabamento superficial do furo foi programado na rotina do processo de fresamento a permanência da rotação por dois segundos após avanço máximo. Esse procedimento permite que a fresa proporcione um melhor alisamento da parede do furo e conseqüentemente a melhora no acabamento superficial.

Ambas as ferramentas de usinagem, foram extraídas do furo com o eixo em rotação. Dessa forma, as arestas cortantes das ferramentas tendem a melhorar o acabamento da superfície do furo.

#### 4.3.2. Definição dos Parâmetros de Processamento do Pino Consumível – Etapa de Preenchimento

Em ensaios com apenas um estágio, foi identificado que a força deveria ser menor ou igual a 15 kN para garantir que não houvesse o travamento do sistema de rotação. Para a realização de ensaios com forças superiores a 15 kN, o ensaio deve ser programado para ser realizado com dois estágios, sendo o primeiro estágio com força de 15 kN e comprimento de queima de no mínimo 3 mm. Essa condição permite a realização de ensaios com forças de até 40 kN.

Considerando que a qualidade do reparo realizado é fortemente dependente dos parâmetros de processo (velocidade de rotação, força axial, comprimento de queima, força e tempo de forjamento), foi necessário um estudo para avaliação da qualidade da junta soldada. Para a etapa de preenchimento foram utilizados os seguintes parâmetros de processamento por atrito, ver Tab. 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros utilizados na etapa de preenchimento dos substratos.

<b>SOLDAGEM POR ATRITO</b>	
<b>Material</b>	Substrato: A36
	Pino: PBS
<b>Força (kN)</b>	1° Estágio: 15
	2° Estágio: 30
<b>Rotação (rpm)</b>	5.500
<b>Comprimento de Queima (mm)</b>	1° Estágio: 3
	2° Estágio: 5
<b>Força de Forjamento (kN)</b>	30
<b>Tempo de Forjamento (s)</b>	10
<b>Geometrias do furo do metal Base</b>	Geometria Otimizada Tipo A <sup>1</sup>
<b>Geometrias do pino consumível</b>	Geometria Otimizada Tipo A <sup>1</sup>
<b>Amostras:</b>	CP1 a CP5

<sup>1</sup> Geometrias otimizadas conforme identificação realizado por Pires (2007).

Conforme apresentado na Tab. 4.4, os ensaios foram realizados com dois estágios, sendo a mudança de estágio controlada pelo comprimento de queima. No primeiro estágio foi aplicada uma força de 15 kN, com rotação de 5.500 rpm durante os primeiros 3 mm de comprimento de queima. No segundo estágio, a força foi de 30 kN, mantida por mais 5 mm de comprimento de queima, com a mesma rotação do primeiro estágio. A força axial do segundo estágio foi mantida na etapa de forjamento durante um tempo de 10 s.

Durante a execução do processo FTPW nas amostras CP1 a CP5, os valores de força axial, velocidade de rotação, torque, e do comprimento de queima foram plotados em tempo real e armazenados ao final do processo.

#### 4.4. Procedimentos de Medição

##### 4.4.1. Medições do Perfil Geométrico do Furo Cônico

Para avaliar a qualidade dos furos cônicos usando as ferramentas desenvolvidas nesse trabalho foram realizadas medidas de desvios de forma, profundidade e ângulo do cone desses furos.

Foram medidos os desvios de circularidade de círculos ao longo do comprimento do furo cônico usinado. A Figura 4.5 ilustra graficamente a medição do desvio de circularidade. Essa medição equivale à distância radial mínima entre duas circunferências concêntricas, dentre as quais deve estar contido o perfil real da peça. Para que a distância entre os círculos seja a mínima, são considerados o maior círculo inscrito na seção transversal da peça e o menor círculo circunscrito (ABNT NBR 6409, 1997).

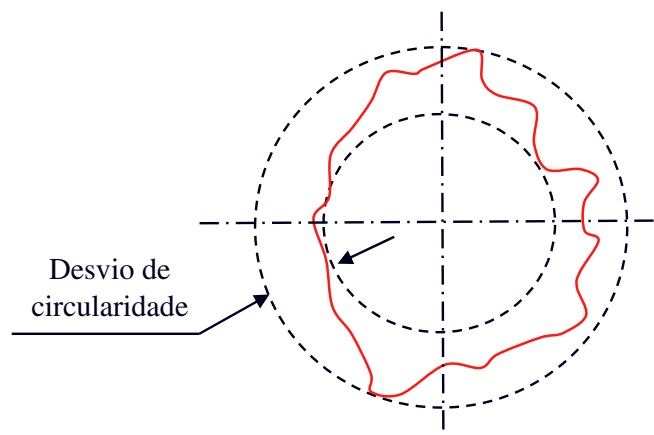


Figura 4.5: Representação gráfica dos desvios de circularidade (SOUZA *et al.*, 2011).

Após a usinagem do furo cônico nos substratos CP1 a CP5, as amostras foram limpas com acetona e depois mantidas por duas horas na sala da MM3C, com temperatura e umidade controladas, a fim de homogeneizar a temperatura das amostras para iniciar as medições.

As medições do furo cônico foram realizadas utilizando uma máquina de medir por coordenadas, fabricada pela Carl Zeiss, modelo CONTURA G2 1000 RDS/direkt, do tipo ponte móvel, com programa de medição Calypso 5.2<sup>®</sup> (Fig. 4.6). O apalpador utilizado nas medições foi o de ponta esférica de rubi (óxido de alumínio) de 3 mm de diâmetro, com haste de fibra de carbono e comprimento de 50 mm.

Neste trabalho as medições foram realizadas no modo varredura, no qual a MM3C oferece informações mais precisas sobre a medida da peça (ZEISS, 2015).

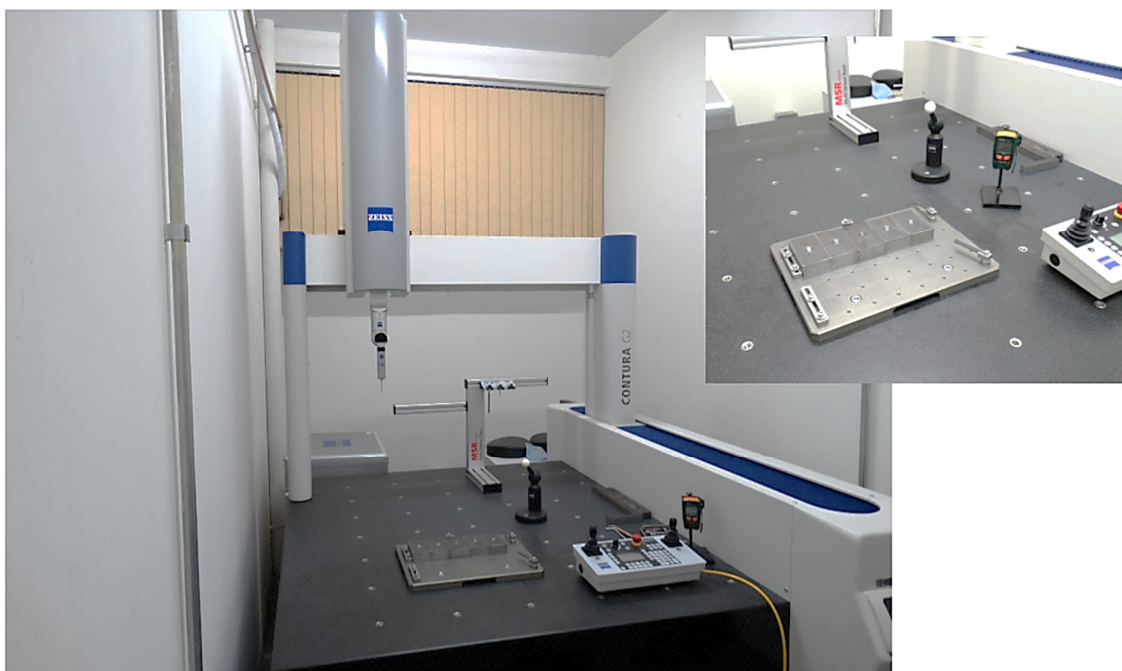


Figura 4.6: Máquina de medir por coordenadas utilizada nas medições geométricas (ângulo e profundidade) e de desvios de forma do furo cônico (circularidade).

As medições com a MM3C foram realizadas em uma sala com temperatura ambiente de  $20,0 \pm 1,0$  °C e umidade relativa entre 45% e 65%.

A Figura 4.7 mostra esquematicamente as etapas executadas para a realização das medições de avaliação do furo cônico do processo FTPW. Em seguida são apresentados os processos de medição para a avaliação geométrica do furo cônico.

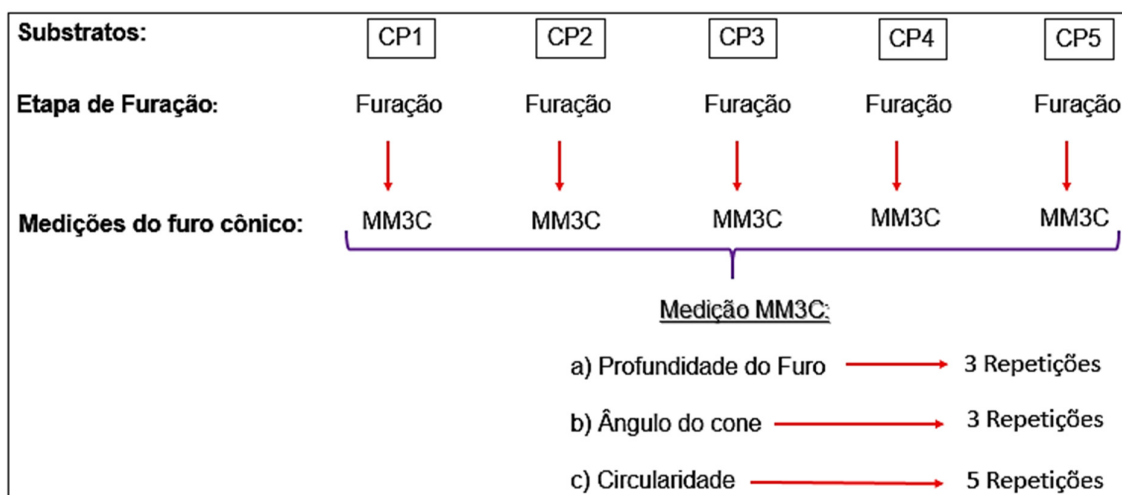


Figura 4.7: Esquema dos procedimentos realizados para as medições de avaliação do furo cônico.

#### a) Medição da profundidade dos furos

Para a medição da profundidade do furo cônico foi utilizada a seguinte estratégia de medição: A máquina MM3C foi programada para apalpar a área da superfície do substrato em quatro pontos próximos à borda do furo cônico. Através desses pontos foi calculada a posição média da superfície do substrato. Em seguida foi apalpado o fundo do furo em apenas um ponto. A diferença entre as distâncias medidas em Z dos pontos apalpados, fornece o valor da profundidade do furo. Foram realizadas três repetições para cada amostra e, em seguida, calculadas a média e desvio padrão da profundidade dos furos cônicos das amostras CP1 a CP5.

#### b) Medição do ângulo de cone

Para a medição do ângulo do cone foi realizada a varredura de quinze circunferências espaçadas de 1 mm ao longo da profundidade do furo cônico. Através do software Calypso® 5.2 da MM3C é possível obter o ângulo do cone através de uma regressão linear dos pontos pelo método dos mínimos quadrados. A equação da reta de regressão linear fornece o ângulo do cone. Foram realizadas três repetições por amostra para a obtenção da média e desvio padrão do ângulo do furo cônico.

#### c) Medição do desvio de forma

O desvio de circularidade foi realizado através da medição de quinze círculos espaçados de 1 mm ao longo da profundidade do furo. Foram realizadas cinco repetições para cada círculo nas cinco amostras (CP1 a CP5). Através do software Calypso® da MM3C

foi calculado o desvio de circularidade pelo método dos mínimos quadrados (circularidade de Gauss).

#### **d) Medição do raio de concordância**

A medição do raio presente entre a transição da superfície cônica com o fundo do furo foi realizada utilizando a amostra CP6. Esta amostra foi a mesma utilizada para as medições dos perfis de rugosidade, descritas no item 4.4.2, a seguir.

Foi realizado um corte transversal em relação ao eixo central do furo cônico, visando deste modo, preservar a seção central do furo. Posteriormente, a parte que continha o centro do furo foi seccionada paralelamente à superfície do fundo do furo, obtendo-se desse modo, a superfície que continha o raio presente no fundo do furo. A amostra foi embutida a quente por meio de uma prensa, utilizando-se pressão e aquecimento para efetuar a polimerização do baquelite. Antes do embutimento, esferas de aço foram colocadas a fim de preservar a geometria de interesse da amostra. Em seguida, a amostra embutida foi metalograficamente preparada (Fig. 4.8) para obtenção de uma imagem da superfície que contém o raio presente no fundo do furo cônico.

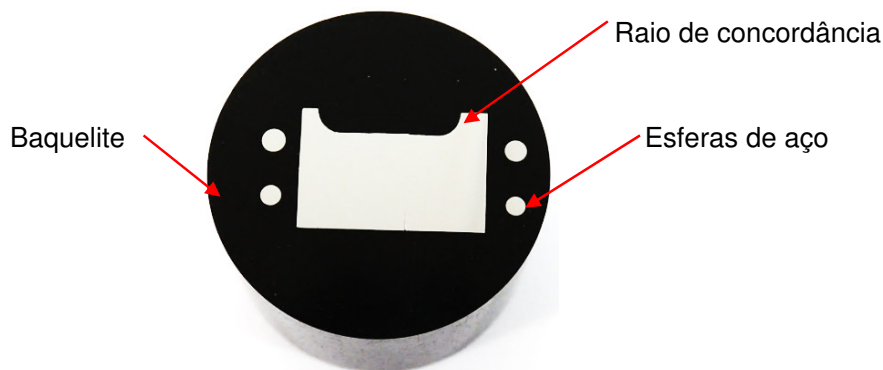


Figura 4.8: Amostra embutida e preparada metalograficamente para medições do raio de concordância.

A obtenção da imagem foi realizada com auxílio de um microscópio ótico marca OLYMPUS modelo BX51M, equipado com uma câmera digital colorida da marca ZEISS modelo ICC5, com resolução de imagem 1920 x 1080 pixels. Foi gerada uma imagem da amostra com o auxílio do software da Zeiss AxioVision® 40 Versão 4.8.2.0, com uma escala de referência. A imagem foi reproduzida utilizando o software AutoCAD® 2010, onde foram gerados círculos concordantes e sobrepostos à imagem e medido o valor do raio do círculo gerado (Fig. 4.9). Dessa forma, foram realizadas cinco medições do raio e em seguida calculado a média e o desvio padrão.

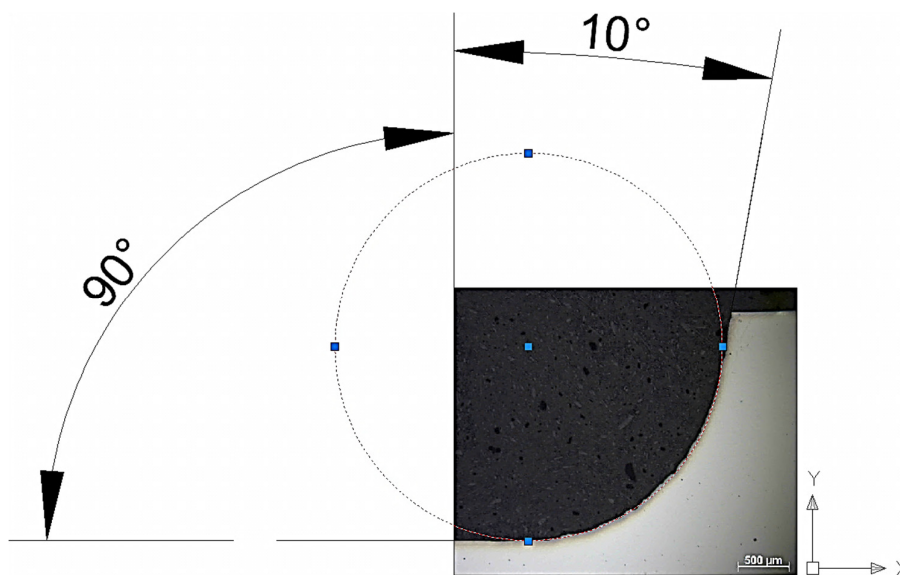


Figura 4.9: Procedimento utilizado para a medição do raio de concordância em uma imagem com escala de 500  $\mu\text{m}$  (amostra CP6).

Os desvios obtidos através das medições geométricas, permitiu classificar a qualidade de usinagem conforme os graus de tolerância-padrão da norma ABNT NBR 6158.

Os graus de tolerância são designados pela letra IT (*Internacional Tolerance*) e por um número. O sistema prevê um total de 20 graus de tolerância, dos quais os graus IT1 a IT18 são de uso geral. A Tabela 4.5 representa os três grupos existentes:

Tabela 4.5: Graus de tolerância-padrão (IT).

IT	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1° GRUPO					2° GRUPO						3° GRUPO									

Resumidamente, os três grupos representados estão associados aos seguintes critérios de fabricação:

- 1° GRUPO: Reservado para peças de grande precisão de fabricação e para fabricação de calibradores.
  - IT1 - Reservado para dimensões padrão de medida e para verificação da fabricação dos calibradores destinados aos IT's 2, 3 e 4.
  - IT2 - Reservado para verificação das peças fabricadas com IT5.
  - IT3 - Reservado para verificação das peças fabricadas com IT6 e IT7.

- IT4 - Reservado para verificação das peças fabricadas com IT5, IT6 e IT7.
- 2° GRUPO: Reservado para fabricação de peças mecânicas em geral.
  - IT5 - reservado apenas para dimensões externas (eixos); é a máxima precisão utilizada em fabricação mecânica.
  - IT6 e IT7 - Reservado normalmente para trabalhos de mecânica fina.
  - IT8 a IT11 - Reservados para trabalhos mecânicos de usinagem comum.
- 3° GRUPO: Reservado para fabricação de peças isoladas, não destinadas a acoplamentos.
  - IT12 a IT18 - Reservados para trabalhos de forjamento, fundição, laminação, mecânica agrícola, etc.

#### 4.4.2. Medições de Rugosidade

Para a medição dos perfis de rugosidade do furo cônico foi utilizado um interferômetro ótico, modelo TALYSURF CLI 2000, fabricado pela Taylor Hobson, com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.10), empregando luz branca.

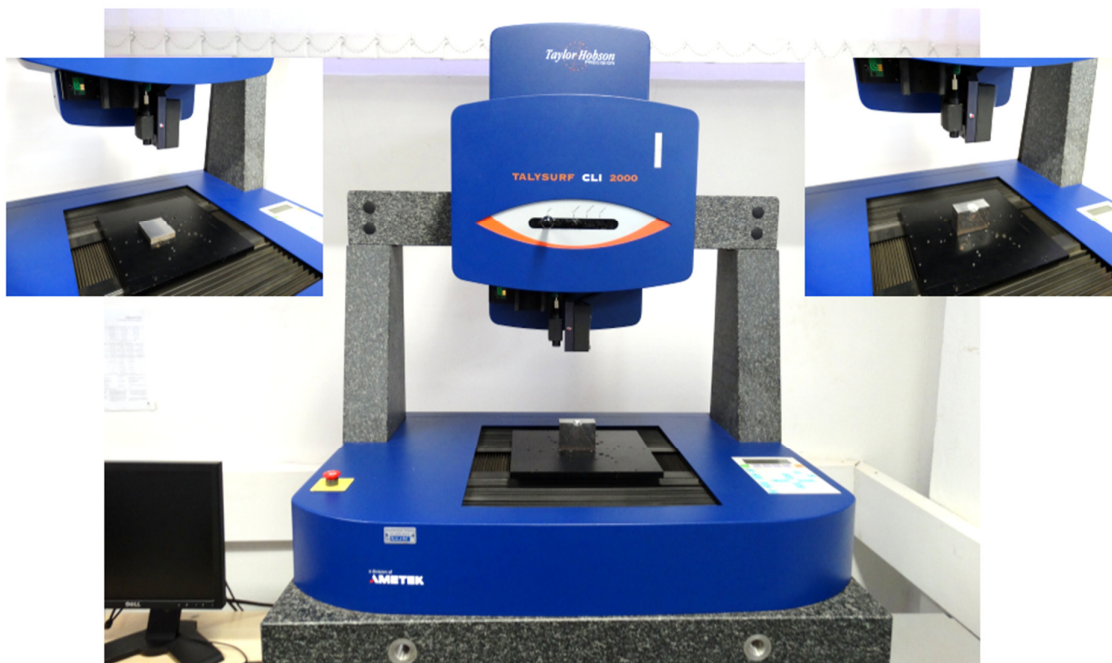


Figura 4.10: Interferômetro ótico utilizado nas medições dos perfis e superfícies de rugosidade.



Para a medição dos perfis de rugosidade, o substrato CP6 foi seccionado na direção paralela ao eixo do furo cônico, preservando o centro do furo. O segmento que continha o centro do furo foi seccionado próximo e paralelo à superfície do fundo do furo cônico. A Figura 4.11 ilustra as amostras obtidas para a realização das medições de rugosidade. A amostra “A” foi utilizada para a medição dos perfis de rugosidade ao longo da superfície lateral do furo cônico. A amostra “B” foi utilizada para a realização das medições de rugosidade da superfície do fundo do furo cônico.

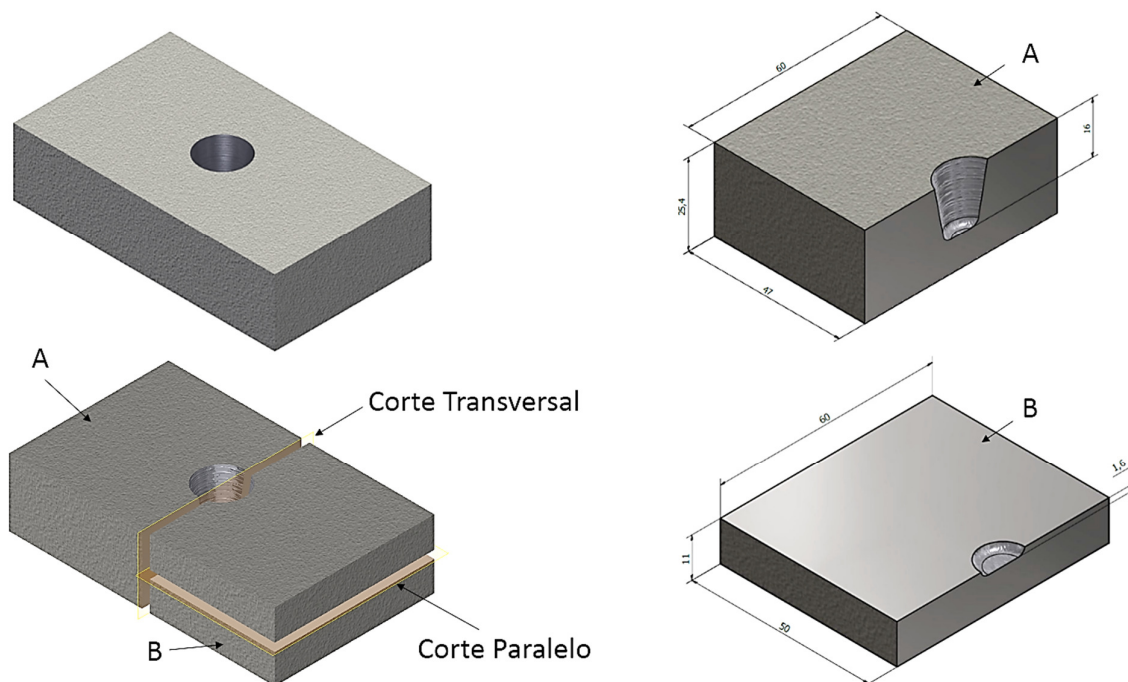


Figura 4.11: Ilustração dos cortes realizados na amostra CP6 para a medição da rugosidade. A) Amostra utilizada para a medição dos perfis de rugosidade na superfície lateral do furo cônico. B) Amostra utilizada para a medição dos perfis de rugosidade na superfície do fundo do furo cônico.

As medições preliminares dos perfis de rugosidade, tanto na superfície lateral, quanto da superfície do furo, foram realizadas, a fim de determinar o valor do parâmetro de espaçamento  $RSm$  (Largura Média dos Elementos do Perfil). Esse parâmetro permite definir o valor do comprimento de amostragem (*cut-off*) a ser utilizado para a medição dos perfis de rugosidade conforme recomendações da norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

Antes do início das medições dos perfis de rugosidade, as amostras foram limpas em banho ultrasônico com álcool a fim de remover qualquer tipo de impureza que pudessem influenciar no processo de medição.

Com os valores dos comprimentos de amostragem definidos, foi elaborado um mapa com as posições estratégicas de medição dos perfis de rugosidade nos blocos “A” e “B” da amostra CP6 (Fig. 4.11). As Figuras 4.12 e 4.13 ilustram de forma esquemática as posições dos perfis de rugosidade obtidas na amostra CP6. Foram realizadas cinco medições para cada trecho, sendo que na amostra “A” foi realizada a medição da rugosidade em três trechos, identificados por “A”, “B” e “C” (Fig. 4.12). Para uma melhor identificação dos perfis de medição foi elaborada uma nomenclatura para identificação do perfil. A sigla PL designa “Perfil Longitudinal”, sendo assim, o perfil PL1A condiz com o perfil da direita da posição A, e assim sucessivamente. Para a amostra B (Fig. 4.13), foram realizadas apenas 5 medições identificadas pela sigla PF (Perfil Fundo).

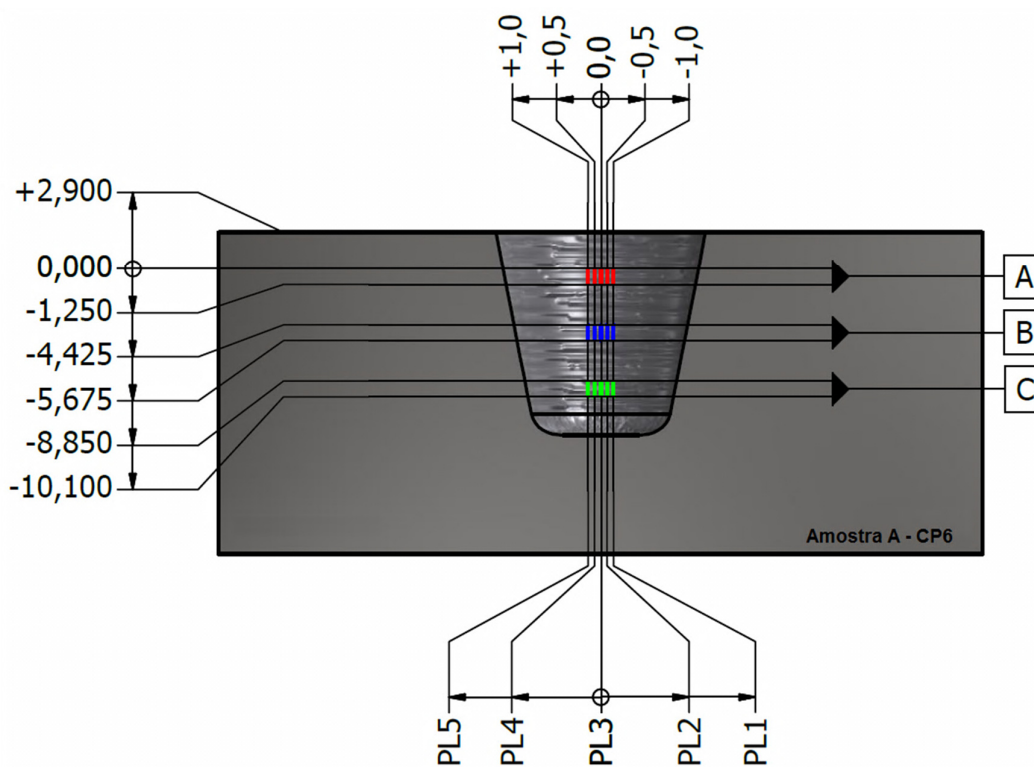


Figura 4.12: Posições de medição dos perfis de rugosidade na superfície lateral do furo cônico.

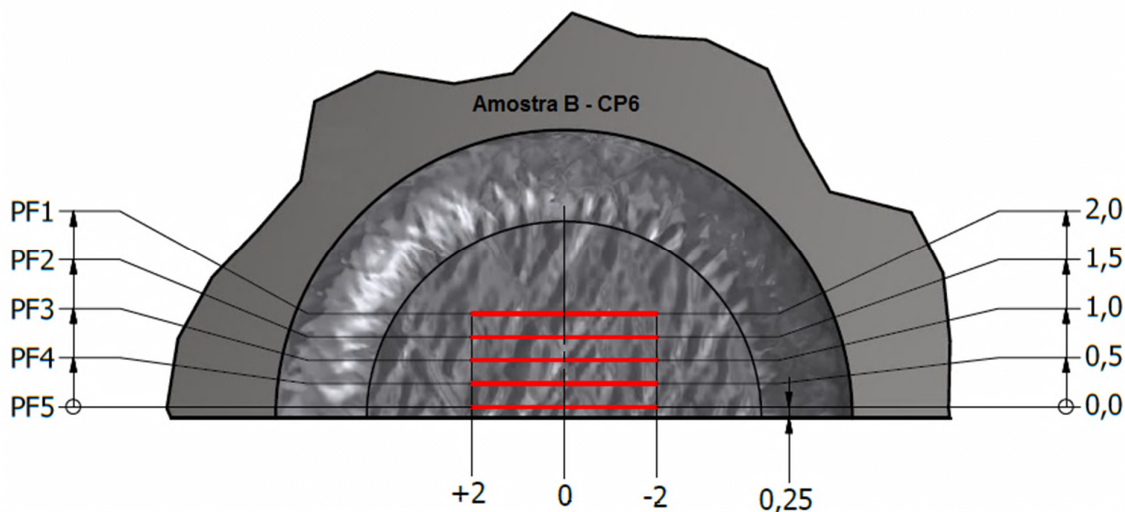


Figura 4.13: Posições de medição dos perfis de rugosidade na superfície do fundo do furo cônico.

Foi calculado o desvio aritmético médio ( $R_a$ ) dos perfis avaliados com objetivo de classificar o estado da superfície conforme a norma ISO 1302 (2002) e a norma DIN 4766.

#### 4.5. Etapa de Preenchimento das Amostras

Após a realização das medições descritas no item anterior, as amostras de CP1 a CP5 foram processadas termomecânicamente via soldagem por atrito pela técnica FTPW, utilizando para isso, os parâmetros de processo selecionados na Tab. 4.4.

Para o processamento dos substratos, foi utilizada a estrutura de fixação do cilindro de reparo da UPPAX. Nessa estrutura o substrato é fixado em uma base plana de aço carbono de 1" (25,4 mm) de espessura, e travado por meio de quatro parafusos laterais, que permitem o ajuste e o alinhamento do centro do furo cônico com o eixo do cilindro de reparo (Fig. 4.14). Antes da realização dos ensaios, as superfícies dos pinos e dos furos foram limpas com acetona para retirar a presença de partículas e resíduos de óleo.

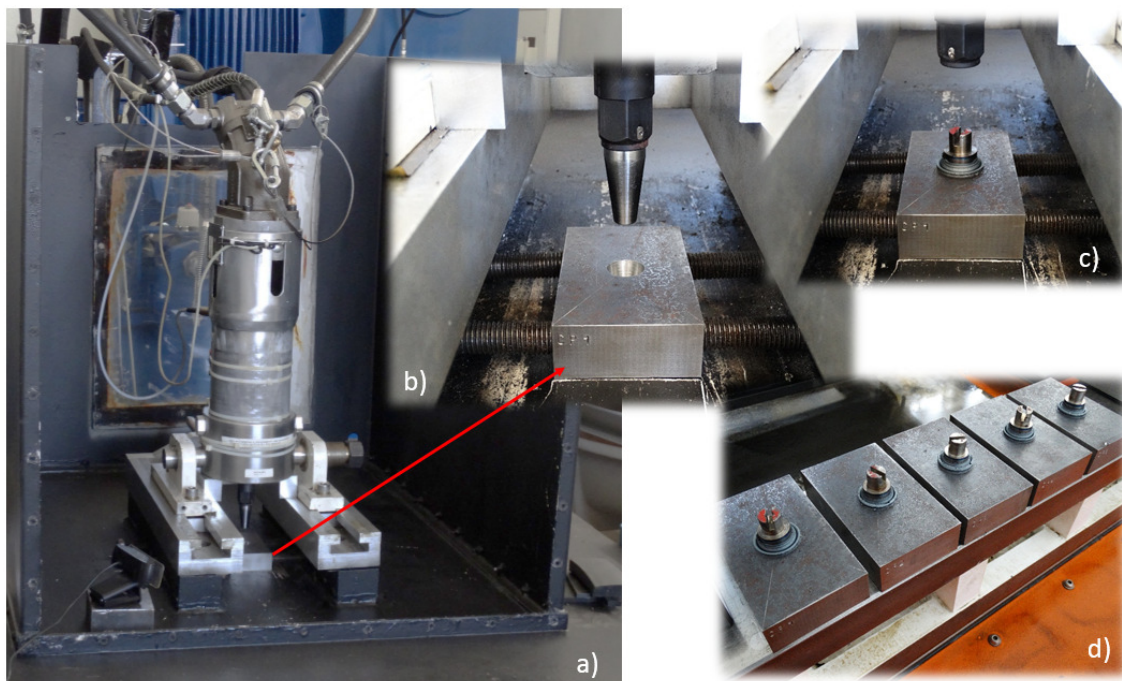


Figura 4.14: Etapa de preenchimento. a) Estrutura utilizada para a fixação dos substratos para a realização dos ensaios, b) Detalhe de fixação dos substratos, c) Substrato processado, d) Substratos CP1 a CP5 processados.

## 4.6. Ensaio Mecânico de Tração

### 4.6.1. Caracterização, dimensionamento, usinagem e preparação dos corpos de prova para ensaio de tração

Nesse trabalho, o ensaio de tração foi realizado com objetivo de determinar as propriedades mecânicas de tração do metal de base (substrato) e da junta processada pela técnica FTPW. Através desse ensaio é possível identificar o local onde houve a ruptura dos corpos de prova, ou seja, se a falha ocorreu no metal base, na região do pino processado ou na região de interface pino/bloco, observando para isso o efeito *overmatching*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> É comum classificar as soldas em função da comparação do limite de escoamento ou do limite de resistência do metal de base com o metal de solda. Se o valor do limite de escoamento ou resistência do metal de solda for, maior, menor ou igual que aquele encontrado no metal de base, as soldas são ditas *overmatched*, *evenmatched* ou *undermatched* respectivamente. Soldas *undermatched* são usadas em juntas de aços de alta resistência mecânica com objetivo de minimizar a tendência da trinca induzida pelo hidrogênio, reduzindo ou prevenindo custos com operações de pré-aquecimento. Enquanto que soldas *overmatched* ou *overmatching* são utilizadas em componentes estruturais sob tensão (AWS D1.1, 2004).

Para a realização do ensaio de tração, foram confeccionados corpos-de-prova retirados a partir das amostras contendo a junta soldada FTPW (CP1, CP2 e CP3). Os corpos-de-prova de tração foram dimensionados de acordo com as recomendações da norma ASTM E8/E8M - 15a. A Figura 4.15 ilustra a dimensão dos corpos de prova de tração utilizados neste trabalho.

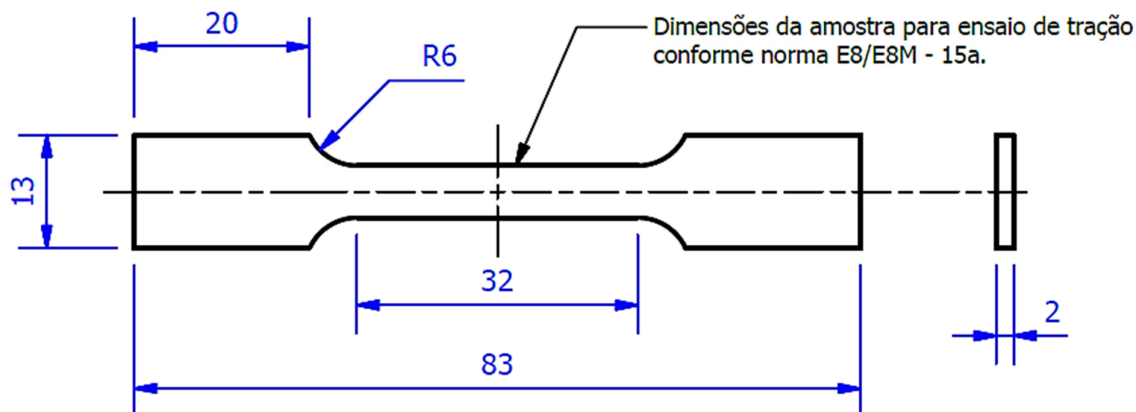


Figura 4.15: Dimensões dos corpos-de-prova de tração conforme recomendações da norma ASTM E8/E8M - 15a.

Os corpos-de-prova foram usinados observando a direção de laminação da chapa, de tal forma que o comprimento da amostra ficasse paralelo à direção de laminação (teste longitudinal, conforme a norma ASTM A370-15).

Para uma melhor análise da junta soldada, os corpos-de-prova de tração foram obtidos em seis diferentes seções ao longo da profundidade da junta, usinados a partir do centro dos substratos, como mostrado na Fig. 4.16.

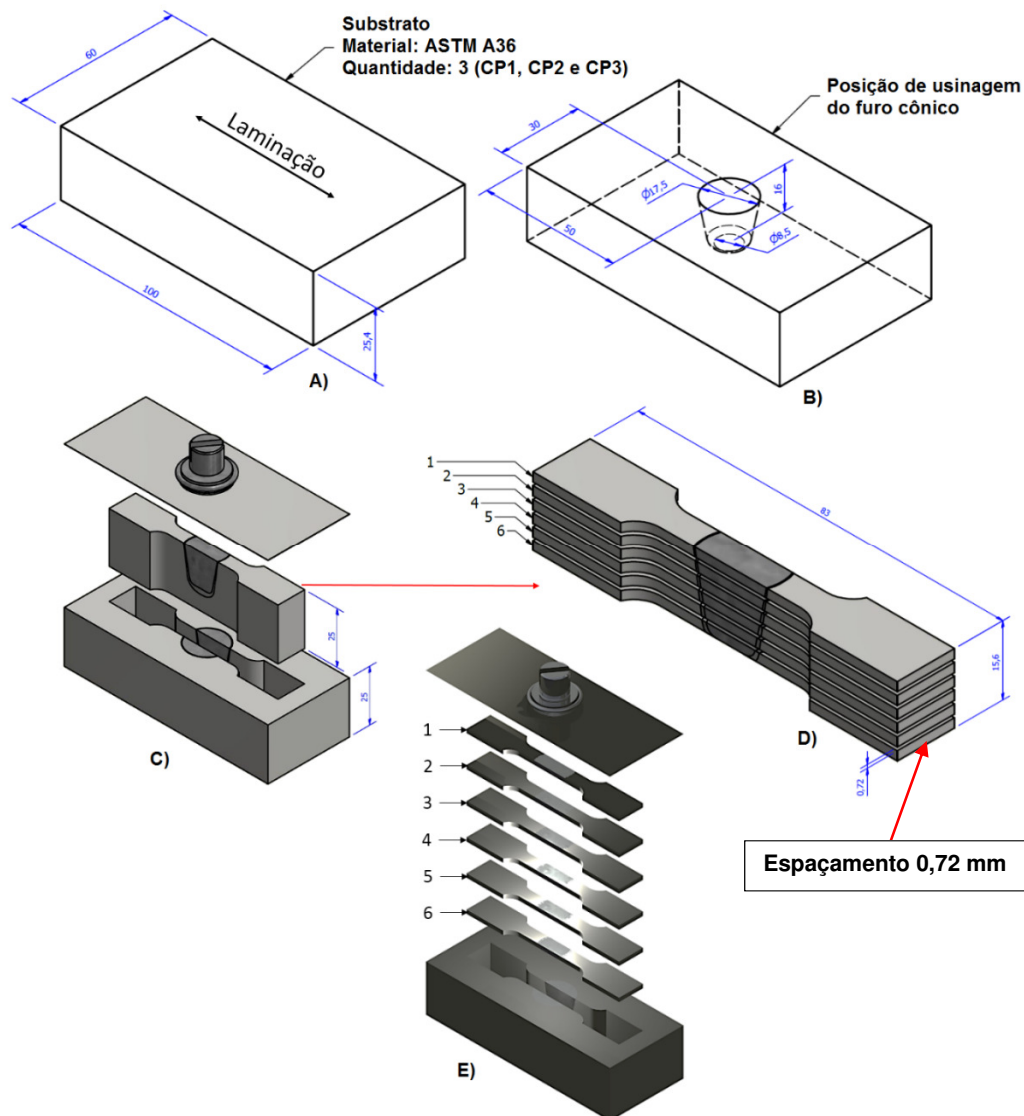


Figura 4.16: Procedimento de usinagem dos corpos de prova de tração. A) Dimensões dos substratos, B) Posição de usinagem do furo cônico, C) Posição de usinagem do punção, D) Amostras de tração com gap de usinagem de 0,72 mm, E) Amostras para ensaio de tração.

Os corpos-de-prova foram usinados utilizando uma máquina de eletroerosão a fio, modelo FW 2U, da marca AgieCharmilles (Fig. 4.17). Primeiramente foi realizado o corte com as dimensões das amostras de tração no centro dos três substratos conforme observado no item “C” da Fig. 4.16. As peças obtidas foram empilhadas e alinhadas, para possibilitar o corte simultâneo das seções de interesse. Os corpos-de-prova foram usinados com espaçamento entre cada seção de 0,72mm (item “D” da Fig. 4.16).

Após a usinagem, os corpos-de-prova foram lixados com lixa d'água de carboneto de Silício na granulometria 1200 e limpas em banho ultra-sônico com acetona. Em seguida, os corpos-de-prova foram atacados com Nital 10% por 10 segundos. Assim, foi possível revelar a região da ZTA do pino processado no substrato.



Figura 4.17: Máquina de eletroerosão a fio Marca AgieCharmilles Modelo FW 2U.

As amostras de tração foram identificadas, seguindo o modelo ilustrado na Fig. 4.18.

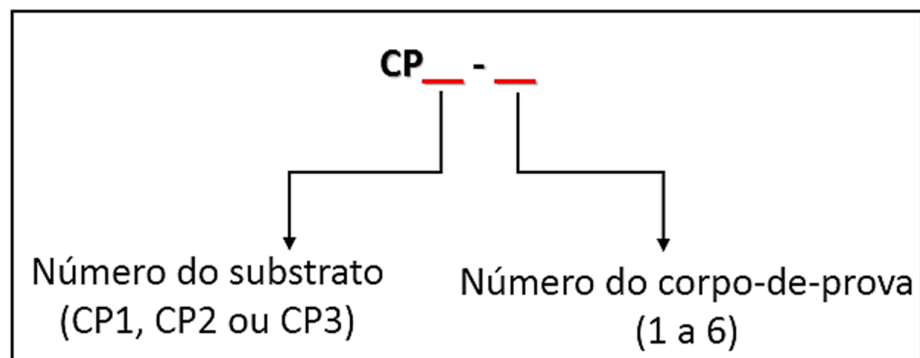


Figura 4.18: Esquema de nomenclatura dos corpos-de-prova de tração.

Adicionalmente, foram fabricadas quatro amostras para ensaio de tração do metal base (substrato), com o propósito de comparar os resultados obtidos com as amostras processadas pela técnica FTPW.

#### 4.6.2. Procedimentos de ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente numa máquina da marca Instron®, modelo 8801 (Fig. 4.19), com capacidade de 100 kN. Para a realização dos ensaios foi utilizado um extensômetro do tipo dinâmico, também da marca Instron® modelo 2620-601, com abertura ajustada de 25 mm e faixa de medição de  $\pm 5$  mm.

Para os ensaios de tração dos corpos-de-prova do metal base, o deslocamento foi medido pelo extensômetro até 10% da deformação. Em seguida o extensômetro foi removido e a medição do deslocamento passou a ser realizado pelo LVTD da máquina até a ruptura da amostra. A velocidade de deslocamento foi de 1 mm/min até 25% de deformação e de 3 mm/min até a ruptura do material.

Para os ensaios de tração dos corpos-de-prova contendo a junta soldada, o extensômetro foi removido após 1% da deformação. Essa alternativa foi adotada no intuito de proteger o extensômetro de uma inesperada ruptura do material. Foi utilizada a mesma velocidade de deslocamento usada durante os ensaios dos corpos-de-prova do metal base.

Os valores obtidos durante os ensaios (tempo (s), tensão (MPa) e alongamento (mm)) foram armazenados e depois plotados os gráficos com as curvas tensão-deformação. Os parâmetros determinados foram: Limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), a 0,2% de alongamento, limite de resistência ( $\sigma_R$ ) e alongamento total.



Figura 4.19: Máquina de tração utilizada para a realização dos ensaios.



#### 4.7. Análise Macro e Microscópica da Junta Soldada

Após o processamento dos pinos consumíveis (etapa de preenchimento), a amostra CP5 foi preparada metalograficamente, visando análise do resultado, tanto via observações visuais com vista desarmada (a olho nu), bem como por auxílio de microscópio óptico. A metalografia foi dividida em duas etapas, sendo a primeira visando caracterizar a macroestrutura e a segunda a microestrutura da junta soldada.

Inicialmente a amostra CP5 foi cortada na direção transversal ao bloco, ao longo de um plano paralelo ao centro do furo, visando, desta forma, preservar a seção central para a realização de inspeção e estudos de qualificação do reparo. Esse corte foi realizado mediante o uso de disco abrasivo refrigerado, minimizando o efeito térmico proveniente do corte na microestrutura.

Para a preparação da superfície de interesse para análise macroscópica, a seção foi lixada com lixas d'água de Carboneto de Silício (SiC) de granulometrias 220, 320, 400 e 600 *mesh*. Em seguida, a amostra foi limpa no banho ultra-sônico com acetona, e em seguida atacada quimicamente com uma solução de Nital (ácido nítrico e álcool) a 10% durante um tempo de 10 segundos. Dessa forma foi destacado a região termicamente afetada pelo calor.

A superfície utilizada para a análise macrográfica foi digitalizada através de um *scanner* da marca Hewlett Packard Scanjet modelo G4050. Depois de realizar as observações macrográficas, a superfície da amostra foi preparada para análise micrográfica.

Para a análise micrográfica a superfície foi lixada com lixas d'água de Carboneto de Silício (SiC), seguindo a sequência com lixas de granulometria 600 e 1.200 *mesh*. Em seguida, a amostra foi limpa em banho ultrasônico com acetona. Na sequência, a superfície foi polida utilizando pasta de polimento nas seguintes granulometrias: 15, 9, 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ .

O polimento final foi realizado com sílica coloidal de 0,04  $\mu\text{m}$ . Por último, a amostra foi lavada em água corrente e, em seguida, com álcool. Por fim, a amostra foi atacada quimicamente com uma solução de Nital a 2% até a revelação da zona termicamente afetada. A amostra foi lavada com água corrente e novamente com álcool.

# CAPÍTULO V

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de usinagem do furo cônico usando a unidade reestruturada, os resultados das medições do perfil geométrico e de rugosidade de furos obtidos com novas ferramentas, os resultados de preenchimento, bem como uma avaliação da qualidade da junta soldada através de ensaios de tração e análise macro e micrográfica.

### 5.1. Resultados dos Ensaios de Usinagem do Furo Cônico

#### *5.1.1. Definição dos parâmetros de usinagem – Testes preliminares*

O principal objetivo dos testes preliminares foi determinar os parâmetros de usinagem (avanço, profundidade de corte, rotação e velocidade de avanço) das ferramentas de metal duro, a fim de se obter furos cônicos com dimensões desejadas e com qualidade superficial aceitável para o processo de reparo por atrito.

No Teste 1 foi utilizada uma velocidade de avanço para a broca escalonada de 0,5 mm/s. A Figura 5.1 mostra o gráfico do Teste 1, construído com as aquisições dos sinais de posição, torque, velocidade de avanço, força, potência consumida e velocidade de rotação da ferramenta, todos em função do tempo.

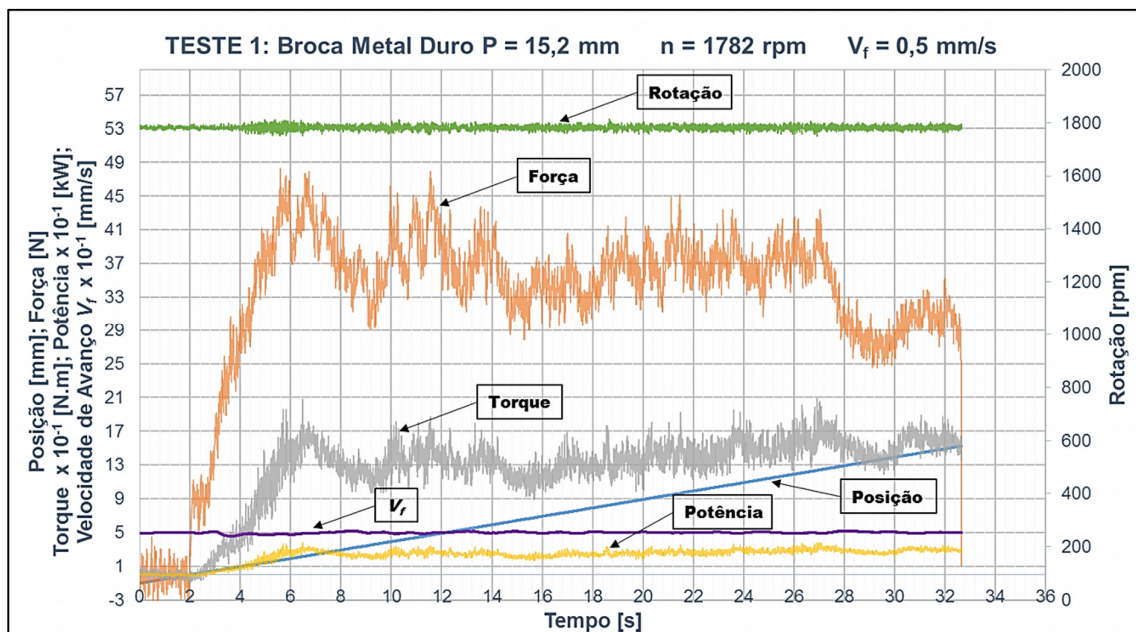


Figura 5.1: Sinais adquiridos durante o Teste 1, utilizando a broca cônica escalonada (Rotação de 1.782 rpm e  $V_f$  de 0,5 mm/s).

Primeiramente, pôde-se observar, com base nos resultados apresentados nos gráficos, que os sistemas de controle de rotação e velocidade de deslocamento do cilindro de reparo apresentaram um bom desempenho, mantendo os parâmetros estabelecidos dentro de limites aceitáveis para operação de usinagem. As válvulas proporcionais especificadas para o processo de usinagem controlaram o motor hidráulico em baixas rotações, assim como a velocidade de deslocamento do cilindro, que permite atualmente valores a partir de 0,1 mm/s. Durante os ensaios pôde ser observada uma redução do golpe de aríete no final do processo, que antes acontecia sempre que a rotação era zerada.

Observa-se na Fig. 5.1, que o sistema de controle e monitoramento da UPPAX para o processo de furação com a broca mostrou-se eficiente na aquisição dos sinais monitorados, até mesmo para pequenas variações ocorridas em curtos intervalos de tempo.

Visualmente o sistema apresentou boa rigidez e estabilidade durante todo o tempo de usinagem, isso pode também ser confirmado pela observação da estabilidade da rotação e velocidade de avanço durante todo o processo. Não foram verificadas vibrações excessivas ou batimento da ferramenta, como mostrado no acabamento do furo da Fig. 5.2.

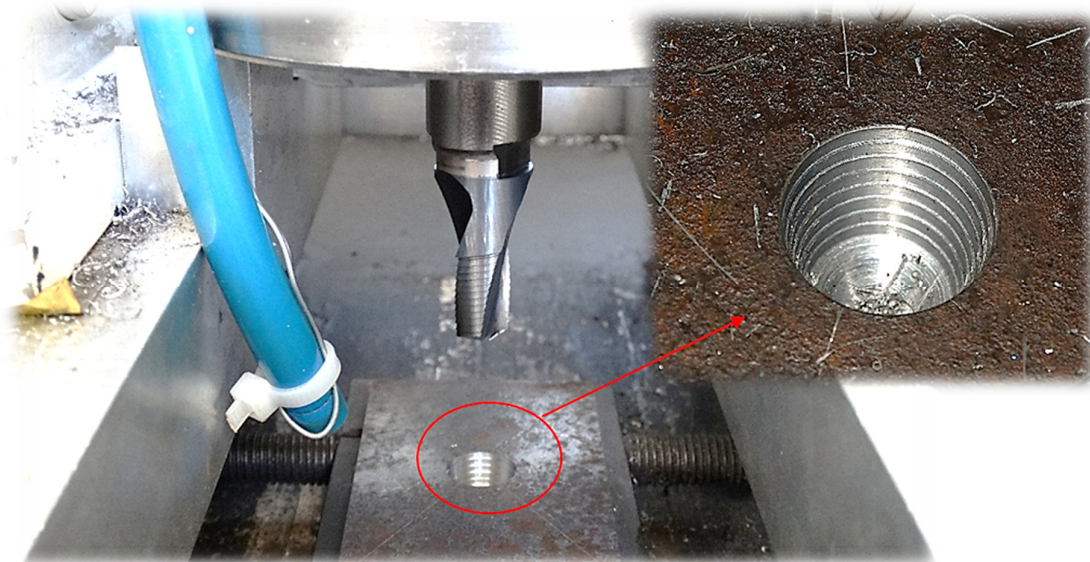


Figura 5.2: Usinagem do furo realizado com a broca cônica escalonada.

No Teste 1 observou-se que o tempo de usinagem utilizando a broca cônica foi de aproximadamente 30 segundos. Esse tempo parece aceitável para uma operação de furação em campo. O torque máximo atingido pelo motor hidráulico foi de aproximadamente 2 Nm e a força axial máxima foi de 48 N. Deste modo, os parâmetros do Teste 1 estão dentro dos limites de usinagem da ferramenta e consomem menos que 3% da capacidade de torque fornecida pelo equipamento.

Foi realizado um estudo para definir a profundidade de corte de cada ferramenta, com objetivo de realizar o último passe de usinagem com a fresa, garantindo a impressão da geometria desejada. Dessa forma, foi estabelecido, para usinagem de furos com profundidade de 16 mm, operações com a broca até 15,2 mm de profundidade, sendo o restante realizado com a fresa. Esse procedimento garante que todas as marcas de usinagem deixadas pela broca sejam removidas pela fresa, conferindo a geometria desejada no final do processo de usinagem.

Para a usinagem de acabamento com a fresa no Teste 1, foi utilizada a mesma velocidade de avanço da broca de 0,5 mm/s. A Figura 5.3 mostra os resultados dos sinais obtidos durante a etapa de fresamento do furo.

Os gráficos referentes aos sinais adquiridos no processo de fresamento foram plotados considerando um trecho inicial de aproximação da ferramenta. Isso pode ser observado nos primeiros segundos dos gráficos onde não há variação de alguns dos parâmetros.

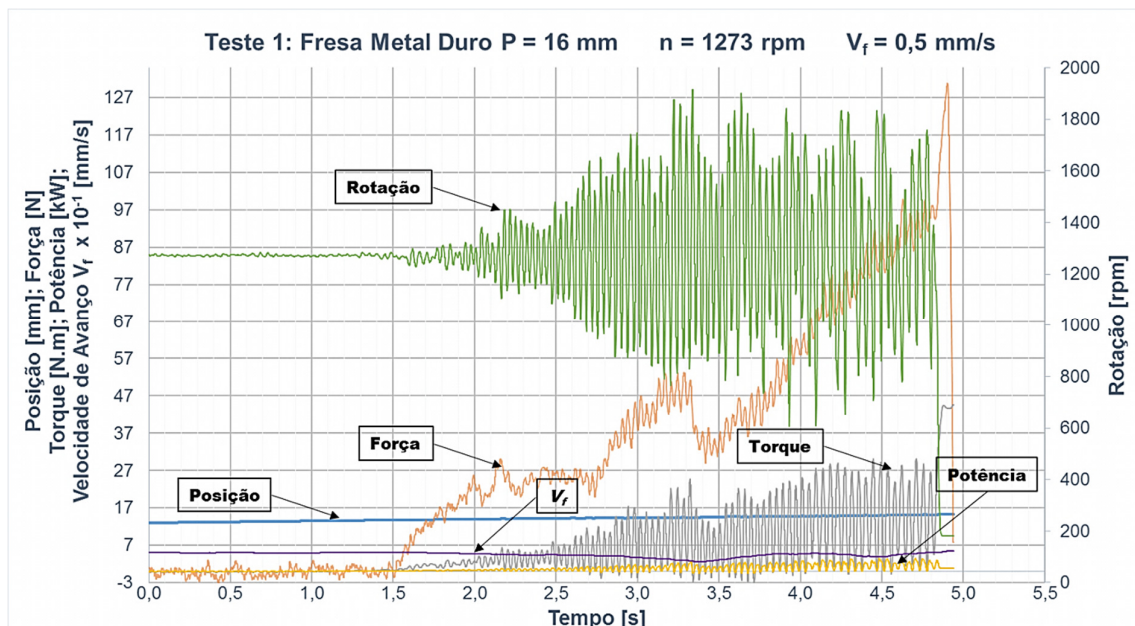


Figura 5.3: Sinais adquiridos durante o Teste 1 utilizando a fresa cônica (Rotação de 1.273 rpm e  $V_f$  de 0,5 mm/s).

Pode-se observar na Fig. 5.3 uma considerável instabilidade da rotação, o que contribuiu para o aumento considerável da força axial aplicada sobre a ferramenta devido à redução da taxa de remoção de material da ferramenta. A instabilidade se intensificou ao ponto de causar o travamento do eixo do motor hidráulico devido ao pronunciado aumento do torque, que atingiu valor máximo de aproximadamente 45 Nm. O travamento do eixo ocorreu no instante em que a ferramenta atingiu a posição de 15,3 mm da superfície do substrato. Nessa posição a força axial aplicada sobre a ferramenta foi de aproximadamente 131 N. Todos esses fenômenos indicam que os parâmetros do Teste 1 não são adequados para a etapa de fresamento.

Em resumo, os parâmetros utilizados no Teste 1 possibilitam realizar a usinagem com a broca, mas não são aplicáveis para a etapa de usinagem com a fresa. Nos Testes 2 e 3, foi variada apenas a velocidade de avanço. Os demais parâmetros foram mantidos como no Teste 1.

No Teste 2 a velocidade de avanço da fresa foi reduzida para 0,3 mm/s. A Figura 5.4 mostra os sinais adquiridos durante o processo.

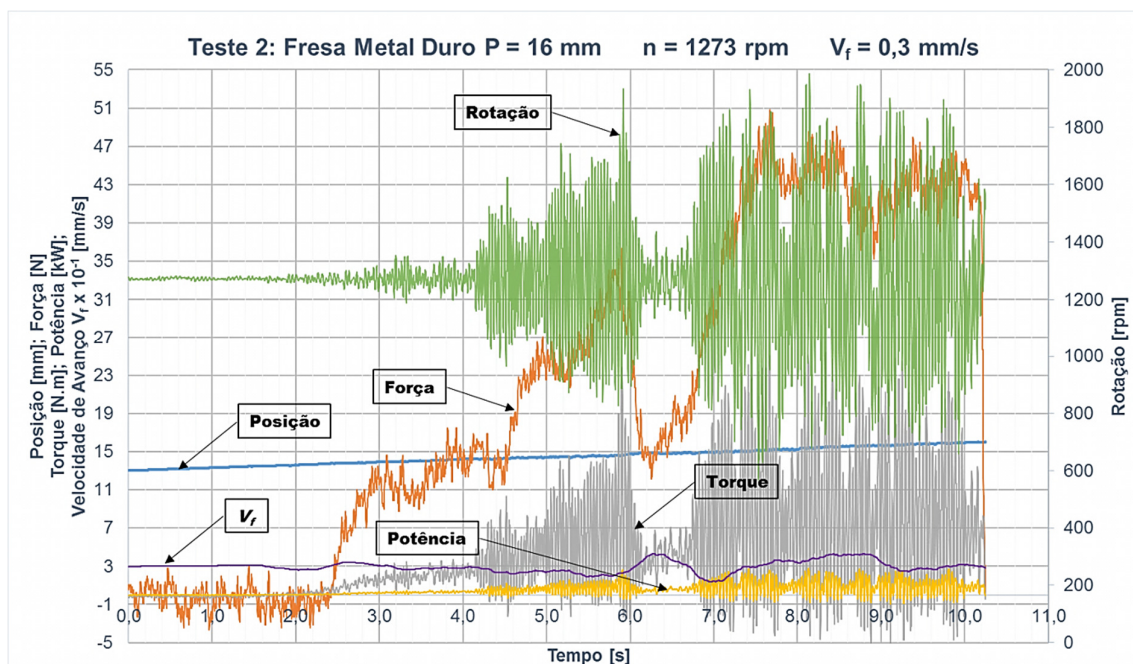


Figura 5.4: Sinais adquiridos durante o Teste 2 utilizando a fresa cônica (Rotação de 1.273 rpm e  $V_f$  de 0,3 mm/s).

Com os novos parâmetros não houve travamento, porém, ainda foi observada uma instabilidade significativa da rotação. A usinagem prosseguiu até a profundidade requerida de 16 mm, como mostrado na Fig. 5.4. A força axial máxima foi consideravelmente menor que a observada no Teste 1, sendo reduzida de 131 N para aproximadamente 51 N.

Apesar da execução do furo ter sido concluída, uma observação visual da superfície usinada indicou marcas de usinagem provenientes da instabilidade da rotação. Desta forma, entende-se que os parâmetros estabelecidos no Teste 2 não foram satisfatórios.

A partir dos resultados obtidos no Teste 2, foi realizado o Teste 3, onde a velocidade de avanço foi reduzida para 0,1 mm/s. A Figura 5.5 mostra os resultados dos sinais obtidos durante a realização do Teste 3.

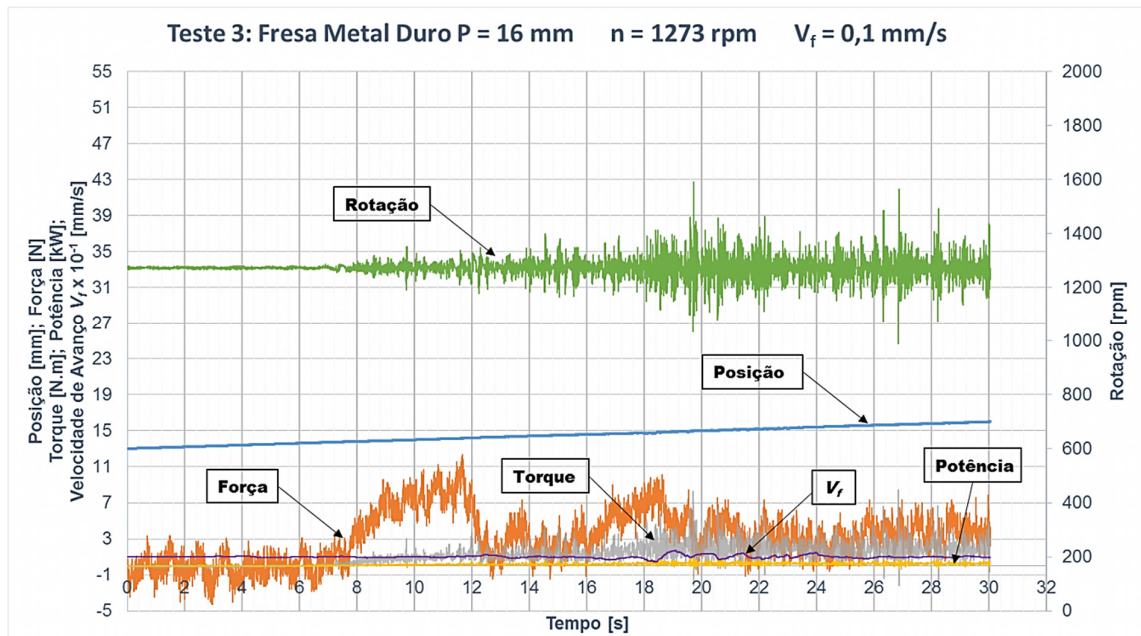


Figura 5.5: Sinais adquiridos durante o Teste 3 utilizando a fresa cônica (Rotação de 1.273 rpm e  $V_f$  de 0,1 mm/s).

O sinal da rotação com os parâmetros do Teste 3 foi nitidamente mais estável do que os anteriores. Esse comportamento foi visualmente perceptível durante a execução do furo. Nesse caso, a força máxima aplicada sobre a ferramenta foi de aproximadamente 12 N, novamente reduzida em relação aos testes anteriores.

Uma avaliação visual do furo obtido mostra que essa configuração produz melhores acabamentos. A Figura 5.6 mostra a imagem de um dos furos usinados com a fresa cônica.

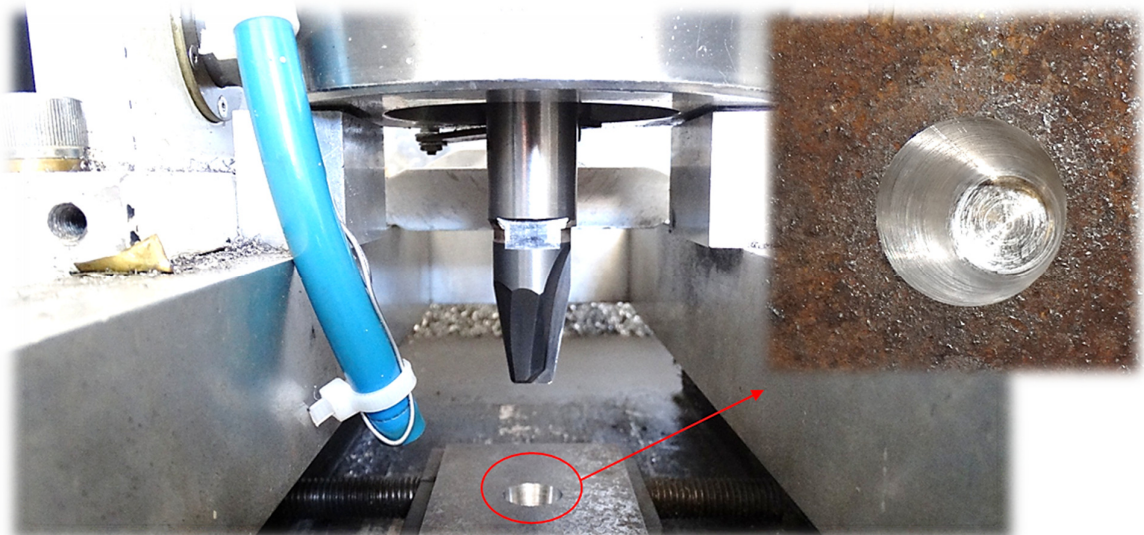


Figura 5.6: Usinagem do furo realizado com a fresa cônica.

A Tabela 5.1 resume os valores máximos de força e torque registrados durante os Testes 1, 2 e 3.

Tabela 5.1: Máximas valores de forças e torque registrados durante a realização dos testes preliminares de usinagem.

		Força [N]	Torque [Nm]
<b>Broca Cônica</b>	<b>Teste 1</b>	48,22	2,09
	<b>Teste 2</b>	46,31	2,27
	<b>Teste 3</b>	44,95	2,07
		Força [N]	Torque [Nm]
<b>Fresa Cônica</b>	<b>Teste 1</b>	130,94	44,64
	<b>Teste 2</b>	50,79	25,35
	<b>Teste 3</b>	12,38	8,47

Dos ensaios preliminares decidiu-se utilizar os parâmetros de usinagem do Teste 3 para a usinagem das amostras CP1 a CP6.

### 5.1.2. Processo de usinagem do furo cônico – Etapa de Furação

Após ter definido os parâmetros de usinagem do furo cônico, os substratos CP1 a CP6 foram usinados, sendo todos os sinais gerados e armazenados, com objetivo de preservar as informações de cada evento realizado.

Após a limpeza dos furos com acetona, esses foram submetidos a uma inspeção visual. Pôde-se observar que os furos apresentaram a superfície lateral visualmente melhor do que a superfície do fundo do furo. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram com mais detalhes o furo realizado no CP6, o qual foi seccionado para medição dos perfis de rugosidade e medição do raio de concordância.



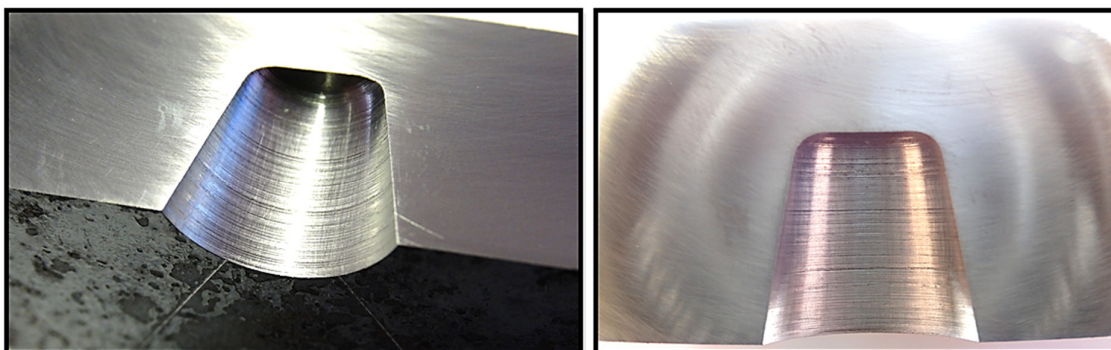


Figura 5.7: Imagem da superfície lateral do furo cônico (CP6).

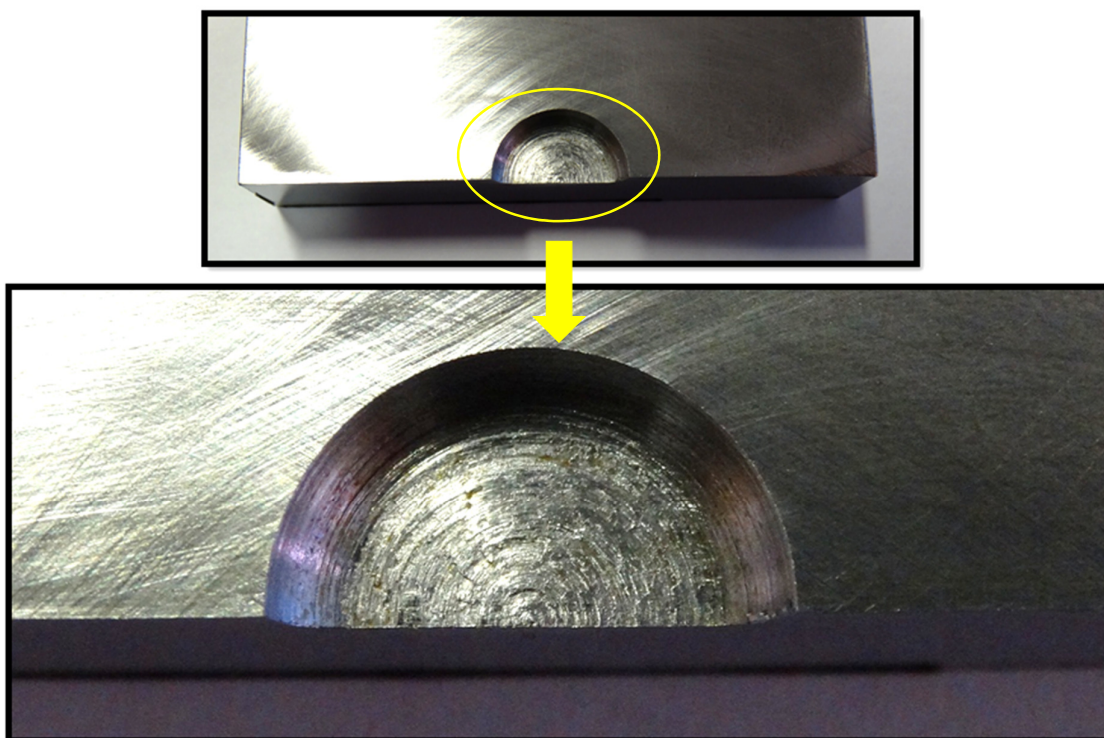


Figura 5.8: Imagem da superfície do fundo do furo (CP6).

## 5.2. Desvios de Forma dos Furos Cônico

A Tabela 5.2 apresenta os resultados das medidas de profundidade dos furos cônicos usinados nos substratos CP1 a CP6. Como pode ser observado, os valores estão próximos ao valor predefinido de 16 mm. Destaca-se aqui que o maior desvio de profundidade foi observado no substrato CP3, com valor de, aproximadamente, 0,12 mm.

Tabela 5.2: Resultados das medições de profundidade dos furos cônicos.

Profundidade (mm)					
Medições	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
1	15,9959	16,0094	16,1212	15,9425	16,0731
2	15,9957	16,0100	16,1212	15,9425	16,0734
3	15,9958	16,0096	16,1211	15,9425	16,0735
<b>Média</b>	<b>15,9958</b>	<b>16,0097</b>	<b>16,1212</b>	<b>15,9425</b>	<b>16,0733</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0002</b>

Em trabalhos passados de investigação de geometrias para reparo por atrito, Pires (2007) indica uma tolerância de menos 0,1 mm na profundidade do furo para fabricação convencional, como pode ser observado na Fig. 5.9. Observa-se que a variação da profundidade nos furos executados na UPPAX foi ligeiramente superior em apenas um CP. Muito provavelmente essa variação ocorreu pelo fato da rigidez da UPPAX ser inferior à de um torno ou de uma fresadora.

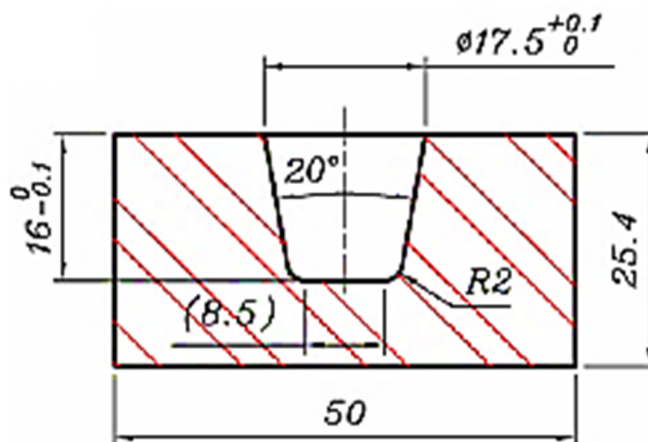


Figura 5.9: Geometria do furo cônico Tipo A (PIRES, 2007).

Para o completo preenchimento do furo cônico, foi determinado por Pires (2007), o comprimento de queima de oito milímetros. Esse valor foi calculado levando-se em conta o volume de preenchimento do furo e uma margem superior de 15%, considerando as possíveis deformações e variações geométricas do furo. Dessa forma, é garantido o total preenchimento da cavidade e ainda a formação de rebarba (*flash*) durante o processamento. A partir dessas considerações, pode-se concluir que a variação dimensional obtida na medição dos furos não acarreta problemas para o processo de preenchimento.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados das medidas do ângulo de cone dos furos. Como pode ser observado, os valores estão próximos ao valor pretendido de 20°. Destaca-se aqui que o maior desvio foi de 0,47°, observado na amostra CP5.

Tabela 5.3: Resultados das medições do ângulo dos furos cônicos.

Ângulo de Cone (°)					
Medição	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
1	19,9733	20,0031	20,0386	20,1600	20,4667
2	19,9742	20,0036	20,0392	20,1583	20,4686
3	19,9725	20,0047	20,0394	20,1594	20,4628
<b>Média</b>	<b>19,9733</b>	<b>20,0039</b>	<b>20,0392</b>	<b>20,1592</b>	<b>20,4660</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0030</b>

A variação máxima do ângulo do cone foi de 2,33%. O maior desvio do ângulo aconteceu justamente no corpo-de-prova CP5, o qual foi avaliado via análise macro e micrográfica. A partir dessa análise não foi identificado nenhum problema de preenchimento.

A Tabela 5.4 mostra o resultado de medição do raio de concordância presente na região de transição do fundo do furo com a seção cônica, observado no substrato CP6. Apesar dos resultados expressarem as medidas de apenas um corpo-de-prova, a variação do valor médio para o valor pretendido de 2 mm foi inferior a 0,5%. De igual modo, não há referências na literatura de tolerância para essa medida. Foi realizada a avaliação final do preenchimento no CP5, e foi constatado a inexistência de falhas de preenchimento nessa região.

Tabela 5.4: Resultados das medições do raio de concordância na amostra CP6.

Raio de Concordância (mm)	
Medição	Raio (mm)
1	2,009
2	1,995
3	2,012
4	2,025
5	2,005
<b>Média</b>	<b>2,009</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,011</b>

As Figuras 5.10 a 5.14 mostram os resultados dos desvios médios de circularidade obtidos pelo método dos mínimos quadrados através do *software* Calypso®. Pode-se observar que houve uma variação micrométrica entre os furos cônicos realizados. Os desvios padrão foram multiplicados por dois obtendo-se 95% de confiabilidade nos resultados apresentados.

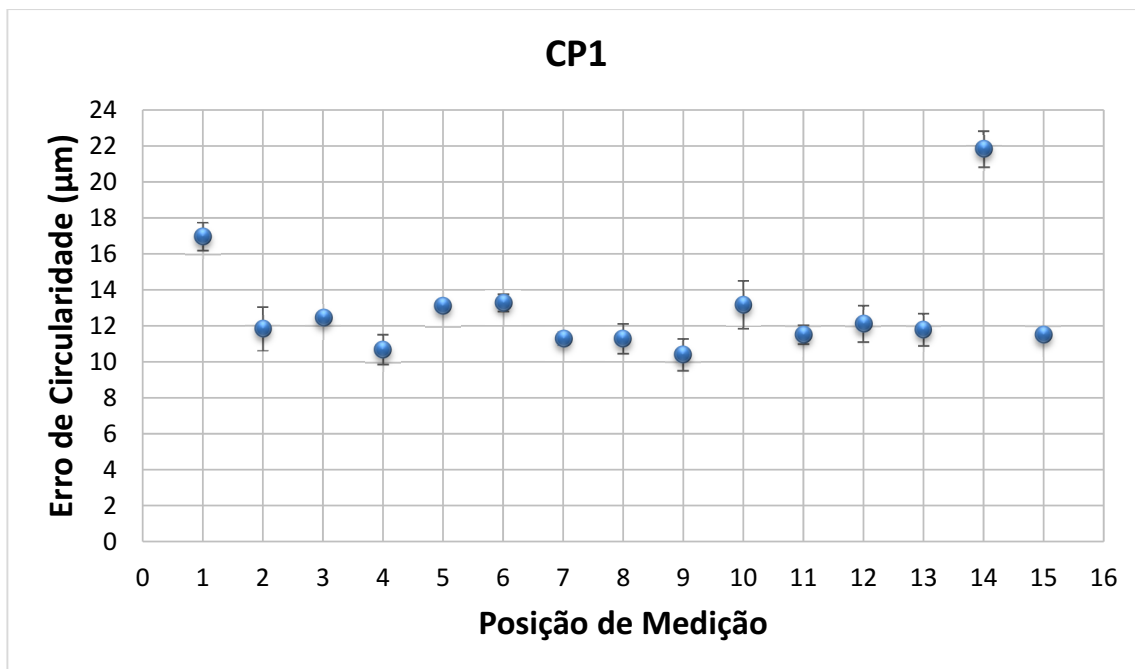


Figura 5.10: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP1.

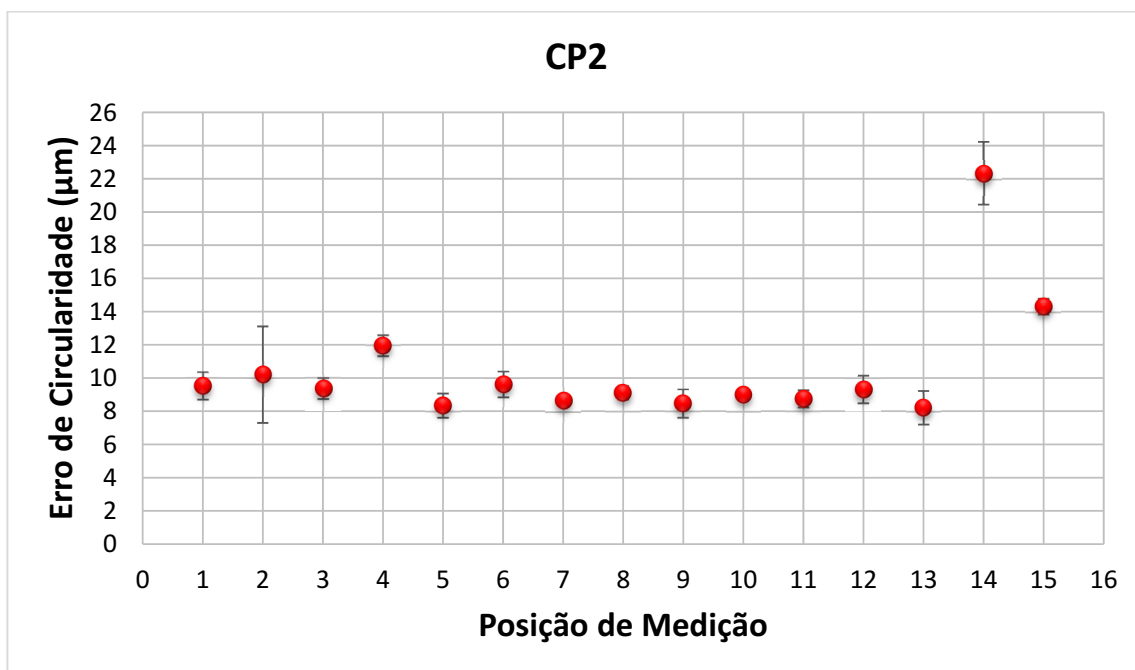


Figura 5.11: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP2.

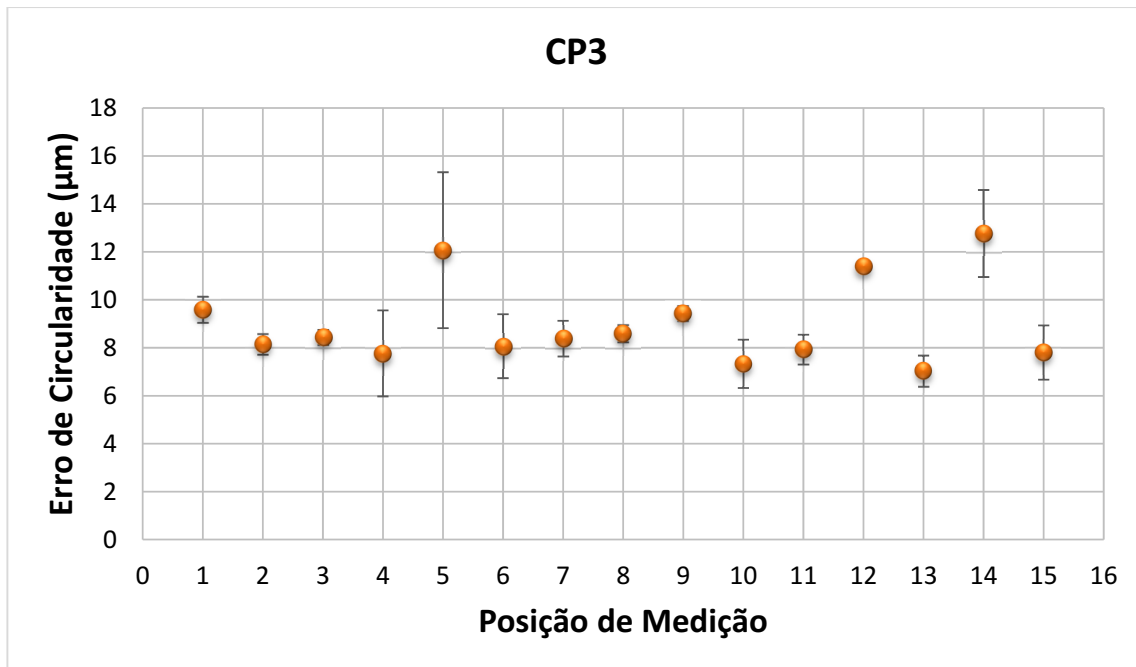


Figura 5.12: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP3.

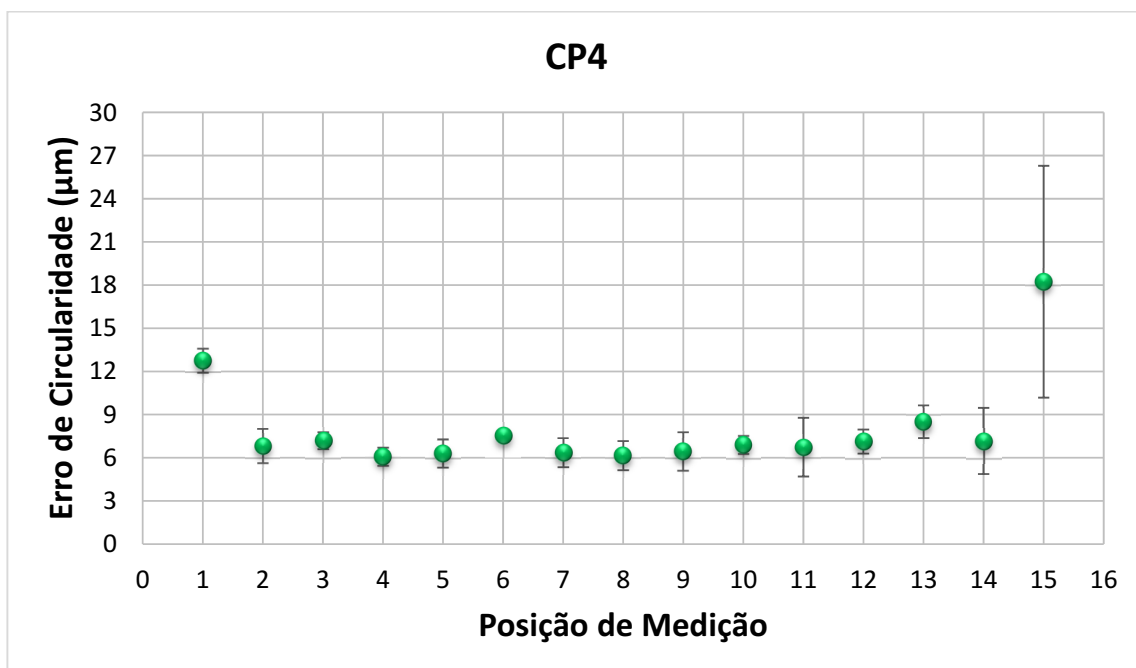


Figura 5.13: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP4.

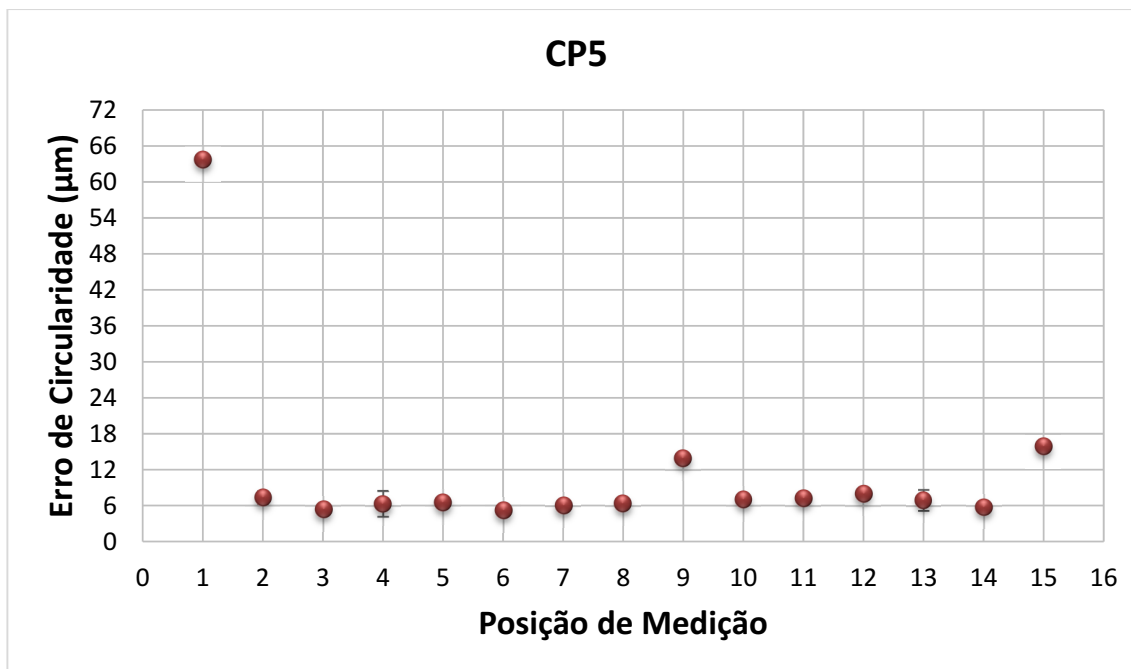


Figura 5.14: Erro de circularidade ao longo do comprimento do furo cônico usinado no substrato CP5.

Observando os resultados dos erros de circularidade fica evidente que na média as variações foram em torno de 12 µm. Em um processo de furação convencional esses valores estão na faixa de 8 a 110 µm. Mesmo considerando os pontos que desviam desse valor médio, como por exemplo na posição 14 do CP2 e na posição 1 do CP5, pode-se considerar que a qualidade do furo se compara à de usinagens em máquinas convencionais.

Através dos resultados obtidos nas medições de profundidade, ângulo, raio de concordância e do erro de circularidade foi possível identificar o grupo de tolerâncias que correlaciona ao padrão de qualidade IT (*Internacional Tolerance*) conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 6158.

Os diâmetros do furo cônico estão no intervalo de 17,5 mm e 12,0 mm; pode-se então concluir que a qualidade de usinagem obtida com as ferramentas desenvolvidas utilizando a UPPAX se enquadra nos intervalos de padrões de qualidade IT8 a IT11 (Tabela 5.5). Esse intervalo de categoria de trabalho está agrupado aos padrões de qualidade reservados para fabricação de peças mecânicas em geral, mais precisamente para trabalhos mecânicos de usinagem comum.

Tabela 5.5: Tolerâncias fundamentais (ABNT NBR 6158).

IT	DIÂMETROS [mm] (mais de - até)													UT
	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 120	120 - 180	180 - 250	250 - 315	315 - 400	400 - 500	
01	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	2.0	2.5	3.0	4.0	0.5i
0	0.5	0.6	0.6	0.8	1.0	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	1i
1	0.8	1.0	1.0	1.2	1.5	1.5	2.0	2.5	3.5	4.5	6.0	7.0	8.0	1.5i
2	1.2	1.5	1.5	2.0	2.5	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0	8.0	9.0	10	2i
3	2.0	2.5	2.5	3.0	4.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10	12	13	15	3.5i
4	3.0	4.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	10	12	14	16	18	20	5i
5	4.0	5.0	6.0	8.0	9.0	11	13	15	18	20	23	25	27	7i
6	6.0	8.0	9.0	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40	10i
7	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63	16i
8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97	25i
9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155	40i
10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250	64i
11	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400	100i
12	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630	160i
13	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970	250i
14	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550	400i
15	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500	640i
16	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000	1000i
17	900	1200	1500	1800	2100	2500	3000	3500	4000	4600	5200	5700	6300	1600i
18	1400	1800	2200	2700	3300	3900	4600	5400	6300	7200	8100	8900	9700	2500i

### 5.3. Parâmetros de Rugosidade

Em paralelo às atividades realizadas no item 5.2, o corpo de prova CP6 foi seccionado conforme ilustrado na Figura 4.11 para a realização das medições de rugosidade.

Foram medidos os parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  e  $RSm$ . Entretanto, neste trabalho serão discutidos apenas os valores dos parâmetros  $R_a$  e  $RSm$ . Entende-se que esses parâmetros são suficientes para a avaliação das condições superficiais dos furos usinados. Os demais são mostrados no APÊNDICE I, sendo todos os perfis de rugosidade apresentados no APÊNDICE II.

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram os resultados dos valores das médias com os respectivos desvios padrão dos parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $RSm$ , obtidos a partir das medições dos perfis longitudinal (PL) e dos perfis do fundo (PF) do furo cônico.

Ressalta-se aqui, que os comprimentos de amostragem de rugosidade (*cut-off*) para os perfis longitudinais e para o fundo do furo foram definidos observando as recomendações da norma ABNT NBR 4288 (2008). Para essa avaliação foram utilizados os valores de  $RSm$  da Fig. 5.15.

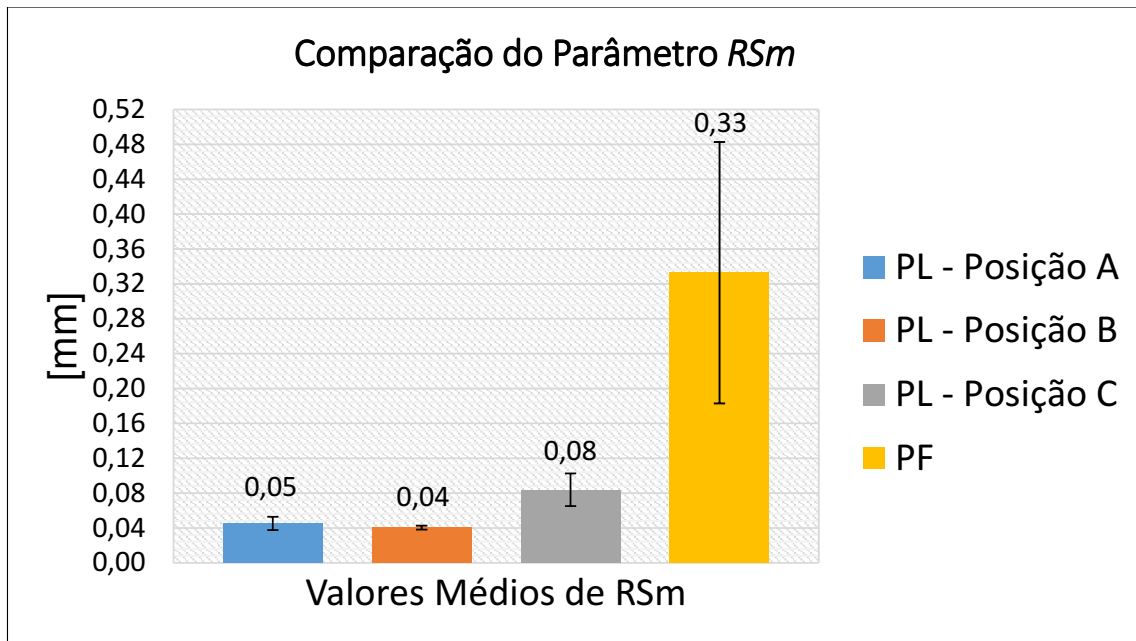


Figura 5.15: Valores médios de  $R_{Sm}$  com os respectivos desvios padrão, medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6.

A Figura 5.16 mostra os resultados das medições de  $R_a$  dos perfis longitudinais e do fundo do furo da amostra CP6.

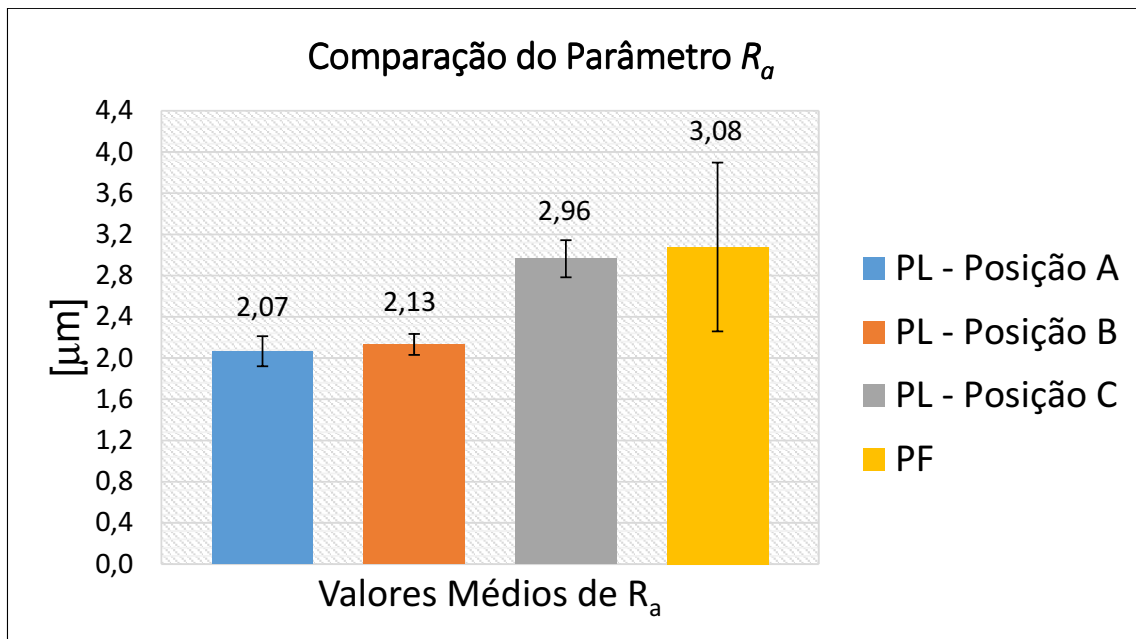


Figura 5.16: Valores médios de  $R_a$  com os respectivos desvios padrão medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6.



O valor da rugosidade média do parâmetro  $R_a$  próximo à superfície (Posição A) e na posição intermediária do furo (Posição B) apresentam valores similares, enquanto que a “Posição C” e a superfície do fundo do furo apresentaram os maiores valores de  $R_a$ , sendo 2,96  $\mu\text{m}$  e 3,08  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Pode-se observar que houve um progressivo aumento no valor da rugosidade, comparando as posições A, B e C, ou seja, quanto mais próximo do fundo do furo, pior a qualidade do acabamento superficial.

Esse evento pode ser explicado por dois fatores que ocorrem simultaneamente. O primeiro fator refere-se à velocidade de corte que é maior na borda e menor no fundo do furo, devido a conicidade da ferramenta. Segundo Almeida (2006) tem-se um melhor acabamento de usinagem quando são utilizados maiores velocidades de corte, devido à redução das forças de usinagem. Para usinagem de materiais dúcteis, esta melhoria é rápida até uma velocidade crítica, devido à contínua redução da aresta postiça de corte (APC). Considerando a diferença das dimensões do diâmetro maior e menor da fresa cônica, há uma redução de aproximadamente 30% da velocidade de corte.

Um segundo fator é a maior dificuldade de saída dos cavacos no fundo do furo, os quais, quando em contato com a superfície do furo, comprometem o acabamento superficial. (MICHELON. *et. al.*, 2014). A velocidade de corte é muito menor à medida que se avança para a região central da ferramenta. A não existência de ângulo de saída de cavacos contribui para o aumento da rugosidade nessa região.

Outro fator que pode ocorrer em processos de furação é a adesão de microcavacos em virtude do aumento de temperatura à medida que a ferramenta de usinagem atinge profundidades maiores. Esse fenômeno causa danos superficiais, aumentando o valor de  $R_a$  (CARDOSO, 2014).

A norma ISO 1302 (2002) faz uma abordagem de classificação do estado da superfície em função do valor médio do parâmetro  $R_a$  (Tab. 5.6). Considerando o valor médio de  $R_a$  da superfície longitudinal e do fundo do furo cônico, pode-se concluir que o processo de furação produz furos cônicos com rugosidade classe N8.

Tabela 5.6: Número de classe de rugosidade  $R_a$  para superfície. (Fonte: ISO 1302:1992)

Desvio médio aritmético $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Classe de Rugosidade
50	N12
25	N11
12,5	N10
6,3	N9
<b>3,2</b>	<b>N8</b>
1,6	N7
0,8	N6
0,4	N5
0,2	N4
0,1	N3
0,05	N2
0,025	N1

A norma DIN 4766 classifica os valores de  $R_a$  em função dos processos de fabricação, sendo o  $R_a$  de 3,2  $\mu\text{m}$  típica de processos de fresamento (Tab. 5.7).

Tabela 5.7: Valores de  $R_a$  para processo de fabricação (DE MARCO FILHO, 1996).

$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100
Fresamento														
Torneamento														

A rugosidade superficial do furo cônico é um fator importante e determinístico para evitar possíveis travamentos do sistema de rotação no instante inicial em que as superfícies (pino e metal base) se tocam. Nesse momento as asperidades (rugosidade natural derivada do processo de usinagem) presentes nas superfícies metálicas penetram nas cavidades e depressões de outro corpo. Com o deslocamento relativo entre os corpos envolvidos, tem-se a deformação local entre as asperezas, que depende da resistência mecânica do material. Superfícies com maiores valores de  $R_a$ , resultam em maiores forças de atrito, devido à maior resistência mecânica à deformação plástica dos picos e vales, dificultando o efeito do amaciamento do material, e posteriormente o atrito seco. Esse efeito leva um maior consumo da potência do motor hidráulico, favorecendo o travamento do sistema de rotação, principalmente quando é utilizado sistemas de baixa inércia, como é o caso do cilindro de reparo portátil da UPPAX

O valor médio da rugosidade  $R_a$  adquirido com as ferramentas desenvolvidas para a UPPAX, mostraram através dos gráficos de processamento apresentados no item 5.4, um consumo inferior a 50% da capacidade de torque do cilindro de reparo, e a continuidade e estabilidade do sistema durante o processamento do pino consumível.

#### 5.4. Preenchimento das Amostras

Os substratos CP1 ao CP5 foram processados pela técnica FTPW com dois estágios, sendo o primeiro estágio com força axial de 15 kN durante 3 mm de comprimento de queima e o segundo estágio com carga de 30 kN por mais 5 mm de comprimento de queima. A rotação foi mantida em ambos os estágios no valor de 5.500 rpm. Após o processamento do pino consumível, a força de 30 kN foi mantida por 10 segundos. Os sinais de força axial, velocidade de rotação, comprimento de queima do pino e torque foram todos armazenados e plotados em função do tempo, os quais são apresentados individualmente para cada amostra ensaiada nas Figuras de 5.17 a 5.21.

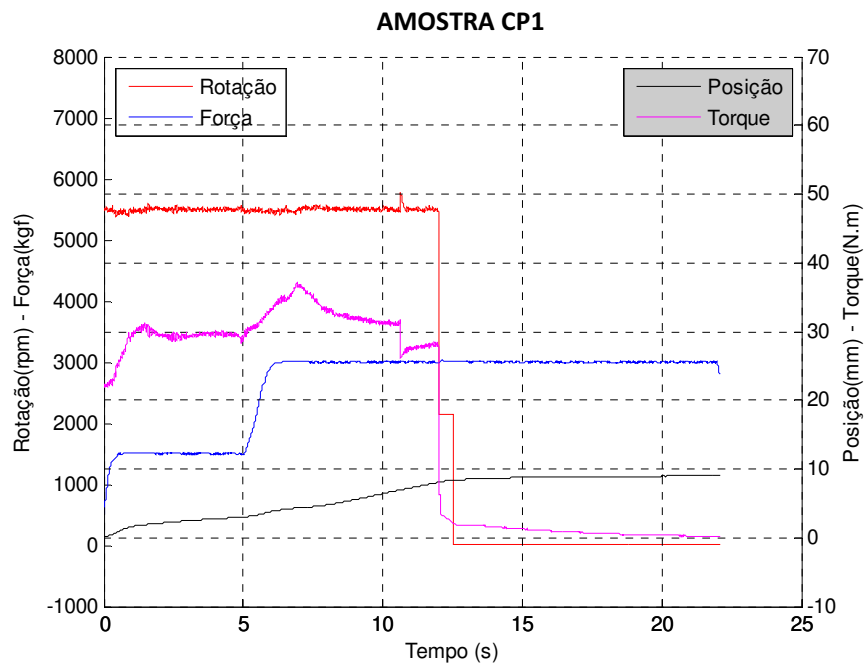


Figura 5.17: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP1 (Parâmetros de ensaio: Força: 1° Estágio: 15 kN e no 2° Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1° Estágio: 3 mm e no 2° Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN).

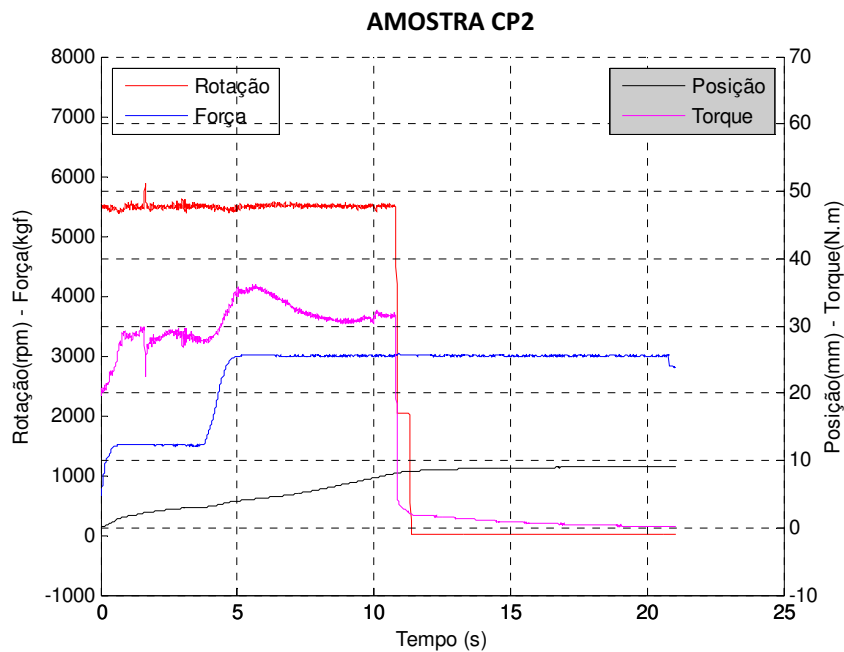


Figura 5.18: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP2 (Parâmetros de ensaio: Força: 1º Estágio: 15 kN e no 2º Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1º Estágio: 3 mm e no 2º Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN).

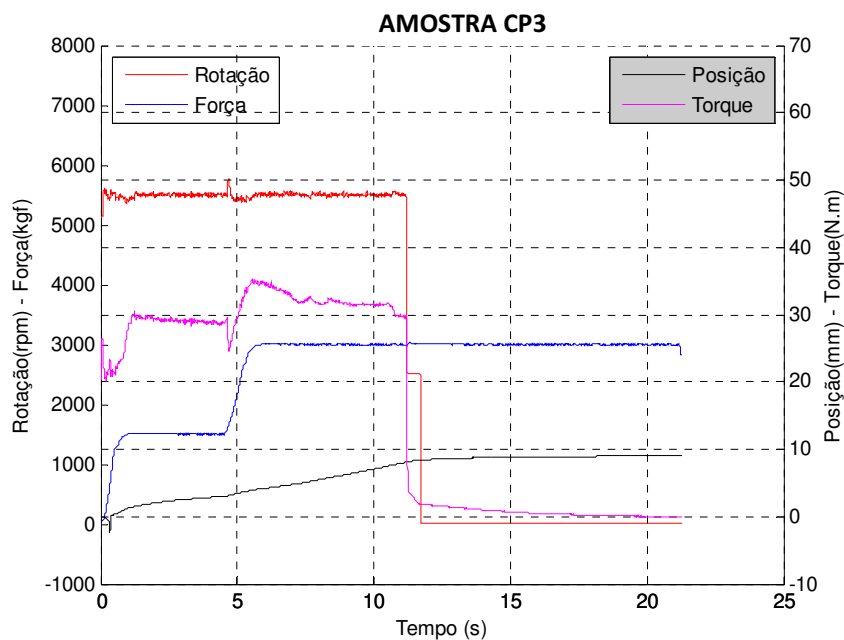


Figura 5.19: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP3 (Parâmetros de ensaio: Força: 1º Estágio: 15 kN e no 2º Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1º Estágio: 3 mm e no 2º Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN).

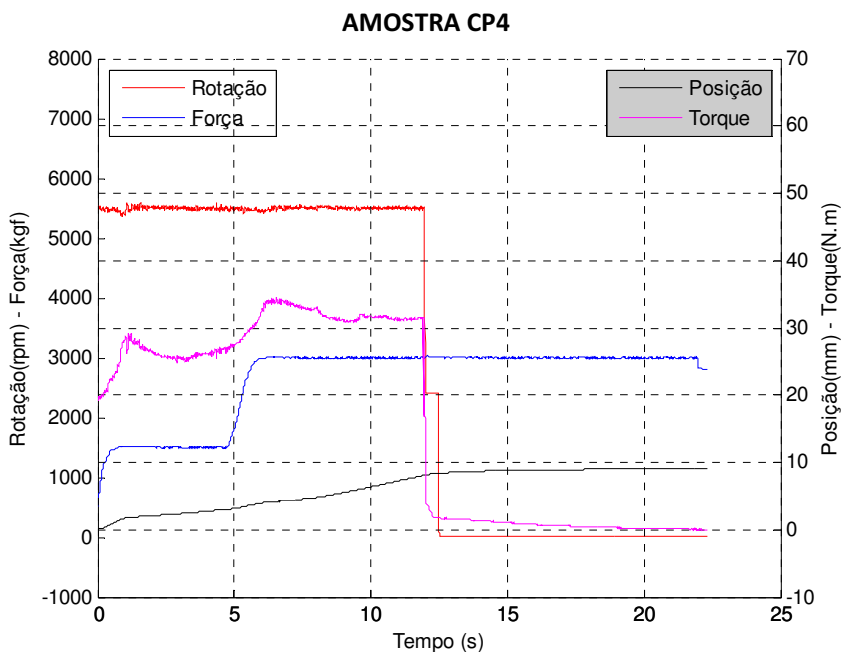


Figura 5.20: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP4 (Parâmetros de ensaio: Força: 1º Estágio: 15 kN e no 2º Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1º Estágio: 3 mm e no 2º Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN).

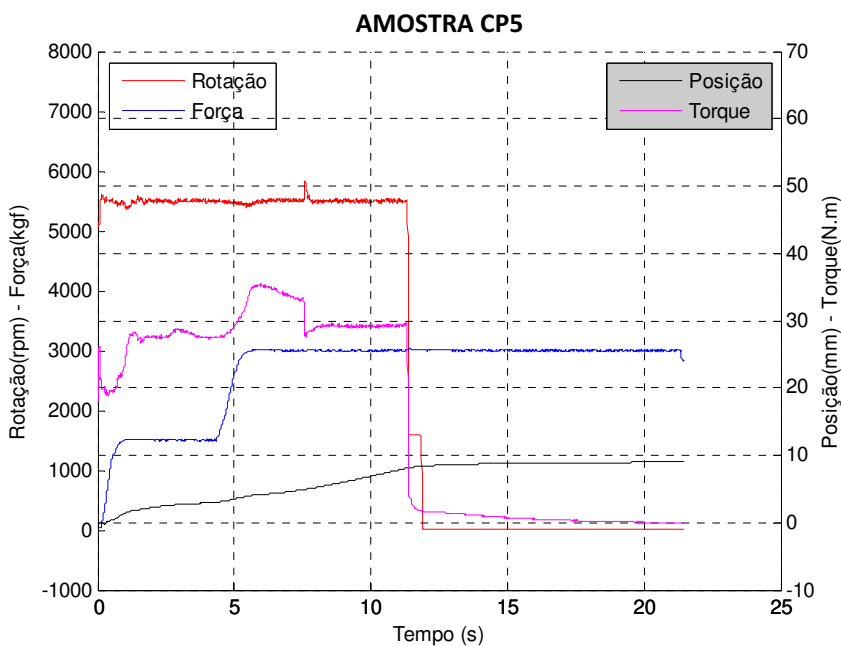


Figura 5.21: Sinais adquiridos para o processamento FTPW no substrato CP5 (Parâmetros de ensaio: Força: 1º Estágio: 15 kN e no 2º Estágio: 30 kN; comprimento de queima: 1º Estágio: 3 mm e no 2º Estágio: 5 mm; rotação de 5.500 rpm nos dois estágios; tempo de forjamento: 10 s; força de forjamento: 30 kN).

Observa-se nos gráficos dos sinais adquiridos, que o sistema de controle e monitoramento do processo de reparo por atrito da UPPAX mostrou-se eficiente na aquisição dos sinais monitorados sem a ocorrência de descontinuidades. Essa característica indica um bom comportamento funcional das válvulas proporcionais especificadas e também do sistema de controle desenvolvido.

Deste modo, para os ensaios realizados não foram identificadas nenhuma anormalidade, sendo o tempo de processamento médio do pino consumível de aproximadamente 12 segundos. O torque médio consumido durante o ensaio foi de aproximadamente 35 Nm. O controle de rotação e de força atendeu às solicitações do ensaio, mantendo-se estáveis durante todo o tempo de processamento.

A substituição do motor e da bomba do sistema de acionamento do cilindro hidráulico, possibilitou a realização dos ensaios com força axial de 30 kN, antes impraticáveis pela insuficiência de pressão disponível na unidade hidráulica. Com o sistema atual, ensaios puderam ser realizados considerando a máxima capacidade de força do cilindro de reparo de 40 kN. A Figura 5.22 mostra os resultados dos sinais obtidos durante a realização de um ensaio nos limites de força para uma rotação de 5.000 rpm.

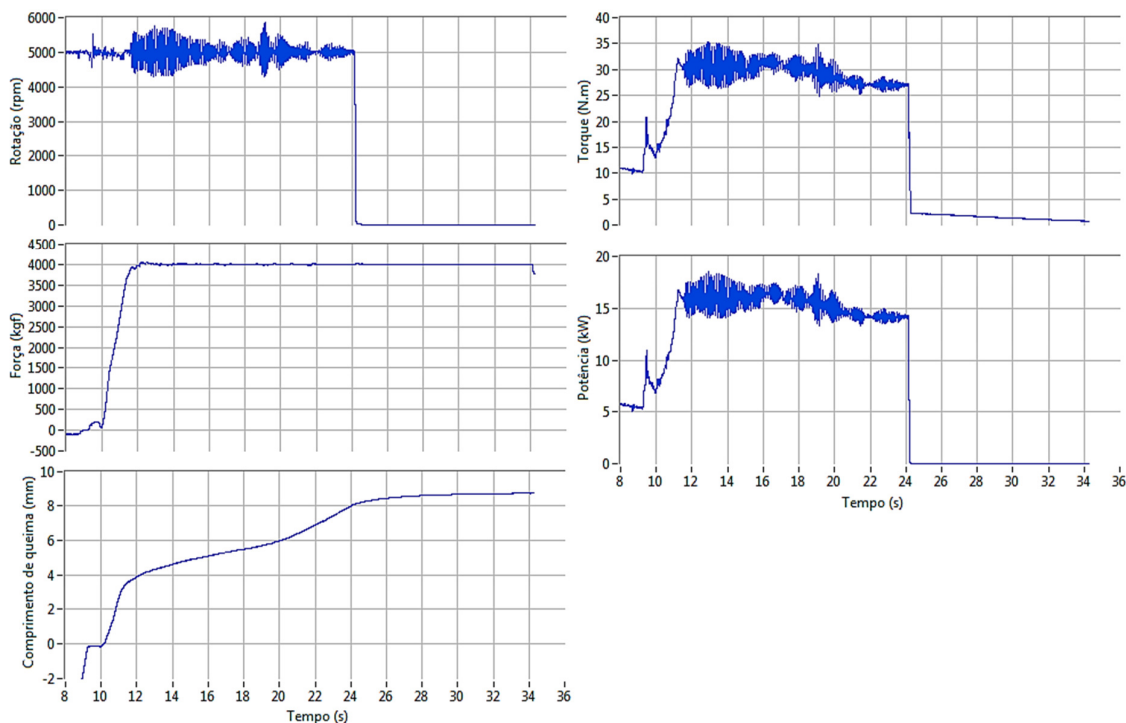


Figura 5.22: Curvas de rotação, força, comprimento de queima, torque e potência obtidas em um ensaio exploratório de reparo por atrito com rotação de 5.000 rpm, comprimento de queima de 8 mm, tempo de forjamento de 10 s e força de 40 kN.

Como pode ser observado, houve momentos de oscilação da rotação em relação ao *setpoint* de aproximadamente 800 rpm. A rotação apresentou uma variação muito maior e com mais frequência comparando-se com os sinais adquiridos durante os ensaios de preenchimento das amostras CP1 a CP5, onde a rotação oscilou de aproximadamente 400 rpm em apenas alguns instantes do processamento. Apesar disso, o ensaio pôde ser concluído sem o travamento do eixo de rotação. Os parâmetros foram mantidos dentro dos valores estabelecidos para o ensaio e sem grandes variações.

Em todos os ensaios de preenchimento foi possível observar a redução do golpe de aríete no final dos processos. Esse efeito deve-se à inserção da válvula *crossover* e das válvulas proporcionais instaladas na unidade hidráulica, as quais possibilitaram o desenvolvimento de rotinas na programação dos ensaios que permitem a pressurização e a despressurização do sistema de maneira suave, minimizando os efeitos do golpe de aríete.

### 5.5. Resultados dos Ensaios de Tração

Os corpos-de-prova para ensaio de tração foram fabricados conforme os procedimentos ilustrados na Fig. 4.16. A Figura 5.23 mostra os corpos-de-prova de tração, fabricados e atacados quimicamente com Nital a 10%.

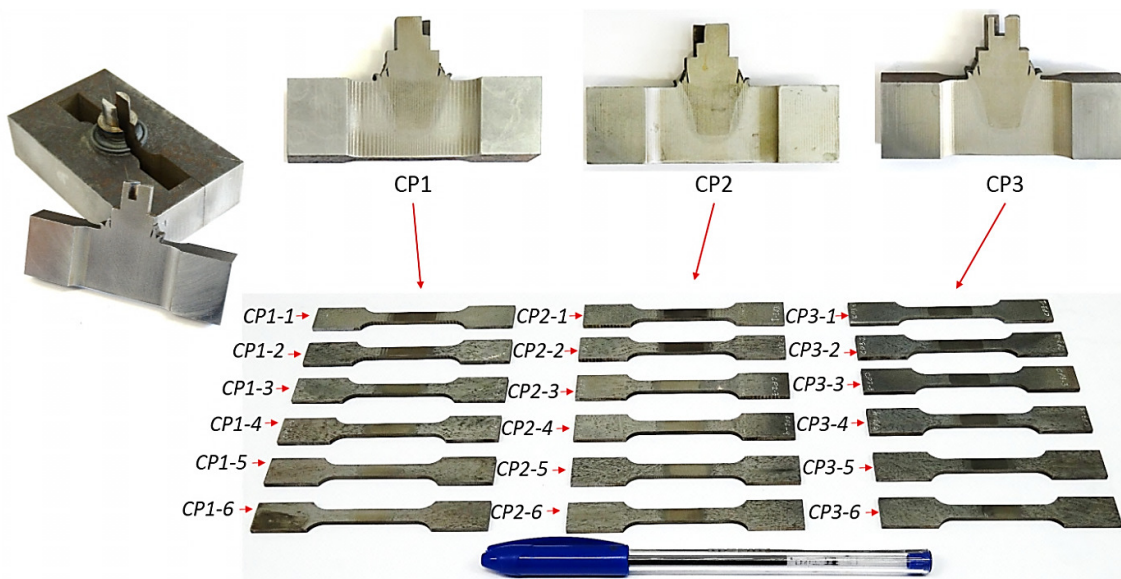


Figura 5.23: Corpos-de-prova para ensaios de tração fabricadas na máquina de eletroerosão a fio.

A Figura 5.24 mostra os locais de fratura dos corpos-de-prova do metal base ASTM A36 após a realização dos ensaios de tração. A Tabela 5.8 mostra os limites de escoamento e de ruptura, além de seus respectivos resultados de alongamento.

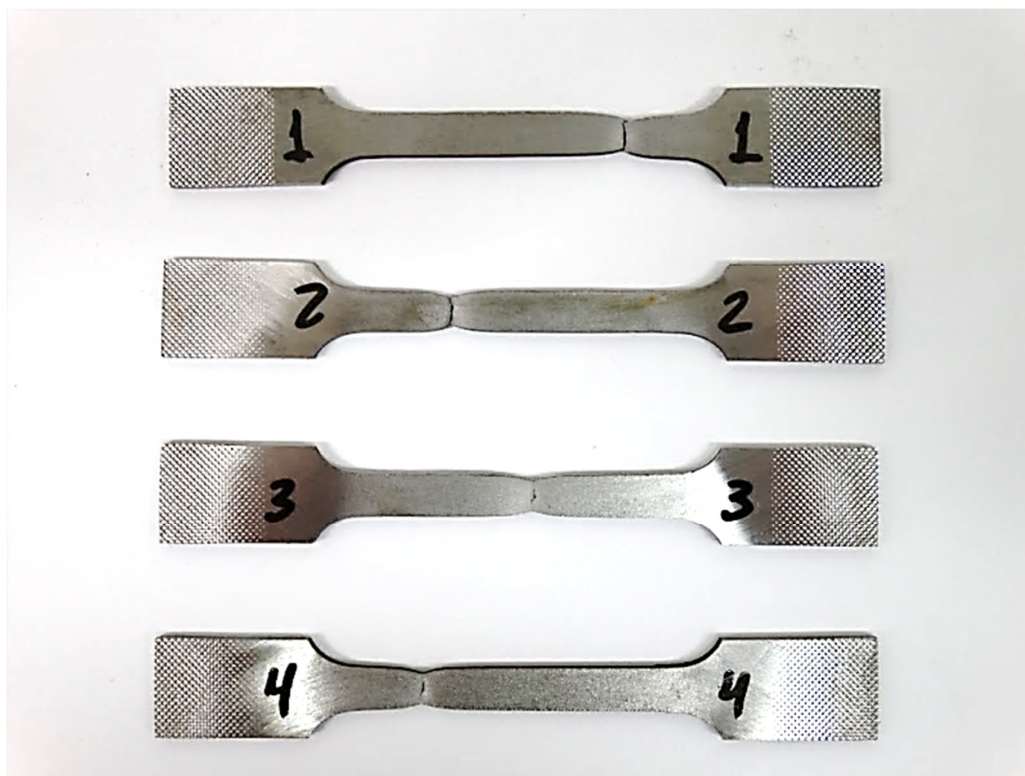


Figura 5.24: Posição de fratura dos corpos-de-prova de tração do metal base (ASTM A36).

Tabela 5.8: Resultado do ensaio de tração para o **metal base**.

CP	Dimensões da seção transversal (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	L <sub>i</sub> <sup>2</sup> (mm)	Deformação na Ruptura (%)	Deformação no Limite de Resistência a Tração (%)	σ <sub>R</sub> (MPa)	σ <sub>e</sub> (MPa)
01	6,13 x 2,01	12,32	25	38,73	26,35	428,26	275,86
02	6,04 x 1,76	10,63	25	39,86	27,52	433,90	289,81
03	6,08 x 1,84	11,19	25	37,34	25,60	434,92	282,05
04	6,14 x 1,83	11,24	25	38,68	26,64	427,20	277,44
<b>Médias</b>				<b>38,65</b>	<b>26,53</b>	<b>431,07</b>	<b>281,29</b>
<b>Desvio Padrão (95,45%)</b>				<b>2,06</b>	<b>1,58</b>	<b>7,80</b>	<b>12,52</b>
<b>AS-36/AS-36-36M (ASME 2007 Section II, Part A)</b>					<b>≅ 23 (min)</b>	<b>400<sup>1</sup> (min)</b>	<b>250</b>

<sup>1</sup>Limite de resistência de 400 a 550 MPa (ASTM A36/ A 36M-05).

<sup>2</sup>L<sub>i</sub> – Comprimento inicial.



Pode-se observar que os resultados estão próximos aos valores mínimos estipulados pela norma ASTM A 36/ A36M-05, informados na última linha da tabela.

As Figuras 5.25 a 5.27 mostram as regiões de fratura dos corpos-de-prova obtidos a partir das amostras CP1, CP2 e CP3, evidenciando as juntas processadas pelo método FTPW. Todas as fraturas ocorreram no metal base, com exceção o corpo de prova CP2-5 (Fig. 5.26), que apresentou fratura na região da interface da junta soldada.

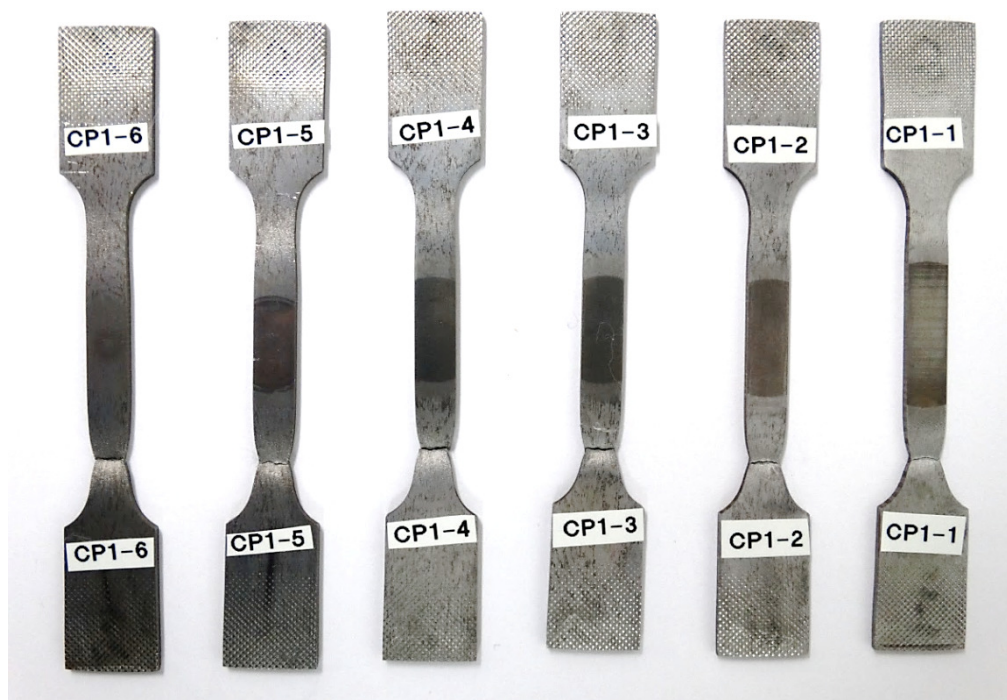


Figura 5.25: Corpos-de-prova de tração da amostra CP1 com fratura no metal base.

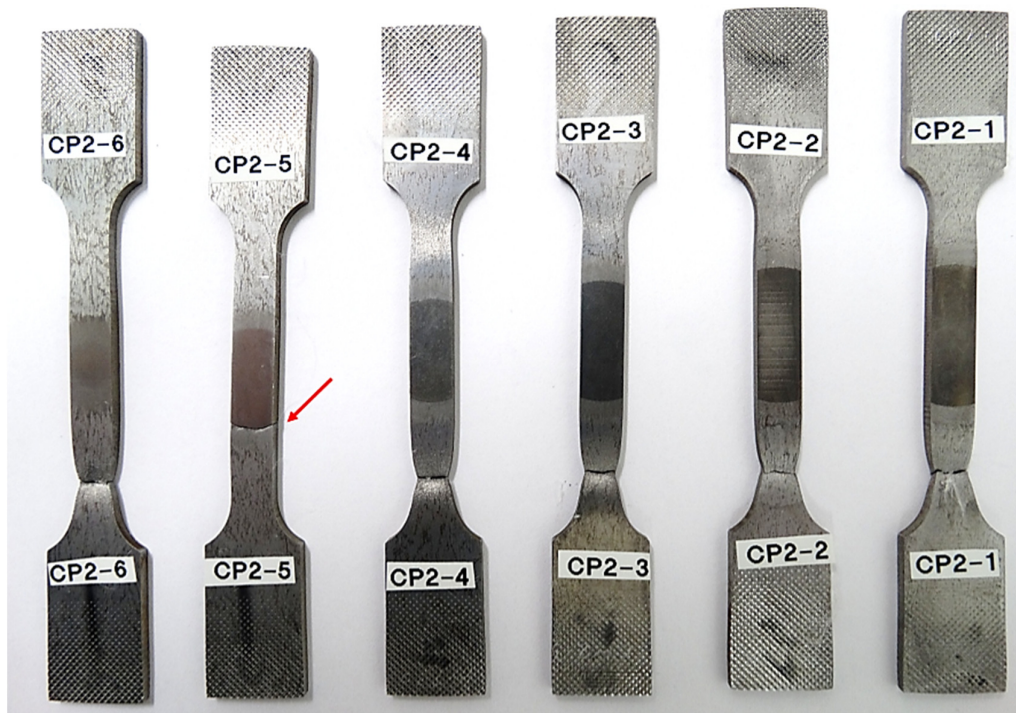


Figura 5.26: Corpos-de-prova de tração da amostra CP2 com fratura no metal base com exceção da amostra CP2-5 que apresentou fratura na região de interface Pino-bloco.

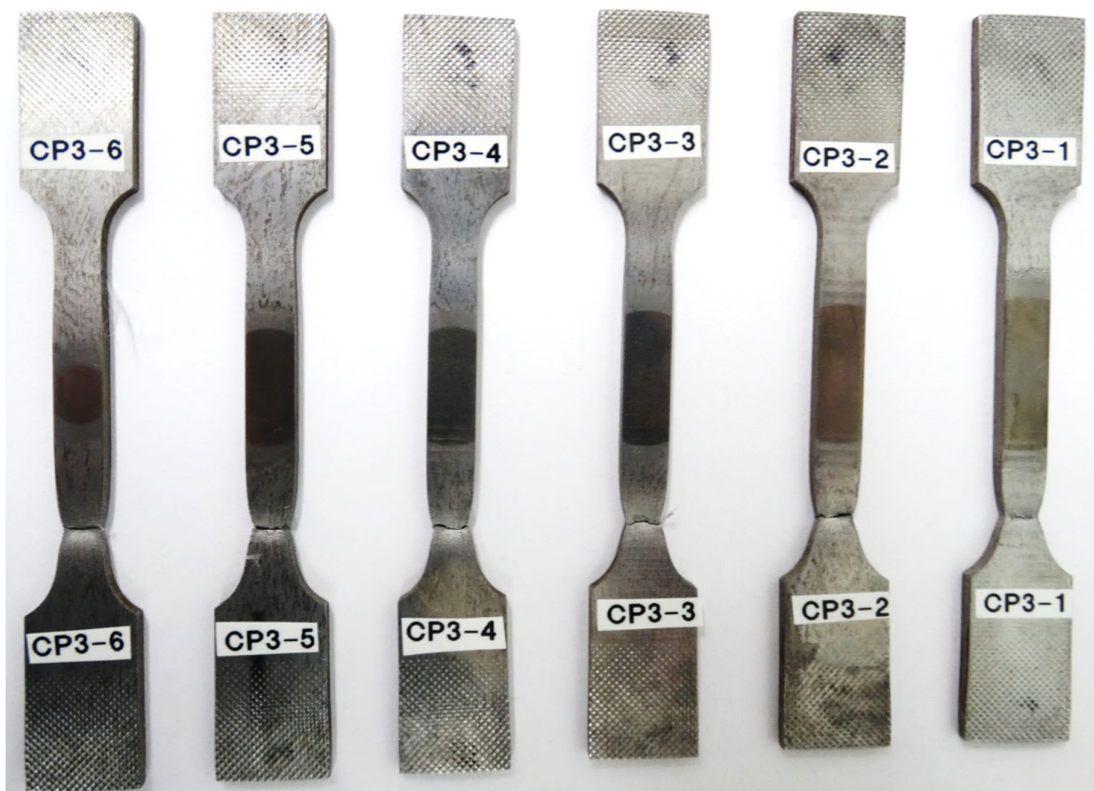


Figura 5.27: Corpos-de-prova de tração da amostra CP3 com fratura no metal base.

A Tabela 5.9 mostra os resultados obtidos durante os ensaios de tração dos corpos-de-prova processados pelo método FTPW.

Tabela 5.9: Resultado do ensaio de tração da **junta soldada** FTPW.

CP	Dimensões da seção transversal (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Deformação no Limite de Resistência a Tração (%)	Deformação na Ruptura (%)	$\sigma_R$ (MPa)	$\sigma_e$ (MPa)
CP1-1	5,60 x 1,92	10,75	<b>0,49</b>	<b>2,66</b>	466,49	412,73
CP1-2	5,60 x 1,93	10,81	6,58	13,88	469,59	399,81
CP1-3	5,61 x 1,91	10,72	6,71	13,77	464,05	370,81
CP1-4	5,62 x 1,87	10,51	7,70	14,84	455,10	344,19
CP1-5	5,66 x 1,86	10,53	9,91	17,88	456,46	334,12
CP1-6	5,69 x 1,84	10,47	10,33	18,36	439,79	304,51
CP2-1	5,63 x 1,93	10,87	5,41	13,16	461,65	401,14
CP2-2	5,63 x 1,90	10,70	6,60	13,75	471,94	393,43
CP2-3	5,63 x 1,93	10,87	7,51	15,27	465,82	369,83
CP2-4	5,68 x 1,86	10,56	8,87	16,87	459,13	346,54
CP2-5	5,68 x 1,87	10,62	4,67	4,85	433,31	326,28
CP2-6	5,70 x 1,82	10,34	11,37	20,16	442,09	302,45
CP3-1	5,63 x 1,92	10,81	4,34	10,49	469,15	419,29
CP3-2	5,63 x 1,92	10,81	5,81	12,71	473,63	403,77
CP3-3	5,64 x 1,93	10,89	6,84	14,35	464,05	381,21
CP3-4	5,63 x 1,88	10,58	7,81	15,46	456,56	353,09
CP3-5	5,69 x 1,88	10,70	7,98	16,01	445,97	375,30
CP3-6	5,68 x 1,87	10,62	9,45	18,18	446,48	312,79

<sup>1</sup>Comprimento inicial (Li) para todos os corpos de prova: 25 mm

Pode-se notar que os valores do limite de resistência e de escoamento de todos os corpos-de-prova estão acima dos valores encontrados para o metal base.

Os valores dos alongamentos do CP1-1 informados na Tab. 5.9 aparecem em vermelho devido a um erro do procedimento de retirada do extensômetro, o qual foi programado para ser removido após 1% de deformação. A fixação do sensor foi realizada na região do reparo, como houve grandes deformações fora da região de medição do sensor, uma nova programação teve que ser atribuída. Para os demais ensaios foi considerada a remoção do extensômetro com 0,5% de deformação. Nos demais ensaios essa modificação foi suficiente para aquisição dos resultados.

Dos resultados do limite de escoamento apresentados na Tab. 5.9 nota-se que a junta soldada é mais resistente mecanicamente mesmo rompendo-se fora da região do preenchimento, caracterizando o efeito de *overmatching*. Este aumento da resistência mecânica nas proximidades da junta soldada é acompanhado por uma redução considerável de deformação em relação ao metal original.

Trabalhos realizados por Paes (2013) em corpos-de-prova de tração miniatura (*microflat*), removidos a partir de juntas soldadas pelo processo FTPW, demonstraram a partir da medição de perfis de microdureza, que houve claramente um endurecimento adicional da junta soldada em relação ao metal base. Tal efeito deve-se ao resfriamento rápido da junta soldada FTPW, resultando em regiões de maior resistência mecânica em relação ao metal base.

Com base nos resultados apresentados por Paes (2013), verificou-se que dentro da região do pino processado bem como da ZTA, as propriedades mecânicas avaliadas em termos de dureza, limite de escoamento e limite de resistência são aumentadas e uma queda do alongamento é observado. O autor aponta que a região de interface (Pino/Metal Base) é caracterizada pela presença de ilhas de ferrita e martensita, devido ao resultado das altas taxas de resfriamento após o processamento, sendo a região mais central da junta soldada composta por ferrita acicular. Essas variações microestruturais na junta soldada são características de um curto ciclo térmico, representado por altas taxas de extração de calor.

Os resultados observados na Tab. 5.9 estão condizentes aos resultados obtidos por Paes (2013), no que diz respeito ao aumento do limite de escoamento, limite de resistência e redução da deformação plástica.

Mesmo para o corpo-de-prova onde houve ruptura na região de interface (CP2-5), o limite de resistência e escoamento são superiores aos do metal base. Esse ensaio foi o que apresentou o menor valor de deformação (4,85%), ou seja, apenas 1,21 mm de alongamento. A Figura 5.28 mostra o local da fratura do corpo-de-prova de tração longitudinal CP2-5.

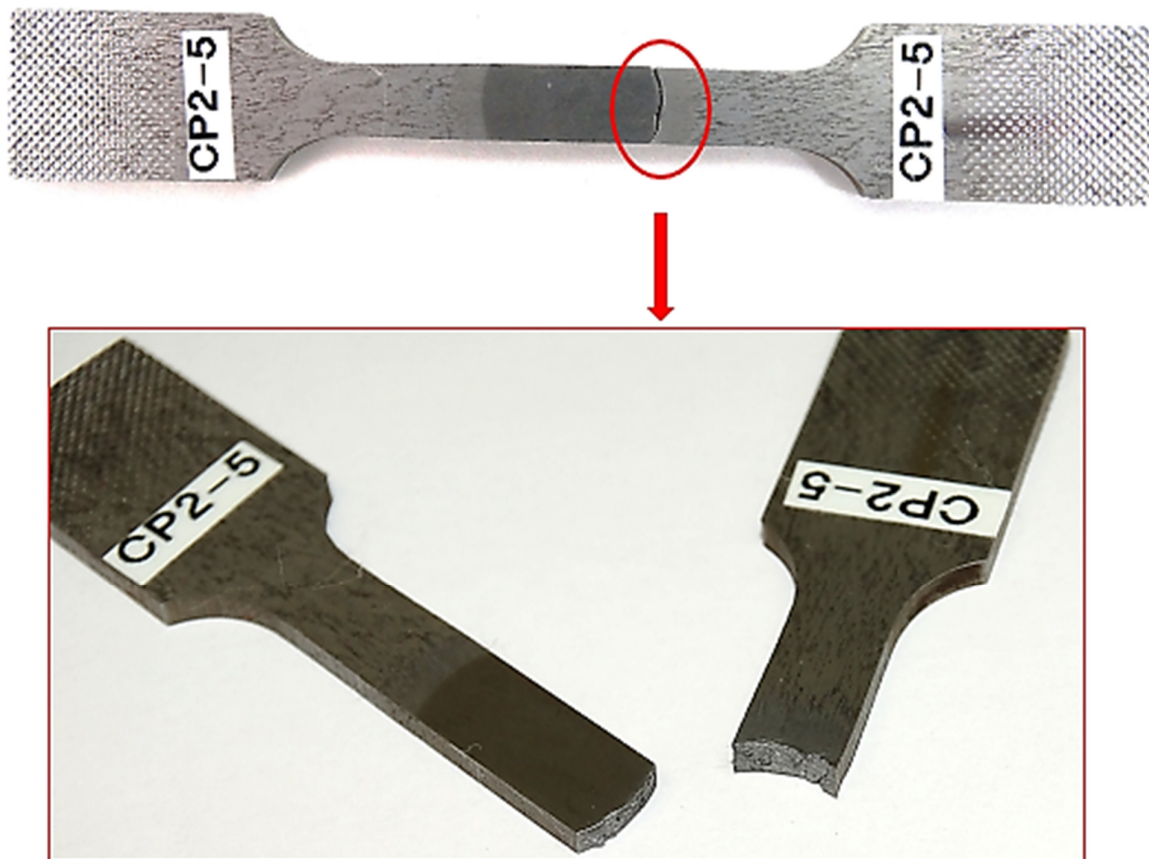


Figura 5.28: Detalhes da região de fratura do corpo-de-prova de tração longitudinal CP2-5.

Para uma melhor compreensão e caracterização da fratura do corpo-de-prova CP2-5, o fragmento de menor dimensão foi analisado utilizando um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução (MEV/FEG – *Field Emission Gun*). A Figura 5.29 mostra uma vista geral de uma das superfícies do corpo-de-prova CP2-5.

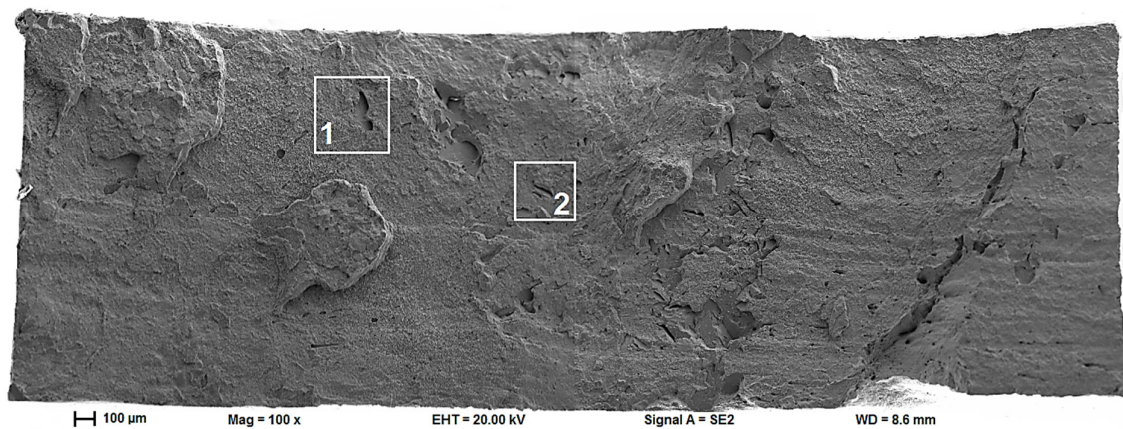


Figura 5.29: Fractografia do corpo-de-prova CP2-5; em destaque as regiões analisadas 1 e 2, analisadas com maiores aumentos.

Na Figura 5.30 é apresentada a região 1 da Fig. 5.29, em detalhes. Pode-se observar que o corpo-de-prova rompeu nos modos dúctil e frágil.

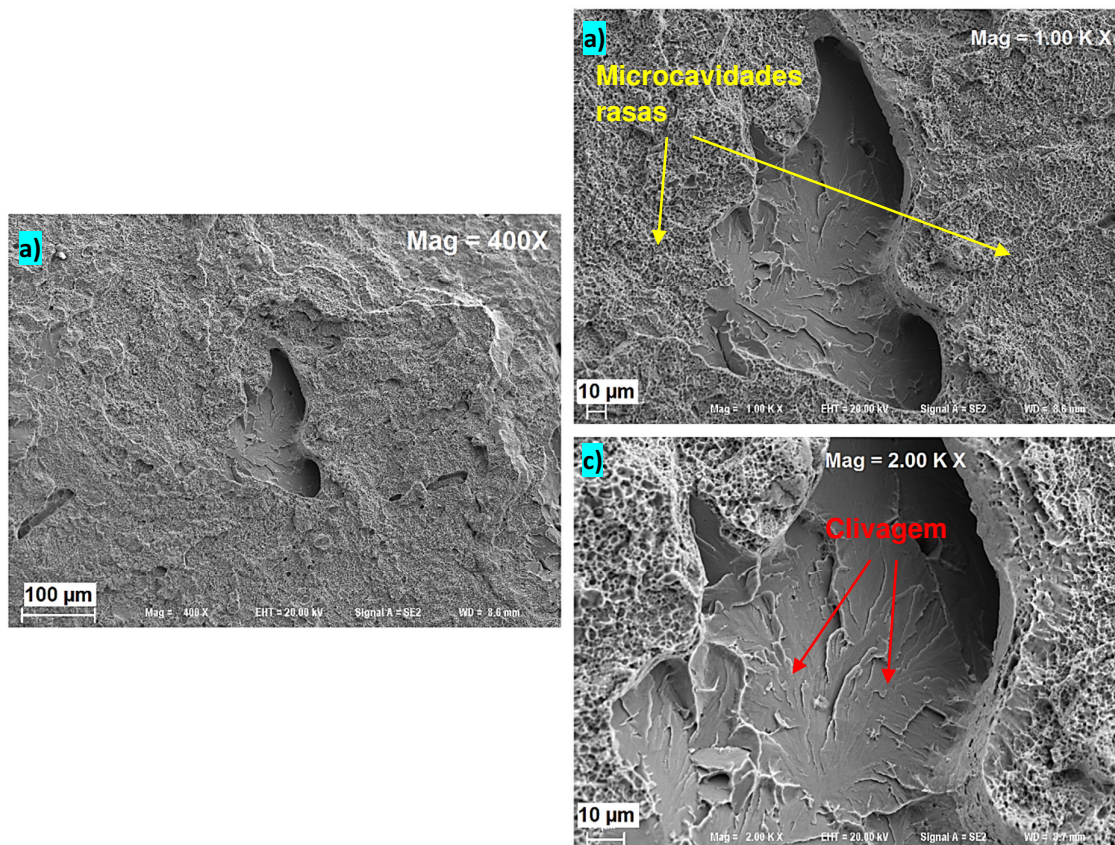


Figura 5.30: Fractografia da região 1 do corpo de prova CP2-5, mostrando os mecanismos de fratura dúctil (microcavidades rasas) e frágil (clivagem). a) Ampliação de 400 vezes da região 1 (Fig. 5.29); b) ampliação de a) mostrando as regiões com microcavidades; c) ampliação de b) mostrando as regiões com clivagem.

A fratura dúctil é identificada nas regiões onde houve deformação plástica do material, caracterizada por ser uma região onde a propagação da trinca (descontinuidade) ocorre de forma mais lenta, com a nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades. O colapso plástico se desenvolve na região perimetral das microcavidades, levando à ruptura gradual e contínua do material (CALLISTER, 2002). Na Figura 5.30 observa-se a formação de microcavidades rasas que se estenderam de encontro com regiões onde houve fratura frágil.

A fratura frágil é identificada pela formação de superfícies relativamente planas. A fratura frágil ocorre devido à quebra sucessiva das ligações atômicas ao longo de um plano cristalográfico característico, denominado plano de clivagem. Esse tipo de fratura ocorre em

metais de alta resistência mecânica, por apresentarem uma microestrutura que impede a movimentação de discordâncias (CALLISTER, 2002). Observa-se na Fig. 5.30 a formação de relevos característicos de fratura frágil.

A Figura 5.31 mostra outro detalhe da região 1, obtida com ampliação de 2.000 vezes da Fig. 5.30. Nessa imagem é observada a região de transição da fratura por microcavidades para a clivagem. Análises EDS mostraram a presença de inclusões de MnS com diversos formatos. A presença dessas inclusões são fatores que podem levar à redução da tenacidade à fratura e da resistência mecânica do material (PAES, 2013).

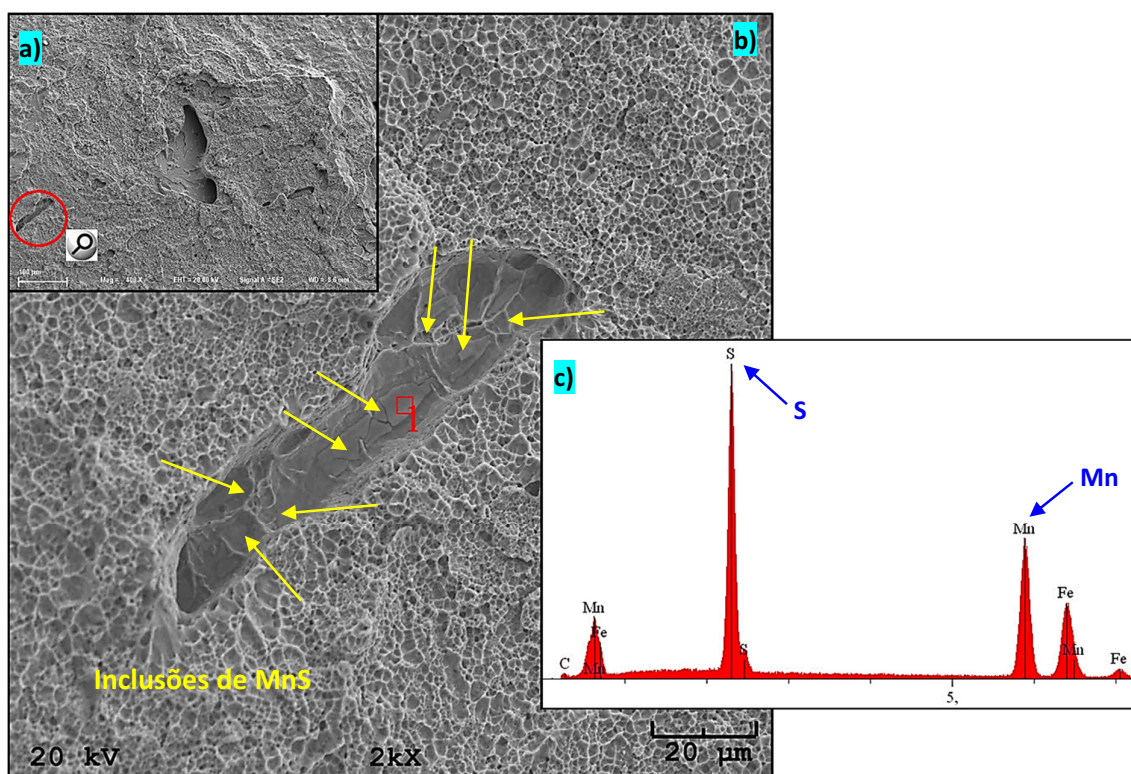


Figura 5.31: Fractografia mostrando detalhe da Região 1 da Fig. 5.29, com inclusões de MnS em diversos formatos. a) Vista geral; b) detalhes indicando a região “1” analisada por EDS; c) espectro de EDS mostrando a presença de MnS na região analisada.

Segundo Paes (2013), o fluxo de inclusões se dá durante o processo de soldagem. Durante o processamento do pino consumível é possível ocorrer o tritamento termomecânico das inclusões de MnS dentro da massa viscoplástica do material processado, resultando na formação de inclusões de pequenas e grandes dimensões com formatos esféricos ou alongados.

As inclusões de sulfeto de manganês observadas contribuem com a redução da tenacidade do material, tendo forte relevância na qualidade final da solda, tanto na microestrutura quanto nas propriedades mecânicas, uma vez que o filme de MnS não oferece nenhuma resistência para a separação de superfícies durante a propagação de uma trinca. Além disso, outro fator contribuinte foi a presença de fraturas frágeis ao logo da região de interface. Dessa forma, a presença de planos de clivagem e inclusões de MnS justifica a fratura desencadeada na região de interface pino/bloco do corpo de prova CP2-5

Na Figura 5.32 é apresentada a fractografia da Região 2 (Fig. 5.29). Nessa região é observada uma grande região contendo microcavidades onde houve fratura dúctil e as regiões contendo as superfícies de fratura por clivagem. Foi realizada uma análise por EDS na região da faceta de clivagem, onde foi registrado um baixo teor de Enxofre e Manganês. Possivelmente, o enxofre e o manganês possam ser encontrados em quantidades substanciais dissolvidos no metal, e não em forma de inclusões como observado na Fig. 5.31.

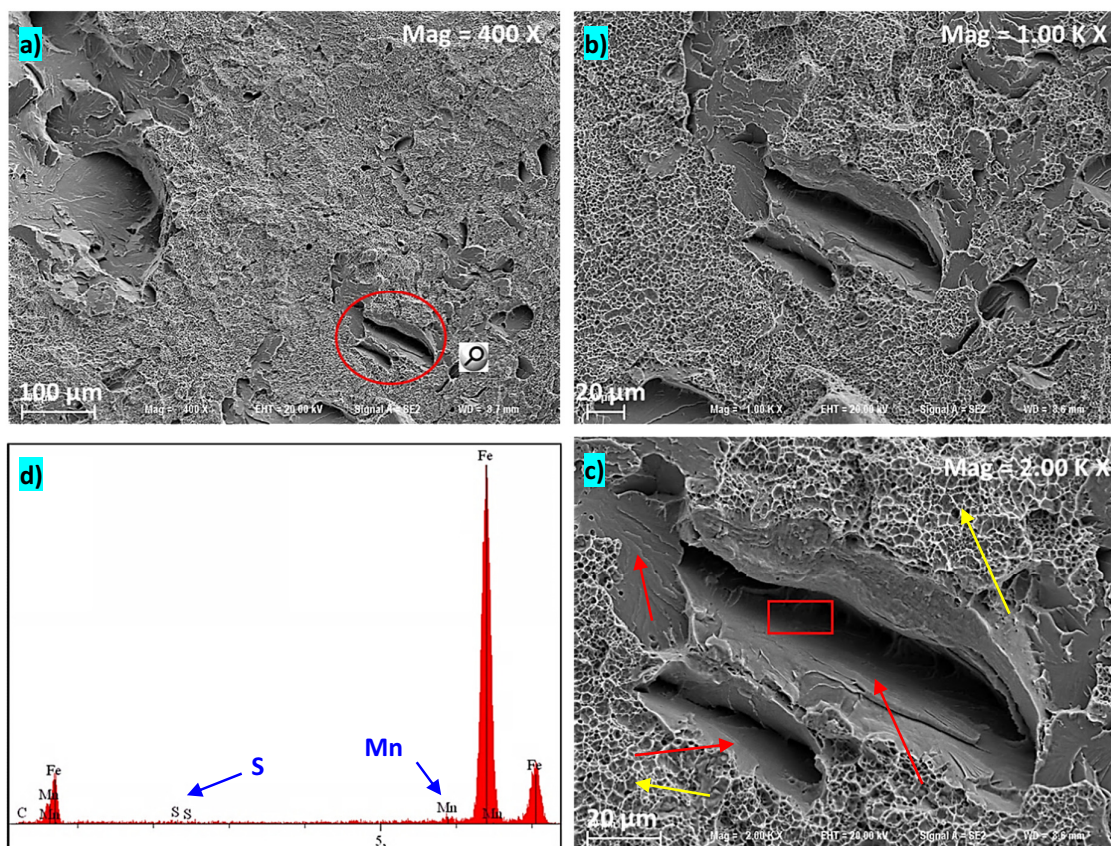


Figura 5.32: Fractografia da região 2 do corpo-de-prova CP2-5 (Fig. 5.29). a) Vista geral; b) ampliação de a); c) região com microcavidades rasas (setas em amarelo) e a clivagem (setas em vermelho); d) espectro de EDS mostrando baixos níveis de Enxofre e Manganês.



## 5.6. Resultados da Análise Macro e Micrográfica da Junta Soldada

Através da macrografia obtida a partir da amostra CP5 (Fig. 5.33), pode-se concluir que aparentemente houve uma solda sem defeitos de preenchimento. Além disso, observa-se o desenvolvimento de uma ZTA (Zona Termicamente Afetada) ao longo da linha interfacial no material do substrato.

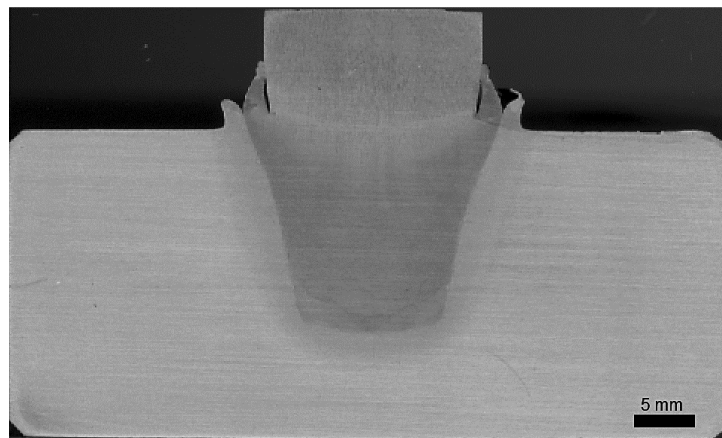


Figura 5.34: Imagem da macrografia da amostra CP5.

A Figura 5.35 mostra as regiões onde foram obtidas as micrografias, afim de uma verificação mais detalhada do reparo, possibilitando a identificação de possíveis discontinuidades. Destaca-se aqui a posição de número 4 como sendo a mais crítica, uma vez que nesta região tem-se um baixo aporte térmico em consequência da baixa velocidade tangencial. Essa característica peculiar repercute tanto na qualidade da junta soldada, quanto na microestrutura (PIRES, 2007).

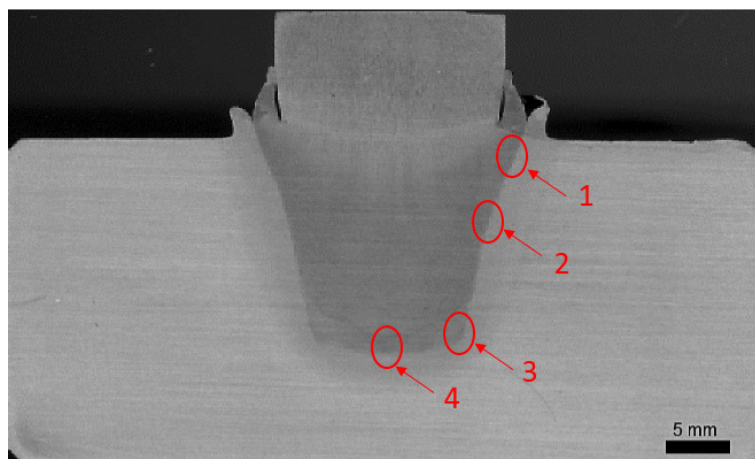


Figura 5.35: Regiões de análise micrográfica.

As Figuras 5.36 e 5.37 mostram as regiões 1, 2, 3 e 4 em maiores ampliações. As manchas escuras evidenciadas nas fotomicrografias foram causadas pelo ataque químico realizado com Nital a 2% durante a preparação metalográfica da amostra. Através dessas imagens é possível observar nas regiões de interface uma união coesa, livre de defeitos ou falhas de preenchimento.

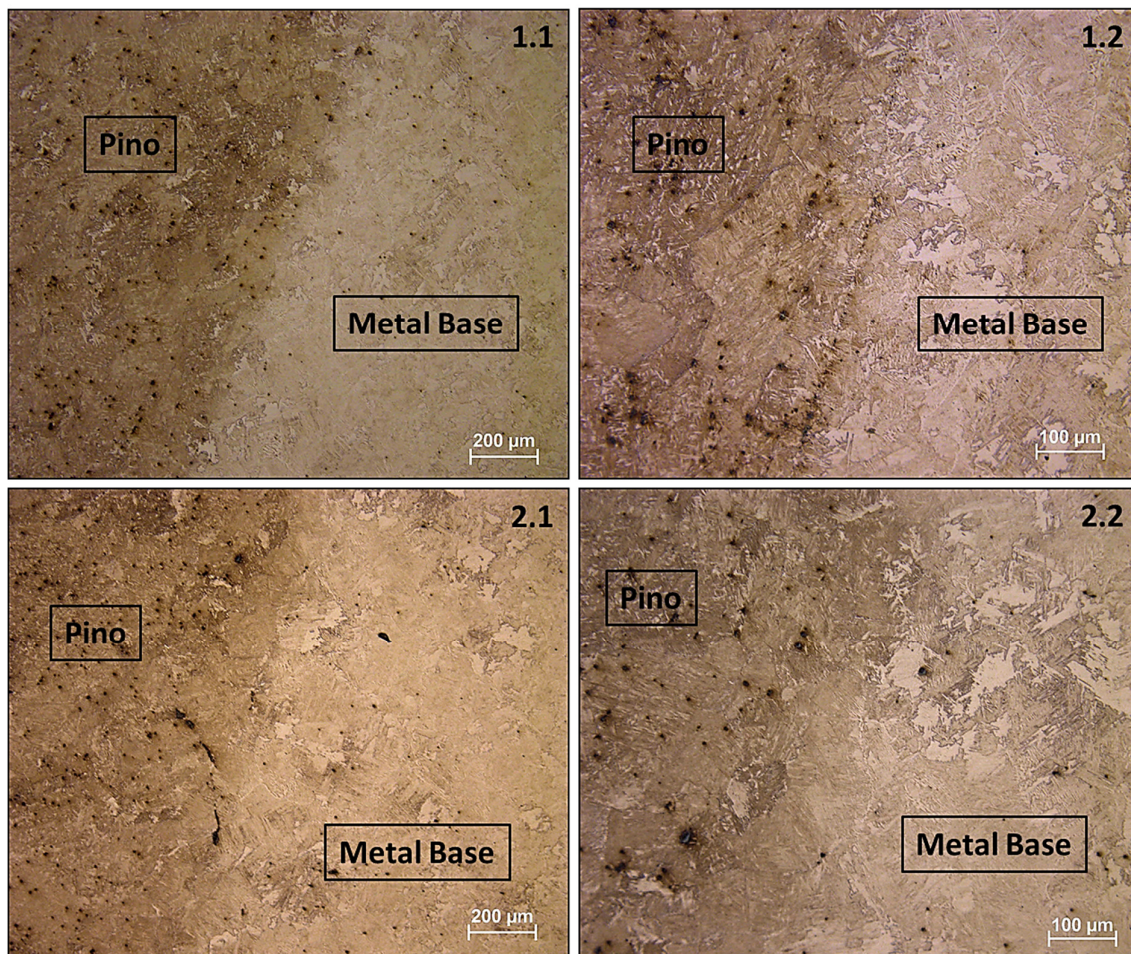


Figura 5.36: Micrografias do reparo executado no substrato CP5: (1.1) interface superior lateral direita, (1.2) imagem anterior ampliada; (2.1) interface intermediária lateral direita; (2.2) imagem anterior ampliada.

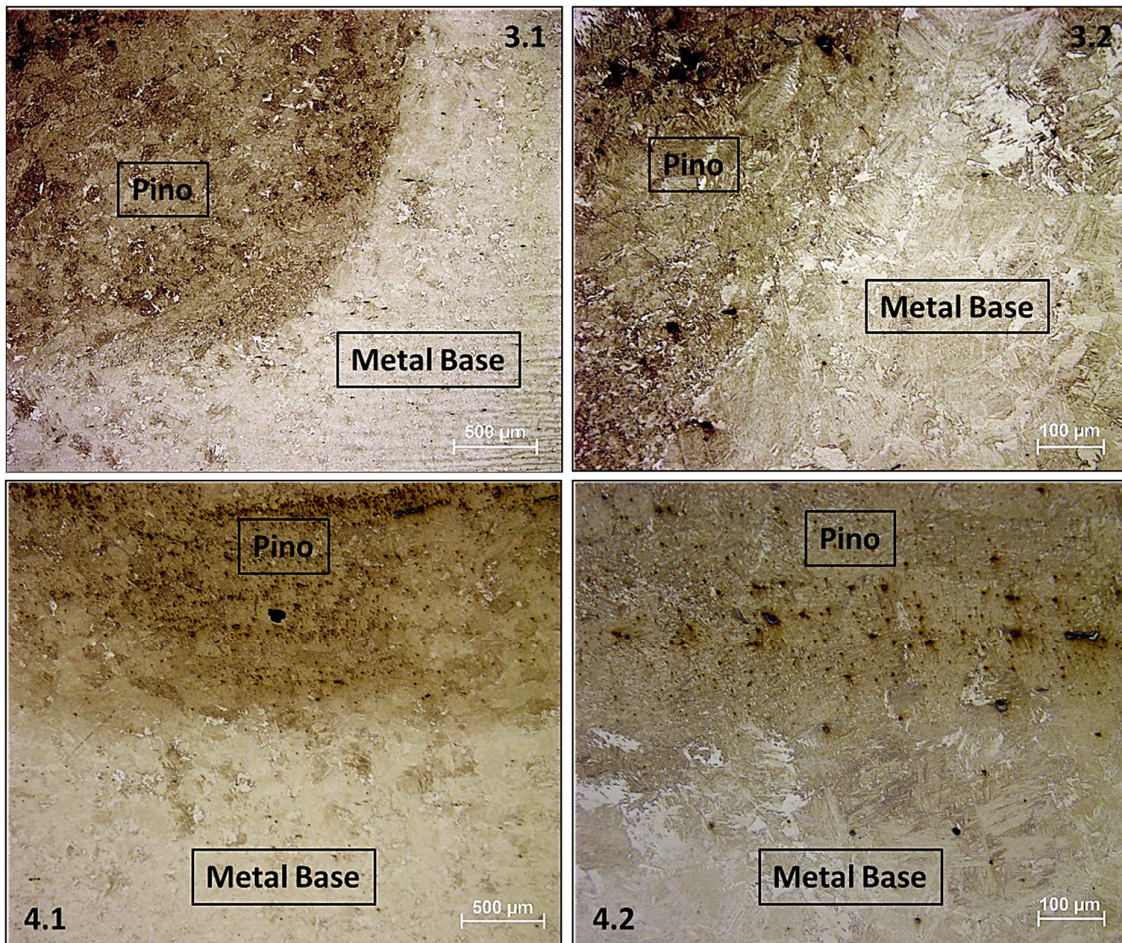


Figura 5.37: Micrografias do reparo executado no substrato CP5: (3.1) interface inferior lateral direita, (3.2) imagem anterior ampliada; (4.1) interface inferior central; (4.2) imagem anterior ampliada.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÃO

Neste trabalho foram, concebidos, projetados e construídos mandris e ferramentas especiais para a realização das etapas do processo de reparo por atrito pelo método FTPW. Adicionalmente, uma unidade hidráulica especial foi completamente reestruturada e operacionalizada, permitindo, assim, a realização de todas as etapas do processamento por atrito, quais sejam: furação, preenchimento e fresamento.

A validação desses desenvolvimentos foi realizada mediante: a) avaliação da qualidade do furo usinado; b) realização de preenchimentos; c) análise macro e micrográfica dos preenchimentos e d) avaliação de propriedades mecânicas de tração do preenchimento. Através dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) O projeto de reestruturação da unidade hidráulica reduziu significativamente o efeito dos golpes de ariete no sistema, proporcionando maior segurança ao operador e a integridade física dos componentes mecânicos do equipamento;
- b) O sistema de controle e monitoramento da UPPAX para a realização das etapas de furação e preenchimento mostrou-se eficiente na aquisição dos sinais monitorados, mesmo para pequenas variações ocorridas em curtos intervalos de tempo. Os gráficos apresentaram baixo nível de ruído e boa similaridade entre os resultados;
- c) Houve um significativo ganho de mobilidade após a montagem de todos os componentes da unidade hidráulica sobre uma mesma estrutura;

- d) As válvulas proporcionais juntamente com o sistema de controle desenvolvido, resultaram um bom desempenho, permitindo o controle de avanço do cilindro hidráulico para velocidades a partir de 0,1 mm/s e velocidade de rotação entre 600 e 5.500 rpm;
- e) O novo conjunto motobomba do sistema de força ampliou a capacidade de aplicação de força do cilindro de reparo da UPPAX para até 40 kN quando submetido a pressão de 200 bar;
- f) A substituição da válvula limitadora de pressão manual por uma reguladora de pressão proporcional, tornou o controle de força independente, viabilizando o controle de pressão de alimentação do sistema em níveis de segurança para a realização das operações de usinagem, garantindo a integridade das ferramentas;
- g) As ferramentas desenvolvidas para a usinagem do furo cônico mostraram-se eficientes para reparos de trincas com profundidade máximas de até 16 mm utilizando a técnica FTPW;
- h) A rosca MSSC<sup>®</sup> utilizada para a fixação das ferramentas e dos mandris da UPPAX reduziu significativamente o torque de aperto, facilitando ao operador a substituição dos componentes utilizados no processo FTPW;
- i) Para ensaios FTPW de único estágio foi definido que a força deve ser menor ou igual a 15 kN para garantir que não haja travamento do sistema de rotação. Para ensaios com forças maiores do que 15 kN, o ensaio deve ser realizado com 2 estágios, sendo a força para o primeiro estágio de 15 kN e comprimento de queima de no mínimo 3 mm e o segundo estágio a força pode chegar a capacidade máxima do equipamento de 40 kN;
- j) Testes mostraram que os parâmetros de avanço fornecidos pelo fabricante para operação da fresa cônica causam instabilidade do sistema de rotação e, conseqüentemente, o travamento do eixo do cilindro de reparo. Para as operações de fresamento a velocidade de avanço de 0,1 mm/s mostrou-se apropriada;

- k) As medições geométricas de profundidade do furo, do ângulo de cone e do desvio de circularidade realizadas nas amostras CP1 a CP5, e a medição do raio de concordância na amostra CP6, indicaram que o processo de furação realizado com as ferramentas desenvolvidas (broca cônica escalonada e fresa cônica), se enquadram dentro dos intervalos de padrões de qualidade IT8 a IT11, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 6158;
- l) Os resultados de medição da rugosidade dos furos indicaram que o processo de furação, produz furos cônicos com rugosidade classe N8, conforme estabelecido pela norma ISO 1302 (2002);
- m) Mesmo para um erro de circularidade de aproximadamente 64  $\mu\text{m}$  presente na região próximo à borda do furo da amostra CP5, as análises macro e micrográficas mostram um reparo livre de defeitos ou falhas de preenchimento;
- n) O completo preenchimento sem defeitos ou vazios observados em todos os ensaios realizados confirmam que o acabamento obtido no processo de furação é adequado para preparação do substrato para o reparo;
- o) Dos corpos-de-prova contendo a junta soldada ensaiados à tração longitudinal, apenas um apresentou fratura na região de interface. Na região da fratura foram identificadas inclusões de sulfeto de Manganês e áreas de clivagem, que reduzem a tenacidade à fratura do material. Os demais corpos-de-prova apresentaram fratura na região do metal base.
- p) A modificação do mecanismo de fixação dos componentes e acessórios, bem como o projeto, desenvolvimento e adaptação dos mandris e ferramentas de usinagem e também o projeto de reestruturação e modernização da unidade hidráulica, mostraram que a UPPAX, de modo geral, é adequado para realização de reparo de estruturas metálicas e de outros componentes mecânicos com trincas não passantes.

## CAPÍTULO VII

### TRABALHOS FUTUROS

Abaixo são listados alguns trabalhos futuros de grande importância, a fim de contribuir para a evolução no desenvolvimento de tecnologias para o reparo de estruturas no campo:

- a) Deve ser implementado no programa de furação da UPPAX, a rotina de iniciar a operação com a fresa cônica a uma distância segura do fundo do furo pré-usinado pela broca cônica. Atualmente o programa inicia as duas operações de usinagem partindo do mesmo ponto de referência, impactando diretamente no tempo de usinagem além do desperdício de energia;
- b) Avaliar a utilização de revestimentos convencionais como de nitreto de titânio (TiN), utilizados para reduzir a adesão e aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta;
- c) Estimar o tempo de vida útil das ferramentas de usinagem do furo cônico e desenvolver métodos de afiação destas ferramentas;
- d) Avaliar o desempenho dos processos de furação e fresamento em mecanismos manipuladores robotizados que serão utilizados na implementação da técnica em campo;
- e) Avaliação da etapa de usinagem do material do pino não processado e do material remanescente do processo de soldagem por atrito (*flash*) com a adaptação de uma fresa de canais com pastilhas de metal duro. Essa ferramenta permite uma usinagem mais rápida e de baixo esforço de corte;

- f) Avaliar a substituição das mangueiras hidráulicas de acionamento do cilindro da UPPAX por outras de menor diâmetro. Essa substituição pode minimizar o efeito de dilatação das mangueiras hidráulicas no tempo de resposta do controlador, e também reduzir o peso facilitando o manuseio e montagem do cilindro de reparo sobre as estruturas de fixação;
- g) Avaliar a capacidade das ferramentas em usinar uma região já processada. Essa etapa pode ser necessária na ocorrência de algum preenchimento incompleto ou com defeitos. Nesse caso, o material encontra-se com maior resistência e em alguns casos com grande quantidade de óxidos provenientes do processamento;
- h) Alguns problemas mecânicos como desgaste de superfícies deslizantes, marcas de deformação plástica por choque de manuseio foram observados durante os testes. Através da Figura 7.1 é possível observar a presença de linhas paralelas indicando a ocorrência do desgaste severo na região próxima ao motor. Sugere-se um projeto do cilindro de reparo, com a modificação do material para um aço inoxidável, tornando-o mais robusto para utilização em campo.

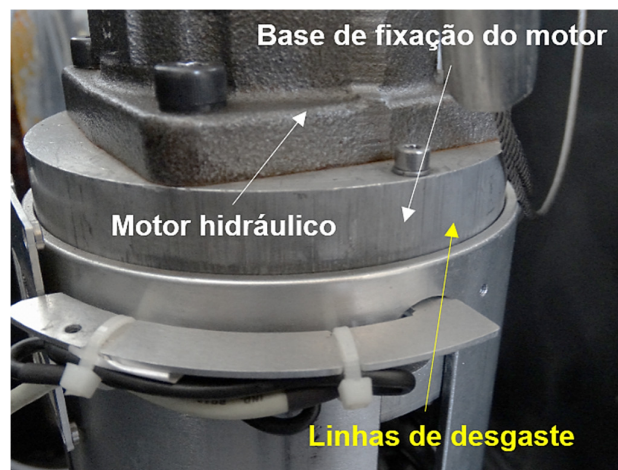


Figura 7.1: Desgaste por deslizamento causado na superfície externa da base de fixação do motor hidráulico.

- i) Projeto e desenvolvimento de um sistema de fixação do cilindro de reparo com dois graus de liberdade (Rotacional e Longitudinal) para reparo de dutos;
- j) Exploração da técnica FPPW utilizando a UPPAX e o novo mandril apresentado neste trabalho. Essa atividade poderá ser realizado utilizando a plataforma robotizada;



- k) Desenvolver um magazine para a disposição de todas as ferramentas e mandris para a troca automática desses componentes;
- l) Desenvolver ferramentas para reparos com maiores profundidades ampliando a capacidade do processo para reparo de trincas mais profundas.
- m) Realização de reparo por atrito em ambientes submersos e áreas classificadas utilizando a UPPAX

## CAPÍTULO VIII

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6158: **Sistema de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro: Copyright, 1995. 79 p.

ABNT-NBR 4288; **“Especificação Geométrica do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Regras e Procedimentos para a Avaliação de Rugosidade.”**, Rio de Janeiro - RJ: Copyright®, 2008 15p.

ABNT-NBR 6409; **“Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho.”** Rio de Janeiro - RJ: Copyright®, 1997. 19 p.

ALMEIDA, D. O.; MACHADO, Á. R. **Investigação de desvios geométricos no alargamento do ferro fundido cinzento**. Artigo. 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, Minas Gerais 2006.

AMÂNCIO, S., **Friction Riveting: Development and Analysis of a New Joining Technique for Polymer-Metal Multi-Materials Structures**, Tese de Doutorado, Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2007.

ANDREWS, R.; BEAMISH, K., **Characterization and Guidelines for Rotary Friction Welding of Common Metallic Engineering Materials**, PR-15053.03/2004/1214.3, TWI, Cambridge, April, 2005.

ANDREWS, R.E.; MITCHELL, J.S., **Underwater Repair by Friction Stitch Welding, Metals and Materials**, Vol. 6, no. 12, p.796-797. Dec., 1990.

API 5L – **Standard Specification for Seamless Line Pipe or Seamless Pipe Line**, 2007.

ASTM E8/E8M, **Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials**, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2015.

ASTM International Standards Worldwide. **2007 SECTION II, PART A - SA-36/SA-36M: Specification for Carbon Structural Steel**. 3<sup>th</sup> ed.: Copyright ASME International, 2007. 6 p.

ASTM, A370. **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. West Conshohocken (US): ASTM, 2015. p. 50.

AWS D1.1/D1.1M: **“Structural Welding Code – Steel**, Annex XI, Guideline on Alternative Methods for Determining Preheat”, Miami, USA, 299p, 2004.

AWS Welding Handbook, **“Friction Welding – Definition and Process Variations”**, 8<sup>th</sup>. edition, Vol. 2, Chapter 23, pp. 740-763, 1991.

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. <https://doi.org/10.4043/11063-MS>

BORGES, B. M. **Instrumentação, Controle e Operacionalização de uma Unidade de Reparo por Atrito com Capacidade de Carga Axial de 500 kN**, 2011, 97p, dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

BS 970-3, **Wrought Steel for Mechanical and Allied Engineering Purposes**, Part 3: Bright Bars for General Engineering Purposes, 1991.

CAIXETA, L. A. **Otimização de Parâmetros de Processamento de Pinos por Atrito em Unidade com Capacidade de 245 KN**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CARDOSO, M. J. **Análise do Processo de Furação Profunda no Aço SAE 4144M Endurecido Utilizando MQL e Broca Helicoidal Revestida**. 2014. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pesquisa e Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CASTILLO, W. J. G. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal Duro com Canais Retos**. Dissertação Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

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, p559-574,1971. <https://doi.org/10.1080/00107517108205660>

DE MARCO FILHO, F. de; C. STOCKLER FILHO, J. **Apostila de Metrologia**. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ., 1996. 123 p. Disponível em: <[http://www.graduacao.mecanica.ufrj.br/pdf/Apostila\\_de\\_Metrologia\\_2009.pdf](http://www.graduacao.mecanica.ufrj.br/pdf/Apostila_de_Metrologia_2009.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2016.

DIN 4766, “**Manufacturing Methods Of Surface Roughness; Attainable Mean Value Of Maximum Height Of The Profile R[z] According To Din 4768 Part 1**”

DOS SANTOS, E. J. **Desenvolvimento de um Processo de Reparo por Atrito para Peças com Trincas Passantes**. 2013. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

DOS SANTOS, J.F., **The FSW Process: Principles and Descriptions and Friction Stir Spot Welding, Friction Spot Welding and Bobbin Tool Welding**, Curso ministrado na VEM em 22 de Dezembro de 2005, Porto Alegre.

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

ELLIS, C. R. G.; NICHOLAS, E.D., **Friction Welding of Mild Steels**, The Welding Institute Research Bulletin, Vol.9, July, 1968.

ELMER. J. W. and KAUTZ, D. D. (1993) “**Fundamentals of Friction Welding – Volume 6: Welding, Brazing and Soldering**”. ASM Handbook. Ohio, ASM International.

FORMOSO, C. M., **Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Instrumentação e Controle para uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito Portátil**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

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.

FREITAS, D. S. **Controle de Força e Rotação de uma Unidade de Reparo por Atrito usando Controlador PID e Inteligência Artificial**. 2014. 191 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

GONTIJO, M. F. **O efeito da espessura da chapa sobre a qualidade do reparo por atrito**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

HUANG, T et. al, **Microstructural Evolution of DP980 Steel During Friction Bit Joining**, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 40<sup>a</sup>, Dec 2009, pp. 2994-3000. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0016-x>

HWANG, H. F.; **Desenvolvimento, projeto, construção e teste de um cilindro de reparo por atrito portátil**. 2010. 45 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

INTERNATIONAL STANDARD.ISO 1302: Geometrical Product Specifications (GPS) — **Indication of surface texture in technical product documentation**. 4<sup>th</sup> ed. Switzerland: Iso Copyright Office, 2002. 54 p. Disponível em: <[http://mach.jlu.edu.cn/jxcx/standars/ISO/ISO 1302-2002 Indication of surface texture in technical product documentation.pdf](http://mach.jlu.edu.cn/jxcx/standars/ISO/ISO_1302-2002_Indication_of_surface_texture_in_technical_product_documentation.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2016.

JAMSHIDINIA, M. et. al, **Friction Stir Cladding of Carbon Steel by 304 Stainless Steel**, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Welding Symposium organized by Japan Welding Society, 2008.

KAISER, M. J., World Offshore Energy Loss Statistics. **Energy Policy**, 35, 2007, p. 3496-3525. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.020>

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

LESSA, C. R.L. **SOLDAGEM FHPP - Processo e Metalurgia nas Transformações das Fases de um Aço C-Mn**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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.

LÓPEZ, S. F. **Montagem e Avaliação de uma Máquina de Solda por Fricção**. 2010. 63 p. Dissertação (Ciência e Tecnologia dos Materiais) Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LOTSBERG, I.; LANDET, E. **Fatigue Capacity of Side Longitudinals in Floating Structures**. *Marine Structures*. v. 18, n. 1, p. 25-42. jan. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2005.08.002>

MACEDO, M. L. K. **Caracterização de Depósitos Realizados pelo Processo de Deposição por Fricção em Chapas de Aço de Alto Carbono**. 2011. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Cap. 3. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/30209>>. Acesso em: 14 out. 2015.

MACHADO, A. **Avaliação da Rugosidade em Superfícies Complexas**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Superior Tupy, Instituto Superior Tupy, Joinville, 2009. Disponível em: <[file:///C:/Users/User/Downloads/mestrado\\_adriane2 \(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/mestrado_adriane2%20(1).pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2016.

MATTEI, F.; **Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção**, 2011, 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing – Bonding Mechanism and Properties**. 2003. 132 p. Dissertação (Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen), Braunschweig University of Technology, Brunsvique, 2003. Disponível em: <[http://www.hzg.de/imperia/md/content/hzg/zentrale\\_einrichtungen/bibliothek/berichte/gkss\\_berichte\\_2003/gkss\\_2003\\_4.pdf](http://www.hzg.de/imperia/md/content/hzg/zentrale_einrichtungen/bibliothek/berichte/gkss_berichte_2003/gkss_2003_4.pdf)>. Acesso em: 21 jul. 2016.

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

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.

MICHELON M. F. *et al.* **Caracterização de Desgaste de Brocas de HSS Revestidas com AlCrN e Não Revestidas, em Ensaios de Furação, na Usinagem de Ferro Fundido Nodular DIN GGG 50 - 2014** Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Criciúma, Brasil, v. 19, n. 1, p.87-104, Ago. 2014.

MINERALS MANAGEMENT SERVICE. United States Department of the Interior Minerals Management Service. **Assessment of Deep Water Pipeline Repair in the Gulf of Mexico**. Metairie, Louisiana: Project Consulting Services, Inc. 2000.

MITSUBISHI, **Informações Técnicas: Mitsubishi Materials Corporation**. Disponível em: [https://www.mitsubishicarbide.com/mnbr/pt/product/pdf/catalog/c007z\\_q.pdf](https://www.mitsubishicarbide.com/mnbr/pt/product/pdf/catalog/c007z_q.pdf). Acesso em: 07/06/2016, 2016.

NICHOLAS, E. D. **Friction Hydro Pillar Processing**. In 11<sup>th</sup> Annual North American Welding Research Conference. Nov. 7-9, 1995.

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

NICHOLAS, E. D. **Underwater Friction Welding for Electrical Coupling of Sacrificial Anodes**. In: 16th ANNUAL OTC. Houston, Texas, May 7-9, 1984. <https://doi.org/10.4043/4741-MS>

NICHOLAS, E.D. **Friction Processing Technologies**. Welding in the World, Vol. 47 (11/12, 2003). <https://doi.org/10.1007/BF03266402>

NSK, **Vibrações Mecânicas Aplicadas à Manutenção: Módulo 1 - Fundamentos da Vibração**. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/6980333-Modulo-1-fundamentos-da-vibracao.html>>. Acesso em: 07 jun. 2016, 2004.

PAES, M. T. P., **Processamento termomecânico de Pinos de Aço no Interior de Cavidades de Aço C-Mn através de Soldagem por Atrito Rotacional**. 2013, 318 p., Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ.

PAES, M.T. *et al.* **Estudo da microestrutura formada no processo de soldagem por atrito em aço C-Mn com pino consumível**. Soldagem & Inspeção (Impresso), v. 16, n. 1, p. 02-11, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000100002>

PAN, T. Y. *et. al.* **Spot Friction Welding-A New Joining Method for Aluminum Sheet**. In: Proceedings of International Automotive Body Congress – IABC 2005, Vol. 2, Ann Arbor, Michigan, pp. 95-99.

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.

PINHEIRO, G. A., **Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Join Properties**, Tese de Doutorado, Universität Hamburg-Harburg, 2008.

PIRES, R. R. **Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito**. 2007. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SANDVIK, disponível em: [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com) – Acesso: 19/06/2016.

SKF, **Rigidez do Sistema**. Disponível em: <http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/principles/designconsiderations/systemrigidity/index.html>. Acesso em: 08 Jul. 2016, 2016.

SOUZA, A. J. (2011) **Fundamentos de Usinagem dos Materiais - Parte 1**, Rio Grande do Sul, 2011.



SOUZA, A. J. (2011) **Processos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida - Parte 2**, Rio Grande do Sul, 2011.

SOUZA, R. J. **Desenvolvimento, Projeto, Construção e Validação de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito**. 2006. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TAKESHITA R; SLIDELL; HIBBARD T. L, KENNER, **Friction Plug Welding**. Int CL7 B23K 20/12, Patent Nº US 6.213.379 B1, 10 Abril 2001, Lockheed Martin Corporation, Bethesda, MD (US).

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 Nº. EP 0 602 072 B1, 1993.

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

WALTER, **Projeto de Broca Escalonada**, 16 Jul. 2009. Desenhista: Miyamoto. Proj. n: B1100-5837412 D10.

ZEISS, C. Disponível em: <http://www.zeiss.com.br>>. Acesso em: fevereiro de 2015.

## APÊNDICE I

### Resultados dos parâmetros de Rugosidade $R_q$ , $R_t$ , $R_z$ , $R_{sk}$ , $R_{ku}$

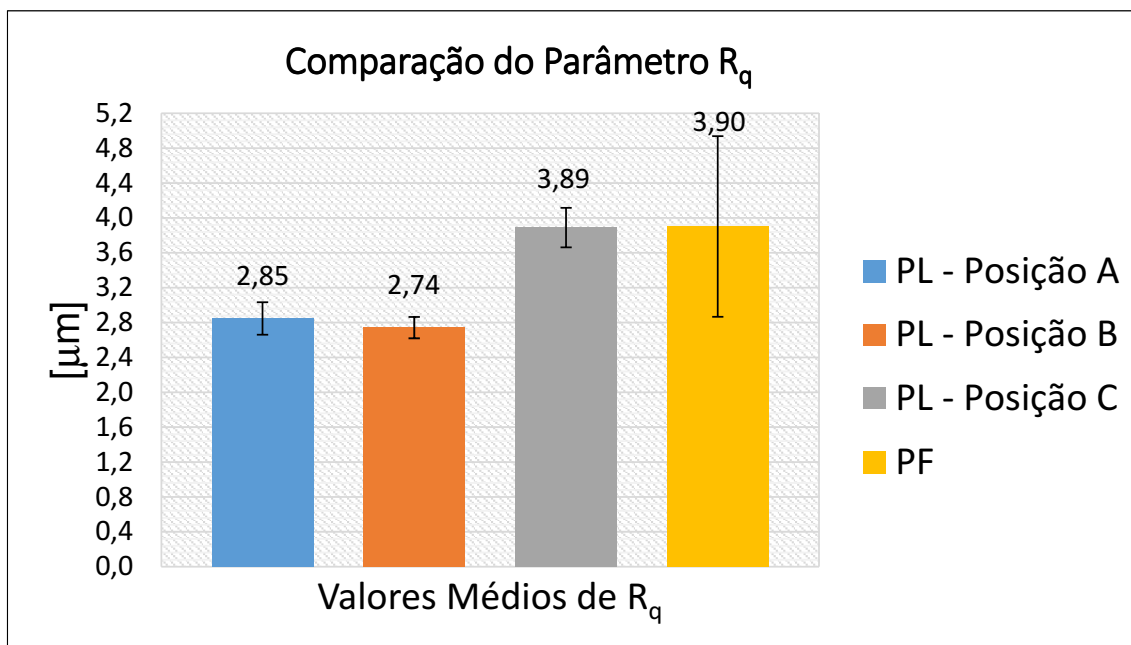


Figura AI.1: Valores médios de  $R_q$  com os respectivos desvios padrão medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6.

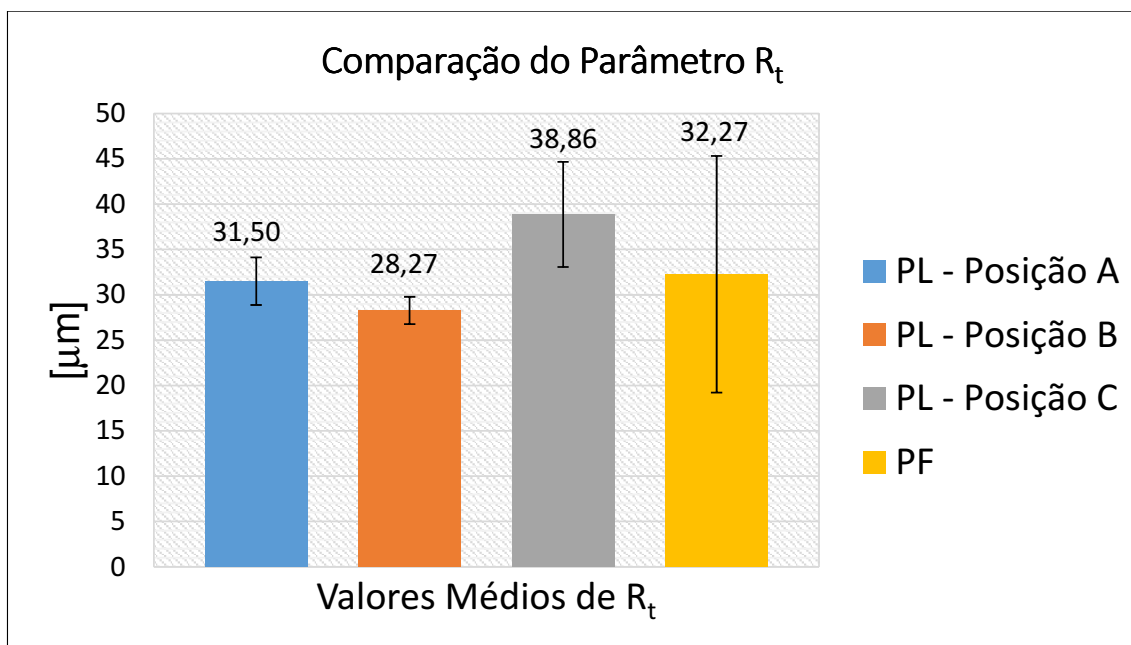


Figura AI.2: Valores médios de  $R_t$  com os respectivos desvios padrão medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6.

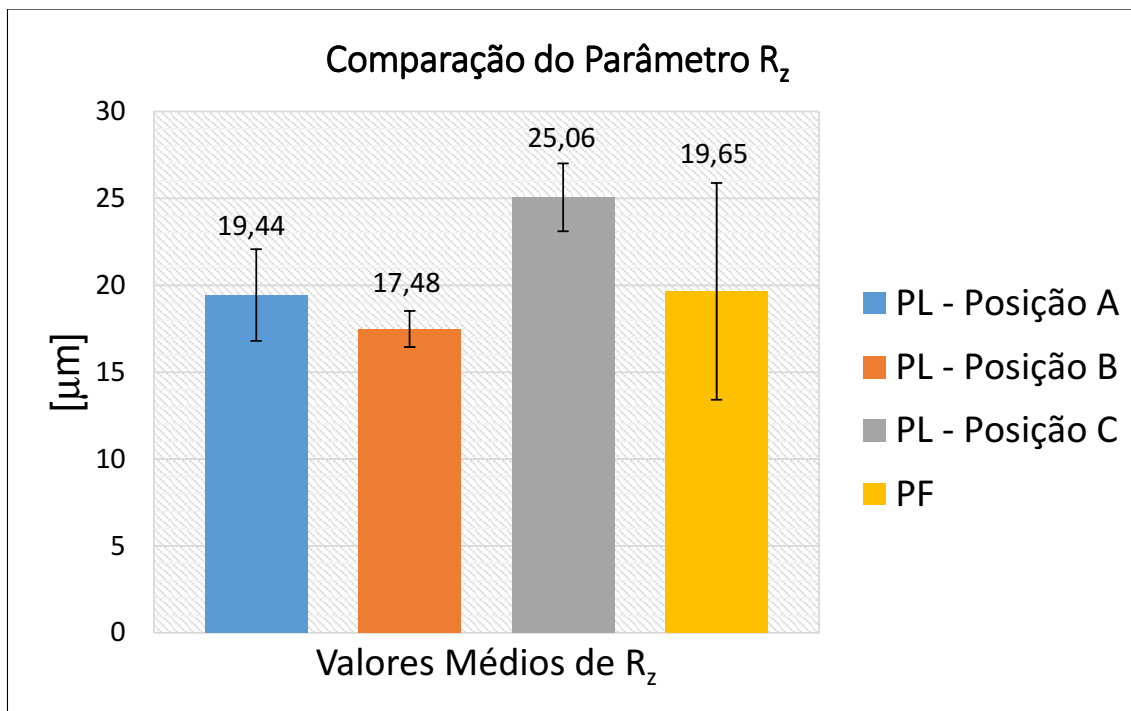


Figura A1.3: Valores médios de  $R_z$  com os respectivos desvios padrão medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6.

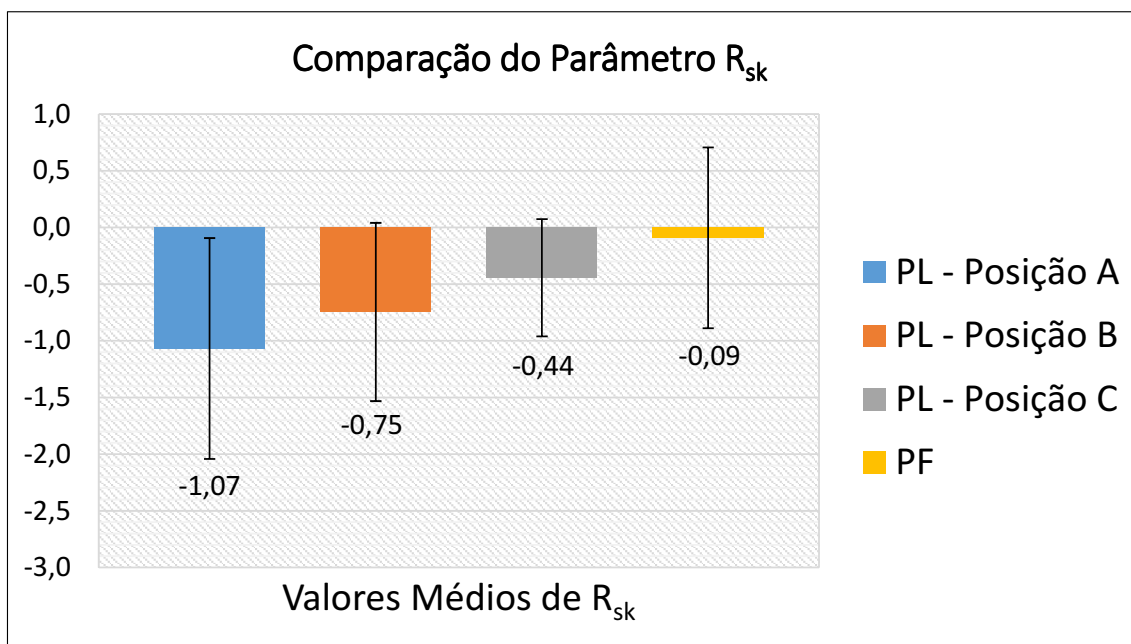


Figura A1.4: Valores médios de  $R_{sk}$  com os respectivos desvios padrão, medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6.

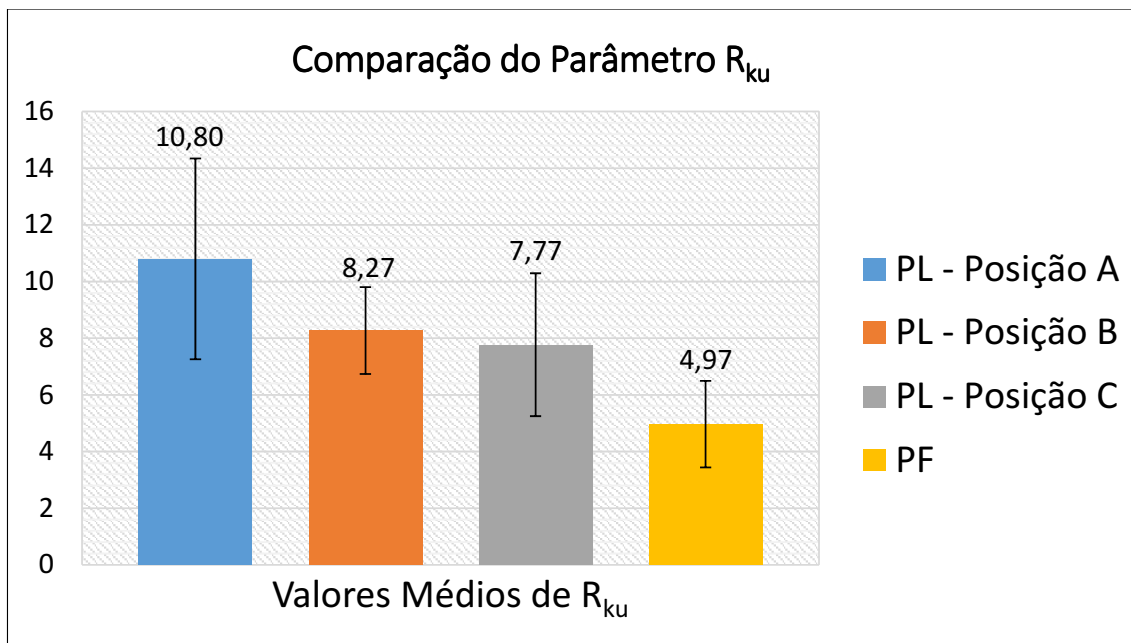


Figura A1.5: Valores médios de  $R_{ku}$  com os respectivos desvios padrão, medidos na superfície lateral e no fundo do furo do substrato CP6.

## APÊNDICE II

### Perfis de Rugosidade

Perfis de rugosidade obtidos na superfície lateral do furo cônico conforme as posições indicadas na: Figura 4.12

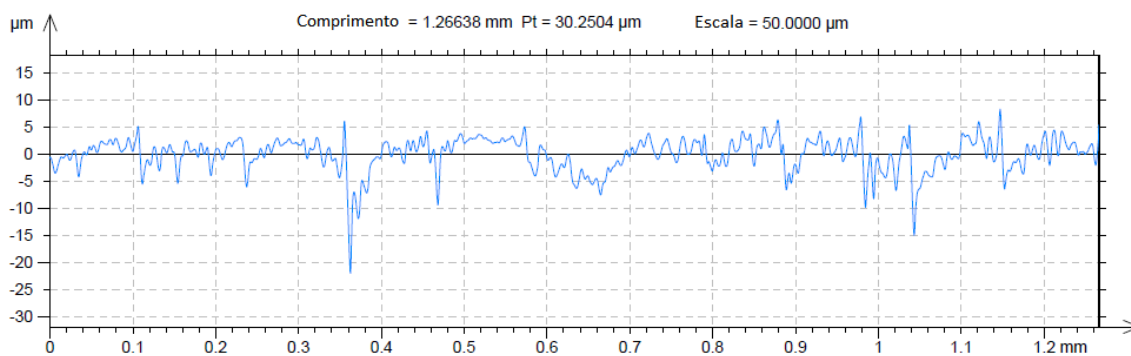


Figura A11-1: Perfil de rugosidade Posição PL1-A.

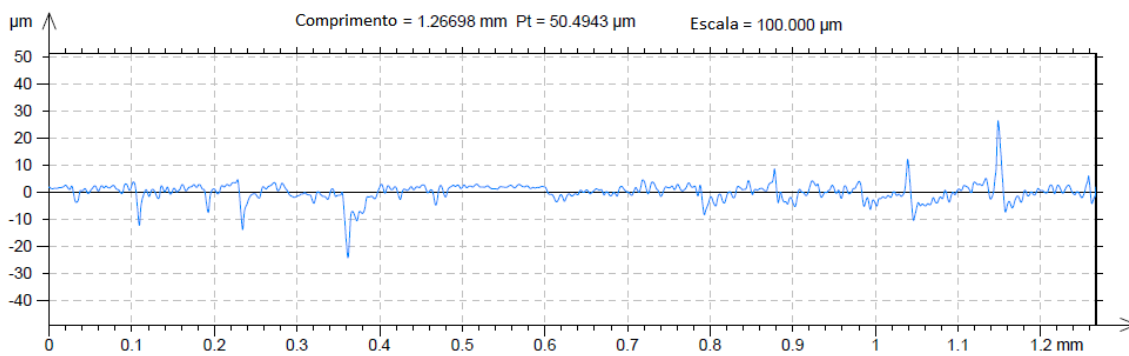


Figura All-2: Perfil de rugosidade Posição PL2-A.

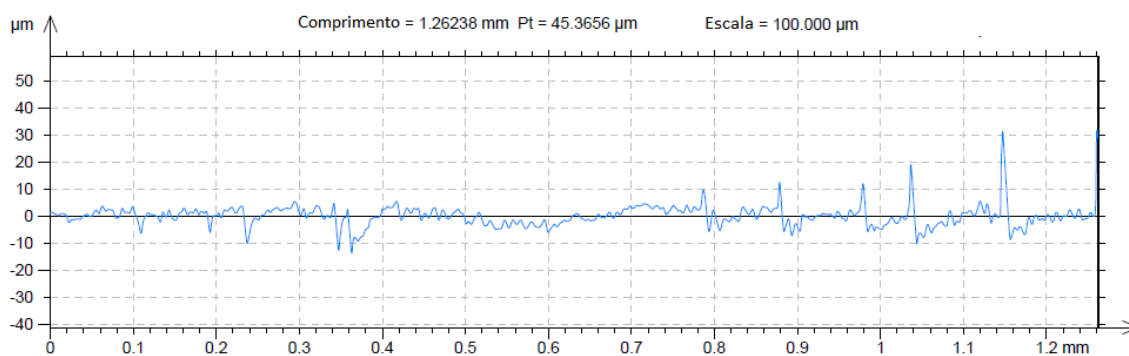


Figura All-3: Perfil de rugosidade Posição PL3-A.

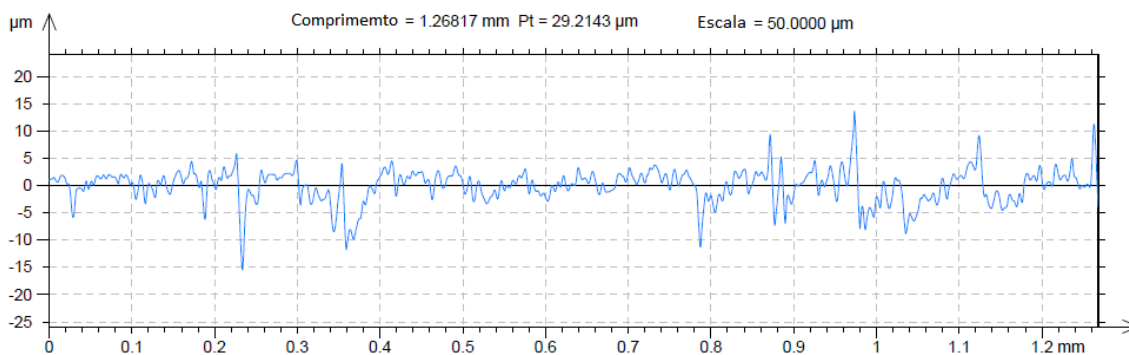


Figura All-4: Perfil de rugosidade Posição PL4-A.

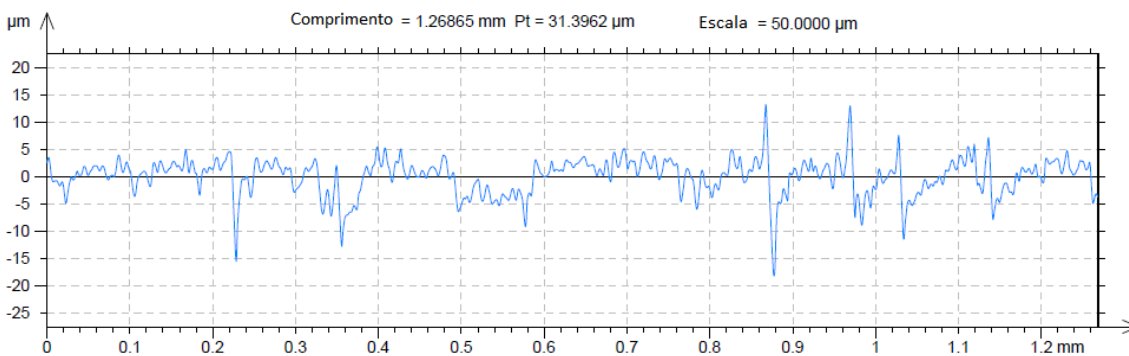


Figura All-5: Perfil de rugosidade Posição PL5-A.

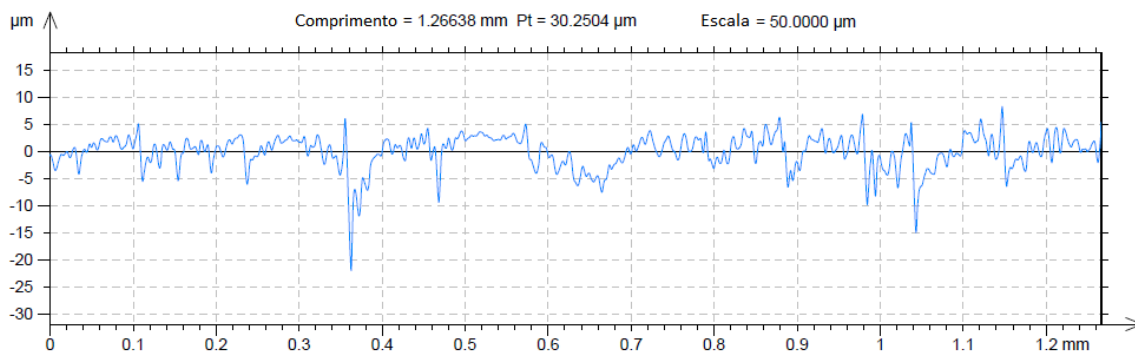


Figura AII-6: Perfil de rugosidade Posição PL1-B.

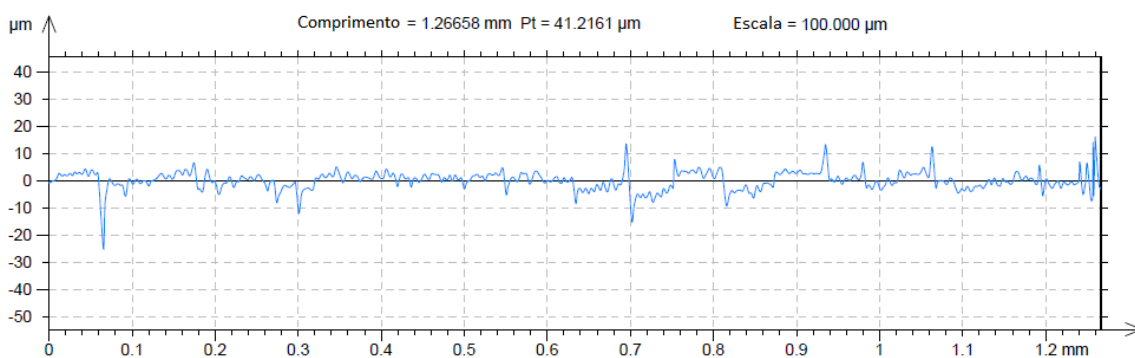


Figura AII-7: Perfil de rugosidade Posição PL2-B.

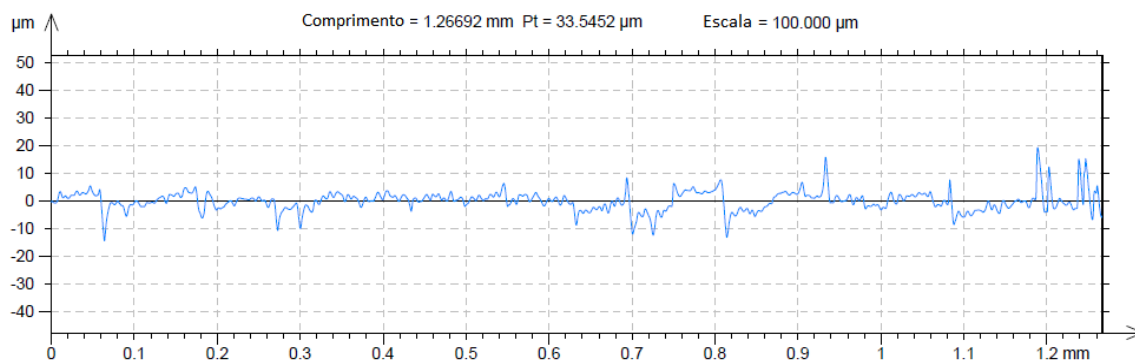


Figura AII- 8: Perfil de rugosidade Posição PL3-B.

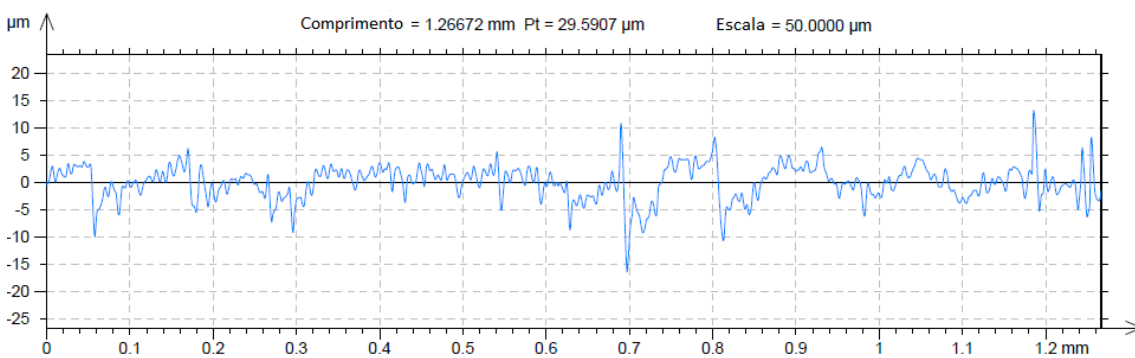


Figura AII-9: Perfil de rugosidade Posição PL4-B.

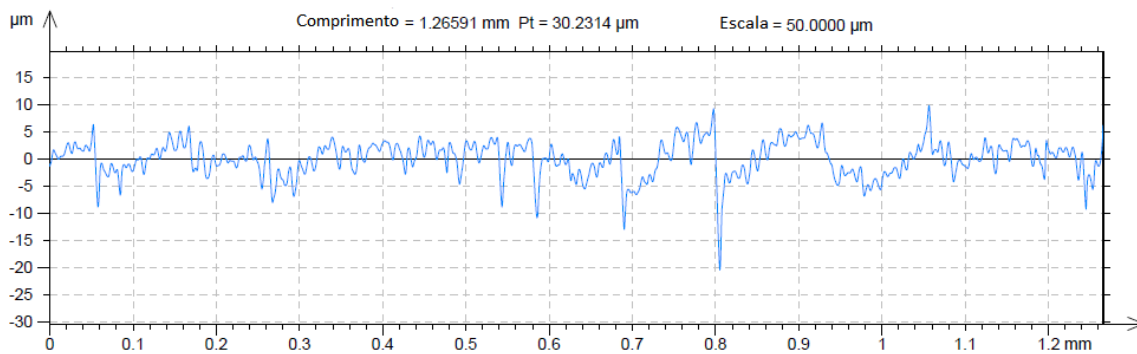


Figura AII-10: Perfil de rugosidade Posição PL5-B.

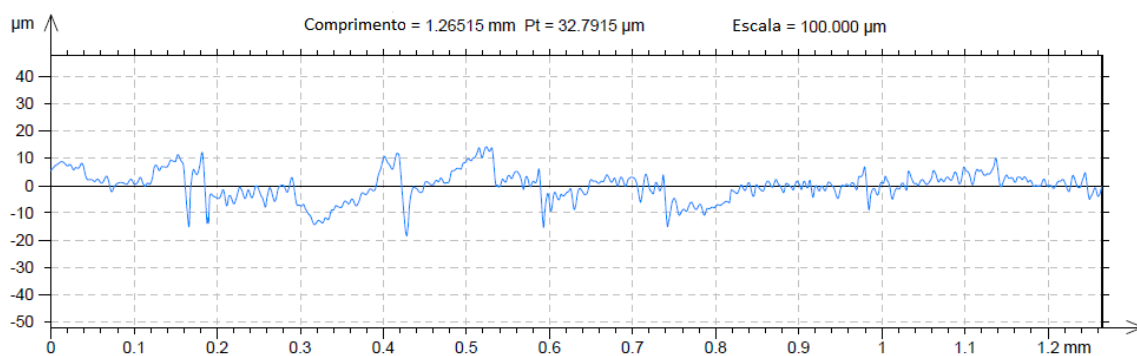


Figura AII-11: Perfil de rugosidade Posição PL1-C.

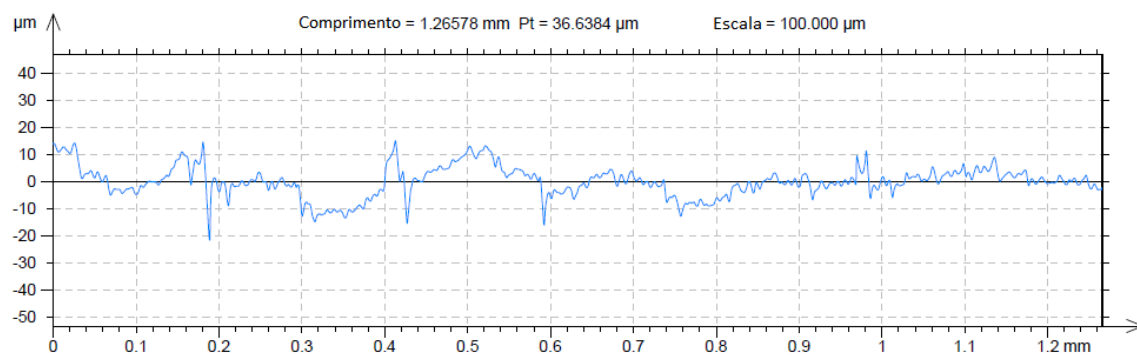


Figura AII-12: Perfil de rugosidade Posição PL2-C.

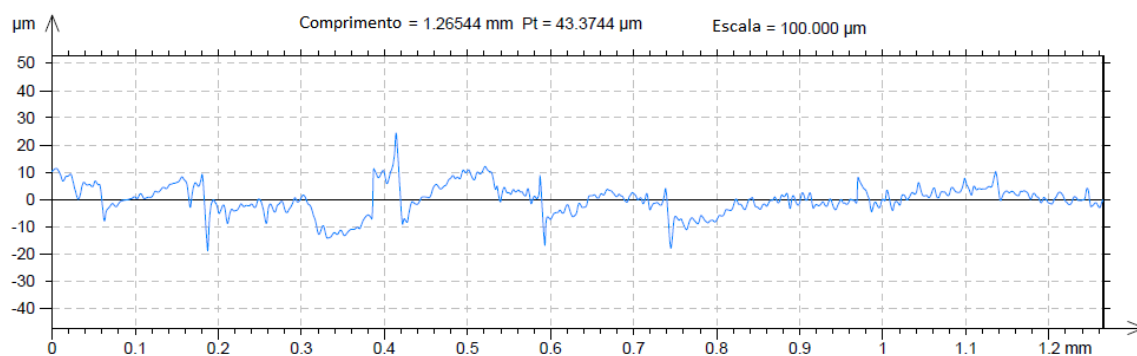


Figura AII-13: Perfil de rugosidade Posição PL3-C.

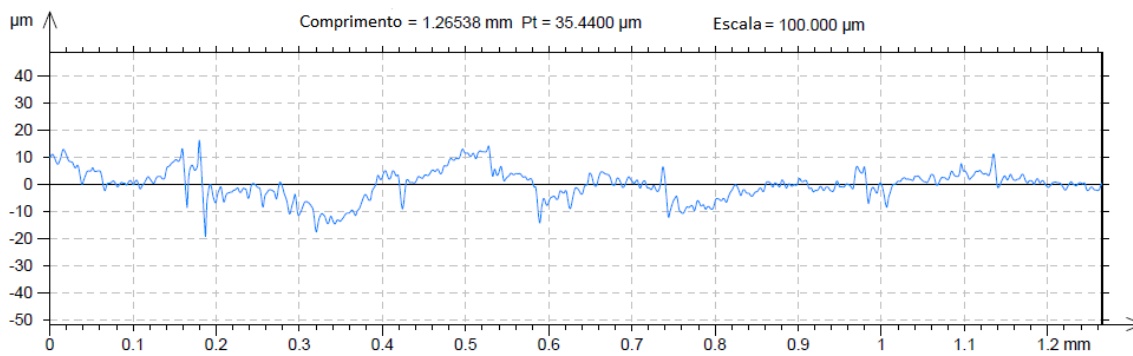


Figura All-14: Perfil de rugosidade Posição PL4-C.

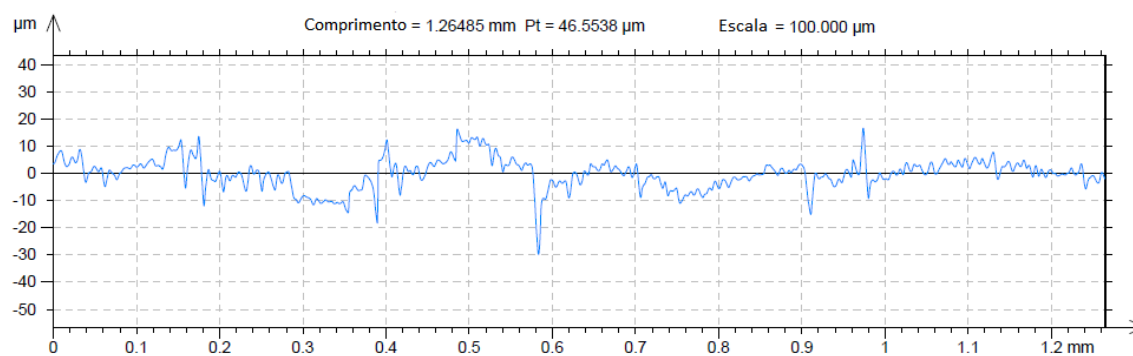


Figura All-15: Perfil de rugosidade Posição PL5-C.

✚ Perfis de rugosidade obtidos no fundo do furo cônico conforme as posições indicadas na: Figura 4.13

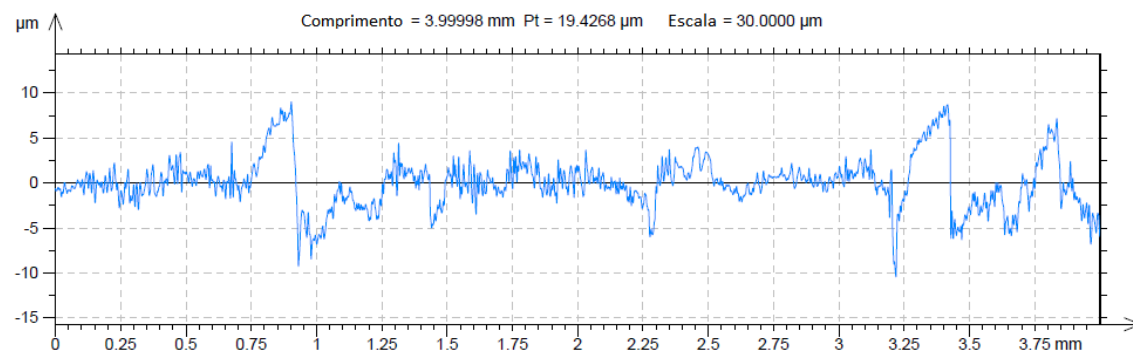


Figura All-16: Perfil de rugosidade Posição PF1.



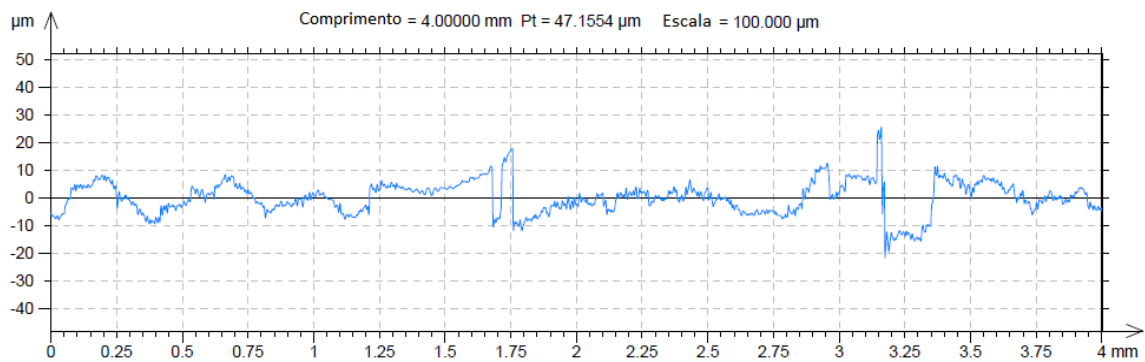


Figura All-17: Perfil de rugosidade Posição PF2.

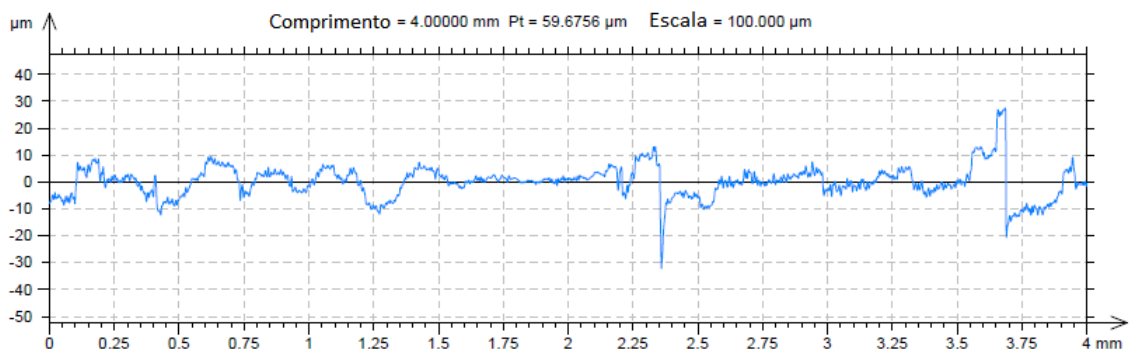


Figura All-18: Perfil de rugosidade Posição PF3.

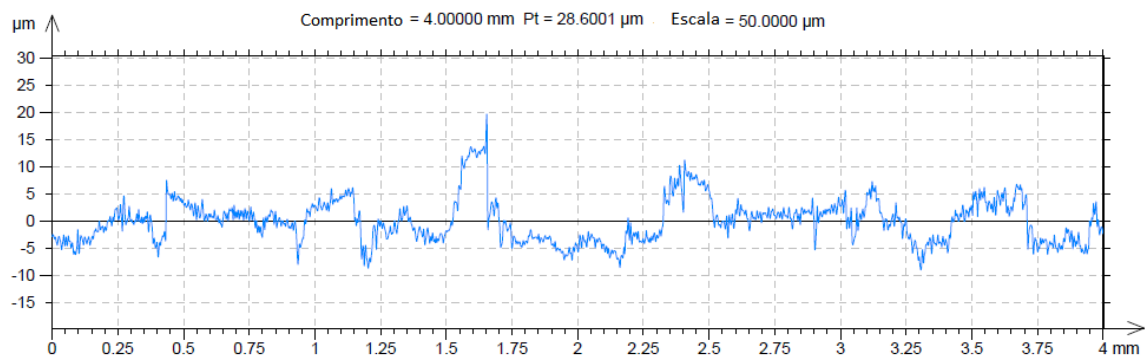


Figura All-19: Perfil de rugosidade Posição PF4.

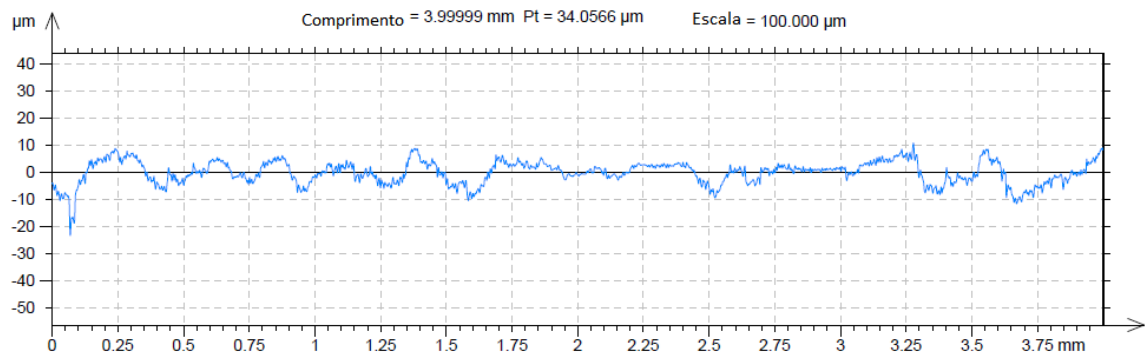


Figura All-20: Perfil de rugosidade Posição PF5.