

LUCAS ANTÔNIO CAIXETA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO
DE PINOS POR ATRITO EM UNIDADE COM CAPACIDADE
DE 245 kN**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UBERLÂNDIA

2011

LUCAS ANTÔNIO CAIXETA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO
DE PINOS POR ATRITO EM UNIDADE COM CAPACIDADE
DE 245 kN**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica, como uma 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

Co-orientadora: Profa. Dra.-Ing. Vera Lúcia D.S. Franco

Uberlândia, Agosto 2011

LUCAS ANTÔNIO CAIXETA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO
DE PINOS POR ATRITO EM UNIDADE COM CAPACIDADE
DE 245 kN**

Dissertação APROVADA pelo programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco

Profa. Dra.-Ing. Vera Lúcia D.S. Franco

Prof. PhD Elias Bitencourt Teodoro

Prof. Dr. Marcelo Camargo S. de Macêdo

Uberlândia, Agosto 2011

AGRADECIMENTOS

À minha família que me apoiou durante essa caminhada com palavras de superação e carinho. Em especial, a Soraya e Lydiane, que além de irmãs foram amigas, ao meu pai pelos conselhos e confiança e a minha tia D'arc por todo carinho. À minha mãe, que apesar da ausência física, sempre ilumina o meu caminho.

Aos meus amigos, que me apoiaram e me receberam durante toda essa jornada e minha namorada que ajudou nos momentos de dificuldade e insegurança.

Ao orientador Sinésio Domingues Franco e a professora Vera Lúcia D. S. Franco, por entender as dificuldades, depositar confiança, ajudar a superar os desafios e pelo importante apoio intelectual.

A todos os membros do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste.

À Empresa Petrobras pela oportunidade de desenvolvimento.

À Deus que tantas vezes foi o maior apoio, dando força e empenho para realização do presente trabalho.

RESUMO

Nos dias atuais, um dos principais problemas enfrentados pelas indústrias petrolíferas é o aparecimento de trincas em estruturas produtivas *offshore*. Nessas áreas, o Processamento de Pinos por Atrito ou *Friction Hidro Pillar Processing* apresenta algumas vantagens em relação à soldagem a arco voltaico, a qual é a mais utilizada atualmente. Esta técnica é mais vantajosa em alguns aspectos por apresentar temperaturas inferiores ao arco voltaico e também por não sofrer grandes influências do ambiente. O presente trabalho apresenta os resultados referente à otimização de alguns parâmetros utilizados no reparo por atrito através da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito com capacidade de carga axial de 245 kN. Esse processo consiste em preencher completamente um furo utilizando um pino submetido à força axial e rotação. O atrito entre as partes proporciona um aumento de temperatura, o que reduz o limite de escoamento dos materiais envolvidos e promove a união metalúrgica. Dentre os parâmetros a serem otimizados, citam-se: força axial, velocidade de rotação do pino e comprimento de queima, sendo que para isso foram utilizadas técnicas de controle PID e estudo dos cartões controladores. Após a otimização foram realizados ensaios para avaliar as melhorias propostas e as faixas de operação do equipamento. As matrizes de ensaio executadas permitiram identificar essas faixas de operação do equipamento e, além disso, as propriedades mecânicas foram avaliadas através de ensaios de microdureza e análise das microestruturas.

ABSTRACT

Nowadays, one of the main problems faced by oil exploitation industries is the formation of cracks in offshore production units. In these classified areas, the Friction Hydro Pillar Processing has some advantages when compared to the arc-voltaic welding, which is widely used to perform these repairs. Some of them are the lower temperatures during the process and also the reduction of the surroundings' influences in the quality of these repairs. This work presents the results concerning the optimization of some important parameters of the process performed by a Friction Pillar Processing unit able to apply axial loads up to 245 kN. This technique consists of filling a hole, through the use of a consumable rod under a controlled rotation speed and pressed against the hole. The friction between the surfaces increases their temperatures reducing the yield strength of the materials involved allowing a metallurgical bond between the parts. Among the process parameters to be optimized there are: axial load, rotation speed and burn length. For this, the PID control techniques were applied and a specific study of the controller boards was also accomplished. After this, some tests were performed to evaluate proposed solutions and also to identify the operational ranges of the equipment. The performed test matrices allowed the identification of these ranges and also validated the new optimal parameters proposed in this work. Moreover, the mechanical properties of each test were evaluated by means of hardness tests and microstructure analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Ilustração esquemático da FHPP (MEYER, 2003).....	20
Figura 2.1: Solda por Atrito Básica, com uma peça fixa e outra em rotação. (AWS,1991).....	25
Figura 2.2: Método de rotação contrária, na qual as duas peças têm movimento em sentidos contrários (AWS,1991).....	25
Figura 2.3: Método <i>Centre Drive</i> . Uma peça em rotação entre duas peças fixas. (AWS,1991).....	25
Figura 2.4: Método <i>Twin Welds</i> . Duas peças da extremidade são rotacionadas contra uma peça fixa no centro (AWS,1991).....	26
Figura 2.5: Variações do processo de soldagem de acordo com LEBEDEV (1992): A) Pressão Constante durante o processo B) Processo com dois ciclos de pressão C) Processo com três ciclos de pressão D) Processo com elevação constante de pressão E) Processo com redução de pressão após início do processo.....	28
Figura 2.6: Variação de pressão e rotação durante o processo: A) Processo com pressão constante e dois ciclos de rotação B) Processo com dois ciclos de pressão e rotação.....	29
Figura 2.7: Esquema Ilustrativo das fases do processo de soldagem. A) Fase de atrito B) Fase de aquecimento, C): Fase de parada e D): fase de Forjamento (MEYER, 2002).....	30
Figura 2.8: Desenho esquemático da área plastificada ao longo do tempo. Primeiramente tem-se um deformação em direção ao centro e posteriormente em direção as extremidades do material (MEYER, 2002).....	31
Figura 2.9: Ilustração da interação entre os parâmetros (MEYER, 2002).....	34
Figura 2.10: Ilustração do escoamento do material (THOMAS e NICHOLAS, 1992).....	36
Figura 3.1: Foto do sistema hidráulico do UPPA-II, mostrando alguns elementos: Motobomba 1, responsável por fornecer óleo ao cilindro hidráulico; Motobomba 2,	

responsável pela circulação de óleo e Motor Diesel, responsável pela rotação do sistema.....	40
Figura 3.2: Cabeça de reparo, destacando-se o motor hidráulico responsável pela rotação e do cilindro hidráulico responsável pela força e deslocamento.....	41
Figura 3.3: Painel elétrico e identificação dos principais elementos.....	44
Figura 3.4: Sequência de atividade executadas pelo CLP.....	46
Figura 3.5: Desenho esquemático da rodada dentada, sensor e onda quadrada.....	46
Figura 3.6: Foto ilustrativa do sensor de pressão.....	47
Figura 3.7: Fluxograma do ensaio independente.....	50
Figura 3.8: Fluxograma do ensaio de reparo completo.....	51
Figura 3.9: Visão macro do ensaio com dois estágios.....	52
Figura 4.1: Ilustra malha de controle fechada do sistema de rotação, implementado pelo cartão VT-HACD-1.,.....	53
Figura 4.2: Ilustra malha de controle da Força/Avanço.....	54
Figura 4.3: Foto ilustrativa do cartão de força.....	55
Figura 4.4: Ilustração do controlador PID paralelo.....	59
Figura 4.5: Ilustração do controlador PID série.....	59
Figura 5.1: Microestrutura dos materiais utilizados no reparo; a) ASTM A36 e b) ABNT 1010.....	66
Figura 5.2: Geometria dos materiais utilizados nos ensaios: A) Bloco B) Pino consumível.....	67
Figura 5.3: Desenho esquemático mostrando a localização dos perfis de microdureza.....	75
Figura 6.1: Evolução da força de processamento em função dos parâmetros de controle. O método utilizado: tentativa e erro com os parâmetros: Teste 1($K_p=16$; $K_i=16$ e $K_d=1$); Teste 1($K_p=16$; $K_i=16$ e $K_d=16$) e Teste 3 ($K_p=1$; $K_i=16$ e $K_d=16$) e força pré-estabelecida de 245kN.....	77
Figura 6.2: Variação na força máxima entre o ensaio 1 (245 kN e 2500 rpm) e ensaio 6 (245 kN e 2500 rpm).....	79
Figura 6.3: Ensaios realizados antes e depois das alterações nos parâmetros de controle e válvulas.....	80
Figura 6.4: Sinais de respostas para o Ensaio 1 (69 kN e 1.000 rpm).....	81

Figura 6.5: Sinais de respostas para o Ensaio 6 (69 kN e 1.500 rpm).....	82
Figura 6.6: Sinais de respostas para o Ensaio 11 (69 kN e 2.000 rpm).....	83
Figura 6.7: Sinais de respostas para o Ensaio 12 (113 kN e 2.000 rpm).....	84
Figura 6.8: Sinais de respostas para o Ensaio 13 (157 kN e 2.000 rpm).....	85
Figura 6.9: Sinais de respostas para o Ensaio 16 (69 kN e 2.500 rpm).....	86
Figura 6.10: Sinais de respostas para o Ensaio 17 (113 kN e 2.500 rpm).....	86
Figura 6.11: Sinais de respostas para o Ensaio 18 (157 kN e 2.500 rpm).....	86
Figura 6.12: Tempo de processamento dos ensaios completos mostrados nas figuras de 6.4 a 6.11.....	87
Figura 6.13: Macrografias dos ensaios (11, 12, 16, 17 e 18) com um ciclo de rotação.....	89
Figura 6.14: Janela de operação do equipamento com um ciclo para a geometria selecionada para o pino e para o bloco.....	90
Figura 6.15: Janela de operação proposta para ensaios com dois ciclos.....	91
Figura 6.16: Ensaio utilizando dois ciclos de força; o primeiro com 41 kN e o segundo com 61 kN.....	92
Figura 6.17: Sinais de resposta do ensaio 1(113 kN/201 kN e 2.500 rpm) com dois ciclos de força.....	93
Figura 6.18: Sinais de resposta do ensaio 2 (20 kN/201 kN e 2.500 rpm) com dois ciclos de força.....	93
Figura 6.19: Sinais de resposta do ensaio 3(20 kN/49 kN e 2.500 rpm) com dois ciclos de força.....	94
Figura 6.20: Sinais de resposta do ensaio 4(20 kN/49 kN e 2.000 rpm) com dois ciclos de força.....	94
Figura 6.21: Sinais de resposta do ensaio 5(20 kN/49 kN e 1.500 rpm) com dois ciclos de força.....	95
Figura 6.22: Sinais de resposta do ensaio 11(20/157 kN e 2.000 rpm) com dois ciclos de força.....	96
Figura 6.23: Sinais de resposta do ensaio 12(49 kN e 2.000 rpm) com dois ciclos de força.....	96
Figura 6.24: Sinais de resposta do ensaio 13(49 kN e 2.500 rpm) com dois ciclos de força.....	97
Figura 6.25: Macrografias referentes aos ensaios de 1 a 4, com dois ciclos de força.....	98

Figura 6.26: Imagens da microestrutura final do ensaio 2. A) Vista Geral. B) Vista Detalhada.....	99
Figura 6.27: Macrografia dos ensaios 5 (20 kN/49 kN e 2.000 rpm) e ensaio 8 (20 kN/49 kN e 1.100 rpm) com oscilação na rotação.....	100
Figura 6.28: Macrografia do ensaio 11 (20 kN/157 kN e 2.000 rpm).....	100
Figura 6.29: Macrografia dos ensaios 12 (49 kN e 2.000 rpm) e ensaio 13 (49 kN e 2.500 rpm).....	101
Figura 6.30: Ensaio 1 com 113 kN/201 kN e 2.500 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface inferior esquerda.....	102
Figura 6.31: Ensaio 2 com 20 kN/201 kN e 2.500 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface inferior esquerda.....	102
Figura 6.32: Ensaio 3 com 20 kN/49 kN e 2.500 rpm- A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface direita.....	103
Figura 6.33: Ensaio 4 com 20 kN/49 kN e 2.000 rpm- A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.....	103
Figura 6.34: Ensaio 11 com 49 kN/157 kN e 2.500 rpm - A)Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.....	104
Figura 6.35: Ensaio 12 com 49 kN e 2.000 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.....	104
Figura 6.36: Ensaio 13 com 49 kN e 2.500 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.....	105
Figura 6.37: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios 1 (113/201 kN), 2 (20/201 kN), 3 (20 kN/49 kN) e 13 (49 kN).....	106
Figura 6.38: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5mm da interface para os ensaios 1 (113/201 kN), 2 (20/201 kN), 3 (20 kN/49 kN) e 13 (49 kN).....	106
Figura 6.39: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10 mm da interface para os ensaios 1 (113/201 kN), 2 (20/201 kN), 3 (20/49 kN) e 13 (49 kN).....	107
Figura 6.40: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios 4 (20/49 kN), 11 (20/157 kN) e 12 (49 kN).....	108
Figura 6.41: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5mm para os ensaios 4 (20/49 kN), 11 (20/157 kN) e 12 (49 kN).....	108
Figura 6.42: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10 mm para os ensaios 4 (20/49 kN), 11 (20/157 kN) e 12 (49 kN).....	109
Figura 6.43: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios 1 (113/201 kN), 2 (20/201 kN) e 11 (20/157 kN).....	110

Figura 6.44: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5mm para os ensaios 1 (113/201 kN), 2 (20/201 kN) e 11 (20/157 kN).....	110
Figura 6.45: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10mm para os ensaios 1 (113/201 kN), 2 (20/201 kN) e 11 (20/157 kN).....	111
Figura 6.46: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios 3 (20/49 kN), 4 (20/49 kN), 12 (49 kN) e 13 (49 kN).....	111
Figura 6.47: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5mm para os ensaios 3 (20/49 kN), 4 (20/49 kN), 12 (49 kN) e 13 (49 kN).....	112
Figura 6.48: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10 mm para os ensaios 3 (20/49 kN), 4 (20/49 kN), 12 (49 kN) e 13 (49 kN).....	112
Figura 6.49: Foto de uma amostra após o ensaio de reparo por atrito com ilustração da região.....	113
Figura 6.50: Faixa de operação final com a inclusão dos dois ciclos de força.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre os dois métodos de soldagem por atrito (FARIA,2003).....	24
Tabela 2.2: Influência dos parâmetros nas propriedades mecânicas (MEYER, 2002).....	35
Tabela 4.1: Efeito dos parâmetros de controle na resposta do sistema.....	58
Tabela 4.2: Fórmulas para obter parâmetros do controlador PID, através do Método Ziegler & Nichols.....	61
Tabela 4.3: Possíveis variações das chaves de controle do cartão controlador	62
Tabela 5.1: Composição química dos materiais utilizados no reparo (% em peso).....	65
Tabela 5.2: Matriz com ensaios preliminares, sendo que foram utilizadas força de ensaio e forjamento igual a 245 kN.....	68
Tabela 5.3: Matriz de ensaios com variação da força e rotação e comprimento de queima fixo em 14 mm.....	69
Tabela 5.4: Matriz com ensaios de dois ciclos, sendo o primeiro ciclo com comprimento de queima de 5 mm e o segundo até 14 mm.....	71
Tabela 5.5: Matriz de ensaios com dois estágios, no qual utilizou-se uma força baixa e um comprimento de queima de 3 mm no primeiro ciclo. O segundo ciclo foi até 15 mm.....	72
Tabela 5.6: Matriz de ensaios com 49 kN e variação na rotação.....	73
Tabela 6.1: Variação nos parâmetros de controle de força e as respectivas respostas no tempo de subida.....	78

LISTAS DE ABREVIATURAS

AQW	Saída Analógica
CLP	Controlador Lógico Programável
CV	Cavalo a Vapor
FHPP	<i>Friction Hydro Pillar Processing</i>
IHM	Interface Homem Máquina
Kd	Constante derivativa
Ki	Constante integral
Kp	Constante proporcional
kgf	Quilograma força
l/min	Litros por minuto
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
mA	Miliampere
N	Newton
N.m	Newton-metro
PC	<i>Personal computer</i>
PID	Proporcional-integral-derivativo
PLC	Programmable Logic Controller
rpm	Rotações por Minuto
TWI	<i>The Welding Institute</i>
UPPA	Unidade de Processamento de Pinos por Atrito
V	Volts

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	17
CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1.SOLDA POR ATRITO	22
2.1.1. Variações do processo.....	24
2.1.2. Ciclos de soldagem.....	26
2.1.3. Fases do processo.....	29
2.1.4. Parâmetros importantes para qualidade do reparo.....	32
2.1.5. Influência dos parâmetros nas propriedades.....	35
2.2.PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO.....	35
2.2.1. Descrição do processo.....	35
2.2.2. Vantagens e desvantagens do reparo por atrito.....	37
2.2.3. Equipamentos desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD).....	38
CAPÍTULO III: DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE REPARO POR ATRITO	
3.1.Sistema mecânico.....	39
3.1.1 Sistema hidráulico.....	39
3.1.2 Cabeça de reparo.....	41
3.2.Sistema elétrico.....	43
3.3.Sistema de controle.....	44
3.3.1. Cartões de controle.....	45
3.3.2. Programa de controle.....	49
CAPÍTULO IV: OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DO EQUIPAMENTO.....	53
4.1.Ajustes dos parâmetros de controle de força.....	55

4.2.Ajuste do controle dos parâmetros do processo.....	57
4.2.1. Efeitos das constantes de controle PID.....	57
4.2.2. Estrutura dos controladores.....	59
4.2.3. Métodos de sintonia.....	60
4.2.4. Ajustes no controlador.....	62
4.3.Teste do controle.....	64
 CAPÍTULO V: PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	65
5.1.Material de ensaio.....	65
5.2.Ensaio preliminares.....	66
5.3.Ensaio de reparo por atrito completo.....	68
5.3.1. Ensaio com um ciclo de processamento.....	69
5.3.2. Ensaio com dois ciclos de processamento.....	70
5.4.Preparação metalográfica.....	73
5.4.1. Macrografia.....	73
5.4.2. Micrografia.....	74
5.5.Ensaio de microdureza.....	74
 CAPÍTULO VI: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
6.1.Ensaio preliminares.....	76
6.1.1. Parâmetros de controle PID e válvulas	76
6.1.2. Gráficos de Processamento.....	78
6.2.Ensaio de reparo por atrito com um ciclo.....	81
6.2.1. Variação nos parâmetros de processamento.....	81
6.2.2. Macrografia.....	88
6.2.3. Faixa de operação.....	89
6.3.Ensaio de reparo por atrito com dois ciclos.....	90
6.3.1. Implementação dos dois ciclos.....	91
6.3.2. Variação nos parâmetros de processamento.....	92
6.3.3. Análise Metalográfica.....	97
6.3.4. Microdureza.....	105
6.3.5. Faixa de Operação.....	113

CAPÍTULO VII: CONCLUSÕES.....	115
CAPÍTULO VIII: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
CAPÍTULO IX: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor industrial mundial vem apresentando um forte crescimento. A economia teve uma taxa de crescimento maior que o esperado, segundo projeções realizadas pelo FMI em 2010 (LACERDA 2010). Esse cenário não é diferente para o setor industrial brasileiro, mais especificamente o setor de minas e energia.

Este crescimento é puxado pelo aumento da demanda de energia e pelo desenvolvimento do setor industrial. Em 2007, o gás natural e o petróleo representavam 46% de toda produção energética do Brasil, sendo que isso somente foi possível com um enorme crescimento do setor de extração de petróleo e serviços correlatos. No período entre 1997 e 2006, o número de estabelecimentos cresceu aproximadamente 4 vezes, sendo em 1997 de 34 e em 2006 de 135 estabelecimentos. (MESSA, A., ESTEVES L., NEGRI F., 2009)

Este cenário mundial e brasileiro apresenta um mercado extremamente competitivo, que exerce forte pressão para que haja uma redução dos custos produtivos e viabilize a expansão necessária. Para tanto, há investimentos para reduzir as paradas de produção e implementar novas tecnologias que reduzam o aparecimento de defeitos e que aperfeiçoem os processos produtivos.

Segundo Edílson Lobão, ministro de Minas e Energia em 2008, os investimentos da Petrobras e outras empresas privadas em petróleo e gás natural estão próximos de R\$ 266 bilhões, para período de 2008 a 2012 (LOBÃO 2008). Esses investimentos aplicados pela Petrobras e parceiras, juntamente com a experiência de explorar em águas profundas e ultra profundas e a tecnologia aplicada, permite desenvolver processos de transporte em navios e dutos com um aumento da confiabilidade, reduzindo assim os custos com manutenção.

Quando se trata da indústria do petróleo, tal como a referência nacional Petróleo Brasileira (PETROBRAS), esses custos são especialmente elevados, por se tratar de áreas classificadas (com risco de explosão). Há de se destacar ainda, que, na exploração de petróleo *offshore*, os custos de manutenção são cerca de 20 vezes maiores que os praticados em estruturas *onshore*.

Assim, fica evidente a necessidade das empresas, principalmente nessa área petrolífera, investirem em desenvolvimento e inovação tecnológica, com intuito de minimizar o tempo e a quantidade de paradas para manutenção, aprimorar as técnicas de processamento e, consequentemente, reduzir os custos.

Muitas vezes, esses desenvolvimentos e melhoria são realizados em parceria com universidades, o que gera resultados benéficos para empresa e universidade, tais como: soluções de problemas técnicos da produção, maior eficiência do processo produtivo e formação de mão-de-obra qualificada para docência e indústria.

Atualmente, um dos problemas enfrentados pelas indústrias petrolíferas é o aparecimento de trincas em estruturas produtivas *offshore*. Ao longo de várias décadas, um dos principais métodos empregados para o reparo e enrijecimento de estruturas é a soldagem a arco voltaico (MINERALS MANAGEMENT SERVICE, 2000).

O reparo dessas trincas requer utilização de técnicas especiais de soldagem a arco voltaico, como a soldagem submersa. Porém, essa técnica traz consigo alguns inconvenientes, tais como (MEYER, 2002):

- Absorção de gases: esse é um dos principais problemas, uma vez que pode-se alterar significativamente as propriedades mecânicas do material. Esse inconveniente é intensificado quando o processo é realizado em ambiente submerso, pois as moléculas de oxigênio e hidrogênio se dissociam e são absorvidos pela material em fusão. O aumento do teor de oxigênio reduz a tenacidade e o aumento da quantidade de hidrogênio causa a fragilização por hidrogênio (MEYER, 2002). Deve-se lembrar também que o aumento da profundidade eleva a quantidade de absorção desses gases (CHRISTENSEN, 1983 citado em PINHEIRO, G).
- Porosidade: formada pela evolução dos gases, na parte posterior da poça de fusão, durante a solidificação da solda. Os poros têm usualmente um formato esférico,

embora poros alongados possam ser formados, em geral, associados com o hidrogênio (MODENESI, 2001).

Além dos inconvenientes da solda a arco voltaico citados acima, ainda pode-se adicionar as dificuldades e limitações do operador (máximo de 50 metros de profundidade). Essas dificuldades elevam a chance de reprovação do reparo e uma possível repetição do processo de reparo (PIRES, 2007).

Devido às dificuldades mencionadas, recentemente várias pesquisas têm sido realizadas com intuito de aprimorar a manutenção em áreas classificadas. Uma das técnicas desenvolvidas é denominada *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP) ou Processamento de Pinos por Atrito (ANDREWS, 1990; NICHOLAS e THOMAS, 1992; NICHOLAS, 1995; THOMAS e TEMPEL-SMITH, 1997).

A FHPP pode ser considerada um processo de reparo alternativo baseado nos princípios da solda por atrito (MEYER, 2001). Essa última é uma técnica bastante pesquisada e conhecida, sendo que sua primeira patente foi concedida em 1891 (CROSSLAND, 1971). Uma das possíveis aplicações deste processo é na fabricação e reparo de estruturas submersas, como plataformas e navios utilizados na extração de óleo e gás. (BLAKEMORE, 1984; NICHOLAS, 2003 e BLAKEMORE, 1999). Apesar disso, a FHPP é um processo de reparo recente, que começou a ser desenvolvido na década de 90 pelo *The Welding Institute* (TWI - Inglaterra), que culminou com a apresentação de um pedido de patente em 1993 (THOMAS e NICHOLAS, 2002).

O processo, propriamente dito, consiste de duas etapas: na primeira é feito um furo cego no local onde se encontra a trinca e na segunda esse furo é preenchido por um pino consumível, mediante rotação e aplicação de altas forças axiais. Nesta segunda etapa, o pino primeiramente é colocado em rotação e somente depois de iniciar o contato com o bloco a força axial é aplicada, conforme está mostrado na figura 1.1.

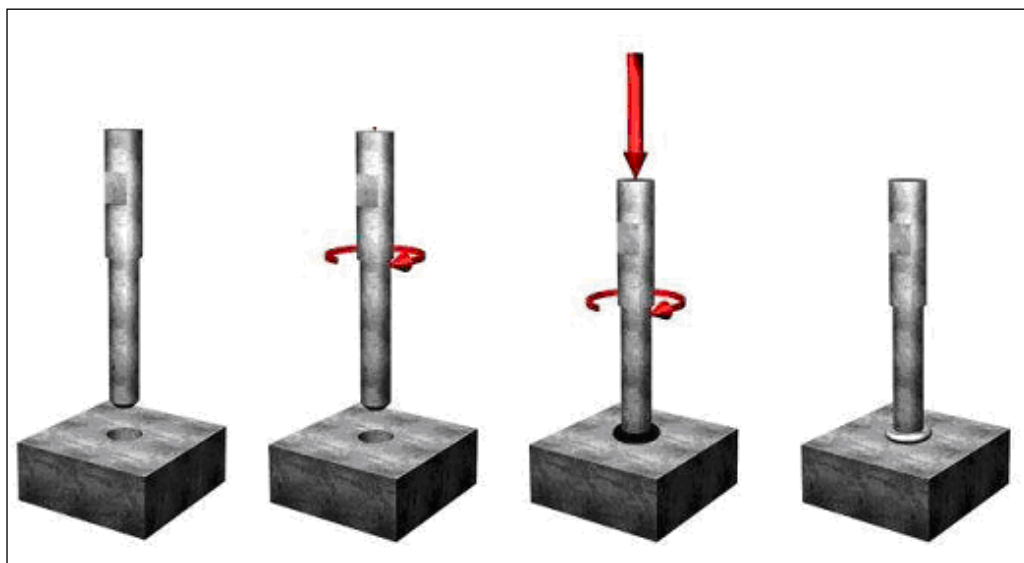


Figura 1.1: Ilustração esquemática da FHPP (MEYER, 2003).

Com o movimento relativo entre o pino e o substrato, e com a aplicação de forças axiais consideráveis, uma grande quantidade de calor é gerada pelo atrito entre as duas peças. Esse calor, conseqüentemente, proporciona um aumento de temperatura, o que reduz o limite de escoamento dos materiais envolvidos. Isso, por sua vez, favorece o escoamento plástico e permite o preenchimento completo do furo.

É importante ressaltar que a FHPP é um processo rápido de baixo custo operacional que oferece uma economia significativa e reparo de boa qualidade, enquanto os outros processos envolvem consumíveis caros e um processo mais longo (MEYER, ROOS, SANTOS, GIBSON, BLACKMORE e HAMMERIN, 2001).

Como o FHPP é um processo recente, a influência dos parâmetros durante o reparo ainda são pouco conhecidos, podendo citar poucos trabalhos de referência como o de PIRES (2007) e MAREGA (2011). Assim, este trabalho tem como objetivo otimizar parâmetros do processo de reparo por atrito em uma unidade com capacidade de processamento de pinos, com forças axiais de até 245 kN, denominada Unidade de Processamento de Pinos por Atrito II. Dentre os parâmetros a serem otimizados, citam-se: força axial, velocidade de rotação do pino e comprimento de queima. Pretende-se, ainda, intervir no sistema de controle, de tal forma que esses parâmetros possam ser amplamente alterados durante a fase de otimização, sem que o motor de acionamento trave.

Com intuito de facilitar a compreensão do trabalho, os assuntos abordados estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo II: apresenta uma revisão teórica do processo de soldagem por atrito e do FHPP;
- Capítulo III: descreve os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos utilizados no equipamento de reparo;
- Capítulo IV: apresenta os ajustes/melhorias realizadas no controle de força do equipamento;
- Capítulo V: descreve os materiais utilizados e a metodologia empregada nos ensaios de reparo por atrito;
- Capítulo VI: mostra os resultados e uma discussão sobre os mesmos;
- Capítulo VII: apresenta as conclusões do trabalho em questão;
- Capítulo VIII: proposta de trabalhos futuros;
- Capítulo IX: referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A soldagem por atrito é uma técnica relativamente bem conhecida. O processo ocorre no estado sólido e sua aplicação industrial foi realizada, pela primeira vez, na União Soviética em 1956 (LEBEDEV e CHERNENKO, 1992). Além disso, a primeira patente já tinha sido concedida em 1891 (CROSSLAND, 1971).

O processo de reparo por atrito é um processo recente, sendo que foi desenvolvido em 1990 (ANDREWS e MITCHEL, 1990) e patenteado em 1993 (THOMAS, 1992). Apesar de ser um processo advindo da soldagem por atrito, ainda se tem pouco conhecimento sobre as características desse processo. Porém, por possuir os mesmos princípios físicos, os dois processos apresentam algumas semelhanças.

Devido a essas semelhanças, no presente trabalho serão apresentados o processo de soldagem por atrito e posteriormente, o processo de reparo de trincas por atrito.

2.1 Soldagem por Atrito

A soldagem por atrito é um processo altamente eficiente e econômico utilizado para unir partes de diferentes metais e polímeros (LEBEDEV e CHERNENKO, 1992). Atualmente, este tipo de solda está bastante difundido e é utilizado em vários setores da indústria: setor naval, petrolífero, aeronáutico, metal mecânico, automobilístico e indústrias siderúrgicas. Porém, esta técnica é muito utilizada em países mais avançados na automatização da indústria, tais como EUA e Japão. Em 2003, havia nesses dois países um

total de aproximadamente 1800 equipamentos para solda por atrito (SPINDLER, D.E., citado por MEYER, 2001).

A soldagem por atrito é um processo que ocorre no estado sólido, o calor é resultante do movimento relativo entre duas peças, as quais ficam submetidas a forças compressivas. O calor gerado devido ao atrito entre as peças, juntamente com as forças axiais, permite um escoamento plástico do material na superfície das peças em união (AWS, 1991)

Apesar de ser um processo no estado sólido, ou seja, nenhum dos materiais utilizados alcança a temperatura de fusão, alguns autores assumem que algumas partículas formam um filme de material fundido na interface dos materiais utilizados (WICHELHAUS, 1975). Porém, no final do processo, a região reparada não apresenta características de fusão do material (MEYER, 2002).

Outra característica interessante da solda por atrito é que o processo pode ser considerado auto-limpante, uma vez que durante o reparo as impurezas tendem a ser eliminadas juntamente com o *flash* ou rebarba. Portanto, eliminam-se algumas partículas que poderiam ser responsáveis pelo aparecimento de descontinuidades na região soldada.

O processo de soldagem por atrito pode ser dividido em quatro partes, como descrito a seguir:

- Parte 1: inicialmente é implementada rotação em uma das peças a serem unidas;
- Parte 2: as peças são colocadas em contato e a força axial é aplicada. Neste momento o atrito gera calor que juntamente com a força axial aplicada favorece o escoamento plástico do material;
- Parte 3: a rotação do consumível é cessada;
- Parte 4: aplica-se uma força axial de mesma intensidade ou superior a etapa anterior, caracterizando a etapa de forjamento.

A geração de energia mecânica, que posteriormente será transformada em energia térmica, pode ser obtida por dois métodos, de acordo com AWS (1991). No primeiro método, denominado soldagem por arraste contínuo, uma das peças é colocada em rotação, entra em contato com uma peça estática e uma força é aplicada durante um dado intervalo de tempo ou um deslocamento axial pré-determinado. Após esse tempo ou deslocamento a força é cessada e uma força igual ou superior a anterior é aplicada.

No segundo método, denominado de soldagem por atrito inercial, uma das peças é colocada em rotação acoplada a um volante de inércia até uma dada rotação. Quando a rotação é atingida, o volante é desacoplado e as peças são colocadas em contato através de uma força axial que é mantida até o final do processo.

A tabela 2.1, mostra a comparação entre os dois métodos aplicáveis.

Tabela 2.1: Comparação entre os dois métodos de soldagem por atrito. (FARIA, 2003)

Característica	Soldagem por Inércia	Soldagem por Arraste
Variáveis do processo	Velocidade relativa	Velocidade relativa
	Pressão	Pressão
	Inércia do volante	Duração do aquecimento
Tempo de soldagem	Menor	Maior
Energia de soldagem	Maior	Menor
Torque	Maior	Menor
Zona Termicamente Afetada	Menor	Maior
Resistência da solda	Maior	Menor

2.1.1. Variações do Processo

Existem diversas variações para a soldagem por atrito, sendo diferenciadas pela movimentação relativa entre as peças em processo de união. Deve-se observar as vantagens e desvantagens de cada alternativa em relação a aplicação necessária. A *American Welding Society* (AWS) divide as diferentes alternativas de soldagem por atrito em dois grupos: métodos convencionais e não convencionais. Dentre os métodos convencionais pode destacar: rotação básica, rotação contrária, *centre drive* e *twin welds*, os quais serão descritos abaixo (AWS,1991):

1) Método Convencional: neste método a primeira peça é colocada em rotação a segunda se mantém fixa. O mesmo é muito utilizado em indústrias automotivas envolvendo materiais similares e dissimilares. A figura 2.1 apresenta esquematicamente esse método.

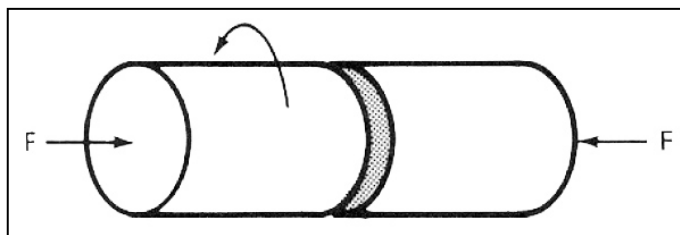


Figura 2.1: Método convencional, com uma peça fixa e outra em rotação. (AWS, 1991)

2) Método Rotação Contrária: este processo apresenta rotação das duas partes envolvidas no processo de união, como mostra a figura 2.2. De acordo com AWS (1991), para utilização deste método deve-se empregar altas velocidades de rotação às peças.

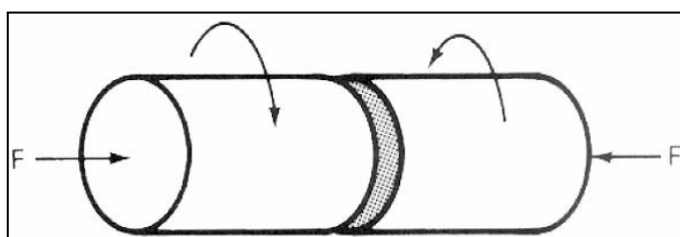


Figura 2.2: Método de rotação contrária, na qual as duas peças têm movimento em sentidos contrários (AWS, 1991)

3) Método *Centre Drive*: neste processo duas peças estacionárias são pressionadas contra uma terceira peça que se encontra em movimento e posicionada entre as duas, como ilustra a figura 2.3. Este é um processo que pode ser utilizado quando as peças a serem unidas são longas ou não podem ser colocadas em movimento de rotação, devido a ausência de um eixo de revolução. Porém, esse método tem como principal desvantagem a alta energia e potência requeridas (LEBEDEV e CHERNENKO, 1992).

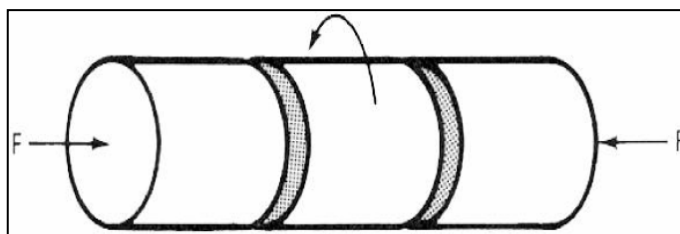


Figura 2.3: Método *Centre Drive*. Uma peça em rotação entre duas peças fixas. (AWS, 1991)

4) Método *Twin Welds*: este método envolve duas peças em rotação sendo pressionadas contra uma peça estacionária, entre as mesmas. Este processo é ilustrado na figura 2.4.

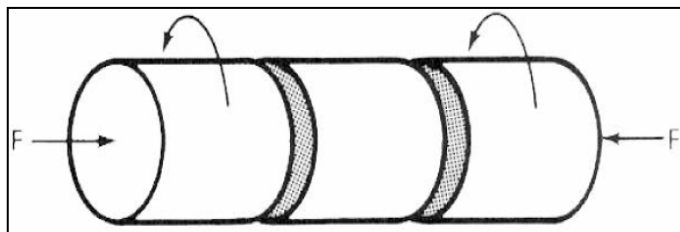


Figura 2.4: Método *Twin Welds*. Duas peças da extremidade são rotacionadas contra uma peça fixa no centro (AWS, 1991)

Como citado anteriormente, existem também os processo não-convencionais. Dentre eles citam-se: soldagem radial, *Friction Stir Welding* e *Friction Hydro Pillar Processing*. Esse último será discutido posteriormente, pois trata-se do principal assunto do presente estudo.

2.1.2. Ciclos de Soldagem

De acordo com LEBEDEV (1992) existem outras formas de variação do processo. Essas variações são caracterizadas pela alteração dos parâmetros, tais como força axial e/ou velocidade de rotação, durante o processamento da solda. Com isso pode-se obter uma nova microestrutura na região soldada, melhorando a qualidade da união metalúrgica.

Os ciclos propostos por LEBEDEV (1992) estão relacionados à variação de pressão durante o processo, sendo que cada uma das cinco configurações apresentam suas vantagens e desvantagens específicas. Além disso, os ciclos permitem uma maior flexibilidade do processo, ou seja, permite uma mesma unidade propulsora operar com maior variação dos parâmetros.

A escolha por um ou outro ciclo irá depender, além do tipo de material, similar ou dissimilar a ser soldado, das condições e qualidades finais requeridas (PIRES, 2007). Os 5 ciclos apresentados por LEBEDEV (1992) podem ser visualizados na figura 2.5 e são descritos brevemente a seguir:

A) Este ciclo apresenta uma pressão constante ao longo de todo o processamento. Esse é um ciclo utilizado para casos de soldas mais simples;

B) Neste são utilizados dois estágios, sendo que o segundo apresenta uma pressão maior, porém por um menor tempo. O início do processo com pressões menores favorece a utilização de unidades propulsoras de menor potência, pois a primeira etapa funciona como um estágio de aquecimento;

C) Este ciclo é composto por três variações de pressão durante o processo. O primeiro estágio precede a fase de aquecimento, sendo conhecido como *lapping stage*. Este estágio é responsável por livrar a região da solda de impurezas e inclusões, sendo que a pressão utilizada deve ser aproximadamente metade do estágio de aquecimento (LEBEDEV, 1992);

D) Como mostrado na figura 2.5, este ciclo apresenta uma elevação constante da pressão após início do processo. Isso resultará na redução do torque inicial ou possibilitará o uso de um equipamento de menor potência. Esse ciclo é adequado quando se trabalha com elevadas espessuras;

E) Este processo apresenta uma redução de pressão após o início do processo e um aumento no final. Isto é utilizado para reduzir taxa de aquecimento entre outras características.

Pode-se variar o processo de soldagem por atrito de mais duas formas: alterando o valor da rotação durante o processo ou variar rotação e pressão simultaneamente, como mostrado na figura 2.6. Esta variação permite uma maior flexibilidade utilizando uma mesma unidade propulsora.

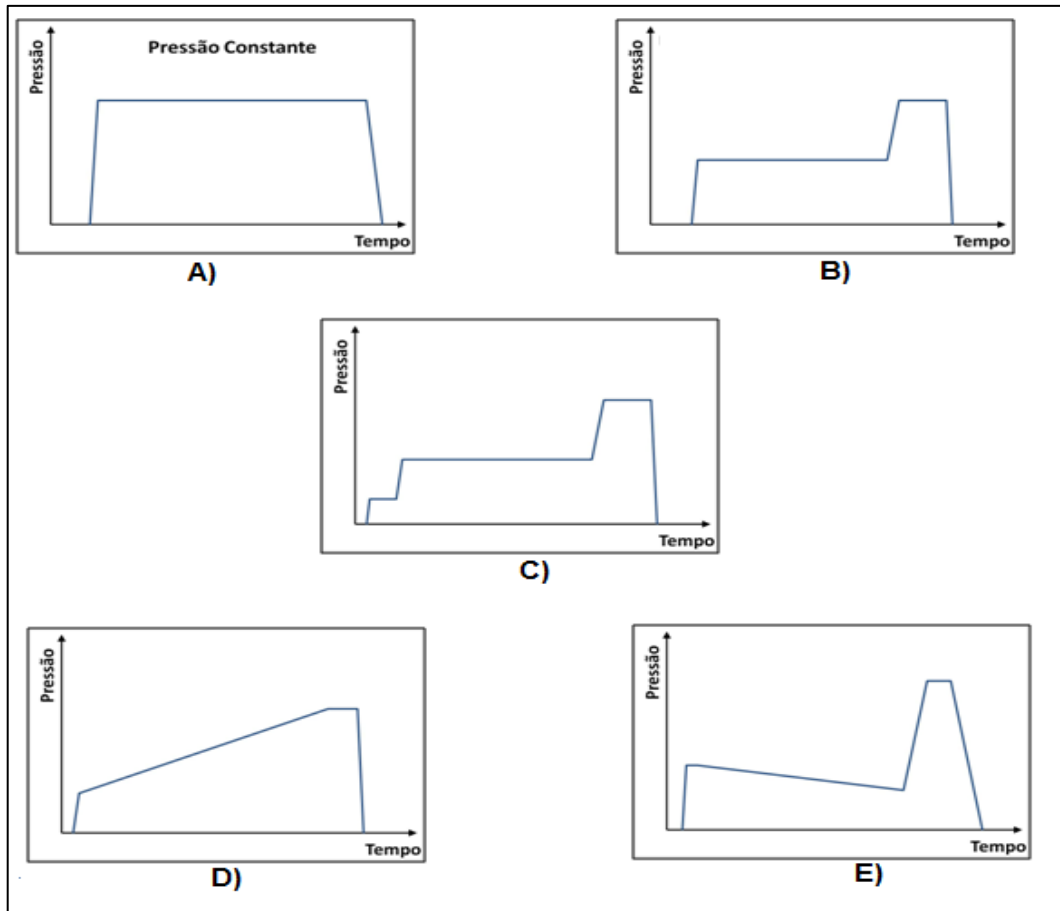


Figura 2.5: Variações do processo de soldagem de acordo com LEBEDEV (1992): A) Pressão Constante durante o processo B) Processo com dois ciclos de pressão C) Processo com três ciclos de pressão D) Processo com elevação constante de pressão E) Processo com redução de pressão após início do processo

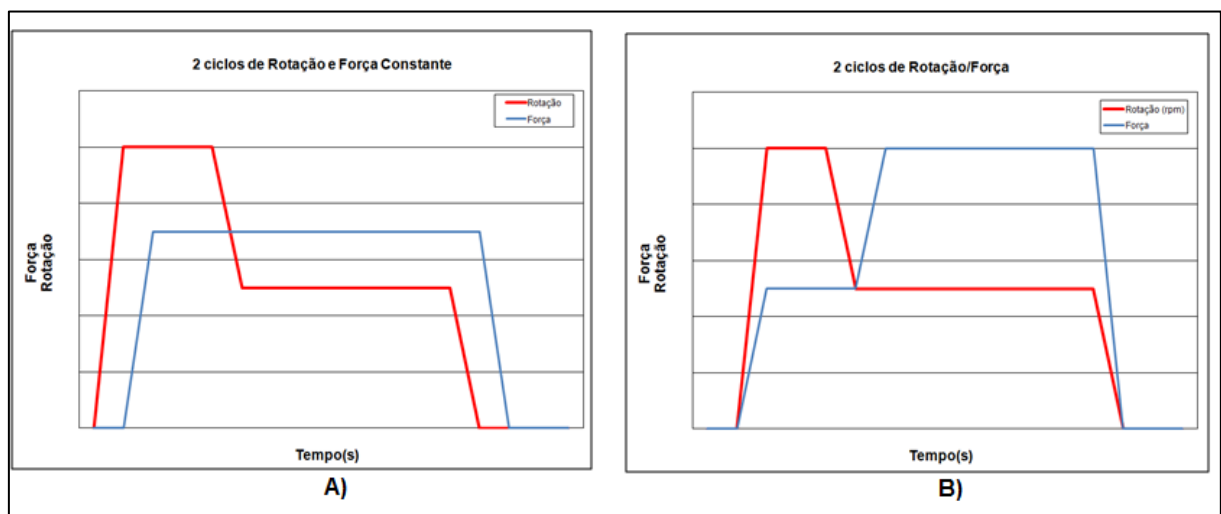


Figura 2.6: Variação de pressão e rotação durante o processo. A) Processo com pressão constante e dois ciclos de rotação B) Processo com dois ciclos de pressão e rotação.

2.1.3. Fases do Processo

A solda por atrito parece um processo de soldagem simples, porém, na realidade, é extremamente complexo, pois é um processo constituído por um conjunto de interações entre muitos fenômenos. Dentre tais fenômenos, podem-se citar: liberação de calor intensa nas superfícies de contato, recristalização, deformação elástico-plástica de microrregiões próximas a superfície, entre outras. (LEBEDEV e CHERNENKO, 1992).

Com intuito de melhorar a compreensão das transformações ocorridas durante o processo de soldagem por atrito, esse foi dividido em fases. De acordo com MEYER, diferentes autores dividem os processos em diferentes números de fases, sendo possível utilizar 2, 3, 4, 5 e 6 fases. A divisão em quatro fases é a mais comum, sendo esta a apresentada neste trabalho, como mostra a figura 2.7. Nesta figura estão representados os gráficos dos principais parâmetros do processo de solda por atrito: velocidade de rotação, torque, pressão axial e taxa de queima, sendo cada gráfico dividido nas quatro fases: fase de fricção, aquecimento, parada e forjamento, que serão detalhadas a seguir.

I) Fase de Atrito: no início desta fase ocorre a interação mecânica entre asperidades das superfícies de contato, as quais são submetidas a elevadas tensões, uma vez que se tem uma pequena área de contato (PIRES, 2007). Devido ao atrito, a essa alta pressão local e altas rotações nas superfícies externas, as rugosidades da superfície são parcialmente “amaciadas” por deformação elástica, plástica e fusão local, iniciando nas regiões mais externas (VILL, 1962). Se a temperatura atingir a temperatura de fusão ou temperaturas ainda mais altas, a geração de calor reduz, então a mesma dissipação de calor e união não podem ser mantidas (NEUMMAN, 1991). Além disso, se o material sofre deformação plástica, a taxa de recristalização é mais baixa que a taxa de deformação, o que leva a ruptura das micro-soldas local (MEYER, 2002).

Também nessa fase, os contaminantes e resíduos presentes são expelidos para o exterior da união devido às elevadas forças radiais, sendo que esse fenômeno acontece principalmente na zona mais externa e é conhecido como hidro-extração (CROSSLAND, 1971).

Como resultado do processo, o momento de atrito, o calor gerado e a temperatura elevam-se significativamente. Esse pico do atrito é causado pelo incremento de superfícies rugosas e remoção do filme contaminante, que permite um contato direto dos metais, o que aumenta o coeficiente de atrito.

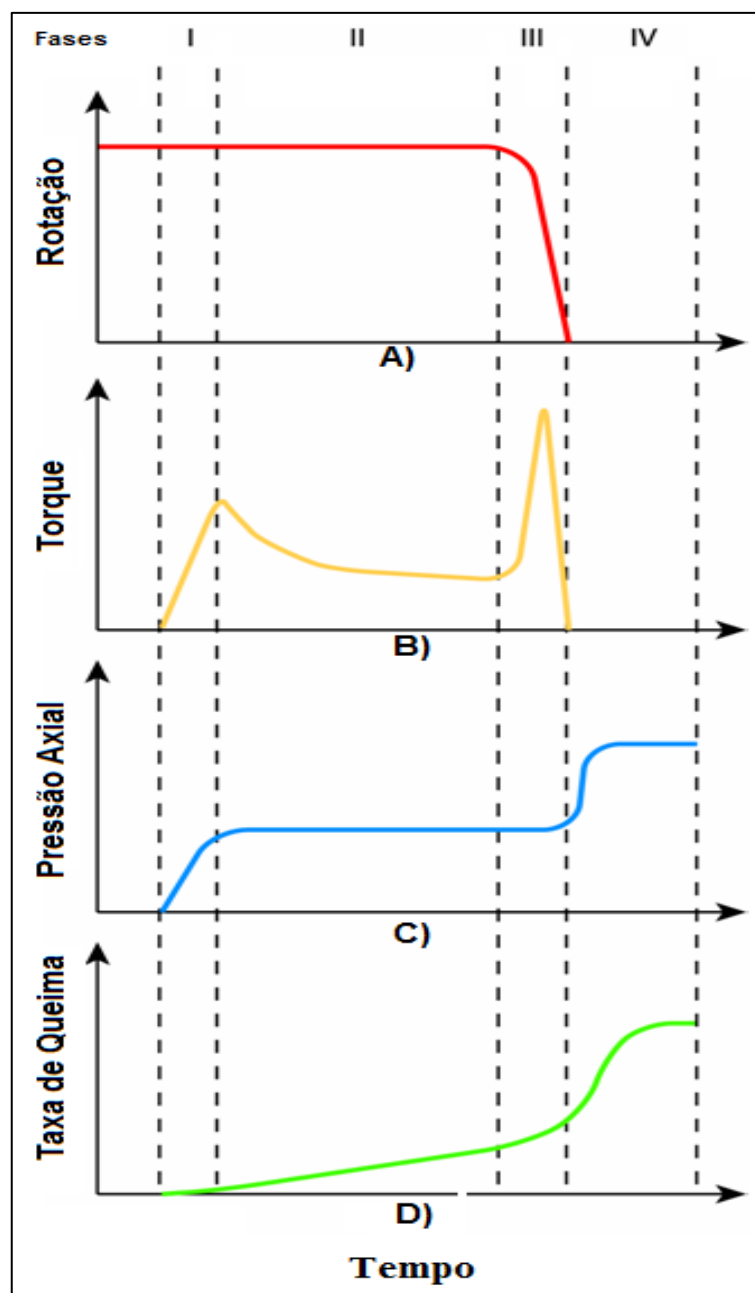


Figura 2.7: Esquema ilustrativo das fases do processo de soldagem – I) Fase de atrito, II) Fase de aquecimento, III) Fase de parada e IV) fase de Forjamento (MEYER, 2002).

II) Fase de Aquecimento: nesta fase há um aumento de temperatura, sendo que o anel de material plastificado se estende em direção ao centro de rotação, que tem uma temperatura relativamente mais baixa. Após esse aquecimento da região central, ou região de menor velocidade, a deformação plástica tende a atingir as zonas externas da região de equilíbrio. A figura 2.8 ilustra esse processo.

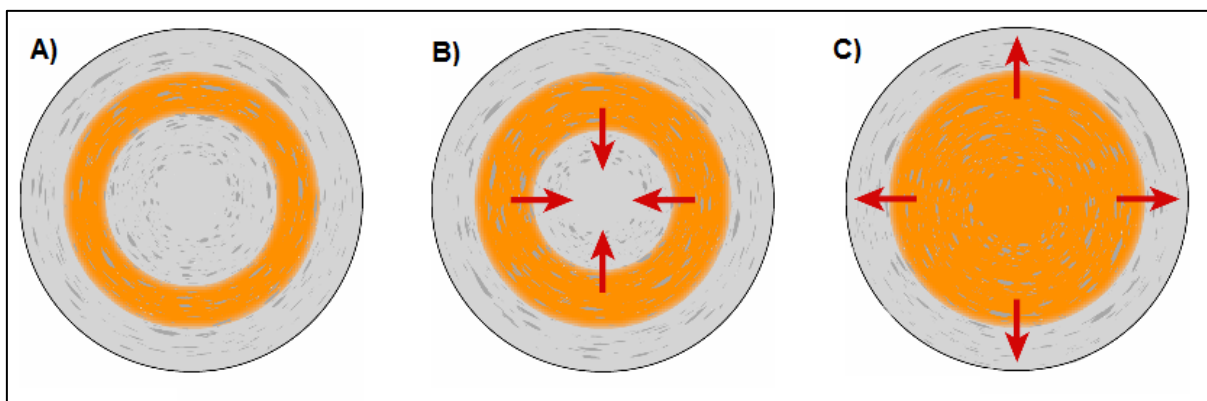


Figura 2.8: Desenho esquemático da área plastificada ao longo do tempo. Primeiramente tem-se uma deformação em direção ao centro e posteriormente em direção às extremidades do material (MEYER, 2002).

Neste ponto o processo atinge uma situação estável e passa a operar através da autoregulação. Isso resulta do equilíbrio térmico da área de atrito e da zona correspondente. Uma taxa de queima constante é estabelecida e com a crescente saturação térmica das peças a energia necessária para deformação plástica é reduzida, exigindo um momento de atrito menor (BETHLEHEM, 1984). Porém, com o crescente aparecimento do *flash* (material extrudado para extremidades da união) a superfície de atrito aumenta e eleva o momento de atrito, equilibrando os fenômenos e mantendo o torque praticamente constante (WANG, 1970), conforme mostrado na figura 2.8.

O final dessa segunda fase é caracterizado pelo alcance de um parâmetro pré-estabelecido, o qual pode ser um tempo, o comprimento de queima (quantidade de material consumida) ou temperatura.

III) Fase de Frenagem: esse é o período de desaceleração do processo. A temperatura reduz, a resistência ao cisalhamento aumenta, devido à baixa taxa de deformação e, consequentemente, aumenta o torque, o qual atinge o segundo pico, conforme mostrado na figura 2.7-II (CROSSLAND, 1971).

O final desta etapa é caracterizado pela finalização da rotação, o que determina a formação intensificada das uniões metalúrgicas (PIRES, 2007).

IV) Fase de Forjamento: é caracterizada por cessar a rotação e manter ou elevar a força utilizada durante o processo. Isso resulta em um aumento da taxa de queima e do momento de atrito (EICHHORN, 1968).

Muitos autores tem opinião comum de que a etapa de forjamento melhora as propriedades mecânicas do material soldado, além do que funciona como alívio de tensões.

2.1.4. Parâmetros importantes para a qualidade do reparo

O processo de soldagem por atrito é complexo e apresenta muitos parâmetros que influenciam no mesmo. Dentre esses parâmetros, quatro apresentam maior relevância quanto à influência ou importância na qualidade do reparo e na energia requerida pelo processo: velocidade de rotação, força axial, tempo de aquecimento e taxa de queima.

Os parâmetros têm interação entre si, porém para um entendimento mais claro da influência de cada um, os mesmos serão detalhados separadamente a seguir:

I) Velocidade de Rotação: a faixa de operação é vasta e limitada pelo equipamento utilizado, porém a influência na qualidade da solda é menor que outros parâmetros, tal como força axial (AWS, 1991). De acordo com Vill, cada par de material apresenta uma velocidade ótima de processo, assim, o aumento ou redução da velocidade pode não significar um aperfeiçoamento do processo.

Com o aumento da velocidade de rotação, as superfícies sofrem uma ação denominada polimento, o que reduz o atrito entre as partes e, conseqüentemente, aumenta o tempo de aquecimento. Este longo tempo de aquecimento resulta em uma maior propagação de calor e um maior volume do material processado é aquecido. Dessa forma, no final do processo obtêm-se maiores zonas termicamente afetadas (ZTA's) e menor taxa de resfriamento, que ocasionaram queda nas propriedades mecânicas, tais como, limite de resistência e dureza (ELLIS, 1992).

Por outro lado, a redução da velocidade de rotação eleva a interação mecânica entre as superfícies, aumenta o torque e, portanto, exige uma maior potência do equipamento de propulsão. Além disso, devido ao baixo tempo de aquecimento, tem-se uma taxa de resfriamento alta, o que pode resultar em uma excessiva dureza, como foi demonstrado no trabalho de PIRES (2007), porém utilizando um caso semelhante a solda por atrito, que foi o reparo por atrito.

II) Força Axial: a força axial é um parâmetro de extrema relevância para o resultado da solda por atrito, sendo a mesma responsável por manter as partes em contato durante todo o processo e, dessa forma, evitar a presença de partículas estranhas na interface. Porém, deve-

se ressaltar que o aumento da força axial eleva a temperatura local e a taxa de queima (ELLIS, 1972) e, conseqüentemente, reduz o tempo de processamento. O aumento da força axial também proporciona um estreitamento na ZTA, a qual se propaga de forma cônica na direção axial.

Recomenda-se a utilização de forças axiais mais altas, a qual eleva a temperatura e favorece a obtenção de uma microestrutura mais refinada, o que melhora a tenacidade da estrutura final (AWS, 1991). Deve-se observar a microestrutura dos ensaios realizados, pois havendo a formação de bainita e/ou martensita pode piorar a tenacidade.

Vale lembrar, que quanto maior a força axial aplicada mais robusto deve ser o equipamento de propulsão e maiores as chances de um travamento do equipamento durante o processo, uma vez que isso eleva o torque necessário a execução do processo.

III) Tempo de Aquecimento: este é o período desde o início do contato entre as superfícies até o momento em que a velocidade de rotação é nula (VILL 1962 e ELLIS 1972). Este parâmetro é influenciado pela velocidade rotacional e pela força axial, sendo diretamente proporcional ao primeiro e inversamente ao segundo. Esse tempo de aquecimento juntamente com a quantidade de *flash* formado, irá influenciar na taxa de resfriamento, que por sua vez influencia nas propriedades mecânicas da estrutura final (MEYER, 2002).

O tempo de aquecimento também pode ser utilizado como um parâmetro de controle para o processo de solda por atrito. Portanto, neste modo de controle, o processo é finalizado ou a rotação é cessada após atingir um certo tempo de ensaio.

IV) Taxa de Queima: este parâmetro representa a quantidade de material consumida durante um intervalo de tempo. Este é influenciado pela velocidade de rotação e da força axial, sendo que o aumento da velocidade reduz a taxa de queima, enquanto o aumento da força aumenta a taxa de queima (MEYER, 2002).

A utilização do comprimento de queima, que é influenciado pela taxa de queima, é muito comum para controle do processo.

Um resumo da interação entre os parâmetros do processo pode ser visto na figura 2.9.

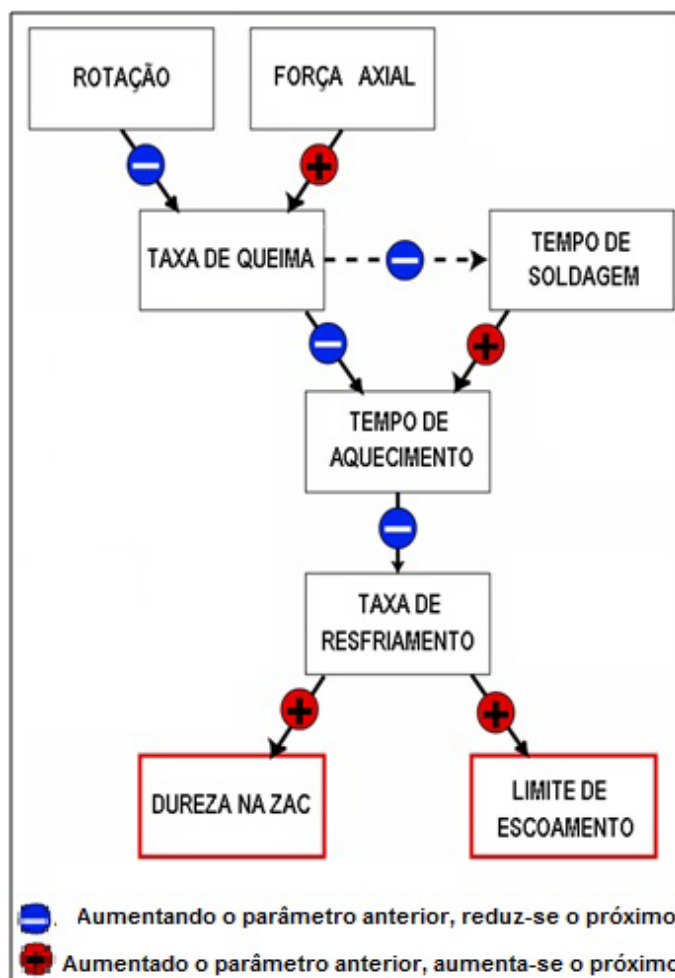


Figura 2.9: Ilustração da interação entre os parâmetros (MEYER, 2002).

2.1.5. Influência dos parâmetros nas propriedades

A influência dos parâmetros no processo de solda por atrito foi relacionada por muitos autores. Porém, esta influência está relacionada a cada parâmetro separadamente, não considerando um processo de interação entre os mesmos. A tabela 2.2 mostra a relação entre os parâmetros e as propriedades mecânicas.

Tabela 2.2: Influência dos parâmetros nas propriedades mecânicas (MEYER, 2002).

Parâmetro	Resistência a tração	Dureza
Velocidade de Rotação	O aumento na velocidade de rotação reduz a resistência à tração, devido ao maior tempo de aquecimento e menor taxa de resfriamento.	Aumento da velocidade de rotação reduz a dureza, pois aumenta o tempo de aquecimento.
Força Axial	Com o aumento da força axial ocorre um aumento da resistência a tração, pois a quantidade de calor gerada é menor.	O aumento da força axial resulta também em aumento da dureza
Taxa de queima	Menor tempo de queima resulta em aumento da resistência a tração, pois a ZTA é mais estreita e a taxa de resfriamento é maior.	Maior tempo de solda e menor taxa de resfriamento reduz a dureza. Este é o parâmetro mais importante para controlar a dureza.
Força de Forjamento	Uma força de forjamento adequada pode melhorar a ductilidade, além de aumentar a dureza e a resistência à tração.	

2.2 Processamento de Pinos por Atrito

O processamento de pinos por atrito ou *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP), como citado no capítulo I, é um processo de soldagem alternativo baseado na solda por atrito. Este é um processo recente que está sendo desenvolvido pelo TWI desde a década de 90, a qual apresentou um pedido de patente em 1993 (THOMAS e NICHOLAS, 1992).

2.2.1. Descrição do Processo

O processo pode ser dividido em duas etapas: I) abertura de um furo cego no local de trinca, II) Preenchimento do furo por meio de um pino consumível inicialmente rotacionado e depois submetido a um esforço de compressão, através de uma força normal controlada. A presença desse pino consumível é o principal diferencial em relação a solda por atrito (SOUZA, 2006).

O movimento relativo entre o pino consumível e o substrato proporciona geração de calor por atrito, o que aumenta o aquecimento e reduz o limite de escoamento do material. Esse efeito térmico favorece o escoamento plástico e permite o preenchimento completo do furo. O material em fluxo plástico se desloca axialmente ao longo do pino, como ilustrado na figura 2.10. (THOMAS e NICHOLAS, 1992).

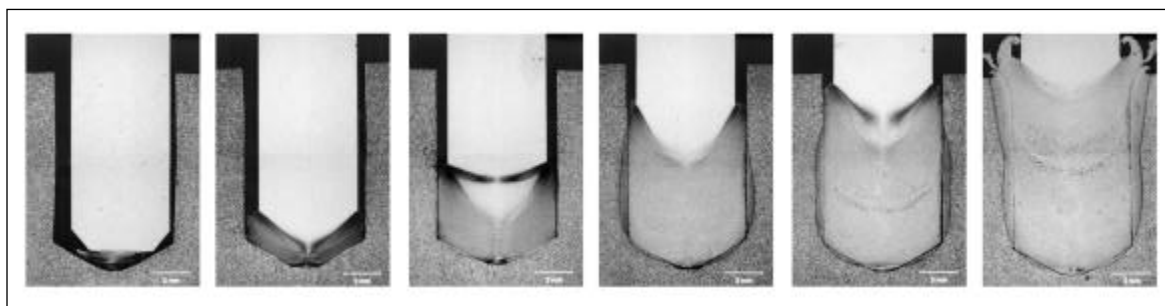


Figura 2.10: Ilustração do escoamento do material (THOMAS e NICHOLAS, 1992).

O produto dos efeitos da deformação e do aquecimento gerado durante o processo é uma ZTA (UNFRIED, 2008). As temperaturas e tempos de processamento no FHPP são muito menores que os observados nos demais processos de soldagem e, conseqüentemente, tem-se uma ZTA menor, o que proporciona uma melhoria, pois as alterações na microestrutura do material base serão reduzidas, quando comparadas aos outros processos.

O processo de reparo por atrito é um processo que ocorre no estado sólido, ou seja, nenhum dos materiais utilizados alcança a temperatura de fusão, apesar de alguns autores assumirem que algumas partículas formam um filme de material fundido na interface dos materiais utilizados (WICHELHAUS, 1975). Isso elimina alguns defeitos metalúrgicos, tais como: fragilização por hidrogênio e porosidade. Além disso, por ser um processo no estado sólido, o reparo por atrito não é afetado pela pressão do ambiente (NIXON, 1986). Assim, ele pode ser utilizado em altas profundidades, sem interferências do ambiente. Outra característica interessante, é que o processo pode ser considerado auto-limpante, uma vez que durante o reparo as impurezas tendem a ser eliminadas juntamente com o *flash* ou rebarba. Portanto, eliminam-se algumas partículas que poderiam ser responsáveis pelo aparecimento de descontinuidades. Além disso, essa técnica permite a união metalúrgica de materiais dissimilares, o que é de extrema dificuldade utilizando algumas de técnicas de soldagem convencionais.

Os principais parâmetros do processo são os mesmos da solda por atrito: força normal, velocidade relativa de rotação, tempo de aquecimento, comprimento e taxa de queima,

velocidade de frenagem e força de forjamento. Como o FHPP é um processo baseado nos processos difusionais para gerar a união metalúrgica, assim como a solda por atrito, pode-se fazer uma analogia quanto à influência dos parâmetros nas duas técnicas.

Porém, para o FHPP não se tem ainda análise clara de como todos os parâmetros se comportam conjuntamente, lembrando que o tipo de material e a geometria são de extrema importância na qualidade final do reparo.

2.2.2. Vantagens e desvantagens do reparo por atrito

O processo de reparo por atrito apresenta algumas vantagens quanto à qualidade, custo e flexibilidade, como citado anteriormente, porém também apresenta algumas limitações. Algumas dessas características estão citadas a seguir:

I) Vantagens do reparo por atrito no reparo de peças confeccionadas em ligas ferrosas:

- Processo no estado sólido, eliminando os riscos de porosidade, segregação e adsorção de hidrogênio;
- Baixo calor introduzido, o que proporciona um estreitamento da ZTA;
- Possibilidade de automatização do processo, o que melhora a qualidade e minimiza a exposição de operadores às condições adversas;
- Permite a união de materiais dissimilares;
- Permite reparo de trincas passantes e não passantes, como mostrado no trabalho de HWANG (2010).

II) Desvantagens do reparo por atrito:

- Custo inicial elevado, devido aos equipamentos utilizados;
- Muitas vezes o processo requer equipamentos robustos devido às altas pressões utilizadas.

2.2.3. Equipamentos desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD)

Devido às vantagens apresentadas anteriormente, foram desenvolvidos quatro equipamentos no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, com intuito de explorar e entender melhor os parâmetros do processo de reparo por atrito. Esses equipamentos tem algumas diferenças, como é descrito brevemente a seguir:

I) UPPA I: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito através do qual pode-se realizar reparos com força axial de 50 kN e velocidade de rotação de até 8000 rpm, como demonstrado no trabalho de PIRES (2007);

II) UPPA II: Unidade através da qual permite-se realizar reparos com força de 245 kN e rotações de até 3000 rpm. Essa unidade é apresentada detalhadamente no presente trabalho, pois é o equipamento em estudo e através do qual se realizou os testes de reparo apresentados;

III) UPPA III: Unidade que permite realizar reparos com força de 500 kN e rotações de até 3000 rpm. A unidade hidráulica desse equipamento é a mesma da UPPA II, porém a cabeça de reparo é diferente, como mostrado no trabalho de MAREGA (2011);

IV) UPPA IV: trabalho que concebeu, projetou, construiu e testou um cilindro de reparo portátil, com capacidade de força axial de 40 kN e rotação de 5.000 rpm, para trabalhar em ambiente submerso (água do mar) até 3 bar, como mostrado no trabalho de HWANG (2010).

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE REPARO POR ATRITO

O equipamento utilizado para execução dos ensaios, denominado Unidade de Reparo por Atrito II (UPPA-II), foi desenvolvido no LTAD da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em conjunto com a Petrobras. O mesmo tem um alto grau de complexidade e como se trata de um equipamento construído exclusivamente para execução deste processo, será descrito mais detalhadamente nos subcapítulos seguintes. Com intuito de simplificar a compreensão desse equipamento, a descrição será subdividida em três partes: mecânica, elétrica e controle.

3.1 Sistema Mecânico

A parte mecânica do UPPA-II foi construída para sustentar e aplicar as forças axiais e rotações necessárias para realização do reparo. O sistema mecânico possui duas partes distintas e igualmente importantes: sistema hidráulico e cabeça de reparo. Os mesmos serão descritas separadamente, a seguir.

3.1.1. Sistema Hidráulico

O sistema hidráulico é responsável pelo fornecimento de óleo ao motor hidráulico e ao cilindro hidráulico.

Dentre os inúmeros componentes deste sistema, destacam-se: dois conjuntos motobomba, um motor diesel e um reservatório com capacidade de armazenamento de 630 litros de óleo hidráulico. A figura 3.1 mostra uma foto do equipamento, destacando-se a motobomba 1, motobomba 2 e motor diesel.

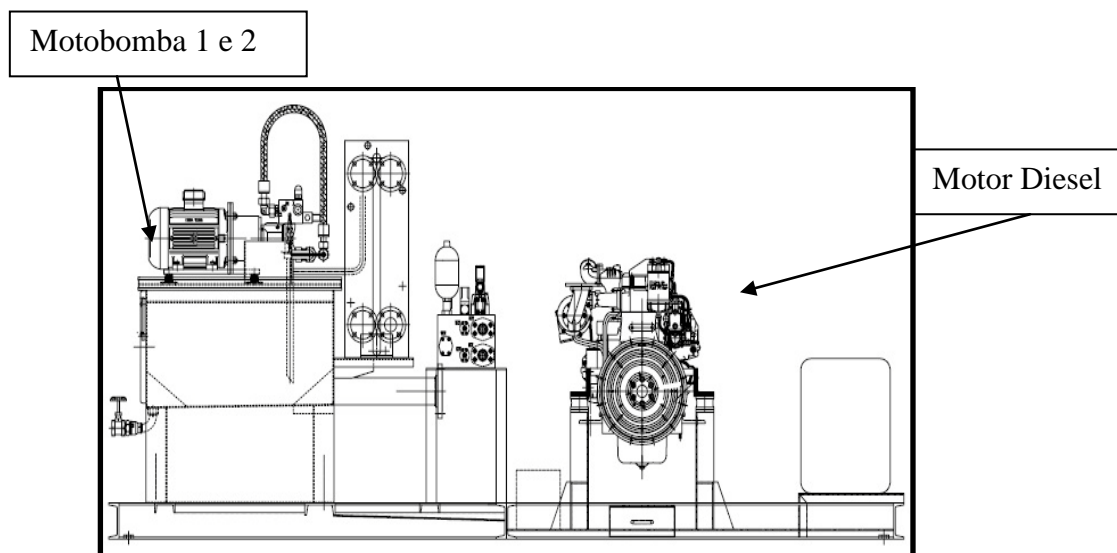


Figura 3.1: Foto do sistema hidráulico do UPPA-II, mostrando alguns elementos: Motobomba 1, responsável por fornecer óleo ao cilindro hidráulico; Motobomba 2, responsável pela circulação de óleo e Motor Diesel, responsável pela rotação do sistema.

O conjunto motobomba 1, conforme destacado na figura 3.1, é responsável pelo fornecimento de óleo ao cilindro hidráulico. Este conjunto opera com potência 10 CV, sendo a pressão e vazão máxima de trabalho de 290 bar e 12 l/min, respectivamente.

O outro conjunto motobomba 2, com potência de 7 CV, mostrado na figura, é responsável por promover a recirculação do óleo. Essa recirculação ocorre nos momentos em que o motor está ligado, porém não está enviando óleo para cabeça de reparo, ou seja, o ensaio de reparo por atrito não está sendo executado. Esse óleo em recirculação passa por um trocador de calor, evitando um superaquecimento do mesmo e qualquer alteração nas suas propriedades, o que seria prejudicial ao funcionamento do sistema. Quando o tempo de operação do sistema é relativamente extenso, torna-se necessário o acionamento de uma torre de refrigeração, que resfria a água que circula pelo sistema e consequentemente minimiza o superaquecimento do óleo.

O sistema também contém um motor diesel, responsável pelo fornecimento de óleo para acionamento do motor hidráulico conectado à cabeça de reparo. Este motor, produzido pela MWM e com potência de 185 CV, é ligado a uma bomba com vazão máxima de

180 l/min e pressão máxima de 350 bar. Com esses parâmetros, o sistema garante o fornecimento de óleo para implementação da rotação do pino e alcance de um torque de 500 N.m, o que permite realização de ensaios com cargas axiais elevadas.

Vale ressaltar, que o conjunto motobomba 1 e motor diesel são ligados ao bloco de válvulas, que controla a passagem de óleo para cabeça de reparo, através de mangueiras longas, com comprimento de 60 metros. As mangueiras condutoras de óleo têm esse comprimento com intuito de simular uma aplicação real, na qual os motores ficam sob a plataforma de petróleo e o bloco de válvulas, juntamente com a cabeça de reparo, são deslocadas até o ponto, onde será realizado o reparo por atrito.

3.1.2. Cabeça de Reparo

A cabeça de reparo é o dispositivo mecânico mais complexo do sistema. Esta unidade é responsável por aplicar a força e rotação ao sistema de reparo por atrito. Podem-se destacar duas partes nesta unidade: motor hidráulico e cilindro de acionamento como são mostrados na figura 3.2 e detalhados posteriormente.

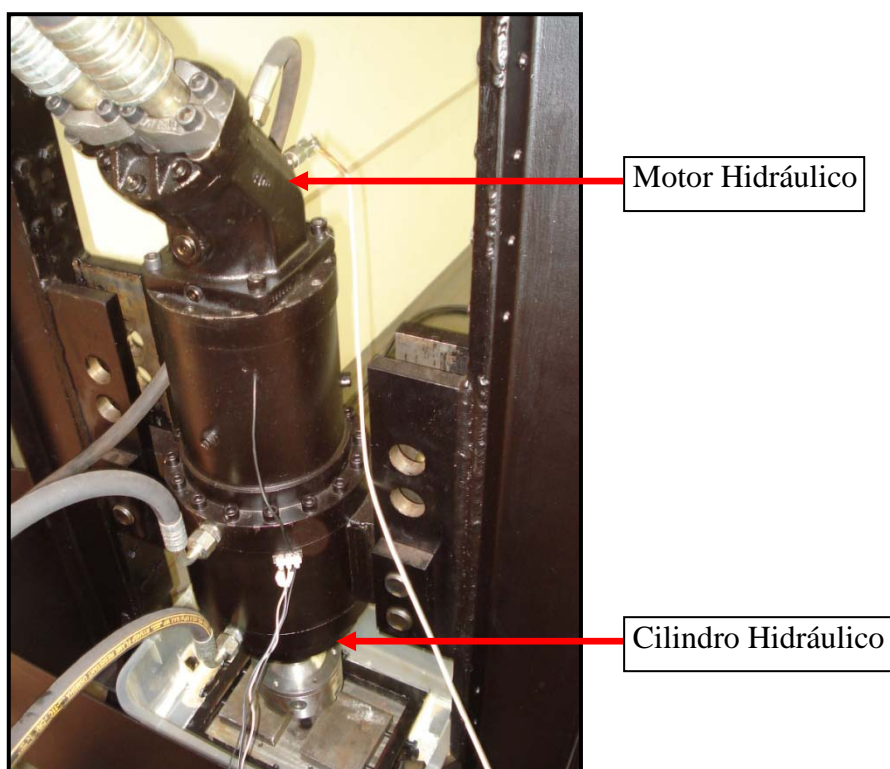


Figura 3.2: Cabeça de reparo, destancando-se o motor hidráulico responsável pela rotação e do cilindro hidráulico responsável pela força e deslocamento.

O cilindro hidráulico é responsável pela aplicação da força axial ao eixo, no qual o pino (consumível do processo de reparo) é fixado através de uma placa de três castanhas. Para aplicação dessa força, a haste recebe, através das mangueiras, o fluxo hidráulico enviado pelo conjunto motobomba de 10 CV. O sentido do movimento hidráulico e, conseqüentemente, da aplicação da força é definido por uma válvula servossolenóide, localizada no bloco de válvulas do sistema. O acionamento dessa válvula é realizado por um cartão de controle de força, como será descrito posteriormente. A força máxima aplicada pela haste hidráulica é de 245 kN.

O motor hidráulico é responsável pela implementação da rotação ao eixo e, conseqüentemente, ao pino. Para isto, o motor hidráulico recebe, através de mangueiras, um fluxo hidráulico enviado pelo motor diesel de 185 CV. O sentido de rotação do motor hidráulico depende da entrada e saída de óleo pelas mangueiras, sendo que o mesmo pode ser invertido através de uma válvula direcional proporcional, controlada por um cartão digital de controle de rotação.

A velocidade de rotação do pino é diretamente proporcional à rotação do motor hidráulico, sendo que a velocidade máxima de rotação desse motor é de 4500 rpm.

Além da velocidade de rotação, o motor hidráulico é o componente que fornece o torque para o sistema. O torque máximo, de acordo com o fornecedor, de 500 N.m, sendo que esse valor é atingido quando se tem uma pressão de 400 bar.

O equipamento não contempla um torquímetro acoplado ao eixo rotativo. O monitoramento do torque é realizado através da diferença de pressão na entrada e saída de óleo do motor hidráulico e com essa diferença de pressão e as características construtivas do motor, pode-se estimar o torque.

É importante lembrar que a cabeça de reparo foi acoplada ao pórtico de sustentação do equipamento através de parafusos, com intuito de permitir maior flexibilidade a altura das amostras ensaiadas. Além disso, esse pórtico visa minimizar a os efeitos da vibração ou deformação no momento de aplicação de altas cargas axiais.

3.2 Sistema Elétrico

O sistema elétrico do UPPA-II é composto por uma extensa gama de componentes, sendo que os elementos principais desse sistema são: motores elétricos, válvulas servossolenóides, sensores diversos e painel elétrico.

Os dois motores de indução, com potência de 7,5 CV e 10,0 CV, que fazem parte dos conjuntos motobomba que foram descritos anteriormente, são alimentados com tensão 220 V e acionados diretamente. O painel contém quatro botoeiras, sendo que uma aciona os dois motores ao mesmo tempo e outra que os desaciona. Os motores são acionados simultaneamente para evitar que o equipamento inicie a operação e proporcione um aquecimento do óleo, quando o motor de recirculação não for acionando por falha humana, elétrica ou mecânica. As outras duas botoeiras, contidas no painel, são utilizadas para habilitar e desabilitar o motor diesel. Portanto, percebe-se que o motor diesel somente será ativado, através da chave manual liga/desliga, após a botoeira estar ativada. Novamente, essa é uma interligação de segurança, com intuito de evitar que o motor diesel seja ligado sem que o operador do sistema esteja ciente da operação.

No painel elétrico, além das botoeiras mencionadas anteriormente, estão inseridos outros componentes, podendo destacar os seguintes: disjuntores, controlador lógico programável (CLP), Interface Homem-Máquina (IHM), módulos auxiliares de entrada e saída de sinais (digitais e analógicos), fontes de tensão contínua (24 V e ± 15 V) e alternada (220 V), cartões PID (Proporcional Integral Derivativo) de controle de força e velocidade de rotação, conversor frequência em tensão, subtrator, relés e contatores. A figura 3.3 mostra uma foto desse painel elétrico destacando os principais componentes para controle do sistema e, conseqüentemente, para o trabalho.

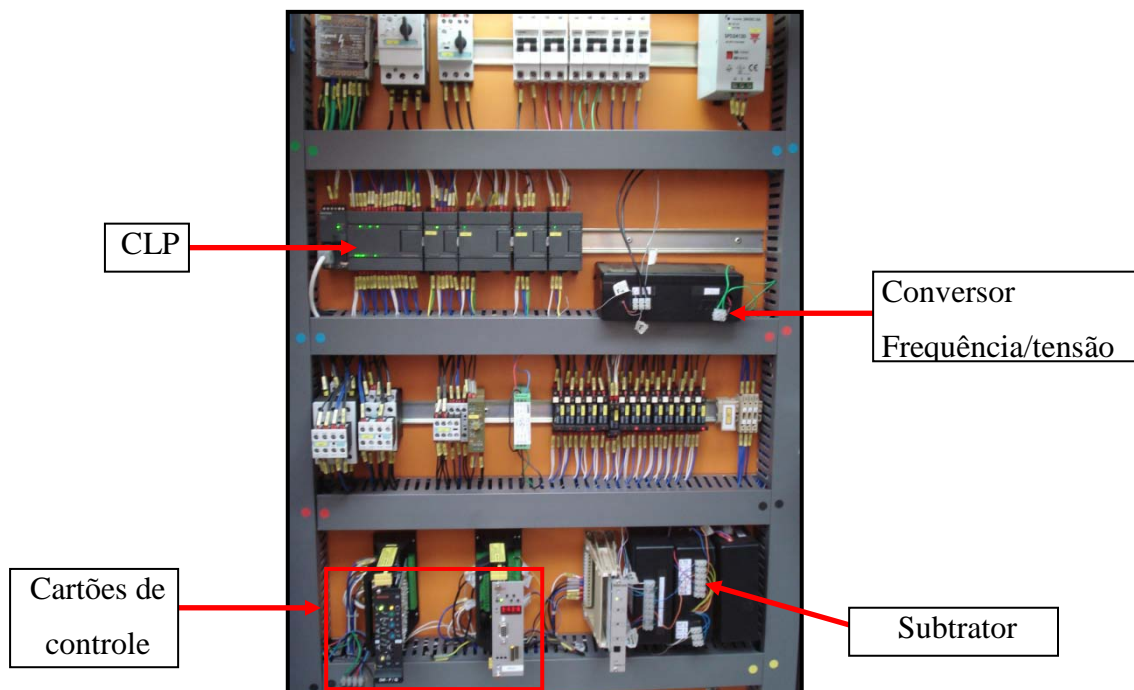


Figura 3.3: Painel elétrico e identificação dos principais elementos.

As válvulas são habilitadas e desabilitadas através de sinais provindos dos cartões de controle ou do controlador lógico programável. Essas são utilizadas tanto para controle de vazão do óleo definindo, assim, a velocidade de rotação e a força axial, quanto para escolha do sentido de movimento, rotacional e deslocamento vertical, do pino consumível. Esses equipamentos serão descritos mais detalhadamente no subcapítulos que se seguem.

3.3 Sistema de Controle

Como visto na seção anterior, o painel é composto por inúmeros componentes. Alguns desses componentes, tais como, cartões PID de controle, CLP, conversor frequência/tensão, e outros externos ao painel como sensores e válvulas servossolenóides, foram inseridos no sistema com o intuito de aplicar a automação do mesmo e melhorar as análises e controle do sistema. Com a inserção desses foi possível obter um sistema de controle de malha fechada, controlando, dessa forma, alguns parâmetros do sistema como pressão e rotação do cilindro. Além disso, outros parâmetros importantes, como por exemplo, posição, foram apenas monitorados, com intuito de observar a sua variação e influência dentro do processo de reparo por atrito.

O principal elemento de controle do processo é o CLP, pois é através dele que se obtém a sequência lógica das operações. Este componente recebe sinal e armazena o valor de todas as variáveis referentes ao ensaio e, durante o processo, toma as decisões em função dos acontecimentos e valores pré-estabelecidos pelo operador. Por esse motivo foi conectado ao CLP uma Interface Homem-Máquina, onde o operador define os valores e parâmetros que são necessários para o controle do processo.

Para facilitar e simplificar o entendimento do sistema de controle inserido na Unidade de Processamento de Pinos por Atrito II, a descrição do mesmo será subdividida em três partes: Instrumentação, Cartões de Controle e Programa de Controle, sendo que essas partes são dependentes e interligadas no processo.

3.3.1. Instrumentação

A instrumentação é a ciência que projeta, constrói, instala, opera e mantém os instrumentos. Por essa definição pode-se perceber a importância da mesma no sistema de controle da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito II.

Define-se como Controlador Lógico Programável um dispositivo de estado sólido - um Computador Industrial, capaz de armazenar instruções para implementação de funções de controle (sequência lógica, temporização, contagem, entre outras), além de realizar operações lógicas e aritméticas, manipulação de dados e comunicação em rede.

O CLP utilizado para controle do equipamento de reparo por atrito foi o S7-200 224XP, série S7-200 da SIEMENS. Esse CLP contém: duas entradas analógicas, uma saída analógica, quatorze entradas digitais, dez saídas digitais e uma memória de 10 kbyte.

Neste equipamento, as entradas analógicas estão ligadas aos sensores do sistema, enquanto as saídas analógicas estão conectadas aos cartões de controle, que controlam as válvulas proporcionais. As entradas digitais recebem sinais de acionamento das botoeiras e de outros elementos, e as saídas habilitam algumas válvulas, realizam outras funções de acionamento.

A programação do CLP estabelece uma sequência de decisões que devem ser tomadas dependendo da situação durante o seu uso. A programação deste dispositivo foi executada através da linguagem *LADDER*. A figura 3.4 ilustra o sequenciamento das atividades desenvolvidas pelo CLP, ou seja, o ciclo de funcionamento.



Figura 3.4: Sequência de atividade executadas pelo CLP.

Para monitoramento da velocidade de rotação do pino utilizou-se um sensor que funciona a partir do *efeito-hall*. Esse sensor foi instalado a aproximadamente 0,6 mm, a uma roda dentada metálica acoplada ao eixo do motor hidráulico. Essa roda dentada é feita de material ferromagnético e quando ela está próxima do sensor, este apresenta como saída uma tensão de aproximadamente 24 V, que é a mesma tensão de alimentação. Quando o vale (vazio entre os dentes) passa pelo sensor, ele envia para saída um sinal de 0 V. Essa variação na saída caracteriza uma onda quadrada. Um desenho esquemático do sensor, da roda dentada e saída em onda quadrada é mostrado na figura 4.5.

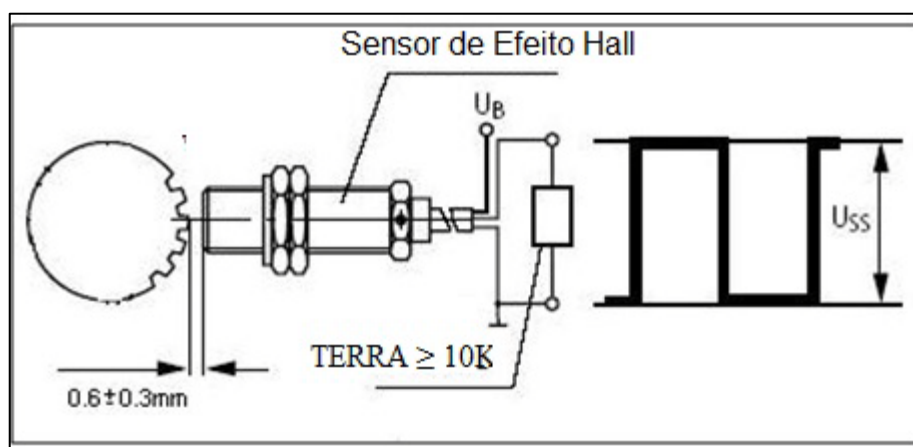


Figura 3.5: Desenho esquemático da rodada dentada, sensor e onda quadrada.

O CLP instalado no equipamento não recebe esta onda quadrada. Esse sinal é enviado para um conversor de frequência em tensão, que tem saída máxima igual a 8,5 V. Esse conversor manda o sinal para o cartão de controle PID (cartão VT-HACD), que compara o sinal (*feedback*) com o sinal de *setpoint*. Após a comparação, o cartão envia um sinal para uma válvula proporcional controlada, que vai abrir ou fechar, ajustando o valor de rotação desejado.

O monitoramento da posição do cilindro durante o ensaio tornou-se possível com a instalação de um sensor potenciométrico ligado diretamente ao eixo que é acoplado o pino. O sensor apresenta uma variação linear do sinal de tensão de saída com a variação do comprimento de seu cabo. Desse modo, de acordo com o deslocamento do pino, tem-se uma variação na tensão de saída do sensor.

Na UPPA-II utilizou-se um sensor potenciométrico da empresa *SpaceAge Control*, da série 173. Esse dispositivo tem linearidade de 0,5 % e uma tensão de alimentação máxima de 35 Volts, alimentado com uma fonte de 6 VDC. Essa tensão de alimentação teve de ser menor que 10 V, devido a exigências das entradas analógicas do CLP.

Na linha de fluxo de óleo para o motor hidráulico foram instalados dois sensores de pressão, sendo um na linha entrada e outro na linha saída. Outros dois sensores de pressão idênticos foram instalados na linha de óleo do cilindro, sendo um na linha da câmara superior e outro na linha da câmara inferior.

Os dispositivos utilizados foram transdutores de pressão capacitivos, como ilustra a figura 3.6. Um circuito eletrônico mensura a variação de capacitância (que é proporcional à pressão exercida sobre o diafragma) e amplifica para sinais proporcionais de alto nível.



Figura 3.6: Foto ilustrativa do sensor de pressão

Os sinais provenientes desses sensores são enviados para um cartão PID, que controla a pressão aplicada de acordo com o valor pré-determinado e armazenado no CLP. Além disso, os sinais são enviados a um subtrator, que faz a diferença e envia os resultados para o CLP e computador, o que possibilita o controle e monitoramento da pressão.

Como mostrado anteriormente, os sensores foram utilizados para monitoramentos dos sinais importantes do processo de reparo e as válvulas para controle.

No controle de rotação foi utilizada uma válvula servossolenóide com eletrônica integrada, que possui quatro vias e três posições, possibilitando fluxo de óleo hidráulico nas duas direções e uma posição de bloqueio. A pressão máxima de operação suportada por esse dispositivo é de 350 bar, enquanto a vazão nominal da mesma é 12 l/min. Para o perfeito funcionamento dessa válvula é necessário que a tensão de alimentação seja igual 24 V e o sinal de entrada esteja em corrente entre 4 e 20 mA.

Uma válvula servossolenóide também foi utilizada para o controle da força e avanço do cilindro. Essa válvula opera com os mesmos níveis de tensão e corrente da válvula mostrada anteriormente.

Outros dois dispositivos foram implantados no equipamento com intuito de controlar as variáveis mais importantes do processo de reparo por atrito. Esses dispositivos são denominados cartões de controle. Um cartão é utilizado para controle da força axial aplicada, enquanto outro controla a velocidade de rotação do eixo. Os dois são alimentados com tensão de 24 V, proveniente do painel.

A força aplicada pelo cilindro é controlada por um cartão de controle PID da empresa Bosch, modelo Diff – P/Q. Esse é um cartão analógico e controla tanto a força axial aplicada quanto à velocidade do cilindro. Enquanto não existe uma contrapressão no cilindro, o cartão controla de acordo com o valor de referência relativo à velocidade. Quando é aplicada uma pressão contra o movimento do cilindro, o cartão passa a controlar o sistema de acordo com o valor relativo de pressão, pré-definido. Este cartão de controle será explicado mais detalhadamente no capítulo IV.

Para executar o controle da rotação do eixo foi utilizado um cartão PID da empresa Bosch/Rexroth, modelo VT-HACD-1. Esse é um cartão digital, que contém um micro controlador, o qual controla toda a seqüência de correções, executa os ajustes e as operações lógicas e realiza o controle em malha fechada. Os dados de configuração, valores de comando e parâmetros são salvos na memória *flash* não-volátil.

O sistema de rotação é controlado por apenas duas entradas e uma saída analógica. Uma das entradas está configurada para receber sinal entre -10 e +10 V, que é um sinal

referente ao *setpoint* advindo do CLP. A outra entrada está configurada para receber entre 0 e 10 V, sinal referente a leitura do sensor de rotação e é procedente do conversor de frequência em tensão, sendo este o sinal de *feedback*, sendo que essas parametrizações das entradas e saídas, assim como todos os parâmetros de ajustes do cartão de controle são feitas via software.

3.3.2. Programa de controle

A automação e controle do equipamento foi implementada utilizando três *softwares*, além dos dispositivos (*hardware*) descritos anteriormente.

O primeiro *software* utilizado foi o *Step-7 MicroWin*. Com esse *software* de programação foi possível implementar no CLP uma sequência lógica de operações de acordo com o exigido para executar o processo de reparo por atrito.

O segundo foi o *LabView®*, o qual foi utilizado no equipamento para o monitoramento e geração dos gráficos de rotação, posição, torque e força axial. Esses gráficos são utilizados para o acompanhamento do processo durante o processo de reparo por atrito e para análise dessas variáveis após a realização do ensaio. Com a geração dos gráficos em tempo real é possível que ao operador acompanhar a evolução das variáveis e, caso necessário, interromper o processo através do programa.

Outro software, o *Design 6.0*, permite que o operador defina os parâmetros do processo através da IHM fixada na porta do painel elétrico.

Com a programação de controle do equipamento através desses três *softwares*, o operador, ao iniciar os trabalhos, deve optar por um ensaio independente ou por um ensaio completo. A opção de ensaio independente está disponível para que o operador realize testes e ajustes no controle do equipamento, uma vez que nessa opção é possível trabalhar com avanço, aplicação de força e rotação, separadamente. Um fluxograma do ensaio independente é mostrado na figura 3.7.

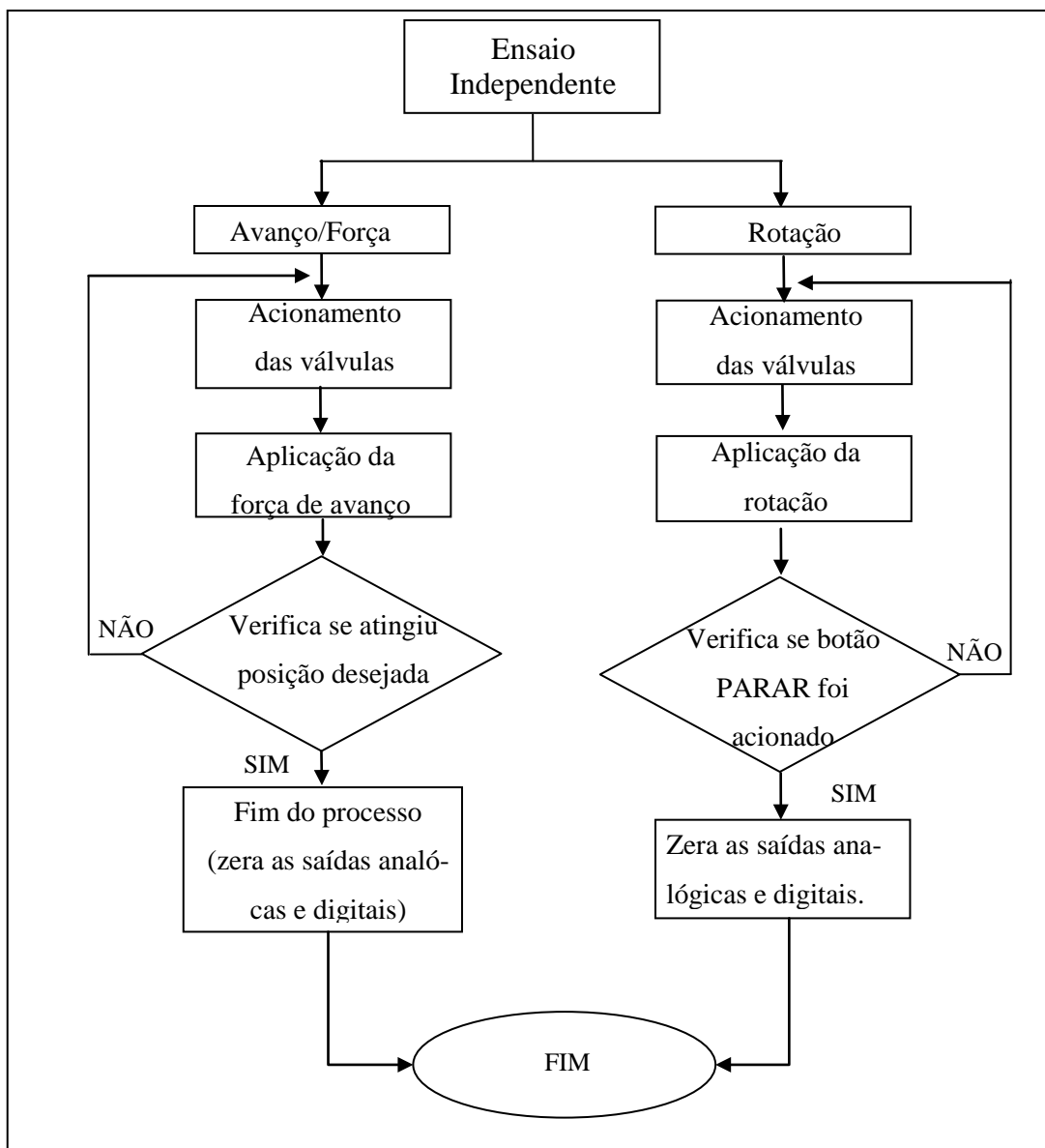


Figura 3.7: Fluxograma do ensaio independente.

A opção de ensaio completo é utilizada quando o operador deseja realizar um reparo por atrito. Nessa opção o operador informa os parâmetros do ensaio, e todo o processo é realizado automaticamente, como mostra a figura 3.8

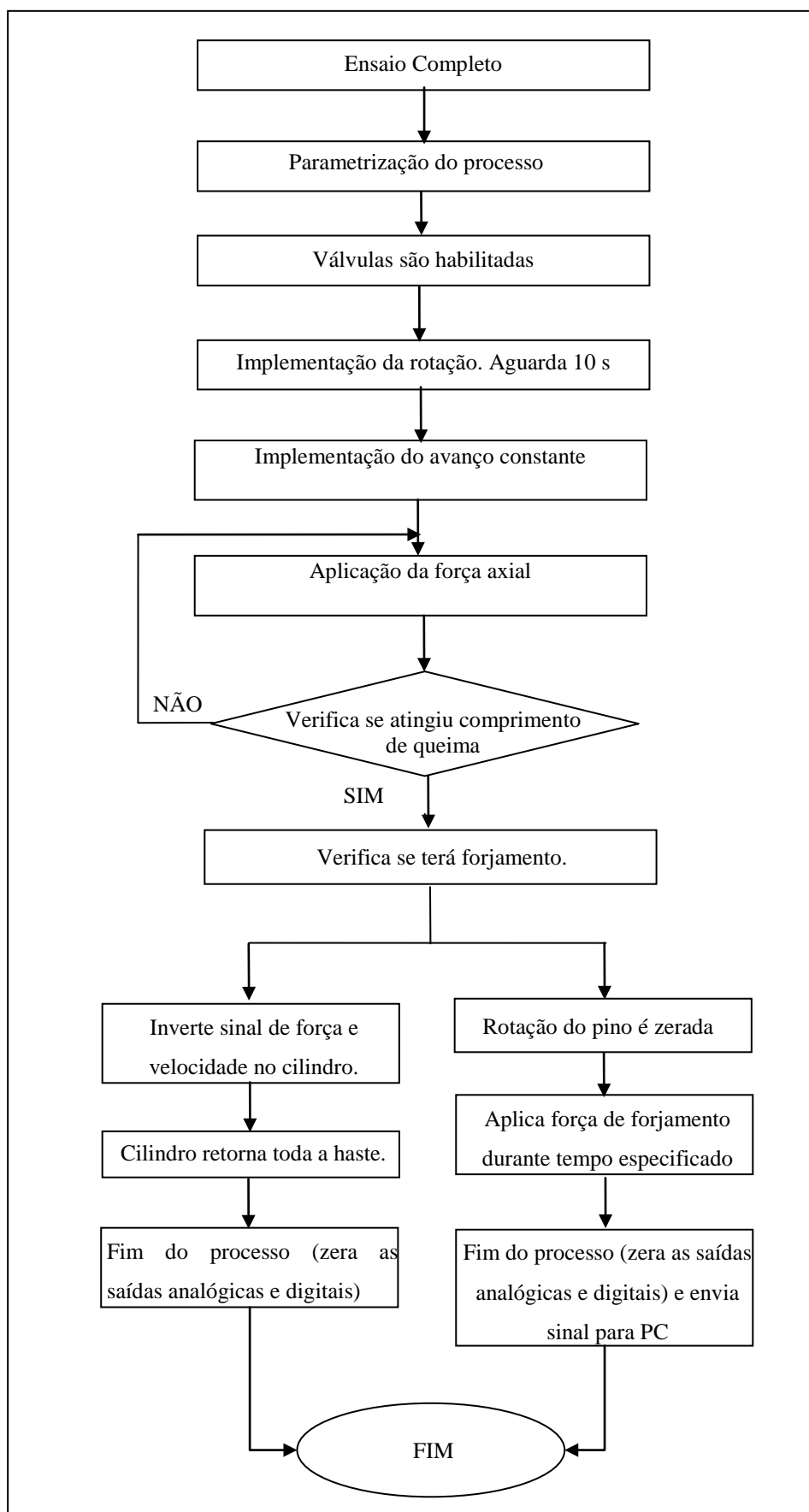


Figura 3.8: Fluxograma do ensaio de reparo completo.

Na etapa de parametrização do processo, o operador define os seguintes parâmetros: velocidade de rotação, força axial, comprimento de queima e com/sem forjamento. Caso seja selecionado ensaio “com forjamento”, o operador deve determinar os parâmetros de força e tempo de forjamento.

Posteriormente, foi realizada uma modificação no programa de controle do CLP. Com a necessidade de realizar ensaios com dois estágios, o operador inicialmente deve escolher a quantidade de ensaios e somente depois disso definir os parâmetros. Caso seja selecionado “dois estágios” o operador define os valores de rotação, força e comprimento de queima separadamente para cada estágio.

Uma visão macro do processo, incluindo os dois estágios de processamento, é mostrada na figura 3.9.

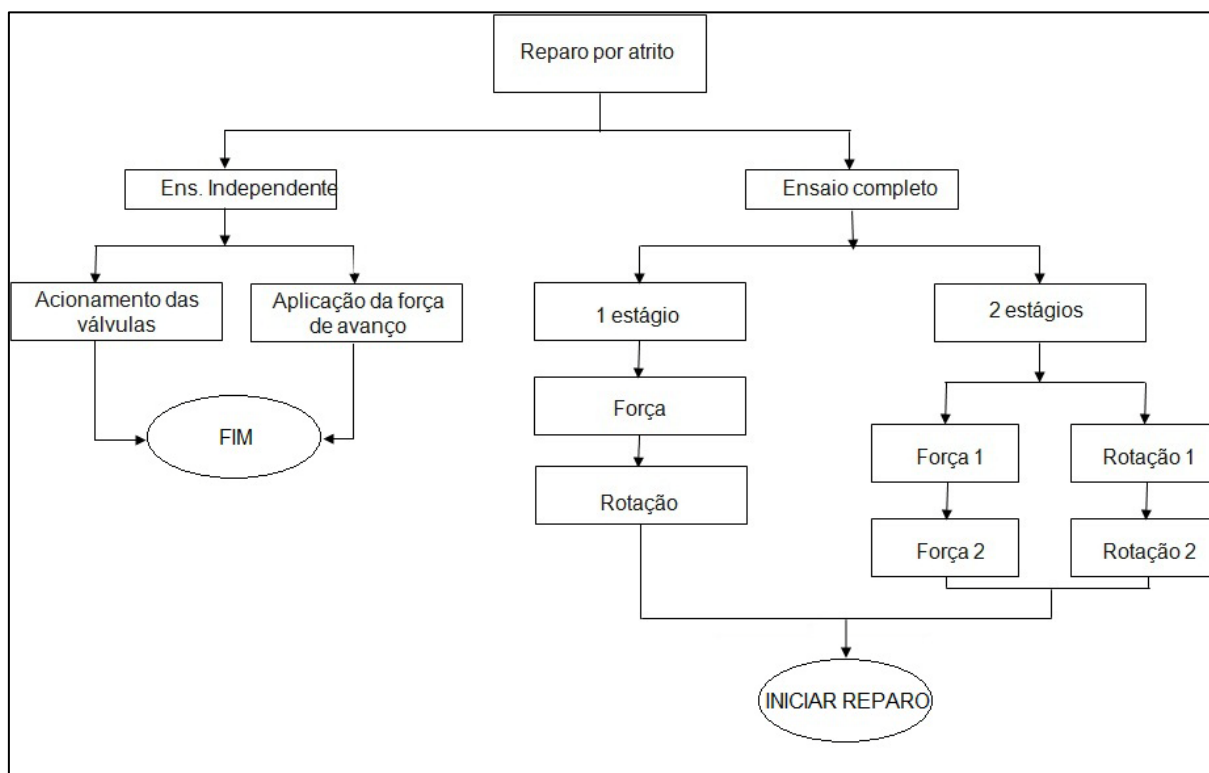


Figura 3.9: Visão macro do ensaio com dois estágios.

CAPÍTULO IV

OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DO EQUIPAMENTO

Um dos parâmetros controlados durante a execução do reparo por atrito é a rotação do pino consumível. No sistema utilizado a rotação do pino pode variar de 0 a 3000 rpm, sendo esse valor máximo limitado devido ao motor hidráulico do sistema. Para o controle dessa rotação foi utilizado um cartão de controle PID da empresa Bosch/Rexroth, modelo VT-HACD-1. Esse é um cartão digital, que contém um micro controlador, que controla toda a sequência de correções, executa os ajustes necessários para cada variável ou constante de controle e realiza as operações lógicas necessárias para o controle em malha fechada. O sistema de controle está ilustrado na figura 4.1.

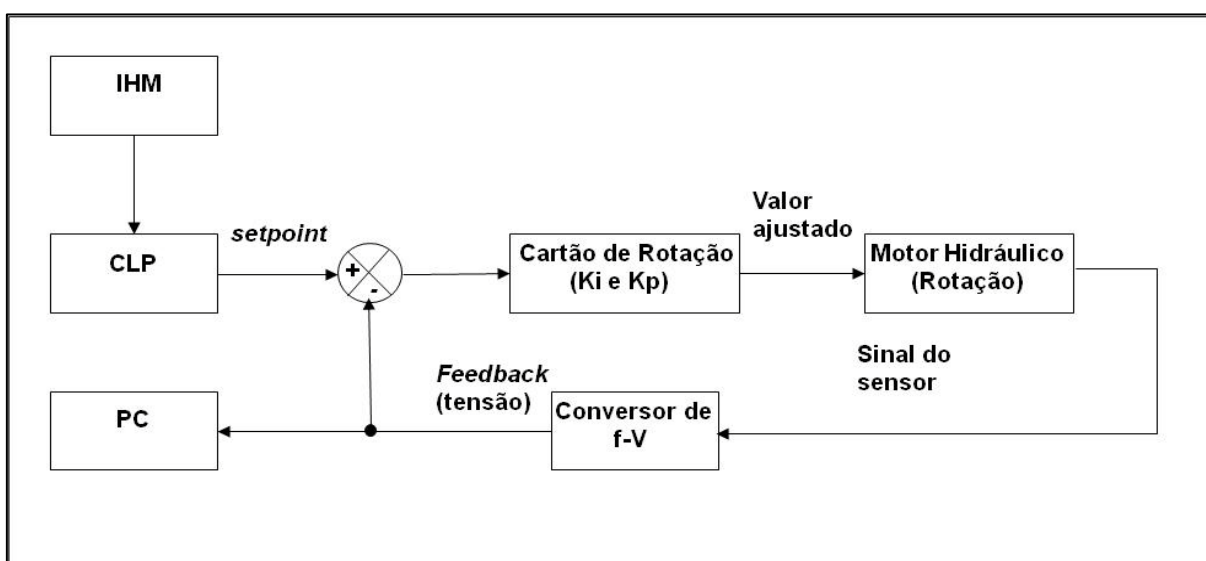


Figura 4.1: Ilustra malha de controle fechada do sistema de rotação, implementado pelo cartão VT-HACD-1.

O valor definido pelo operador na IHM é enviado para o CLP, que por sua vez o transmite para o cartão PID (VT-HACD-1). O cartão compara este sinal de *setpoint* com o sinal de *feedback*, proveniente do conversor de frequência em tensão, e faz os ajustes necessários para o controle da rotação do motor hidráulico, enviando o valor ajustado para a válvula controladora de fluxo. O valor de tensão de saída do conversor de frequência em tensão, enviado para o computador, permite a geração de um gráfico referente à rotação atual do motor.

Vale ressaltar que esse é um controlador digital e, portanto, todos os seus parâmetros são definidos através do computador utilizando um *software* chamado BODAC[®], fornecido pela Rexroth.

Como foi mencionado no capítulo II, quando se trata de parâmetros controlados durante a execução dos ensaios, a variável força axial é o fator de maior influência na qualidade do reparo por atrito. Para uma melhor compressão do sistema, a figura 4.2 ilustra o sistema de malha fechada empregado para controle da força e velocidade de avanço do processo de reparo por atrito.

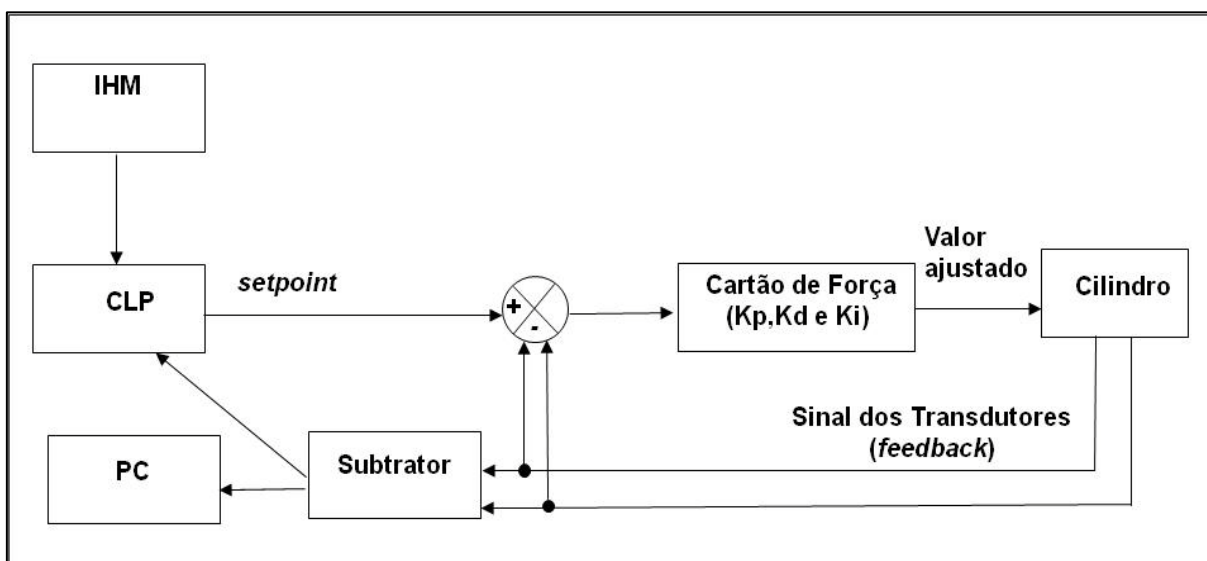


Figura 4.2: Ilustra malha de controle da Força/Avanço.

Na malha de controle mostrada na figura 4.2, um dos principais elementos é o cartão de controle de força, pois trata-se do elemento controlador PID inserido no sistema. Por esse motivo, esse capítulo descreverá como foram ajustados os parâmetros de controle nesse cartão e algumas modificações realizadas, com intuito de otimizar o controle através da redução do tempo de resposta do equipamento e elevação da máxima força atingida durante o ensaio.

Uma foto ilustrativa das entradas e saídas desse cartão estão mostradas na figura 4.3. Nota-se que é um cartão analógico, portanto todos os parâmetros são ajustados através de potenciômetros e os sinais podem ser lidos unicamente através de aparelhos externos.



Figura 4.3: Foto ilustrativa do cartão de força.

Para um melhor detalhamento desse controle da força, a explicação será dividida em três etapas: etapa de ajustes do parâmetro, otimização do controle e testes realizados em vazio.

4.1 Ajustes dos parâmetros de controle de força

O cartão possui seis entradas analógicas, sendo que duas recebem sinal de corrente (4 mA a 20 mA) e outras quatro recebem sinal em tensão (0 a 10 V).

Para controle do equipamento estão sendo utilizadas as entradas que trabalham com valores de tensão. Duas dessas entradas recebem os sinais de *feedback* advindos dos sensores de pressão, os quais estão instalados nas linhas de fluxo óleo do cilindro, sendo que um sinal é referente ao cilindro inferior e outro ao cilindro superior. As outras duas recebem os *setpoint* de velocidade e força. Esses dois últimos valores são enviados ao cartão pelo CLP, sendo que ambos os sinais são em tensão de 0 V a 10 V.

O cartão controla o sistema por duas maneiras: quando o cilindro está em vazio controla através do *setpoint* de velocidade e quando o cilindro encontra uma contrapressão, o cartão controla a pressão através do valor de pressão pré-estabelecido.

Os passos a seguir esclarecem o funcionamento completo do cartão:

- Valor definido na IHM é enviado para CLP;
- O CLP armazena os valores provenientes da IHM e, através das saídas analógicas AQW10 e AQW8, envia os sinais de velocidade de avanço e força, respectivamente, para o cartão PID de força, sendo que esses sinais estão entre 0 V e 10 V;
- O cartão recebe o sinal de velocidade nos pinos B20 e Z20 e os sinais de força nos pinos Z10 e Z12;
- Os sensores de pressão enviam para o cartão PID os sinais referentes à pressão da câmara inferior e da câmara superior. O sinal da câmara superior no pino B26 e da câmara inferior no pino B16;
- Durante o avanço em vazio o cartão tem como referência o sinal de velocidade. O cartão recebe o sinal de *setpoint* e *feedback*, faz os ajustes através das constantes (K_p , K_d e K_i), e envia um sinal entre 0 e 10 V para um conversor de tensão em corrente;
- O conversor interpreta o valor e envia um sinal de corrente correspondente para a válvula controladora de fluxo, que está na linha de óleo do cilindro;
- Os sinais dos sensores também são enviados para o subtrator. Este executa a operação e envia o sinal ao CLP e à placa de aquisição de dados ligada ao computador para gerar o gráfico de força;
- O CLP monitora, durante todo o processo, o sinal de pressão para ter conhecimento do final do avanço do cilindro em vazio e início da aplicação de força, que acontece quando verifica-se a existência de uma contra-pressão no pino;
- Durante a aplicação de força o cartão faz o controle através das mesmas constantes (K_p , K_i e K_d), que foram usadas para o controle de velocidade do cilindro.

Portanto, pode-se perceber que a resposta do cartão depende dos valores adotados para as constantes de controle K_p , K_i e K_d . Inicialmente foram utilizados valores para constantes sem muito estudo das mesmas, pois o objetivo inicial era testar o funcionamento do

equipamento e da programação sem analisar detalhadamente a resposta de cada parâmetro. O cartão também possui dezesseis chaves de controle (catalogada como DIL) que não foram alteradas inicialmente. Essas chaves são responsáveis por habilitar/desabilitar, amplificar/amenizar os parâmetros de controle (K_p , K_i e K_d).

4.2 Ajuste dos parâmetros de controle

A grande maioria de controladores PID industriais incorpora recursos de “Auto Tune”, em que o controlador aplica um ensaio ao processo e obtém o conjunto de parâmetros do PID (K_p , K_i e K_d). Porém, nesse caso, trata-se de um cartão analógico (como descrito anteriormente), o qual não tem essa disponibilidade.

Portanto, com intuito de melhorar a resposta do equipamento em relação à força, foi realizado um estudo mais detalhado do processo de controle PID e do cartão controlador de força aplicado no equipamento.

4.2.1. Efeito das constantes de controle PID.

A constante proporcional tem como objetivo estabilizar o processo controlado. O controlador proporcional atua na correção do erro existente, sendo a saída desse processo diretamente proporcional ao erro e em função do tempo. Também observa-se a presença de um erro de regime permanente ou *off-set*, ou seja, a variável fica controlada em um valor diferente do pré-estabelecido e este erro não pode ser eliminado com um controlador puramente proporcional (NICULA, 2010).

O aumento no valor da constante proporcional reduz o valor do erro em regime permanente, porém impacta diretamente no tempo de resposta, ou seja, reduz a velocidade de resposta do sistema.

A constante integral tende a estabilizar o sistema através da adição de um pólo na origem, o que aumenta em um grau o tipo do sistema (NICULA, 2010). Com isso, o controlador elimina o erro de regime permanente ou *offset* para entradas com ordem menores que o novo controlador.

Portanto, o controlador integral deve ser complementar ao controlador proporcional, pois o primeiro elimina o erro que utilizando somente o segundo controlador é impossível.

Porém, a ação integral não elimina o erro de *overshoot*, que é o pico da variável que ocorre no início de processo. Essa eliminação não é possível porque a ação integral é atrasada em relação a proporcional, assim o pico acontece antes que o controlador integral inicie a atuação.

Vale lembrar que quanto maior a razão entre a constante proporcional e a constante integral, maior a chance de o sistema apresentar um comportamento oscilatório e maior o *overshoot*.

O controlador derivativo tende a melhorar o comportamento transitório do sistema controlado (CAMPESTRINI, 2006). A implementação dessa constante irá tornar a ação corretiva mais rápida e por esse motivo é conhecida como ação antecipatória ou preditiva. Esse controlador não é sensível a erros constantes ou de variação lenta, portanto não tem ação sobre o pico ou *offset* gerado pela ação proporcional, independente do nível desse erro.

Uma constante derivativa elevada provoca menor overshoot, reduz o tempo de estabilização, porém o sistema pode oscilar em torno do *setpoint*.

Um resumo teórico, de acordo com a teoria de OGATA (2003), do efeito de cada um dos parâmetros sobre o desempenho do processo está mostrado na tabela 4.1. Vale ressaltar, que essa tabela resume cada efeito separadamente, além de ser um modelo geral para qualquer processo.

Tabela 4.1: Efeito dos parâmetros de controle na resposta do sistema.

PARAMETRO	AUMENTAR	REDUZIR
Kp	Mais lento	Mais rápido
	Geralmente mais estável	Geralmente mais instável
	Menor overshoot	Maior overshoot
ki	Mais rápido	Mais lento
	Mais Instável	Mais estável
	Maior overshoot	Menor overshoot
kd	Mais lento	Mais rápido
	Menor overshoot	Maior overshoot

4.2.2. Estrutura de Controladores.

Os controladores PID podem apresentar diversas configurações, que alteram a disposição dos controladores separados. As configurações mais importantes para o controle de processos são paralelo e série, como estão mostradas nas figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

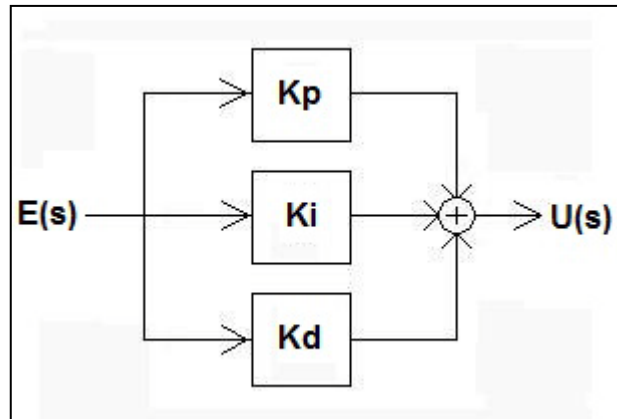


Figura 4.4: Ilustração do controlador PID paralelo.

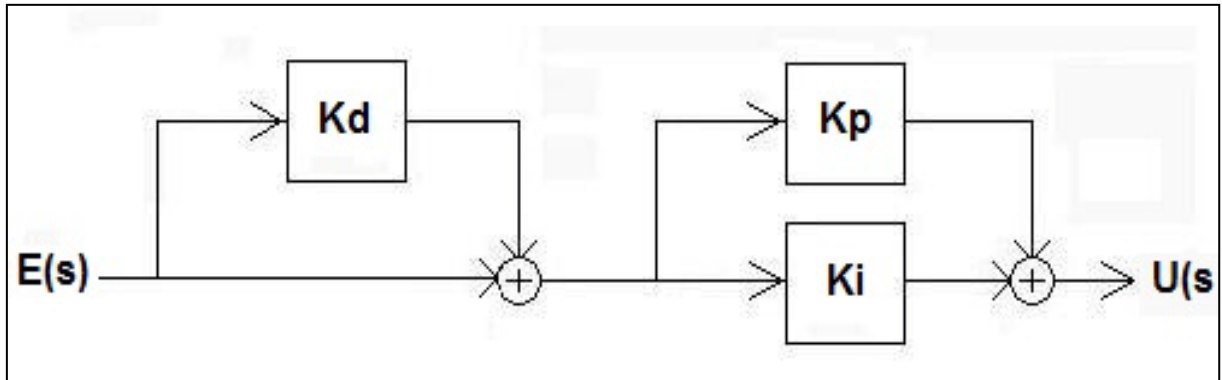


Figura 4.5: Ilustração do controlador PID em série-paralelo.

As estruturas mostradas na figura 4.4 e 4.5 também podem ser representadas pelas equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$C(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Ki \cdot s} + Kd \cdot s \right) \quad (4.1)$$

$$C(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Ki \cdot s} \right) \cdot (1 + Kd \cdot s). \quad (4.2)$$

Onde: K_p , K_i e K_d são as constantes proporcional, integral e derivativa, respectivamente; $E(s)$ e $U(s)$ sinais de entrada e saída, respectivamente.

Na figura 4.4 e equação 4.1 está representado o controlador com estrutura paralela também conhecido como controlador não iterativo. Nesse tipo de controlador os três componentes são totalmente independentes, ou seja, a constante integral não influencia na constante derivativa e vice-versa.

O controlador série ou controlador iterativo está representado na figura 4.5 e equação 4.2. Nos controladores com essa configuração a constante derivativa influencia na constante integral e vice-versa.

4.2.3. Métodos de Sintonia

Uma boa sintonia do sistema de controle somente pode ser atingida com o conhecimento da dinâmica do processo. Para isso deve-se coletar todas as informações possíveis e em seguida definir o critério de desempenho, sendo que esse critério pode ser o *overshoot* (sobrepassagem), *rise time* (tempo de subida), *settling time* (tempo de acomodação) ou *off-set* (desvio em regime permanente). No presente trabalho o desempenho será mensurado através do tempo de subida, ou seja, tempo para atingir o valor pré-estabelecido.

Após essas considerações é necessário escolher o método de sintonia, dentre os diversos existentes. A seguir são apresentados dois métodos de sintonia:

I) Método de Tentativa e Erro: também conhecido como método de aproximações sucessivas, este método consiste em modificar as ações de controle e observar o efeito do processo, até obter uma resposta de acordo com o esperado ou uma resposta ótima. (NICULA, 2010). Para alcançar esses resultados é necessário conhecer o sistema e deve-se seguir os seguintes passos, resumidamente:

- Eliminar a ação integral e derivativa, sendo para isso $K_p = \infty$ e $K_d = 0$;
- Ajustar a constante K_p para um valor baixo;
- Aumentar o valor de K_p até o processo mostrar uma resposta oscilatória com amplitude constante;
- Reduzir o valor de K_p a metade;

- Reduzir a constante K_i até o processo oscilar ciclicamente, então ajustar K_i para três vezes;
- Aumentar K_d lentamente até o processo oscilar continuamente e ajustar K_d para um terço do valor.

Este é um processo simples, porém exige longo tempo para definição das constantes.

II) Método de Ziegler & Nichols: este é um método muito utilizado nos processo de controle devido a simplicidade de sintonia. Este permite calcular as constantes de controle sem a necessidade dos parâmetros do processo, porém não apresenta uma boa resposta em malhas rápidas, como as de vazão, nem em processo com alto tempo morto (NICULA, 2010). A seguir são mostrados, resumidamente, os passos para a sintonia através desse método:

- Eliminar a ação integral e derivativa, sendo para isso $K_p = \infty$ e $K_d = 0$;
- Ajustar a constante K_p para um valor baixo;
- Aumentar o valor de K_p até o processo mostrar uma resposta oscilatória com amplitude constante;
- Determinar o ganho ou constante última (K_u), que é a constante do controlador proporcional;
- Determinar o período (P_u) de oscilação do sinal de saída;
- Obter, através de K_u e P_u , os demais parâmetros do controlador PID, utilizando a tabela 4.2.

Tabela 4.2: Recomendações para obter parâmetros do controlador PID, através do Método Ziegler & Nichols.

CONTROLADOR	K_p	K_i	K_d
P	$0,5K_u$	-	-
PI	$0,45K_u$	$P_u/1,2$	-
PID	$0,6K_u$	$P_u/2$	$P_u/8$

Depois de calculada todos as constantes, deve-se implementá-las no controlador.

4.2.4. Ajustes no controlador.

De acordo com OGATA (2003), quando o equipamento a ser controlado é complexo e um modelo matemático da planta não pode ser obtido facilmente, então a abordagem analítica do projeto do controlador PID não será possível. Portanto, é necessário recorrer a abordagens experimentais de sintonia do controlador, tais como mostradas no subitem anterior.

O cartão de controle de força utilizado contém três potenciômetros referentes as constante K_p , K_i e K_d , como mostrado na figura 4.3. Esse potenciômetro tem variação de 1 a 16, com subdivisões de um em um.

Como se trata de um sistema com resposta rápida, foi escolhido o método de tentativa e erro, descrito anteriormente. Vale ressaltar, que esse método foi utilizado como base para alterações, porém nem todos os passos foram seguidos, uma vez que o controlador se trata de um cartão analógico no qual não foi possível colocar todos os valores requeridos, tal como $K_i = \infty$.

Visando, primeiramente, uma resposta mais rápida do sistema na aplicação da força axial, o primeiro passo foi reduzir o valor da constante derivativa do PID. Portanto, ajustou-se o valor de K_d para o menor valor possível. Posteriormente, ajustes em outras constantes foram sendo realizados para verificar a resposta do sistema a cada variação. A tabela de testes (variação das três constantes) foi sendo construída de acordo com a evolução dos ensaios. A tabela 4.3 mostra os valores testados durante esta etapa.

Tabela 4.3: Variação das constantes do controlador PID de acordo com método de tentativa e erro.

Teste/Parâmetro	K_p	K_i	K_d
1	16	16	1
2	16	16	16
3	1	16	16
4	16	9	16
5	16	1	16
6	1	1	1

Com isso foi possível verificar qual a melhor configuração de acordo com o tempo de resposta do sistema. Os resultados dos testes serão mostrados no subtítulo seguinte.

Com intuito de otimizar a resposta do sistema foram realizadas alterações nas chaves de controle (DIL's). As alterações foram sequenciadas de acordo com informações contidas no catálogo do fabricante, sendo que cinco chaves são referentes à constante K_d , três são referentes a K_p e duas referentes a K_i . Portanto, as chaves foram combinadas, de acordo com a tabela 4.4, e foram verificados os tempos de resposta do sistema para cada alteração das mesmas. Como citado anteriormente, cada combinação tem um objetivo de amplificar ou reduzir a influência das constantes ou mesmo desabilitá-las. Vale lembrar que não foram realizadas todas as combinações possíveis, mas somente as consideradas importantes de acordo com análise realizada junto ao catálogo do fornecedor. Além disso, é importante ressaltar que foram utilizadas informações de catálogo do fabricante por se tratar de chaveamento interno específico do equipamento, porém as amplificações ou reduções e ativação ou desativação de qualquer controle foi realizado a partir de uma análise teórica dos parâmetros.

Tabela 4.4: Possíveis variações das chaves de controle do cartão controlador.

	Kd					Kp			Ki	
TESTES/CHAVES	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16
1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NA				
2	OFF	OFF	OFF	OFF	ON					
3	OFF	OFF	OFF	ON	OFF					
4	OFF	OFF	OFF	ON	ON					
5	ON	ON	ON	OFF	ON					
6	ON	ON	ON	ON	OFF					
7	ON	ON	ON	ON	ON					
8	NA					OFF	ON	OFF	NA	
9						ON	OFF	OFF		
10						NA			ON	OFF
11									OFF	OFF

Depois de configurados as chaves e as constantes de controle, ainda foram realizados dois ajustes que influencia na resposta do controle de força:

- Abertura (mecanicamente) da válvula de controle de vazão, com intuito de permitir maior fluxo de óleo para o cilindro e passando o controle de vazão totalmente para o cartão de força. Essa ação foi tomada devido a falta de óleo/força para alguns ensaios.

- Ajuste do potenciômetro do cartão de força referente a abertura da mesma válvula. Isso também permite um maior fluxo de óleo para o cilindro e permite que o controle seja realizado totalmente via CLP, ou seja, retira uma das restrições de controle do sistema que seria a limitação de abertura da válvula.

- Retirada da limitação do avanço do pino a partir do momento que existe contrapressão no pino consumível. Isso será realizado através de um controle de vazão da bomba hidráulica.

4.3 Testes de controle

Para verificar a influência de cada variação no controle, tanto dos valores das constantes quanto das chaves, foram realizados testes em vazio. O teste em vazio consiste em aplicar força sem implementação da rotação e utilizando um pino de diâmetro maior, com intuito de eliminar qualquer deformação do material, uma vez que essa deformação pode influenciar no deslocamento e na força aplicada.

Os testes relacionados às variações das constantes estão mostrados no capítulo subsequente, sendo que o parâmetro a ser analisado será o tempo de subida da componente de força, a qual pode variar entre 0 e 245 kN, sendo esse o extremo superior suportado pelo equipamento.

Após as alterações nos parâmetros do controlador de força e das válvulas controladas foram realizados alguns ensaios com carga, ou seja, utilizando-se a rotação. Esses ensaios são utilizados para corroborar a melhoria do controle do sistema dinamicamente, o que ainda não tinha sido testado.

Vale lembrar, que por não se tratar de um sistema cíclico os ajustes das constantes de controle devem ser realizados em vazio e posteriormente testados com carga.

CAPÍTULO V

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

5.1. Material de Ensaio

A natureza do material base e do consumível é uma variável relevante no processo de reparo por atrito, pois a mesma influencia na determinação dos parâmetros, tais como, velocidade de rotação, força axial e comprimento de queima.

Neste trabalho optou-se por manter esta variável constante, com intuito de estudar os parâmetros considerados de maior importância, como citado no capítulo II. Portanto, a resposta do equipamento e a qualidade do reparo compreendido neste trabalho será restrito ao material utilizado, que foi pino de aço ABNT 1010 e um bloco de ASTM A36. A composição química destes aços é mostrada na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Composição química (PIRES,2007) dos materiais utilizados no reparo (% em peso).

ELEMENTOS	C	Mn	Cr	Ni	P	Si	Mo	S
Pino ABNT 1010	0,12	0,69	0,03	0,01	0,044	0,16	-	0,027
Bloco ASTM A36	0,13	0,94	0,02	0,01	0,014	0,19	0,01	0,008

Como se pode observar na tabela, os materiais utilizados são aços de baixo teor de carbono, isto é, aços com percentual de carbono inferior a 0,20%. Esses são aços muito utilizados na indústria petrolífera para construção de estruturas marítimas, navios, dutos, entre outros (PIRES, 2007).

O ASTM A36 é um aço estrutural, sendo muito utilizado por apresentar as seguintes características:

- Ductilidade e homogeneidade;
- Alta relação entre limite de resistência e limite de escoamento;
- Soldabilidade;

As microestruturas do aço ASTM A36 esta mostrado na figura 5.1. Esse aço apresenta uma microestrutura constituída basicamente ferrita e perlita.

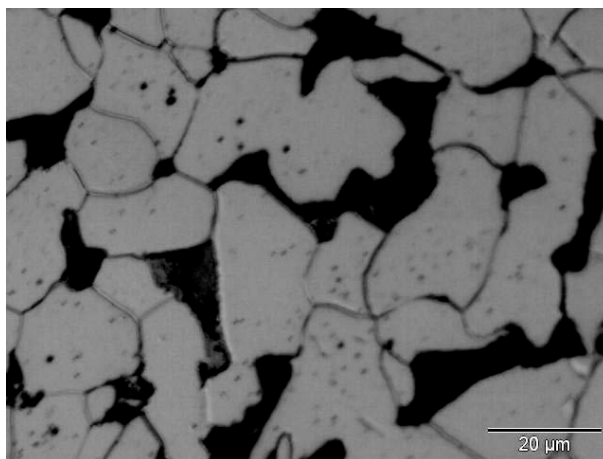


Figura 5.1: Microestrutura do material base ASTM A36.

5.2. Ensaios Preliminares

As geometrias do furo (bloco) e do pino são parâmetros de grande importância para o processo de reparo por atrito. De acordo com algumas literaturas (MEYER, 2002 e PIRES, 2007), o emprego de uma geometria que favoreça o melhor aporte térmico na superfície inferior, bem como condições menos restritivas ao escoamento plástico, são de fundamental importância na obtenção de união com qualidades superiores.

Com intuito de obter melhores resultados no processo de reparo por atrito, durante os ensaios foram utilizados blocos com fundo do furo arredondado e pino cônico com ponta arredondada, pois estas geometrias apresentaram melhores resultados nos trabalhos citados anteriormente.

Os parâmetros geométricos, profundidade do furo, raio de concordância e ângulo do tronco do cone, estão demonstrados na figura 5.2.

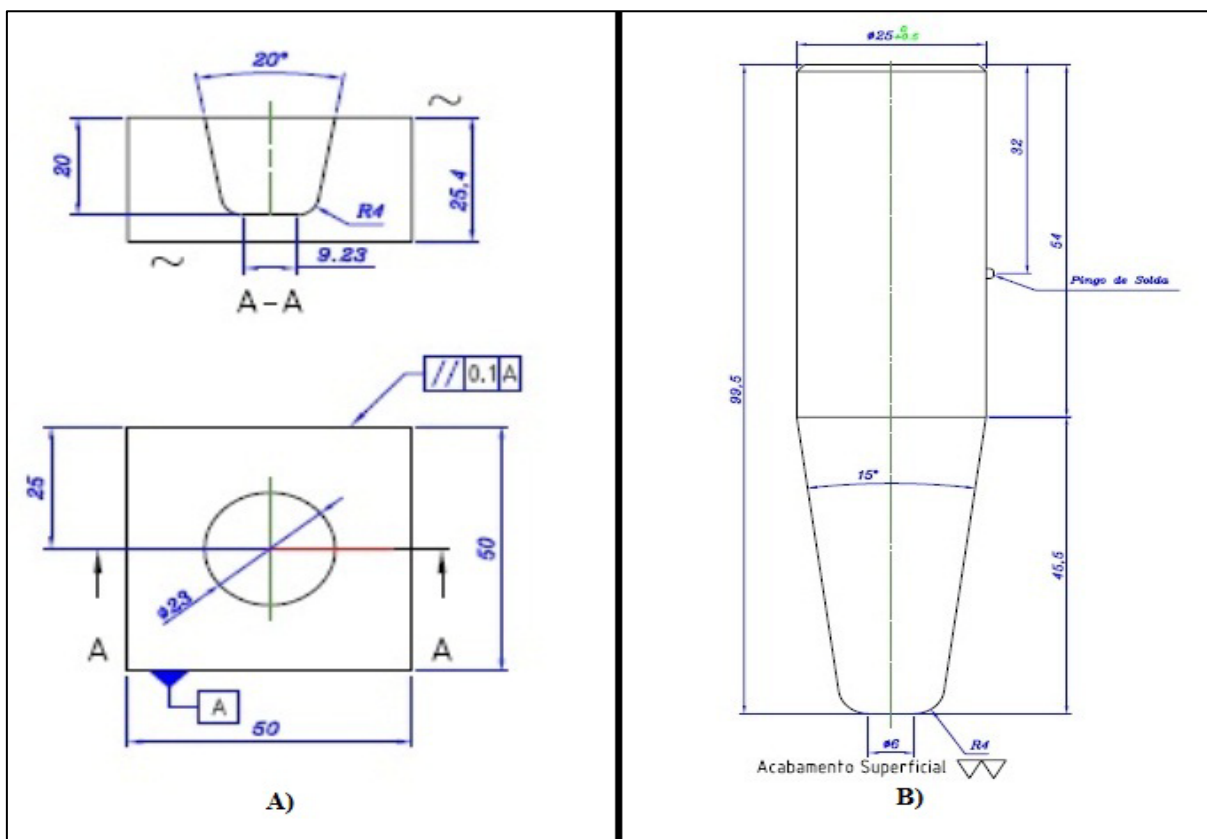


Figura 5.2: Geometria dos materiais utilizados nos ensaios: A) Bloco B) Pino consumível.

Nesta etapa do trabalho, os ensaios foram executados com intuito de verificar a operação do equipamento e a resposta do sistema de controle, pois até o momento todos os testes realizados não contemplavam um sistema dinâmico. Além disso, durante esses ensaios, buscou-se a regulação da válvula direcional proporcional que controla a vazão de óleo para o cilindro e consequentemente a velocidade de avanço do cilindro, ou seja, a definição de valores para os principais parâmetros e a quantidade de ensaios foram definidos de acordo com a evolução dos testes. A tabela 5.2 mostra os valores utilizados durante esta etapa.

Em todos os ensaios, a força de forjamento foi idêntica à força axial e aplicada. O tempo de forjamento foi de 3 segundos, uma vez que esse tempo é suficiente para intensificação do processo de união metalúrgica.

Tabela 5.2: Matriz com ensaios preliminares, sendo que foram utilizadas força de ensaio e forjamento igual a 245 kN.

Ensaio	Rotação [rpm]	Comp. Queima [mm]	Abertura Válvula [%]
A1	2500	14	10
A2	2500	14	10
A3	2000	14	10
A4	2000	10	10
A5	2000	14	50
A6	2500	18	50
A7	2500	18	90
A8	2500	14	90

Realizou-se algumas alterações no comprimento de queima para verificar a influência do mesmo no tempo de reparação e posteriormente na qualidade do reparo.

Com o programa de monitoramento dos parâmetros, foi possível arquivar os valores das variáveis ao longo do processo para posterior análise mais detalhada.

5.3. Ensaios de reparo por atrito completo

Após a realização dos ensaios preliminares e da concretização do funcionamento do equipamento, iniciou-se a etapa de ensaios completos. Essa etapa pretende definir uma faixa de operação do equipamento e compreender os efeitos dos parâmetros no processo e na qualidade do reparo por atrito.

Esta etapa foi subdividida nas duas fases:

- Fase 1: ensaios com um ciclo;
- Fase 2: ensaios com dois ciclos.

5.3.1. Ensaios com um ciclo de processamento

Esta fase contempla apenas um ciclo de processamento, ou seja, a velocidade de rotação e a força axial são constantes durante todo o processo de reparo por atrito. A geometria utilizada nesta fase foi a mesma dos ensaios preliminares, uma vez que os resultados da união foram satisfatórios através de uma análise macrográfica.

Mantendo constantes os dois parâmetros citados acima e utilizando como referência os ensaios realizados durante a etapa preliminar, uma matriz de ensaios foi montada. A tabela 5.3 mostra os valores de cada parâmetro dentro da matriz.

Tabela 5.3: Matriz de ensaios com variação da força e rotação e comprimento de queima fixo em 14 mm e força de forjamento durante 3 s.

Ensaio	Força [kN]	Rotação [rpm]	Força de Forjamento [kN]
B1	69	1000	69
B2	113	1000	113
B3	157	1000	157
B4	201	1000	201
B5	245	1000	245
B6	69	1500	69
B7	113	1500	113
B8	157	1500	157
B9	201	1500	201
B10	245	1500	245
B11	69	2000	69
B12	113	2000	113
B13	157	2000	157
B14	201	2000	201
B15	245	2000	245
B16	69	2500	69
B17	113	2500	113
B18	157	2500	157
B19	201	2500	201
B20	245	2500	245

O intuito de montar uma matriz de ensaios foi abranger toda a faixa de operação do equipamento, ou seja, rotação e força axial de até 2500 rpm e 245 kN, respectivamente.

Os limites de atuação do equipamento referente a variáveis de rotação e força são muitos extensos. Portanto, para uma análise mais detalhada da faixa de operação do equipamento, a matriz de ensaio foi construída através de um planejamento fatorial, considerando um intervalo na rotação de 500 rpm e outro intervalo na força axial de 44 kN. Dessa forma, atingiu-se os extremos do equipamento com uma discretização considerável das variáveis, sendo que novamente, o valor determinado para força axial foi mantido para o processo de forjamento durante o intervalo de 3 segundos.

Através do programa de monitoramento dos parâmetros, foi possível arquivar os valores das variáveis ao longo do processo. Nesta etapa do trabalho a análise dos dados adquiridos é de extrema importância, pois através dessa será possível determinar a influência da variação de cada parâmetro no tempo de processamento do reparo, na energia consumida, no torque atingido e na qualidade do reparo.

5.3.2. Ensaios com dois ciclos de processamento

Após a realização e análise dos ensaios com um ciclo de processamento, verificou-se a necessidade de uma nova fase, alterando os parâmetros de força e/ou rotação durante o processo de reparo por atrito.

A alteração dos parâmetros durante o processo de soldagem permite uma melhoria na qualidade do reparo, como mencionado no Capítulo I. Além disso, a implantação desta permutação está relacionada à potência do motor empregado na propulsão do equipamento, pois altera a taxa de geração de calor e energia aportado no processo.

Nesse primeiro momento de ensaios com dois ciclos foi necessário testar a implementação do programa de 2 estágios, descrito no Capítulo IV. Para corroborar o funcionamento do programa de controle, utilizou-se, no primeiro ensaio, um pino com diâmetro de 50,8 mm (duas polegadas) com ponta plana, ou seja, eliminou-se a parte cônica do pino e uma chapa de aço sem furo cego. O ensaio foi realizado com estas geometrias com intuito de eliminar o efeito causado por geometrias de cone e pelo arredondamento da ponta, o que contribui para que o tempo de processamento do reparo seja mais extenso. Durante este ensaio, houve alteração da força durante o processamento e ressalta-se, que por se tratar de validação do programa de dois estágios, não houve uma preocupação com a qualidade da união.

Após a validação do funcionamento do programa, construiu-se uma matriz de ensaio permutando a força axial ao longo do preenchimento. A mudança de ciclo é controlada pelo comprimento de queima, sendo que o valor para essa alteração é pré-estabelecido juntamente com os outros parâmetros do processo. A tabela 5.4 mostra os valores pré-selecionados para os ensaios.

Tabela 5.4: Matriz com ensaios de dois ciclos, sendo o primeiro ciclo com comprimento de queima de 5 mm e o segundo até 14 mm.

	ESTÁGIO 1		ESTÁGIO 2		
ENSAIO	Força [kN]	Rotação [rpm]	Força [kN]	Rotação [rpm]	Forjamento [kN]
C1	113	2500	201	2500	201
C2	113	2500	245	2500	245
C3	69	2000	157	2000	157
C4	69	2000	201	2000	201
C5	69	2000	245	2000	245
C6	29	1500	69	1500	69
C7	29	1500	113	1500	113
C8	29	1500	157	1500	157
C9	29	1500	201	1500	201
C10	29	1500	245	1500	245

Como mostra a tabela de ensaio, inicialmente foram aplicadas forças moderadas no primeiro ciclo e elevadas após o deslocamento de 5 mm (fim do primeiro ciclo). Para todos os ensaios da matriz, a mesma força axial aplicada durante o processamento também foi empregada na etapa de forjamento, sendo que a mesma teve duração de 3 s.

Durante a realização dos primeiros ensaios, pôde-se perceber que a força inicial era alta e na maioria das vezes o equipamento não atingia a mesma no primeiro ciclo. O comprimento de queima era atingido antes que a força aplicada alcançasse e se mantivesse no valor pré-estabelecido para o processo, como será mostrado e discutido no capítulo VI.

Com intuito de que os ensaios atingissem os valores pré-estabelecidos, uma nova matriz de ensaios foi construída, conforme observado na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Matriz de ensaios com dois estágios, no qual utilizou-se uma força baixa e um comprimento de queima de 3 mm no primeiro ciclo. O segundo ciclo foi até 15 mm.

	ESTÁGIO 1		ESTÁGIO 2		
ENSAIO	Força [kN]	Rotação [rpm]	Força [kN]	Rotação [rpm]	Força de Forjamento [kN]
D1	113	2500	201	2500	201
D2	20	2500	201	2500	201
D3	20	2500	49	2500	49
D4	20	2000	49	2000	49
D5	20	1500	49	1500	49
D6	20	1500	69	2500	69
D7	20	1500	113	1500	113
D8	20	1100	49	1100	49
D9	20	1100	69	1100	69
D10	20	1100	113	1100	113
D11	20	2000	157	2000	157

Nesta nova tabela de ensaios, a força inicial foi reduzida visando um menor esforço do sistema no início do processo e evitando, assim, o travamento do motor. O comprimento de queima do primeiro estágio foi reduzido, pois para atingir a força pré-estabelecida este valor se mostrou suficiente. Já no segundo estágio, o comprimento de queima teve o valor aumentado em 1 mm, pois, dessa forma, a execução do ensaio teria uma duração maior e isto eleva a possibilidade do sistema atingir as altas forças pré-estabelecidas, durante o processamento do pino.

Após a finalização dos ensaios mostrados na matriz de ensaios (tabela 5.5) notou-se que poderia realizar ensaios com 1 ciclo de rotação e aplicação de força de 49 kN, uma vez que é uma força mais baixa e possivelmente não travaria a rotação do equipamento. Portanto, os ensaios mostrados na tabela 5.6 foram realizados.

Tabela 5.6: Matriz de ensaios com 49 kN e variação na rotação.

Ensaio	Força [kN]	Rotação [rpm]	Comp. Queima [mm]	Força de Forjamento [kN]
D12	49	2000	15	49
D13	49	2500	15	49

Estes ensaios foram realizados com comprimento de queima diferente (15 mm), pois é o mesmo valor utilizado nos ensaios de dois ciclos, que será mostrado no próximo tópico.

Novamente os gráficos, contendo os valores dos parâmetros durante o processamento do material, foram salvos e serão analisados e melhor detalhados no capítulo VI.

5.4. Preparação Metalográfica

A análise metalográfica é um meio importante, através do qual se pode explicar as propriedades e o comportamento dos materiais. Com este recurso é possível estudar e conhecer a estrutura do material.

O controle de qualidade através da metalografia pode ser estudado através de duas maneiras: Macrografia e Micrografia. A primeira refere-se a uma análise das características estruturais de grandes dimensões vistas a olhos nus ou com pequenas ampliações, enquanto na segunda tem-se observações da microestrutura, como tamanho de grão e estrutura cristalina, sendo executada somente com auxílio microscopia óptica ou outros meios com mais poder de ampliação. Porém, nos dois casos, se faz necessário uma preparação rigorosa e detalhada da peça a ser analisada.

Neste trabalho as amostras foram analisadas utilizando as duas formas, como será descrito mais detalhadamente nos próximos tópicos.

5.4.1. Macrografia

O primeiro passo foi remover o pino da amostra, uma vez que após o término do processo de reparo e a união metalúrgica concluída, o restante do consumível é dispensável.

Após a retirada do pino efetuou-se um corte longitudinal ao pino, passando pelo centro do pino. Vale ressaltar, que o corte foi realizado de forma lenta e progressiva, além de utilizar,

durante todo o processo, um líquido refrigerante, buscando minimizar os efeitos dos esforços e da temperatura na estrutura do material.

Após a realização do corte, as amostras tiveram suas faces retificadas. Com a superfície totalmente plana, as amostras foram lixadas utilizando as lixas d'água de granulometria 200, 320, 400 e 600 mesh.

Depois da etapa do lixamento, as amostras foram atacadas com solução de Nital de 6% por alguns segundos (tempo suficiente para mostrar a estrutura da superfície em análise).

Com a superfície atacada, foi realizada uma inspeção visual na amostra. Essa inspeção permite verificar a existência de alguns defeitos, tal como falta de preenchimento na interface entre pino e bloco. Além disso, pode-se avaliar a extensão da ZTA. Com intuito de armazenar as imagens macrográficas de todas as amostras ensaiadas, as superfícies em análise foram digitalizadas através de um *scanner*.

5.4.2. Micrografia

Para remover o ataque anterior, utilizado na macrografia, e iniciar o processo de análise micrográfica, a superfície em análise foi novamente lixada com lixa d'água de granulometria 600 e 1200 mesh.

Após a remoção, do ataque químico da macrografia, a superfície foi polida. Esse processo foi realizado em uma politriz com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm , utilizadas sequencialmente. O ataque para revelar a microestrutura foi realizado com solução de Nital 2% durante alguns segundos.

Após a etapa de preparação e ataque das amostras, as mesmas foram analisadas com auxílio de um microscópio óptico. Com esse equipamento foi possível analisar a microestrutura do material após a união metalúrgica, verificar o comportamento do material na região de interface pino bloco e analisar a influência do calor gerado durante o processo. Além disso, algumas fotos dos pontos críticos de união foram registradas.

5.5. Ensaio de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados nas amostras preparadas para a metalografia (após ataque com Nital a 2%)

A análise de microdureza do material foi realizada através de três perfis pré-estabelecidos, sendo um vertical e dois horizontais. Um desenho esquemático desses perfis é mostrado na figura 5.3.

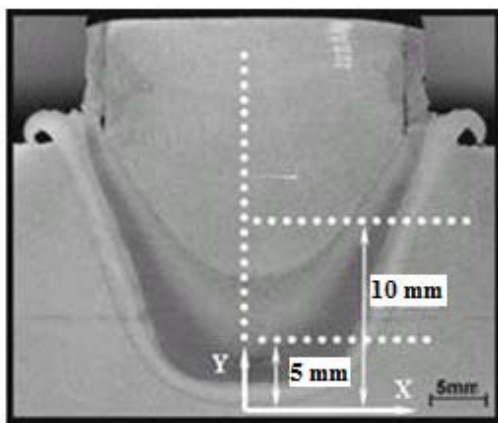


Figura 5.3: Desenho esquemático mostrando a localização dos perfis de microdureza.

As microindentações do perfil vertical tiveram início a aproximadamente três milímetros abaixo da interface inferior do reparo e o término ocorreu no momento que se atingiu o material do pino que não foi afetado pelo processo de união. Os perfis horizontais foram realizados acima da interface inferior, sendo uma a 5 mm e outro a 10 mm do mesmo ponto. Os dois tiveram início no centro do pino e término no momento que atingiam o material do bloco sem influência do reparo.

O equipamento utilizado para realizações das microindentações foi um microdurômetro Shimadzu e as indentações obedeceram as seguintes características:

- Carga: 50 gf (HV 0,05);
- Tempo: 15 segundos;
- Espaçamento: 0,05 mm ou 0,025 mm.

Nos pontos com menores alterações das características dos materiais base, o espaçamento entre as indentações foi de 0,05 mm, o que proporcionou uma maior agilidade no desenvolvimento dos ensaios de microdureza. Na ZAT o espaçamento utilizado foi 0,025 mm, pois um maior detalhamento desta região é importante.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é discutida a resposta do equipamento em relação à força axial, à faixa de operação do equipamento e aos resultados referentes aos ensaios descritos anteriormente. Isso permite verificar a melhoria da resposta do equipamento tratando-se de tempo e qualidade de reparo.

O programa de controle adquiriu sinais através dos sensores instalados em pontos específicos do equipamento e os cartões controladores atuaram na resposta do mesmo corrigindo os valores através de uma malha de controle fechada.

A análise dos dados tornou-se possível através do programa de aquisição de dados, o qual foi desenvolvido com o *software Labview*[®]. Esse adquire tanto os sinais que vão para o CLP quanto para os cartões controladores.

Nos próximos subitens são detalhados os ensaios realizados.

6.1. Ensaios Preliminares

6.1.1. Parâmetros de controle PID e válvulas

Os primeiros ensaios foram executados em vazio, que significa executar o ensaio sem que seja aplicada a rotação, garantindo que não tenha consumo do pino consumível. Os testes inicialmente foram realizados dessa forma com o intuito de minimizar os impactos da geometria no sistema de controle e melhor compreender a resposta referente ao controle de força do mesmo.

Vale lembrar que existem muitos critérios para avaliar o desempenho de um sistema e neste caso foi utilizado o tempo de subida (tempo gasto para atingir a força pré-estabelecida no ensaio). Este critério foi utilizado por se tratar de uma operação muito rápida (alguns segundos de ensaio) e, para que a mesma fosse realizada com uma força adequada, o tempo para se atingir o valor pré-selecionado é de extrema importância e deve ser o menor possível. Os critérios como *overshoot* e tempo de acomodação são importantes parâmetros de controle, porém nesses ensaios não foram tratados por serem considerados parâmetros menos influentes na qualidade do reparo.

O primeiro teste, como mostrado no capítulo anterior, foi realizado utilizando os valores máximos das constantes proporcional e integral e valor mínimo para constante derivativa, como mostrado na figura 6.1 (Teste 1).

Após esse teste elevou-se o valor de K_d (Teste 2) e posteriormente reduziu-se o valor de K_p (Teste 3), com intuito de reduzir o tempo de subida. As respostas dessas três configurações são mostradas na figura 6.1.

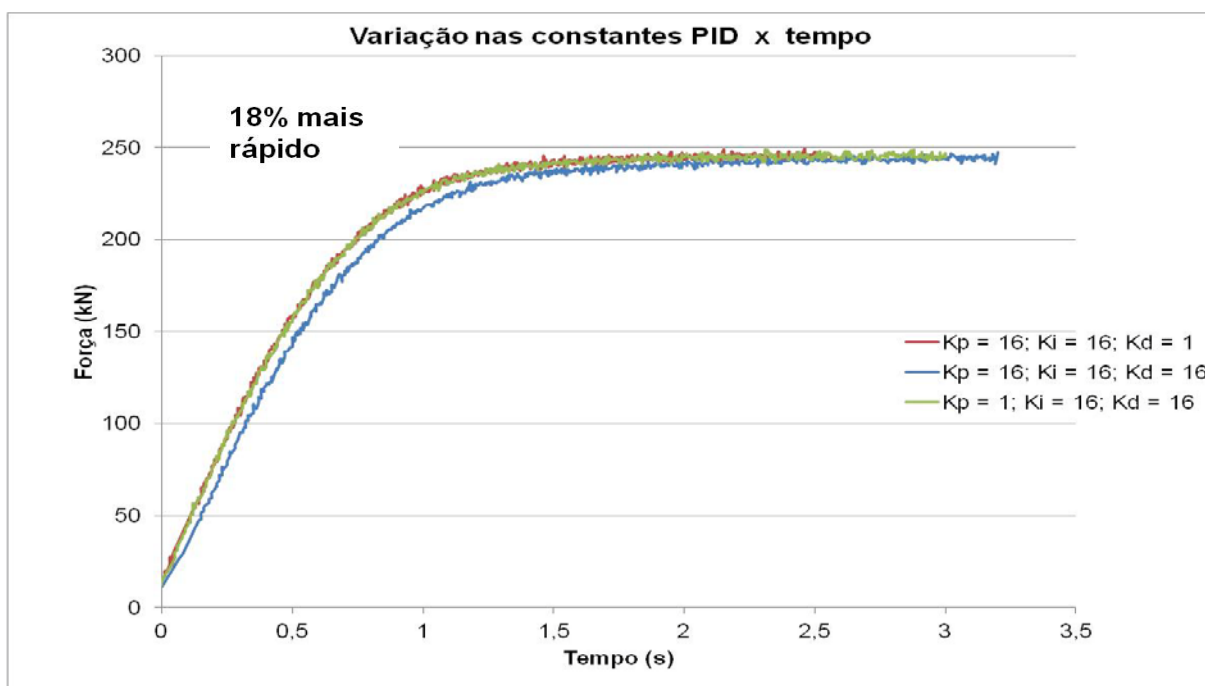


Figura 6.1: Evolução da força de processamento em função dos parâmetros de controle. O método utilizado: tentativa e erro com os parâmetros: Teste 1 ($K_p = 16; K_i = 16$ e $K_d = 1$); Teste 2 ($K_p = 16; K_i = 16$ e $K_d = 16$) e Teste 3 ($K_p = 1; K_i = 16$ e $K_d = 16$) e força pré-estabelecida de 245 kN.

Apesar das curvas apresentarem inclinação semelhante, nota-se que os testes com melhor desempenho foram os testes 1 e 3. O tempo apresentado com esses parâmetros (1,8 s)

representa uma redução de 18% no tempo de subida, quando comparado com o teste 2. Essa resposta condiz com a teoria, uma vez que a redução de K_p ou K_d torna a resposta ao sistema mais rápido. (OGATA, 2003).

Com o objetivo de melhorar ainda mais o desempenho do controle aplicado, outras variações foram aplicadas no controlador. Todas as variações e suas respectivas respostas estão representadas na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Variação nos parâmetros de controle de força e as respectivas respostas no tempo de subida.

Teste/Parâmetro	K_p	K_i	K_d	Tempo de subida [s]
1	16	16	1	1,8
2	16	16	16	2,2
3	1	16	16	1,8
4	16	9	16	1,8
5	16	1	16	3,0
6	1	1	1	1,8

Com intuito de ampliar a faixa de ensaios e mapear uma maior variação das constantes de controle realizou-se o último teste com as constantes no nível mínimo, ou seja, constantes com valor um. Esse teste não teve correlação ou semelhança alguma com os testes anteriores, os quais foram realizados através de uma aproximação do método de tentativa e erro. Nota-se novamente que uma redução muito brusca nos valor de K_i torna a resposta do sistema mais lenta.

Como mostrado no capítulo anterior, os DIL's, que são chaves de controle dos controladores do cartão, também foram alterados, com intuito de verificar uma possível melhoria no tempo de resposta. Porém, com a variação dessas chaves não se teve uma alteração no tempo de resposta do sistema, assim foi utilizada a configuração *standard* fornecida pelo fabricante.

6.1.2. Gráficos de Processamento

Antes das alterações realizadas no presente trabalho, alguns dos problemas do equipamento eram: alto tempo para se atingir a força estabelecida e valor de força pré-estabelecido não atingido. A tabela 5.2, mostrada no capítulo anterior, apresenta os parâmetros utilizados em dois ensaios de reparo realizados no UPPA-II (ensaio 1 e ensaio 6),

sendo que o ensaio 1 foi realizado antes das modificações citadas no trabalho e o ensaio 6 após essas alterações.

A figura 6.2 mostra a resposta do parâmetro de força nos dois ensaios, sendo que nenhum dos ensaios ocorreu travamento do motor e, portanto, podem ser considerados como ensaios completos. Vale ressaltar que os dois ensaios têm os mesmos parâmetros de força e rotação e comprimento de queima diferente. Para a presente análise, essa diferença de comprimento de queima não influenciará, pois será analisada somente a resposta do sistema quanto ao parâmetro força. O comprimento de queima será de suma importância em análises posteriores, nas quais serão tratados o tempo de aquecimento e a qualidade do reparo por atrito.

Através da figura 6.2, nota-se que o ensaio 1 atinge pouco mais de 150 kN de força, enquanto o valor pré-estabelecido era de 245 kN. Depois de atingir esse valor máximo, o ensaio entra na etapa de forjamento, como mostrado na figura 6.2, pois já atingiu o comprimento de queima pré-estabelecido. Por outro lado, o ensaio 2 atinge valores de forças muito mais elevados, sendo seu valor máximo de 232 kN, antes de entrar na fase de forjamento. Ou seja, no ensaio 1 havia limitações dentro do sistema que não permitiam atingir valores pré-estabelecidos acima de 150 kN, exceto quando o processo atingia a etapa de forjamento, na qual há uma maior resistência ao movimento vertical do pino.

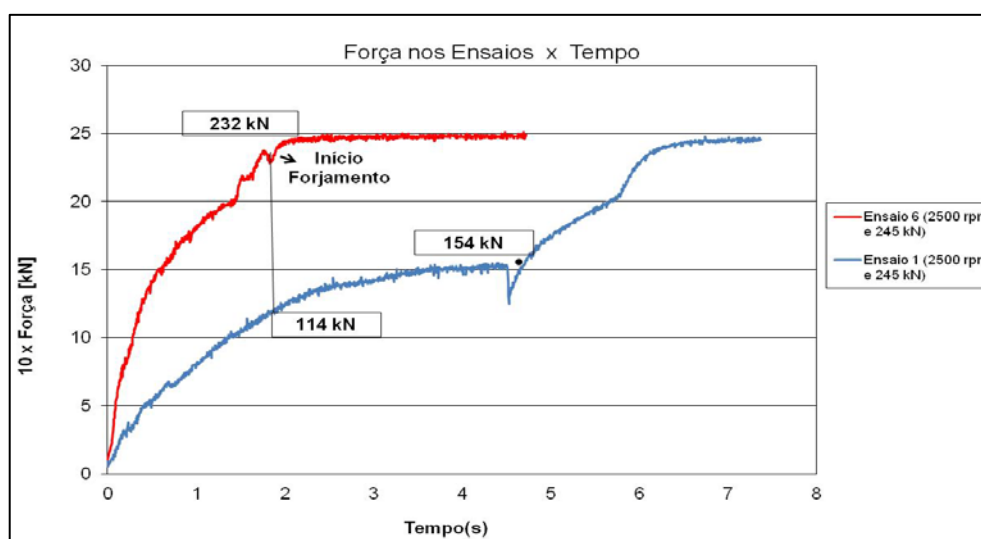


Figura 6.2: Variação na força máxima entre o ensaio 1 (245 kN e 2500 rpm) e ensaio 6 (245 kN e 2500 rpm).

É importante ressaltar que o ensaio 1 e ensaio 2 atingem acima de 150 kN e 230 kN, respectivamente, décimos de segundos antes de iniciarem a etapa de forjamento. Então, pelo

curto tempo, não se pode considerar que os ensaios foram realizados com essas forças axiais. Para não ocorrer esse tipo de problema, ou seja, para que as forças pré-estabelecidas sejam atingidas dentro do ciclo de reparo, o tempo de subida foi levado em consideração na análise como um dos principais pontos de melhoria.

A figura 6.3 mostra dois ensaios realizados, seguindo a mesma idéia anterior, ou seja, um ensaio foi realizado antes e o outro depois das alterações realizadas nos parâmetros de controle do sistema.

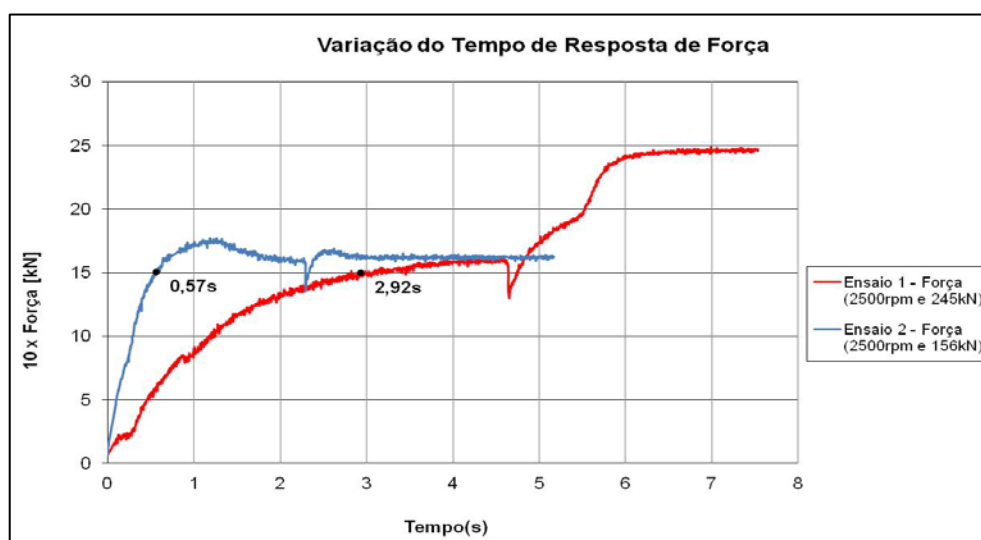


Figura 6.3: Ensaios realizados antes e depois das alterações nos parâmetros de controle e válvulas.

Nota-se que houve uma alteração considerável na resposta do sistema em relação ao tempo de subida do parâmetro força. Isso irá permitir que os ensaios sejam realizados com um valor de força mais uniforme, além de permitir que forças axiais mais elevadas sejam alcançadas, uma vez que o sistema terá mais tempo para processar em níveis de altas cargas.

O ensaio 2 apresenta um *overshoot*, porém atinge o valor máximo de 165 kN, o que representa 3,12% acima do valor pré-estabelecido. Além disso, o sistema é estabilizado rapidamente.

Posteriormente será mostrado o resultado de outro método utilizado para ampliar a faixa de operação do sistema, mas já se pode destacar que as alterações implementadas no controle do sistema trouxe resultados positivos, melhorando o tempo de resposta e, consequentemente, aumentando os níveis de forças axiais aplicadas.

Dentro da etapa de ensaios preliminares também se definiu que o comprimento de queima a ser utilizado nos ensaios de reparo completos será de 14 mm, uma vez que esse valor aparentemente preenche completamente o furo do bloco. Observou-se também que os

ensaios realizados com 18 mm de comprimento de queima elevam o tempo de processamento, aumentam a região do bloco afetada pelo aquecimento e apresentam um excesso de material, que é expelido do furo a ser preenchido.

6.2. Ensaios de Reparo por Atrito com um ciclo

Nesta etapa foram realizados ensaios completos, ou seja, todos os parâmetros foram definidos previamente e tentou-se executar todas as etapas (etapa de atrito, aquecimento, frenagem e forjamento). Os parâmetros utilizados em cada ensaio foram informados na tabela 5.3.

6.2.1. Variação nos Parâmetros do Processamento

As figuras de 6.4 a 6.11 mostram os gráficos dos ensaios realizados de acordo com a tabela 5.3. Como citado anteriormente, os valores coletados são referentes aos parâmetros: Força Axial, Rotação, Comprimento de Queima e Torque.

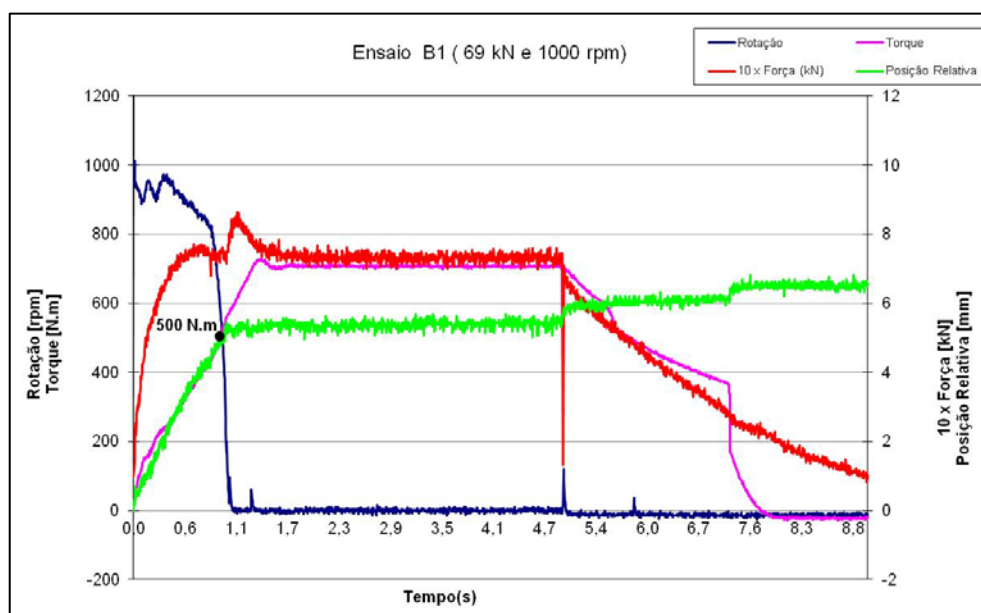


Figura 6.4: Sinais de respostas para o Ensaio B1 (69 kN e 1000 rpm).

Observa-se, através da figura 6.4, que à medida que o valor da força cresce, a rotação começa a oscilar até o momento que é cessada completamente. Isso ocorre porque o torque

ultrapassa o valor de torque máximo suportado pelo equipamento, que é de 500 N.m. De acordo com Lebedev (1992), o coeficiente de atrito médio entre as superfícies em contato varia tal como o torque resistivo.

Segundo Pires (2007), o aumento das forças axiais aumenta a força de atrito e, consequentemente, o torque resistivo. Assim, em uma mesma velocidade, quanto maior a força, maior será o torque requerido pelo sistema.

Como o ensaio B1 é um teste com menor valor de força axial (proposto na tabela 5.3), os ensaios de mesma rotação subsequentes não foram executados, pois todos os ensaios excederiam o torque máximo do equipamento. Este elevado torque nas rotações mais baixas dificulta o controle do sistema, uma vez que gera grandes oscilações nos parâmetros e rapidamente atinge o limite do equipamento.

Como citado, os ensaios B2, B3, B4 e B5 não foram executados. Assim, o próximo ensaio refere-se a uma rotação um pouco maior. A figura 6.5 mostra os parâmetros adquiridos ao longo do ensaio B6.

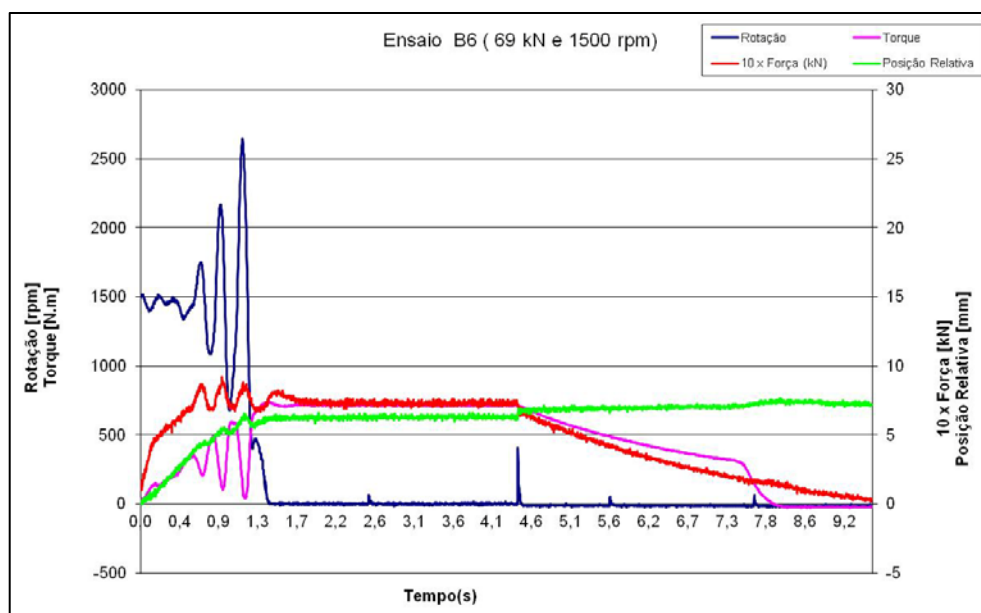


Figura 6.5: Sinais de respostas para o Ensaio B6 (69 kN e 1500 rpm).

Como pode ser visto no gráfico acima, a rotação começa a oscilar antes que o torque atinge o seu valor máximo. Portanto, pode-se concluir novamente que para baixas rotações o sistema de rotação apresenta uma instabilidade. Diante disso, algumas alterações no controle de rotação via cartão VT-HACD foram implementadas. Todavia, a rotação apresentou

grandes oscilações durante a parametrização das variáveis, o que gerou instabilidade e vibração para toda a estrutura da cabeça de reparo.

Novamente verificou-se o controle em vazio, ou seja, aplicando somente rotação no sistema sem aplicação de força. Nesses testes, o sistema apresentou estabilidade na rotação mínima de 1.000 rpm. Todavia, quando aplicado no ensaio completo, ou seja, ensaio onde foi aplicado força e rotação em conjunto, a mesma instabilidade do sistema foi observada.

Assim, os ensaios B7, B8, B9 e B10 não foram executados, pois apresentariam as mesmas instabilidades, sendo que com o aumento da força aumentava-se a chance de atingir o limite de torque do equipamento e travar o sistema de rotação, pelos motivos mencionados anteriormente.

Os dois próximos ensaios, B11 e B12, apresentaram respostas semelhantes, as quais estão representadas nas figuras 6.6 e 6.7, respectivamente.

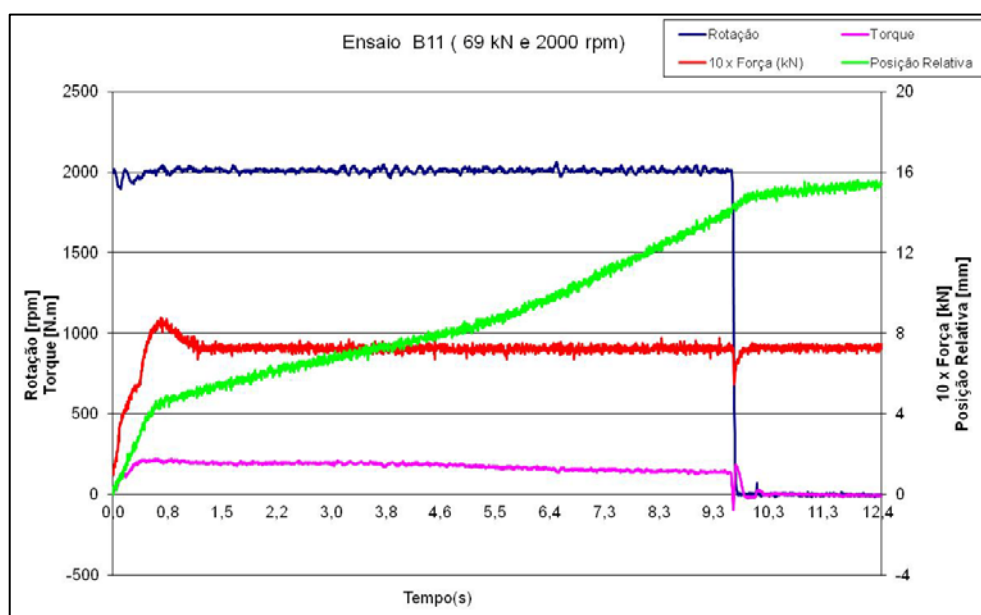


Figura 6.6: Sinais de respostas para o Ensaio B11 (69 kN e 2000 rpm).

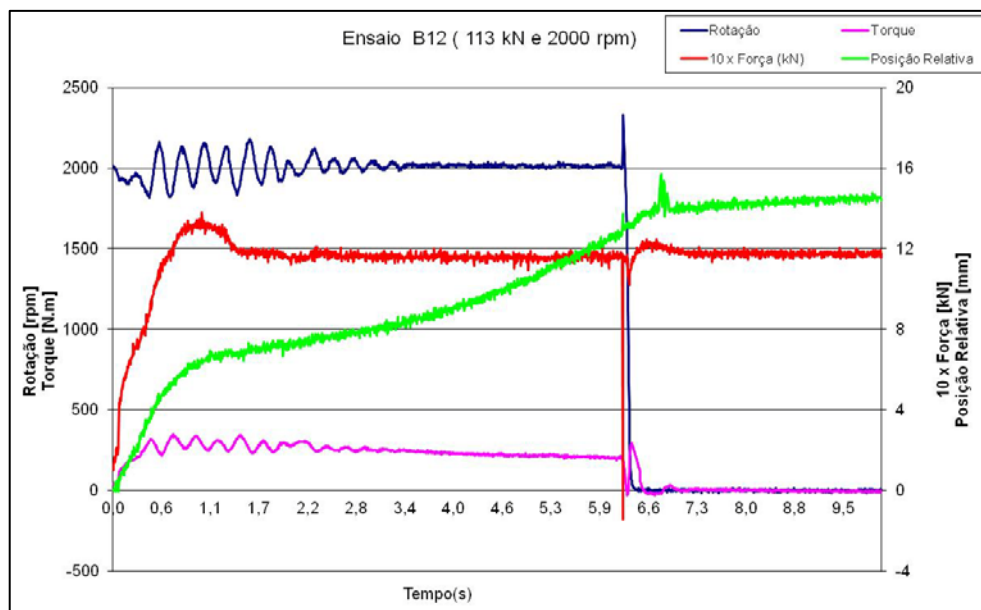


Figura 6.7: Sinais de respostas para o Ensaio B12 (113 kN e 2000 rpm).

Concentrando-se nas curvas de rotação dos gráficos, nota-se que no ensaio B11 o controle de rotação fica estável desde o início do processo, mesmo no pico de força que atinge aproximadamente 83,5 kN. No ensaio B12, a rotação sofre algumas oscilações até aproximadamente 3,25 s de ensaio. Isso é justificado pela variação da força no início do processo, o que altera o torque resistivo. A máxima variação do parâmetro de rotação está próxima de 8 %, o que provavelmente não influenciou no preenchimento ou qualidade do reparo.

Quanto a comprimento de queima, observam-se três comportamentos distintos ao longo dos ensaios, ou seja, consumo intenso no início, consumo linear no meio e baixo durante o forjamento, como é citado abaixo:

- **Início do processo:** neste momento, a taxa de queima é elevada, pois o pino consumível é formado por uma ponta cônica, de diâmetro relativamente pequeno;
- **Fase de processamento:** nesta fase, a taxa de consumo ou queima do pino é constante, pois a área de contato torna-se constante e não há variação na força, e
- **Forjamento:** nesta etapa, essa taxa é baixa, podendo chegar a ser nula. Isso acontece porque não se tem deformação do pino e somente uma acomodação do material deformado (PIRES, 2007).

Como citado anteriormente, o torque tende a aumentar com a elevação da força. Isso fica comprovado, uma vez que no ensaio B11 o torque atinge a faixa de 210 N.m, enquanto o ensaio B12 chega a 330 N.m, ou seja, cerca de 50% maior.

Como mostra a figura 6.8, que representa o próximo ensaio da tabela 5.3, mais uma vez o valor de torque excedeu o limite do equipamento. Quando a força atinge cerca de 150 kN, a rotação é travada, sendo que o valor de torque nesse momento chega a atingir 750 N.m. Nota-se na figura 6.8, que o torque fica elevado até aproximadamente 14 s, pois o equipamento envia óleo para o motor hidráulico visando implementar rotação no pino, porém não é suficiente para superar o atrito. Assim, os ensaios B9 e B10 não foram realizados devido ao travamento do motor de rotação.

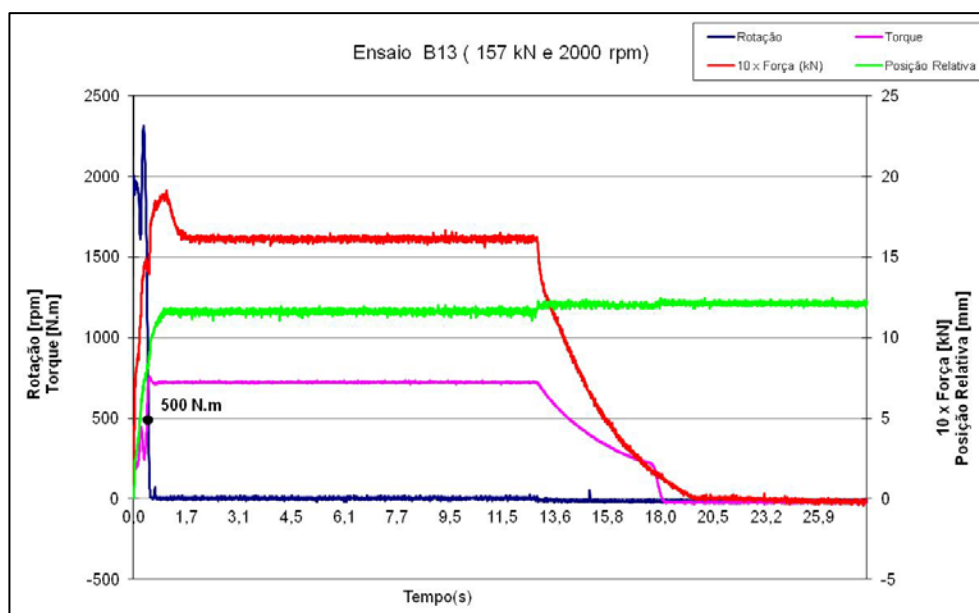


Figura 6.8: Sinais de respostas para o Ensaio B13 (157 kN e 2000 rpm).

Então se iniciam os ensaios que apresentam uma velocidade de rotação de 2500 rpm, como estão representados nas figuras 6.9, 6.10 e 6.11.

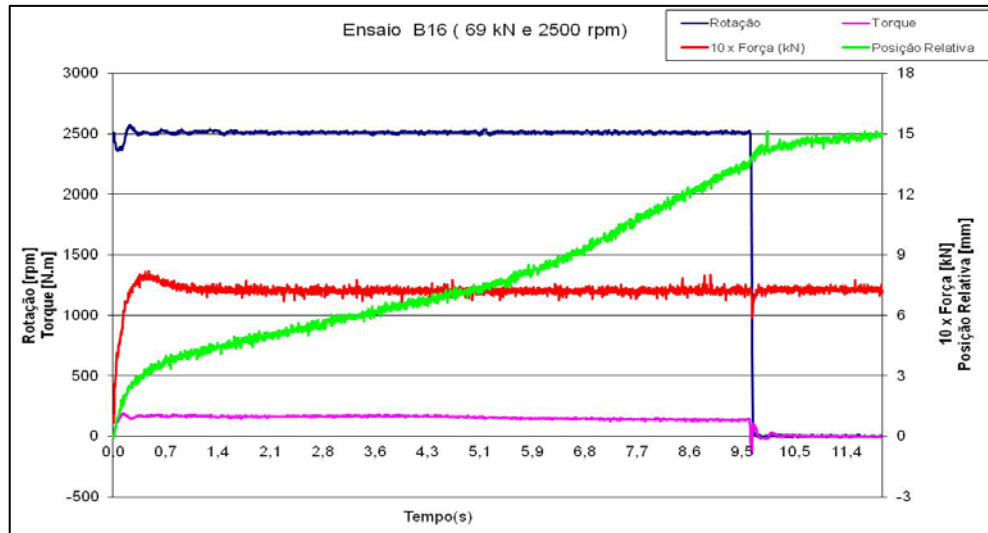


Figura 6.9: Sinais de respostas para o Ensaio B16 (69 kN e 2500 rpm).

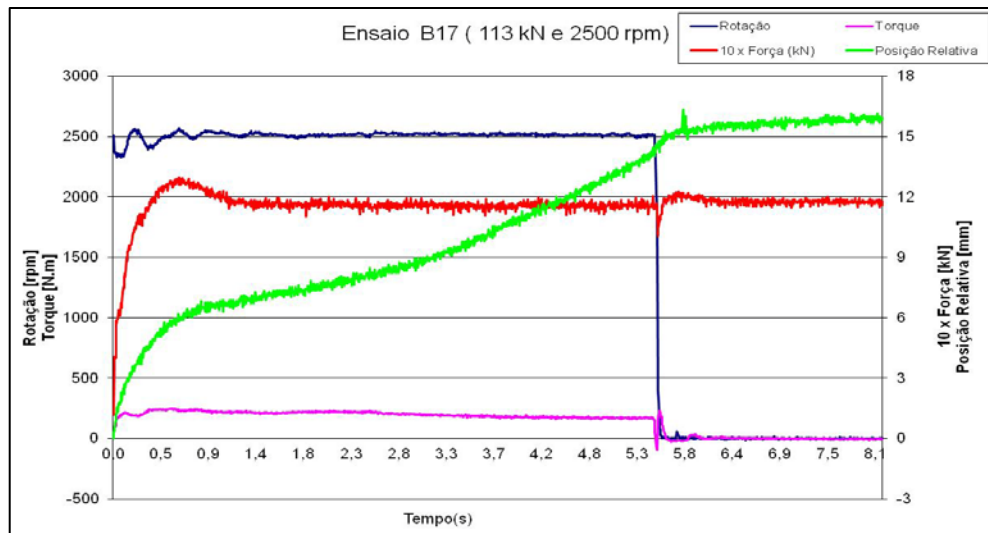


Figura 6.10: Sinais de respostas para o Ensaio B17 (113 kN e 2500 rpm).

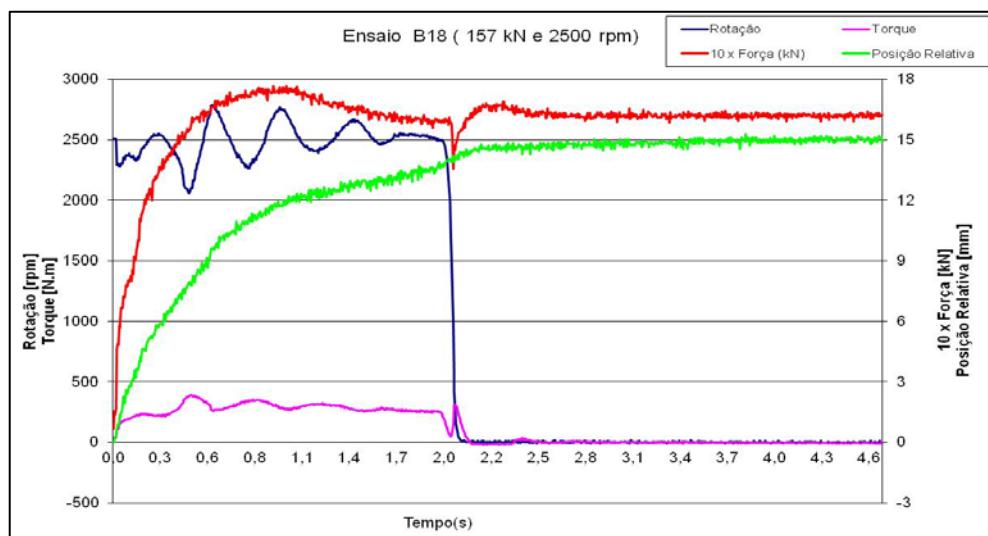


Figura 6.11: Sinais de respostas para o Ensaio B18 (157 kN e 2500 rpm).

Observa-se que o comportamento do parâmetro de queima é idêntico aos ensaios com 2000 rpm, sendo isso esperado, uma vez que o comprimento de queima sofre grande influência da força axial aplicada, como citado anteriormente.

A rotação nos ensaios B16 e B17 mantém-se constante durante todo o processamento. Comparando os ensaios B12 e B17, nota-se que em uma rotação de 2500 rpm, o sistema consegue atingir cargas mais elevadas sem apresentar oscilações, uma vez que o torque atingido é menor (aproximadamente 250 N.m).

No ensaio B18 tem-se uma oscilação da rotação devido ao aumento da carga e, consequentemente, do torque. Esse ensaio apresentou oscilações de rotação de até 16%, o que pode ter comprometido o preenchimento e qualidade do repara. Uma melhor análise poderá ser realizada mediante apresentação da macrografia dessa amostra, a qual será mostrada no próximo subitem.

O ensaio B19 da tabela 5.3 foi realizado, porém novamente teve-se uma elevação do torque além do limite do equipamento, travando-o.

Observando os tempos de processamento dos ensaios realizados, nota-se uma variação quando há variação da força ou rotação. A figura 6.12 mostra essa variação de tempo nos ensaios completos, como era esperado.

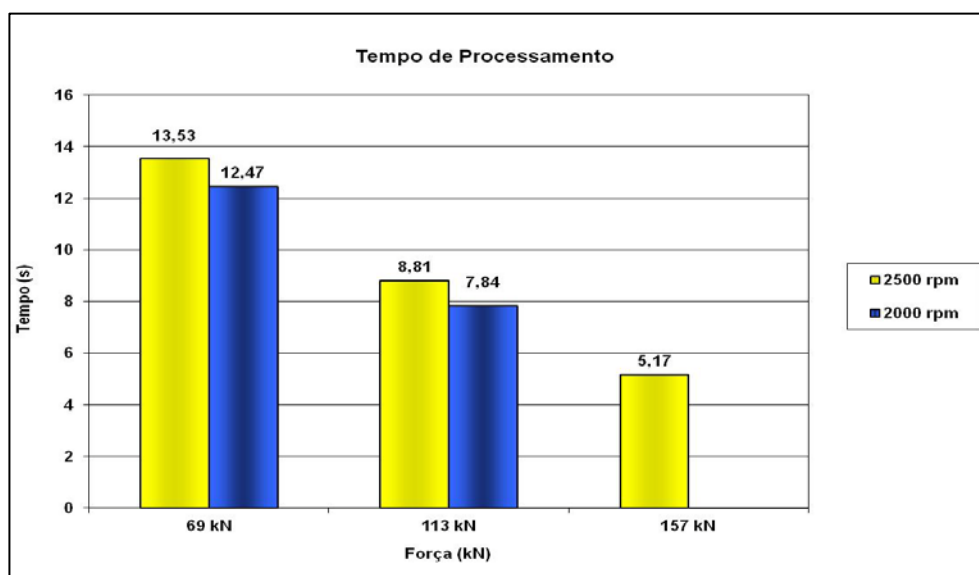


Figura 6.12: Tempo de processamento dos ensaios completos mostrados nas figuras de 6.4 a 6.11.

Mantendo-se a força constante e aumentando o valor da velocidade de rotação tem-se um aumento no tempo de processamento. Com relatado por VILL (1962) e citado por PIRES

(2007) o aumento no tempo de processamento com a elevação da rotação pode ter sua causa decorrente de uma maior ação de polimento nas superfícies em atrito. Esse comportamento requer um maior tempo de aquecimento para se alcançar às condições adequadas de plastificação.

Por outro lado, mantendo-se a rotação constante e aumentando o valor da força axial tem-se uma redução do tempo de processamento. Isso ocorre porque com o aumento da força há um aumento na taxa de queima e, conseqüentemente, o processo terá um menor tempo de aquecimento. Esse tempo de aquecimento influenciará nas características mecânicas do reparo, pois aumentam/reduzem a zona termicamente afetada.

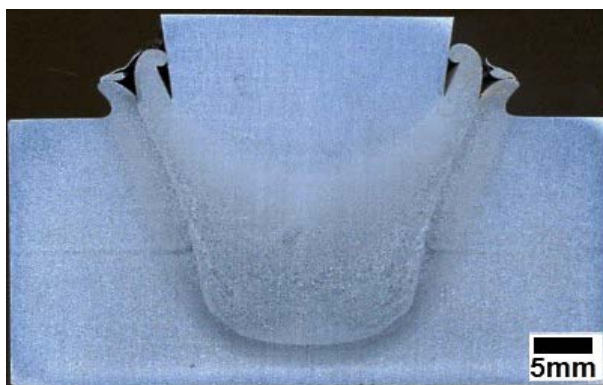
6.2.2. Macrografia

A figura 6.13 representa as macrografias dos ensaios realizados com um ciclo. Essas macrografias foram obtidas com intuito de verificar se todo o espaço vazio no bloco foi preenchido pelo pino consumível.

Analisando as macrografias da figura 6.13, nota-se que o furo é completamente preenchido em todos os ensaios. Portanto, pode-se concluir que os parâmetros utilizados foram aparentemente adequados para o reparo e que a geometria utilizada traz um reparo de qualidade, ou seja, sem falhas.

Mesmo no ensaio B18, que apresentou uma oscilação na rotação de 16%, o resultado foi um preenchimento completo. Aparentemente, essa oscilação provavelmente não afetou a qualidade do reparo.

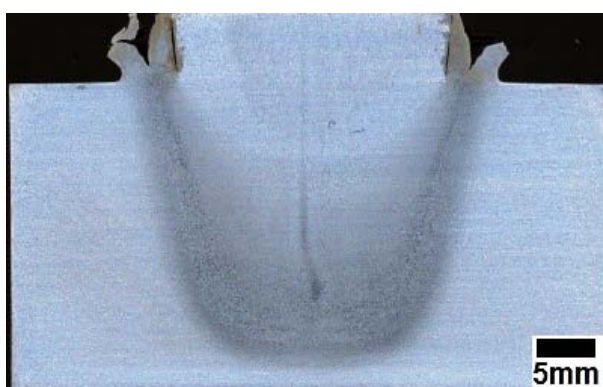
Nesse primeiro momento não foi realizado um estudo detalhado das amostras, uma vez que se preocupou primeiramente em aumentar a faixa de operação do equipamento, tanto para menores velocidades quanto para maiores forças axiais. Nos casos posteriores serão mostrados as análises micrográficas e ensaios de microdureza, além de uma análise mais detalhada das macrografias.



Ensaio B11 (69 kN e 2000 rpm)



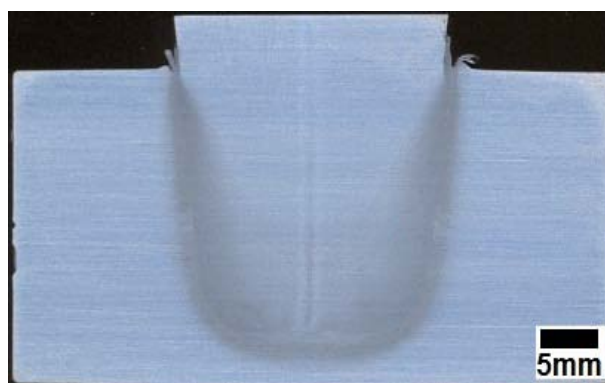
Ensaio B16 (69 kN e 2500 rpm)



Ensaio B12 (113 kN e 2000 rpm)



Ensaio B17 (113 kN e 2500 rpm)



Ensaio B18 (157 kN e 2500 rpm)

Figura 6.13: Macrografias dos ensaios (B11, B12, B16, B17 e B18) com um ciclo de rotação.

6.2.3. Faixa de operação

Após a realização dos ensaios com um ciclo de processamento, pode-se definir a faixa de operação do equipamento, levando em consideração as geometrias do bloco e pino, bem

como o material utilizado. A janela de operação do equipamento é mostrada na figura 6.14, e corresponde às combinações dos parâmetros do processo que retornaram ensaios com processamento completo e ausência de falhas de preenchimento.

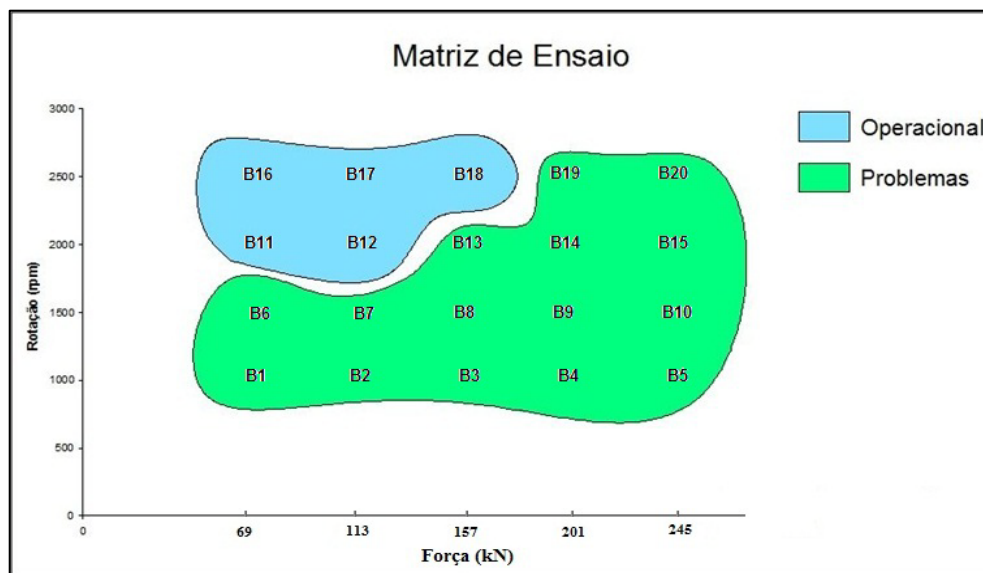


Figura 6.14: Área de operação do equipamento com um ciclo para a geometria selecionada para o pino e para o bloco.

Avaliando a figura acima, nota-se que a faixa de operação do equipamento é restrita, uma vez que forças acima de 160 kN não foram atingidas e rotações abaixo de 1500 rpm apresentaram torque acima do limite do equipamento. Com intuito de aumentar essa janela de operação foi proposta a realização de ensaios com dois ciclos. Nesse caso, durante o ensaio pode-se ter variação de força e/ou rotação. Esses resultados são mostrados no subitem seguintes.

6.3. Ensaios de Reparo por Atrito com dois ciclos

Com intuito de aumentar a faixa de operação do equipamento foi implementada uma programação de dois ciclos de força. O primeiro ciclo funciona como uma fase de aquecimento da amostra. Assim, com um maior aporte térmico, o torque aplicado tende a ser reduzido no início do processo e, consequentemente, o motor não travará. A seguir são mostrados os resultados dessa nova etapa.

6.3.1. Implementação dos dois ciclos

Baseado nos resultados alcançados na primeira etapa, montou-se uma proposta de melhoria como mostrado na tabela 5.4. Porém, com a execução dos ensaios pôde-se notar que não era possível atingir tais forças com a geometria aplicada. Então, uma nova proposta foi montada, como mostrou a tabela 5.5 e representada na figura 6.15 abaixo.

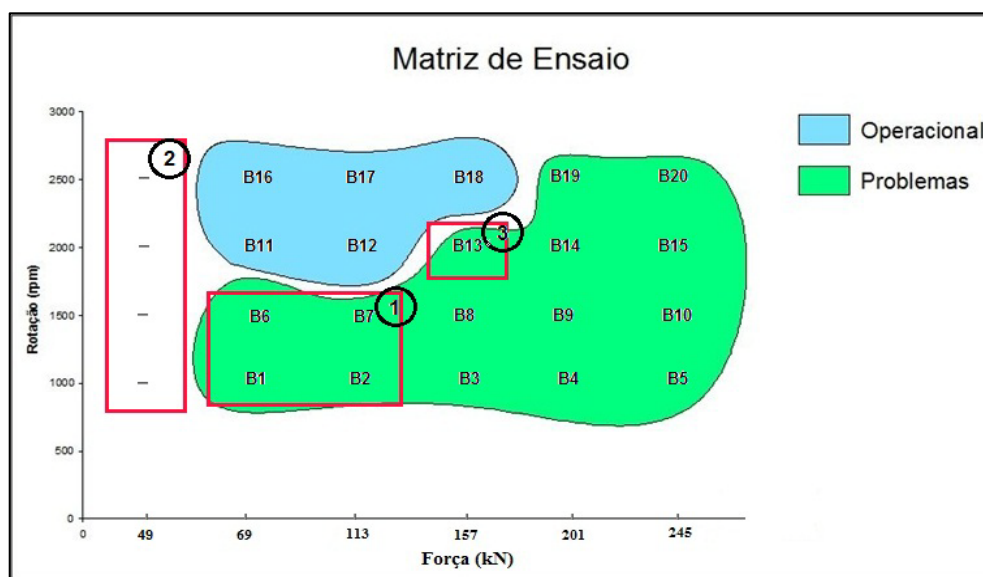


Figura 6.15: Área de operação proposta para ensaios com dois ciclos.

As faixas 1, 2 e 3, representadas na figura 6.15, indicam pontos que se pretende atingir, uma vez que com o equipamento e a geometria utilizadas, percebeu-se uma extrema dificuldade em atingir os pontos com força acima de 160 kN. Algumas vezes atingiu-se acima desse valor, porém isso acontece no final do processo (força aplicada durante alguns milissegundos, pouco antes da finalização da fase de preenchimento, ou seja, praticamente quando se atinge o comprimento de queima pré-selecionado). Portanto não se pode considerar que o ensaio foi realizado com essa força.

Como citado no Capítulo V, o primeiro passo foi implementar uma programação no CLP e posteriormente testar esse novo programa. Para teste do programa foi utilizado um pino de 50,8 mm (duas polegadas), como citado anteriormente, e os resultados desta implementação são mostrados na figura 6.16.

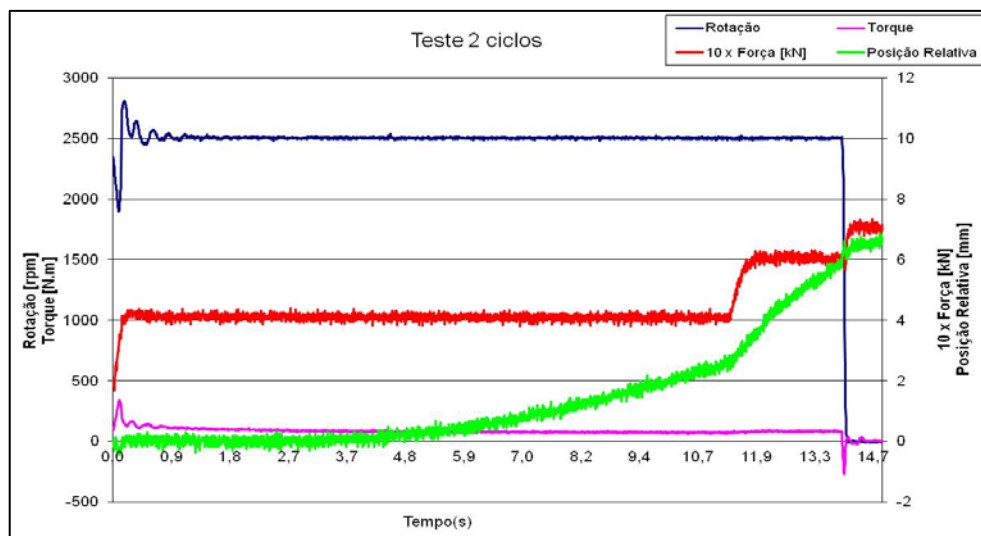


Figura 6.16: Ensaio utilizando dois ciclos de força; o primeiro com 41 kN e o segundo com 61 kN.

Neste ensaio percebe-se claramente que próximo aos 12 segundos há uma mudança no valor de força, ou seja, há uma mudança no ciclo. Portanto, o equipamento funciona perfeitamente com dois ciclos de força. Vale ressaltar que o parâmetro utilizado para alteração do ciclo foi o comprimento de queima do pino e não o tempo de processamento.

Também foram implementados dois ciclos de rotação, porém foi utilizado somente o ciclo de força devido às melhores respostas apresentadas. A variação do tempo é muito mais significativa quando se varia a força do que quando se varia a rotação. Isso foi citado em trabalhos anteriores (MEYER, 2002 e PIRES, 2007) e mostrado na figura 6.12 (tempo de processamento).

6.3.2. Variação nos Parâmetros de Processamento

As figuras de 6.17 a 6.23 mostram os gráficos dos ensaios realizados de acordo com a Tabela 5.5. Esses ensaios mostram as respostas dos ensaios realizados utilizando dois ciclos de força.

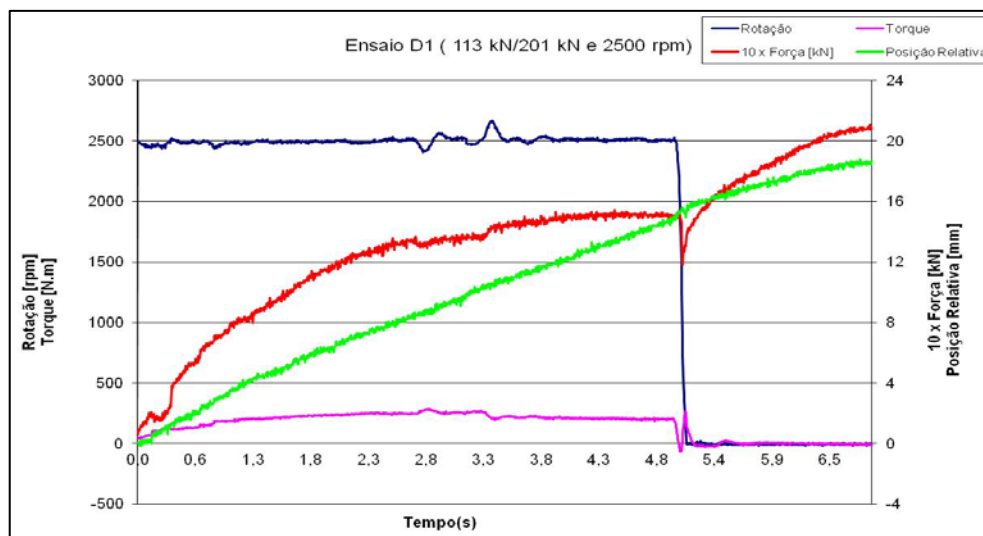


Figura 6.17: Sinais de resposta do ensaio D1(113 kN/201 kN e 2500 rpm) com dois ciclos de força.

Nota-se que no primeiro e no segundo ciclo não foi possível atingir as forças pré-estabelecidas, uma vez que o tempo de ensaio não foi suficiente. Com intuito de melhorar essa resposta e atingir as áreas de processamento mostradas na figura 6.15, reduziu-se o valor de força do primeiro ciclo. Isso proporciona um melhor aporte térmico durante o ensaio, ou seja, os materiais têm tempo suficiente para atingir as temperaturas ideais para proporcionar um escoamento plástico. Esse melhor aporte térmico proporciona uma redução na dureza final do reparo.

A figura 6.18 mostra a resposta do sistema para o ensaio D2.

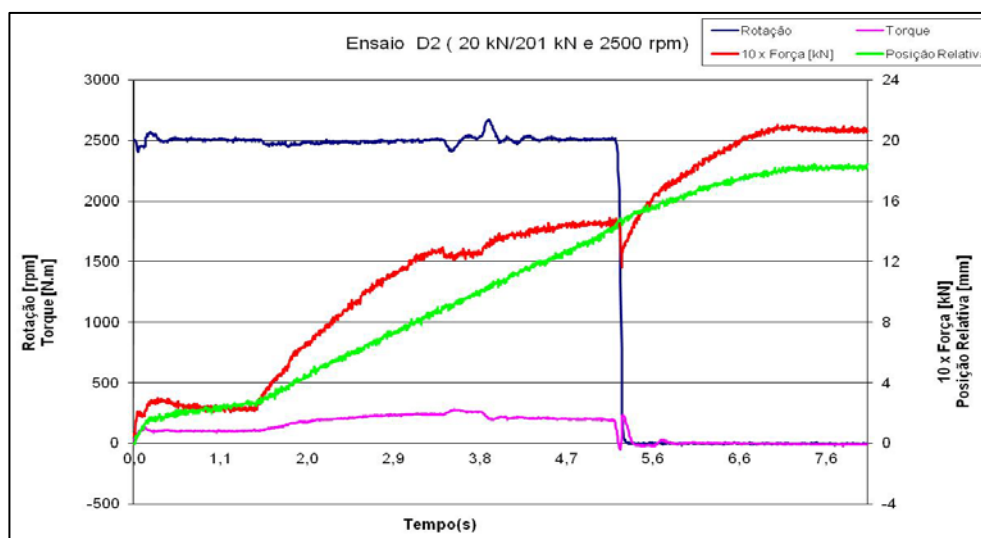


Figura 6.18: Sinais de resposta do ensaio D2 (20 kN/201 kN e 2500 rpm) com dois ciclos de força.

A figura 6.18 mostra que a força pré-estabelecida no primeiro ciclo é atingida e controlada, porém a força de 201 kN novamente não foi atingida. Portanto, restringiram-se os ensaios a forças menores.

Os ensaios D3 e D4 são mostrados na figura 6.19 e 6.20, respectivamente. Nota-se que os dois ensaios são executados completamente e que as forças pré-estabelecidas são atingidas e controladas durante todo o processo. Portanto, com forças menores o equipamento funciona perfeitamente, sendo necessária a avaliação da microestrutura para análise da qualidade do reparo.

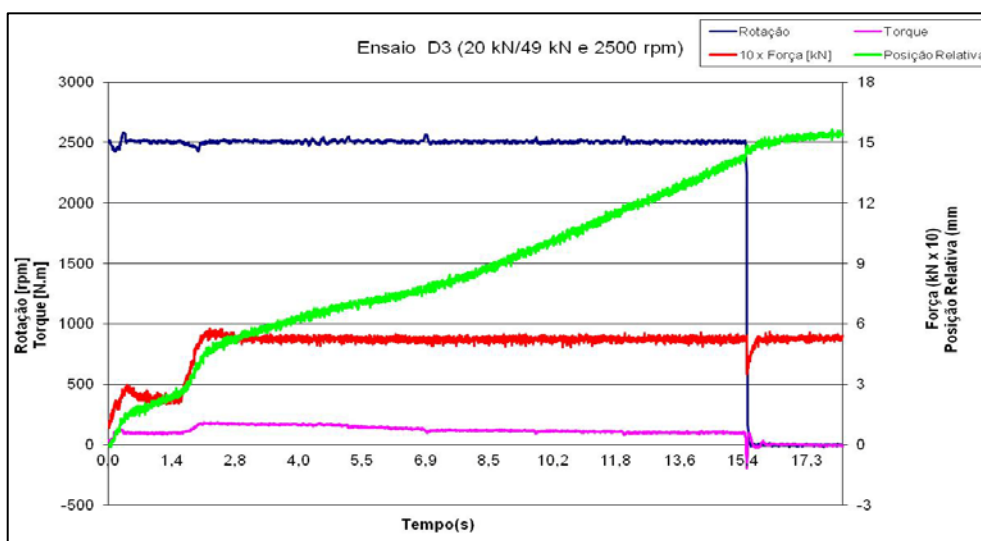


Figura 6.19: Sinais de resposta do ensaio D3 (20 kN/49 kN e 2500 rpm) com dois ciclos de força.

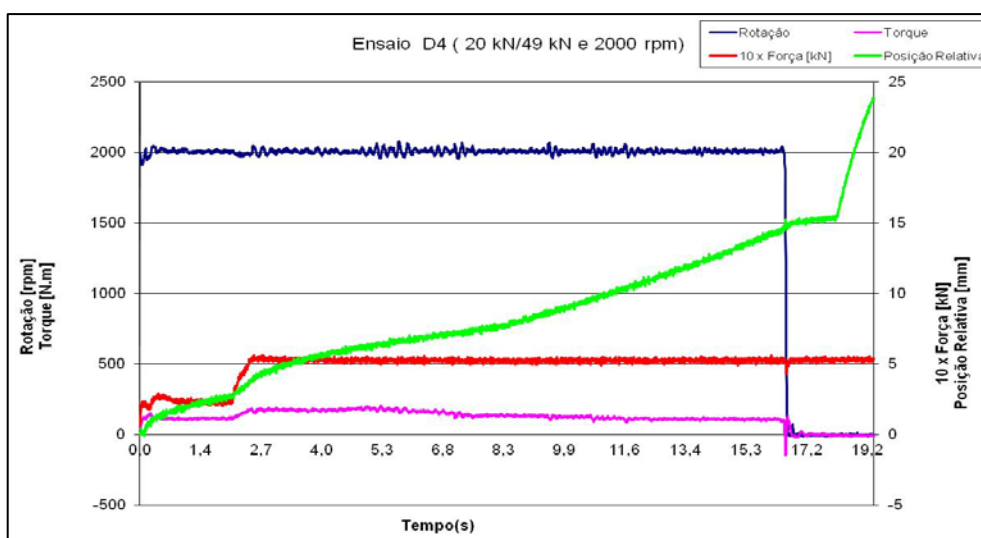


Figura 6.20: Sinais de resposta do ensaio D4 (20 kN/49 kN e 2000 rpm) com dois ciclos de força.

No ensaio D5, como mostra a figura 6.21, há variação no sinal de resposta de rotação. Como verificado nos ensaios de um ciclo de força, essa variação ocorre para ensaios executados em baixas rotações. Vale ressaltar que o ensaio D8 também foi executado e as mesmas oscilações foram verificadas. Assim, os ensaios foram executados somente com rotações acima de 1800 rpm.

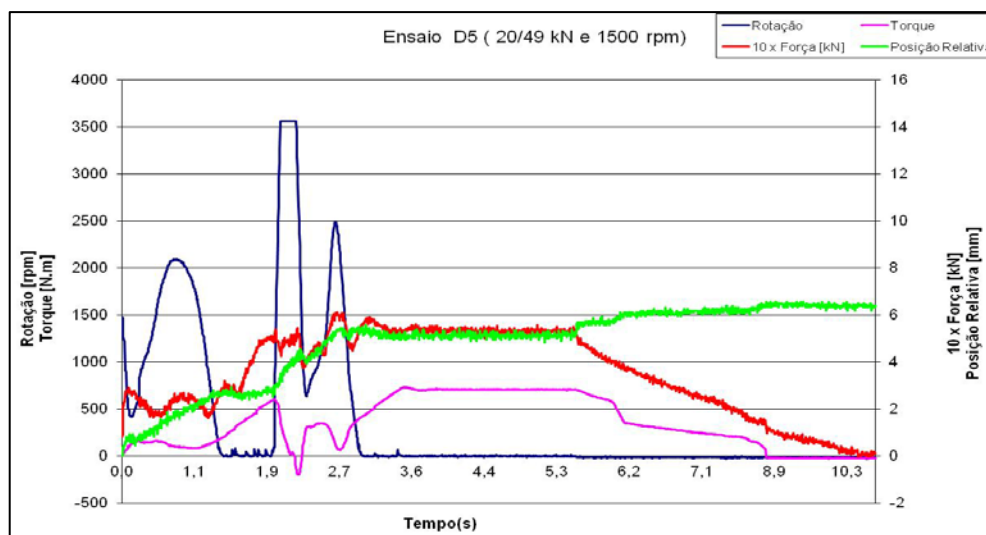


Figura 6.21: Sinais de resposta do ensaio D5 (20 kN/49 kN e 1500 rpm) com dois ciclos de força.

Com intuito de atingir a área 3 da figura 6.15, realizou-se o ensaio D11 e os sinais de respostas estão mostrados na figura 6.22.

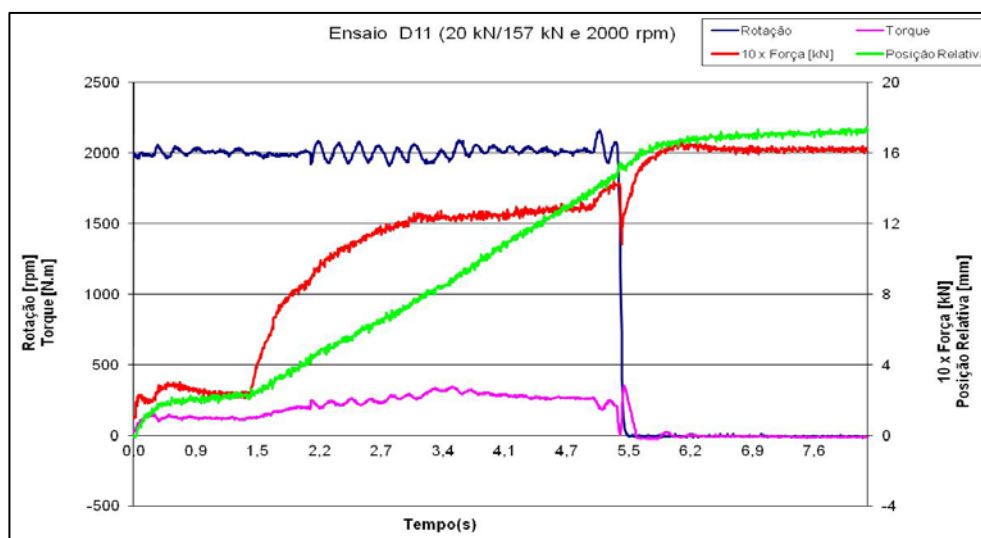


Figura 6.22: Sinais de resposta do ensaio D11 (20/157 kN e 2000 rpm) com dois ciclos de força.

Nota-se que houve uma pequena oscilação na rotação durante o ensaio, porém essa oscilação é aceitável e não influencia na qualidade do reparo. Também é possível verificar que a força aplicada não atinge 157 kN, mas fica próxima de 132 kN no segundo ciclo. Isso demonstra que, aplicando uma força inferior no início do processo, é possível atingir maiores forças utilizando rotações de valores mais baixos, tal como 2000 rpm, sem que o equipamento trave.

Outros dois ensaios foram realizados, como mostrado na tabela 5.6. As respostas dos ensaios D12 e D13 são mostradas nas figuras 6.23 e 6.24, respectivamente. Como esperado, os ensaios foram realizados com sucesso, ou seja, houve controle dos parâmetros do processo sem ocorrer o travamento do motor.

Novamente foi realizada uma análise no tempo de processamento dos ensaios e pôde-se observar que a variação da força tem uma maior influência na variação desse tempo, como verificado também nos ensaios de apenas um ciclo.

Ensaio macrográficos, micrográficos e de microdureza foram realizados para avaliar a variação das propriedades mecânicas em função dos parâmetros utilizados e são apresentados nas seções seguintes.

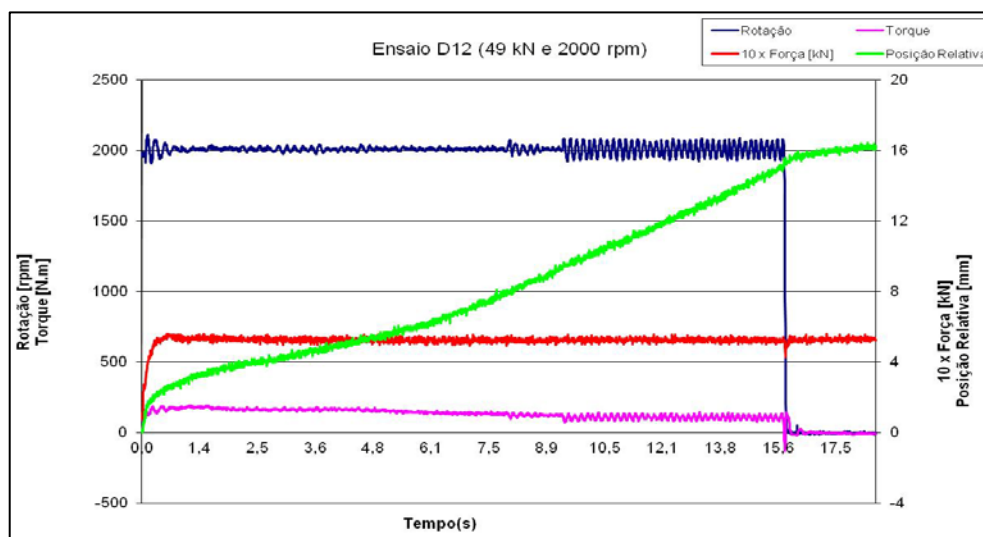


Figura 6.23: Sinais de resposta do ensaio D12 (49 kN e 2000 rpm).

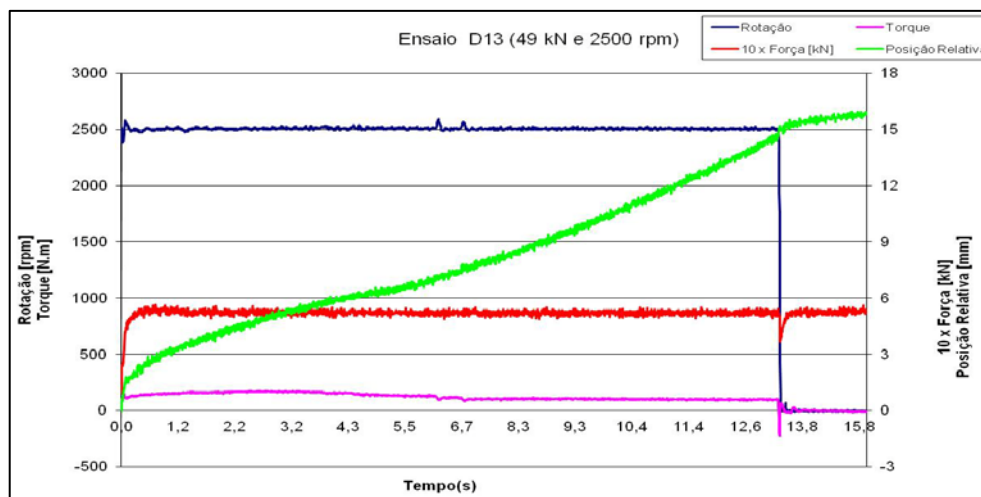
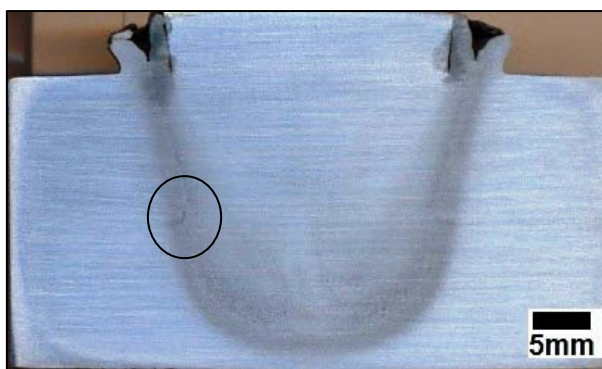


Figura 6.24: Sinais de resposta do ensaio 13 (49 kN e 2500 rpm).

6.3.3. Análise Metalográfica

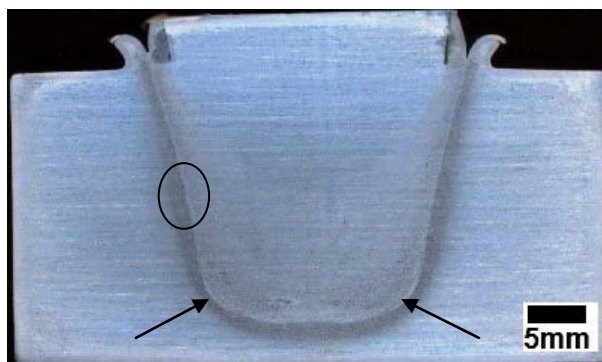
A figura 6.25 apresenta as macrografias dos ensaios realizados com dois ciclos. Como citado no capítulo IV, as macrografias foram obtidas ao longo da seção longitudinal do pino de preenchimento e serve para avaliar o comportamento do reparo.



Ensaio D1 (113/201 kN e 2500 rpm)



Ensaio D3 (20/49 kN e 2500 rpm)



Ensaio D2 (20/201 kN e 2500 rpm)



Ensaio D4 (20/49 kN e 2000 rpm)

Figura 6.25: Macrografias referentes aos ensaios de D1 a D4, com dois ciclos de força.

Através de uma análise macroscópica, observa-se que não há, aparentemente, falta de preenchimento na região de interface entre o material pino e bloco. As regiões mais críticas são as interfaces inferiores laterais, as quais estão indicadas no ensaio D2, figura 6.25. Como citado por Pires (2007) isso está associado à menor taxa de transferência de calor ocorrida nas extremidades inferiores do fundo do furo, devido à menor área desta região, quando comparada com as paredes laterais superiores e inferiores centrais. Assim, é de se esperar que a taxa de resfriamento do material nesta posição assuma um comportamento distinto das demais regiões do furo.

Porém, nesses ensaios, observa-se que nos pontos destacadas pelas setas, na figura 6.25, o preenchimento também é completo, o que sugere uma boa união metalúrgica. Vale lembrar, que para garantir o sucesso do ensaio é preciso que as regiões de reparo sejam observadas através do microscópio.

Os ensaios D3 e D4 apresentam uma zona afetada pelo calor (ZAC) mais larga, quando comparadas com ensaios D1 e D2, como destacado na figura 6.25. O principal motivo dessas diferenças está relacionado à redução da força aplicada nos ensaios D3 e D4. Maiores forças resultam em maiores taxa de queima, o que minimiza o aporte térmico e aquece um volume de material menor, gerando, portanto, uma ZAC mais estreita, como demonstrado em ensaios realizado por Meyer (2002). Ressalta-se que os ensaios D3 e D4 foram atacadas demasiadamente com nital 2% e por esse motivo apresentam as estruturas salientadas.

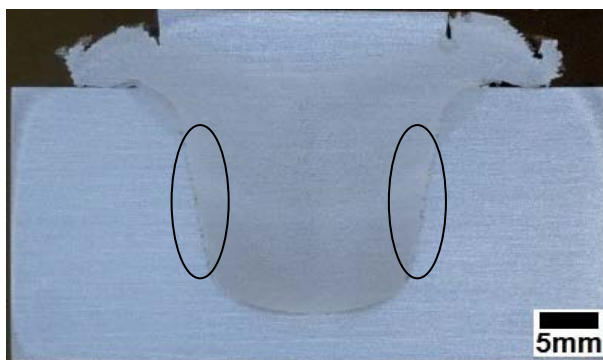
No ensaio D2, foi feita uma varredura ao longo de toda a interface bloco/material adicionado usando microscopia ótica. Foi observado apenas um defeito, como mostra a figura 6.26.



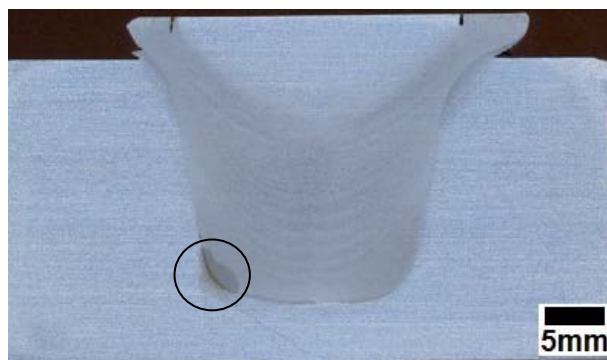
Figura 6.26: Imagens da microestrutura final do ensaio 2. A) Vista Geral. B) Vista Detalhada.

A linha central mais escura tem as características de um óxido, como fica mais evidente na imagem B. Esse óxido é provavelmente um óxido de Ferro ou pode estar associado à formação de MnS , que resulta em uma dificuldade de união entre o material do pino e bloco. Destaca-se ainda, que o material do pino contém elevados teores de enxofre, o que favorece a formação desse sulfetos, principalmente na interface. Porém, para comprovar isso deveria ser feito uma análise via MEV, o que não foi possível durante a execução desse trabalho, pois o MEV estava inoperante. Defeitos semelhantes foram citados no trabalho de Borges (2010) e uma análise via MEV evidenciou a presença de óxidos nesses pontos.

Os ensaios D5 (20 kN/49 kN e 1500 rpm) e 8 (20 kN/49 kN e 1100 rpm) da tabela 5.5 apresentaram problemas, pois houve uma variação no processo de rotação, ou seja, a rotação não foi controlada de acordo com o valor pré-determinado devido ao alto torque exigido. A figura 6.21 mostra a resposta do ensaio D5 e a microestrutura desses ensaios são mostradas na figura 6.27.



Ensaio D5



Ensaio D8

Figura 6.27: Macrografia dos ensaios D5 (20 kN/49 kN e 1500 rpm) e ensaio D8 (20 kN/49 kN e 1100 rpm) com oscilação na rotação.

Nota-se que nos dois ensaios houve escoamento de material, uma vez que apresentam rebarbas ou *flashes* no ponto superior, porém nenhum apresentou aquecimento suficiente para proporcionar uma união metalúrgica, que pode ser notado pela ausência de ZAC em ambos os casos. Os ensaios apresentaram falhas de preenchimento como é destacado na figura 6.27. Nota-se ainda que o *flash* foi gerado apenas pelo material do pino. Não há escoamento plástico do material do bloco, como é notado na figura 6.25. Assim, fica claro que os ensaios devem ser realizados com um nível de controle de rotação adequado, ou seja, devem ser eliminados as variações de velocidade durante o ensaio para não afetar a qualidade final do reparo.

O último ensaio com dois ciclos foi realizado com o intuito de atingir uma força maior com uma rotação relativamente menor. A macrografia desse ensaio está representada na figura 6.28.

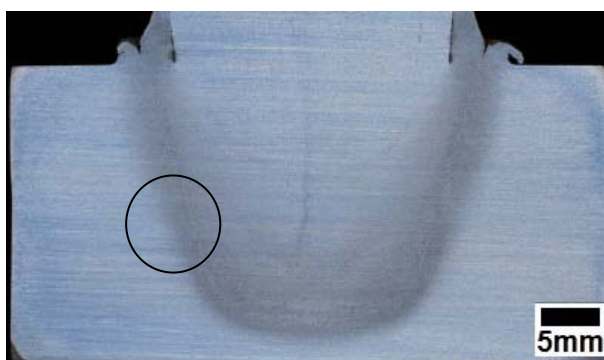


Figura 6.28: Macrografia do ensaio D11 (20 kN/157 kN e 2000 rpm).

Através dessa figura pode-se notar que não existe falha macroscópica na interface do reparo e que a ZAC é menor que no ensaio D4 (mesma velocidade de rotação), o que era esperado devido ao aumento na força axial aplicada.

Nesta segunda etapa de ensaios foram realizados mais dois ensaios, porém nesses foram utilizados apenas um ciclo de rotação. O intuito destes ensaios era confirmar a execução com carga de 50 kN com um ciclo de rotação e verificar alguma diferença no resultado, quando comparado com ensaio executado com dois ciclos. As macrografias desses ensaios são apresentadas na figura 6.29.

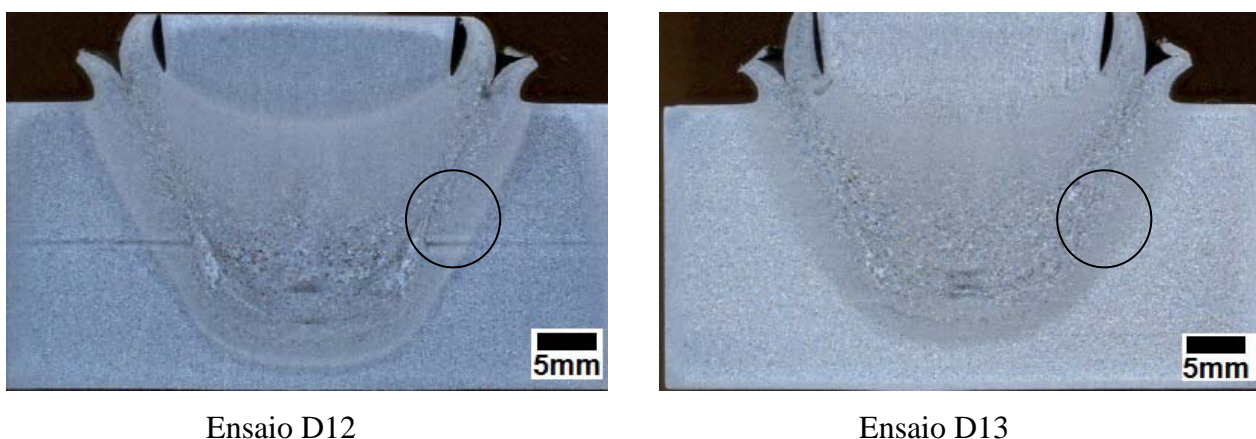


Figura 6.29: Macrografia dos ensaios D12 (49 kN e 2000 rpm) e ensaio D13 (49 kN e 2500 rpm).

Analisando as ZAC's desses ensaios, nota-se que elas são muito semelhantes às apresentadas nos ensaios D3 e D4, que são os ensaios realizados com a mesma força de 500 kN, porém com dois ciclos de força. Isso pode ser explicado pelo tempo de processamento do pino, que foi praticamente o mesmo, tanto com um ciclo quanto com dois ciclos.

Vale ressaltar que para todos os ensaios foram analisadas as micrografias através do microscópio Olympus BX51M e em nenhum dos casos houve falta de preenchimento ou alguma falha na microestrutura do reparo, consolidando que a reparação por atrito foi completa. Essas análises são mostradas nas figuras de 6.30 a 6.36, sendo que a parte A representa a macrografia e a parte B a micrografia em um ponto da ZAC.

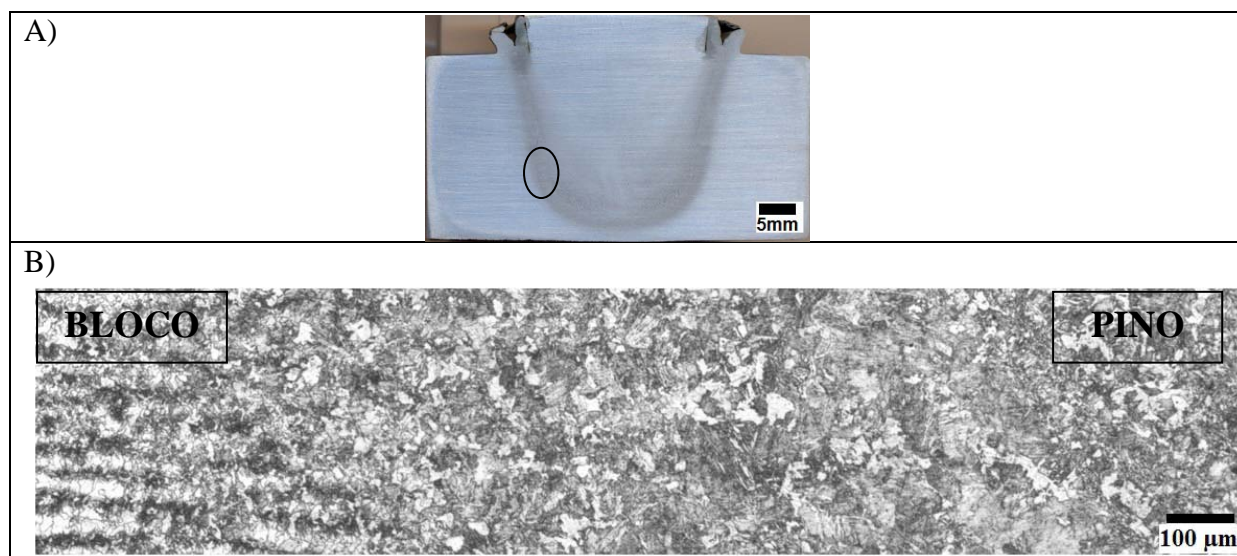


Figura 6.30: Ensaio D1 com 113 kN/201 kN e 2500 rpm – A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface inferior esquerda.

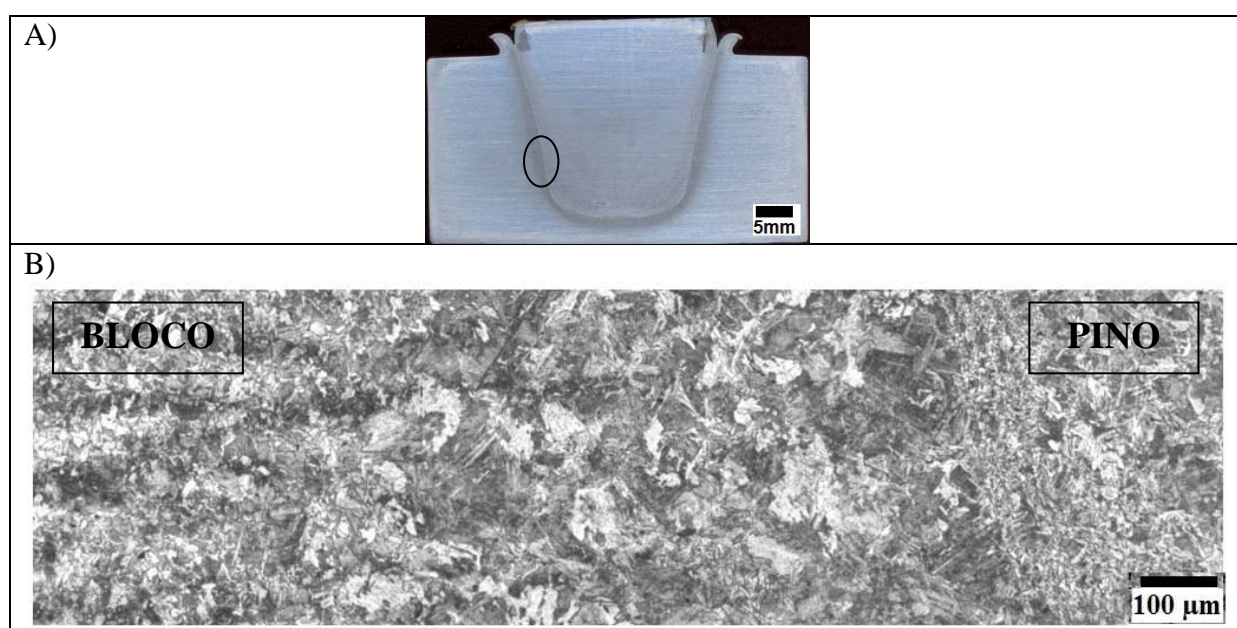


Figura 6.31: Ensaio D2 com 20 kN/201 kN e 2500 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface inferior esquerda

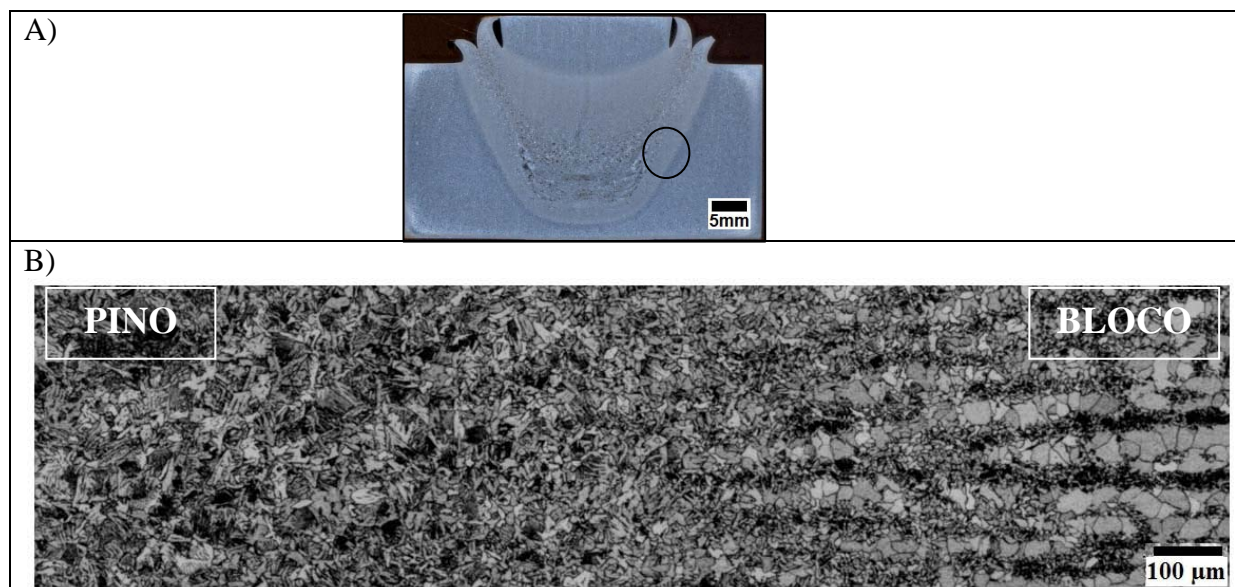


Figura 6.32: Ensaio D3 com 20 kN/49 kN e 2500 rpm- A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface direita.

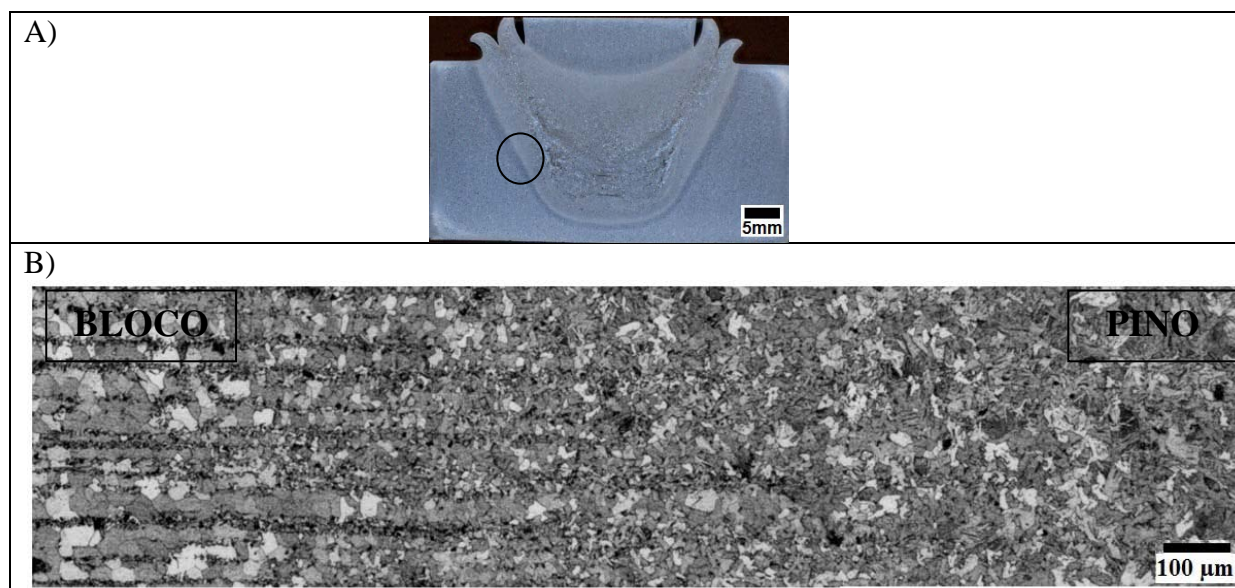


Figura 6.33: Ensaio D4 com 20 kN/49 kN e 2000 rpm- A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.

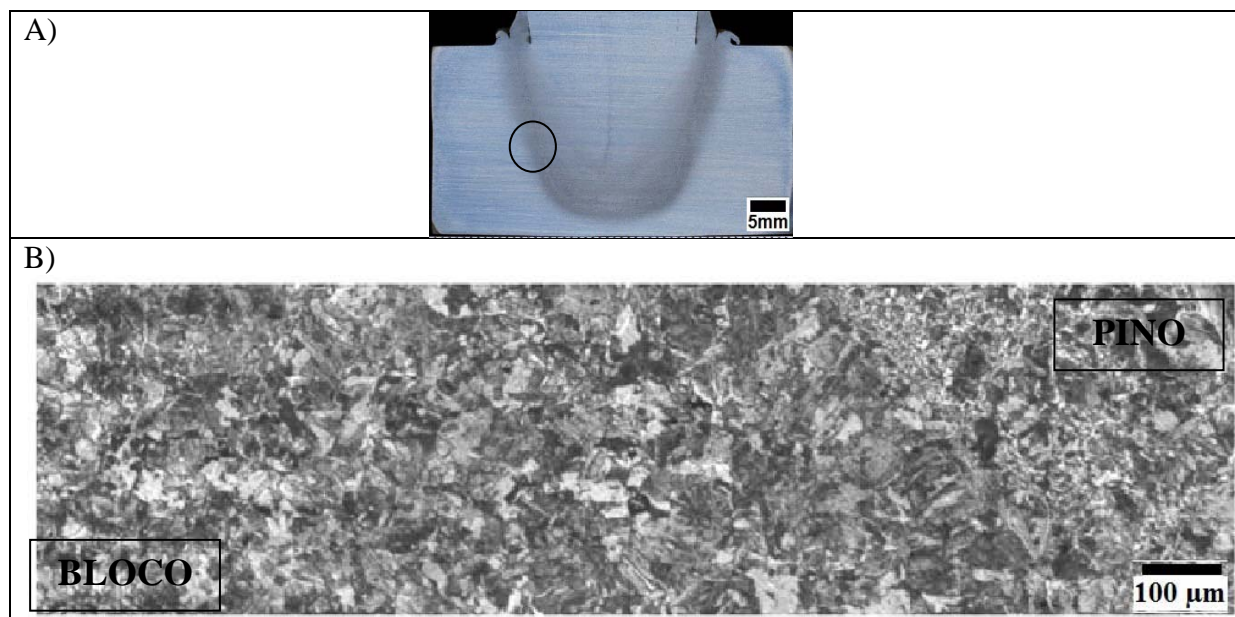


Figura 6.34: Ensaio D11 com 49 kN/157 kN e 2500 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.

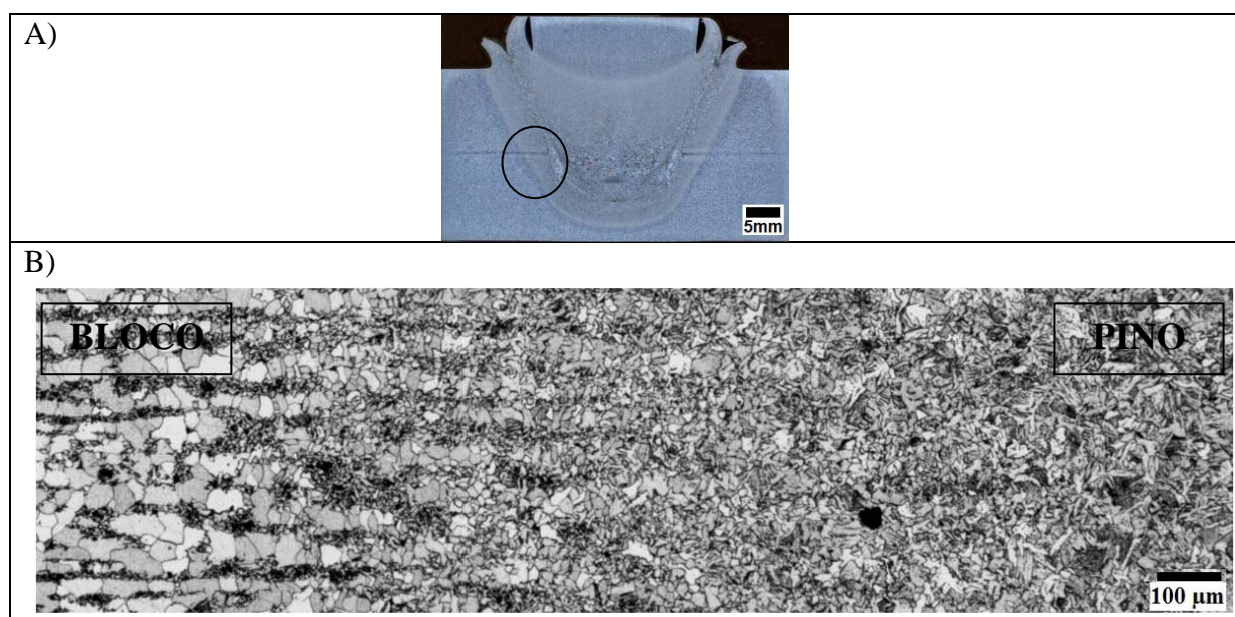


Figura 6.35: Ensaio D12 com 49 kN e 2000 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.

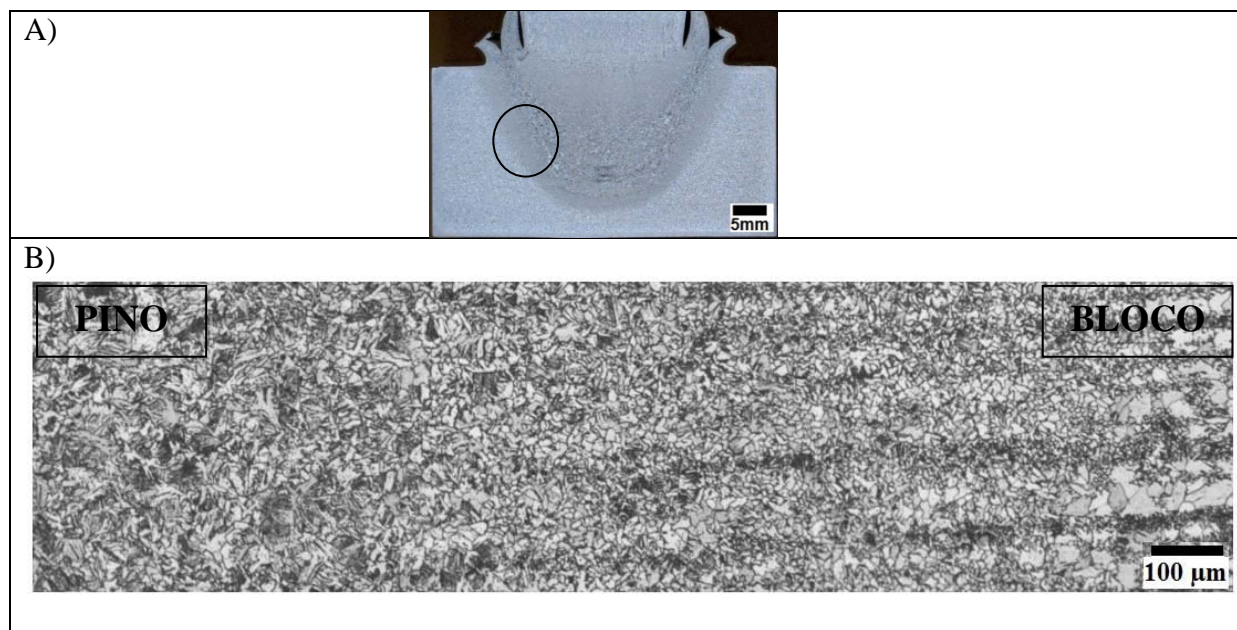


Figura 6.36: Ensaio D13 com 49 kN e 2500 rpm - A) Macrografia B) Ilustração da micrografia na interface esquerda.

6.3.4. Análise Microdureza

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados com intuito de verificar o comportamento das propriedades mecânicas de acordo com as variações dos parâmetros de ensaio.

Para uma melhor análise os 3 perfis (vertical, 5 mm e 10 mm) foram relacionados de duas formas: variação da força com rotação constante e variação da rotação com força constante. Dessa forma, pode-se analisar a variação de cada parâmetro nas três posições.

As figuras 6.37, 6.38 e 6.39 mostram os valores de microdureza nos perfis vertical, horizontal a 5 mm e a 10 mm, sendo que nas três figuras ocorre variação da força e mantém-se a rotação constante em 2500 rpm.

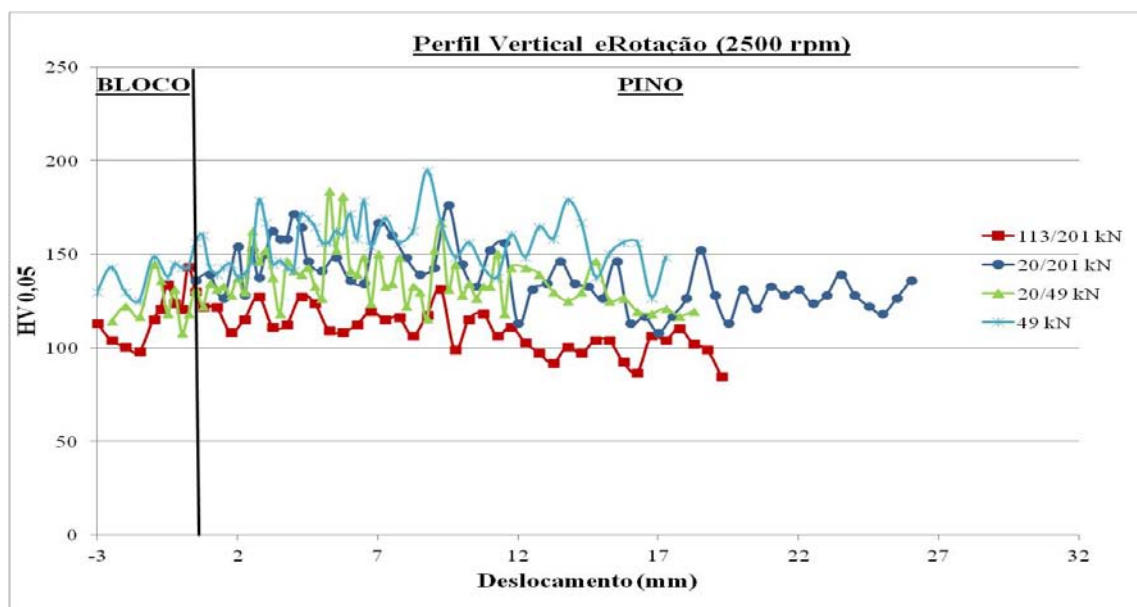


Figura 6.37: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios D1 (113/201 kN), D2 (20/201 kN), D3 (20 kN/49 kN) e D13 (49 kN), 2500 rpm.

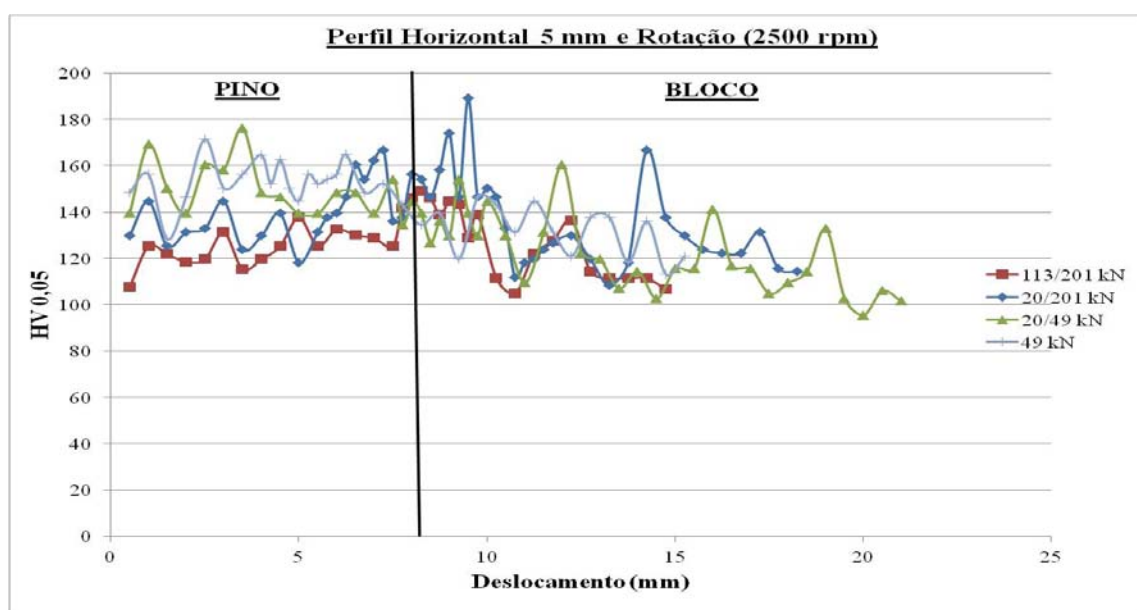


Figura 6.38: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5 mm da interface inferior para os ensaios D1 (113/201 kN), D2 (20/201 kN), D3 (20 kN/49 kN) e D13 (49 kN), 2500 rpm.

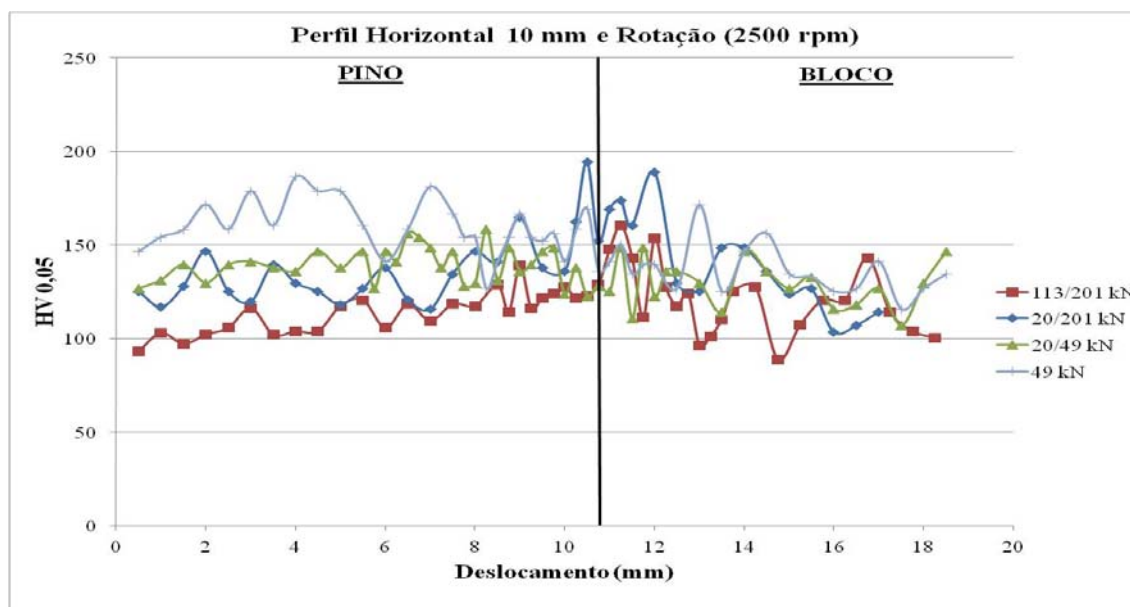


Figura 6.39: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10 mm da interface inferior para os ensaios D1 (113/201 kN), D2 (20/201 kN), D3(20/49 kN) e D13(49 kN), 2500 rpm.

Observa-se que em todos os perfis, o ensaio D1 apresenta, em sua maioria, os valores mais baixos de microdureza. Isso pode ser explicado porque nesse ensaio foi aplicada a maior força axial e de acordo com ELLIS (1972), soldas por atrito realizadas com altas pressões axiais têm como resposta menores valores de dureza na região de interface, pois com maiores forças tem-se menor aporte térmico, o qual não é suficiente para levar o aço à temperaturas acima da temperatura crítica, ou seja, não é austenitizado e não gera microconstituintes mais duros.

Os outros ensaios (D2, D3 e D13) também variam da mesma forma nos três perfis e pode-se observar que todos os valores estão abaixo de 200 HV_{0,05}. Esse é um resultado considerado adequado, pois valores acima de 350 HV_{0,05} podem trazer problemas em peças sujeitas a esforços de fadiga.

As figuras 6.40, 6.41 e 6.42 mostram os valores de microdureza nos perfis vertical, horizontal 5 mm e horizontal 10 mm para os ensaios realizados com rotação de 2000 rpm.

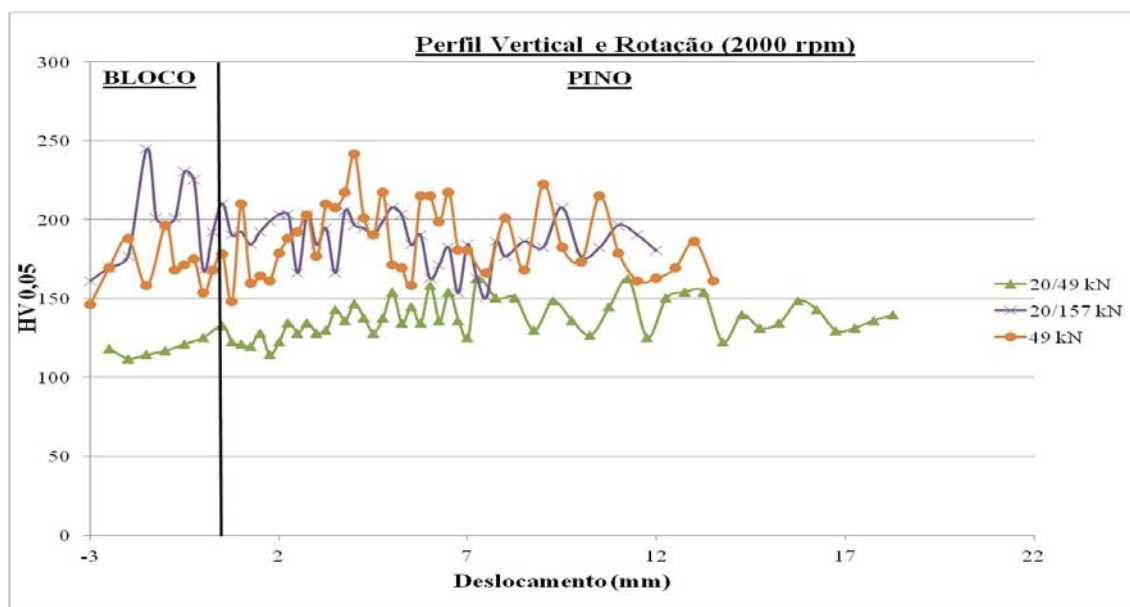


Figura 6.40: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios D4 (20/49 kN), D11 (20/157 kN) e D12(49 kN), 2000 rpm.

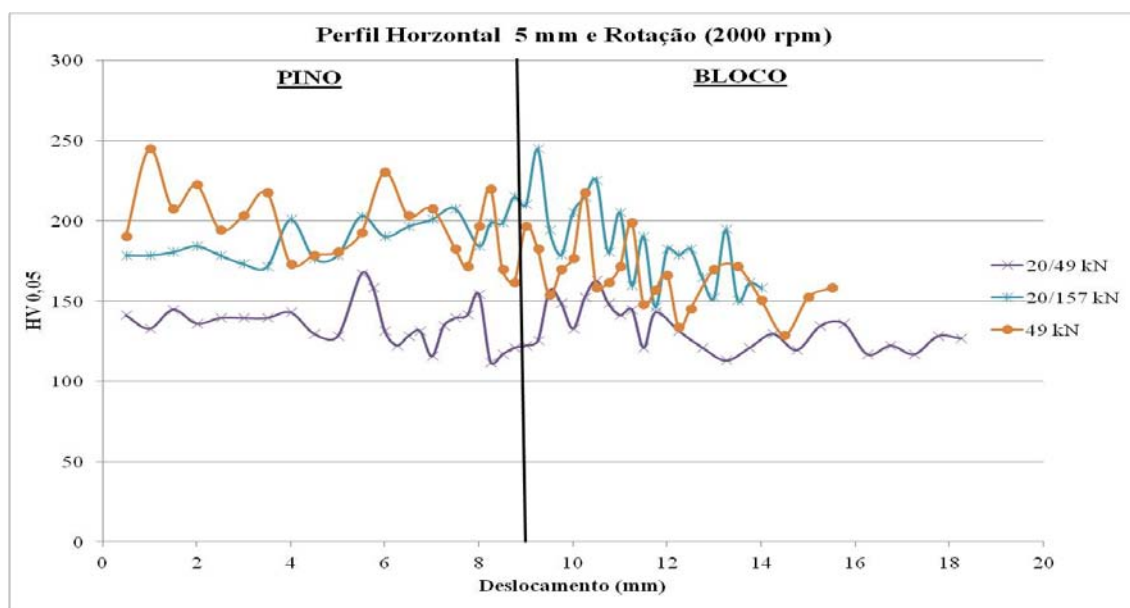


Figura 6.41: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5 mm para os ensaios D4 (20/49 kN), D11 (20/157 kN) e D12 (49 kN), 2000 rpm.

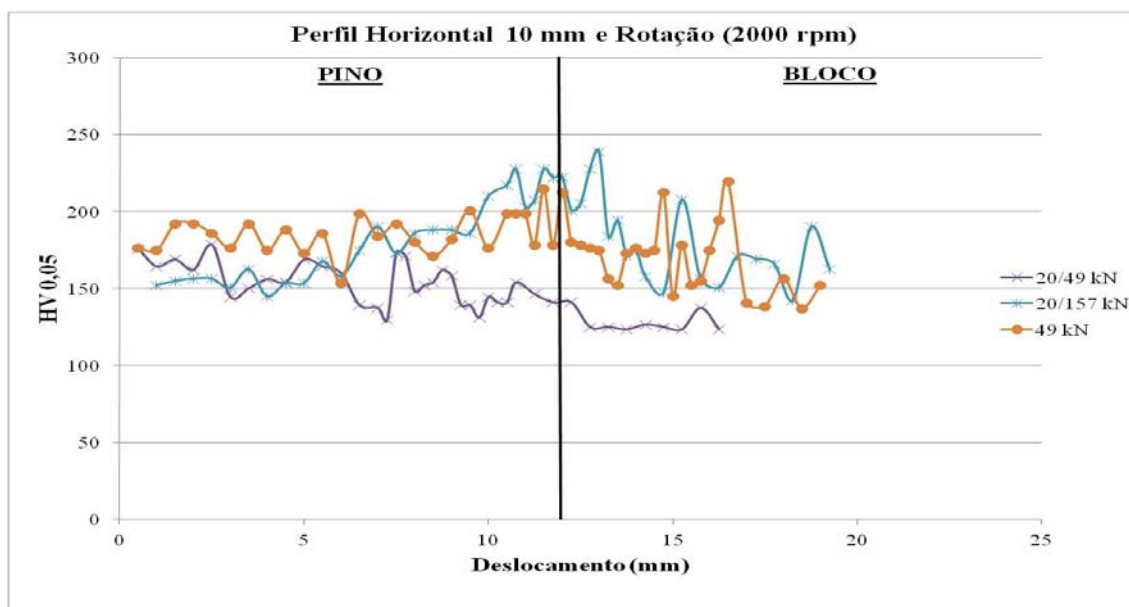


Figura 6.42: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10 mm para os ensaios D4 (20/49 kN), D11 (20/157 kN) e D12 (49 kN), 2000 rpm.

Nesse caso, os três ensaios apresentam variações semelhantes nos três perfis, ou seja, os ensaios de menor e maior microdureza são os mesmos nos três casos. Isso é verificado através do ensaio D4, que apresentou os valores mais baixos nos três perfis, porém as razões para esse comportamento não foram analisadas, uma vez que o ensaio D11 é executado com uma força superior.

Analisando os dois ensaios (D4 - 20/49 kN e D12 - 20/49 kN), os quais foram executados com a mesma força, porém com 2 e 1 ciclo, respectivamente, nota-se que os valores de microdureza para o ensaio com 2 ciclos são menores. Esse comportamento está associado ao fato do ensaio D4 apresentar um maior aporte térmico, pois inicia-se com uma força menor. Isso resulta em menor velocidade de resfriamento e em menores valores de microdureza.

As figuras 6.43, 6.44 e 6.45 mostram os valores de microdureza nos perfis vertical, horizontal 5 mm e horizontal 10 mm para ensaios D1, D2 e D11, que variam a rotação e mantém a força em 157 kN.

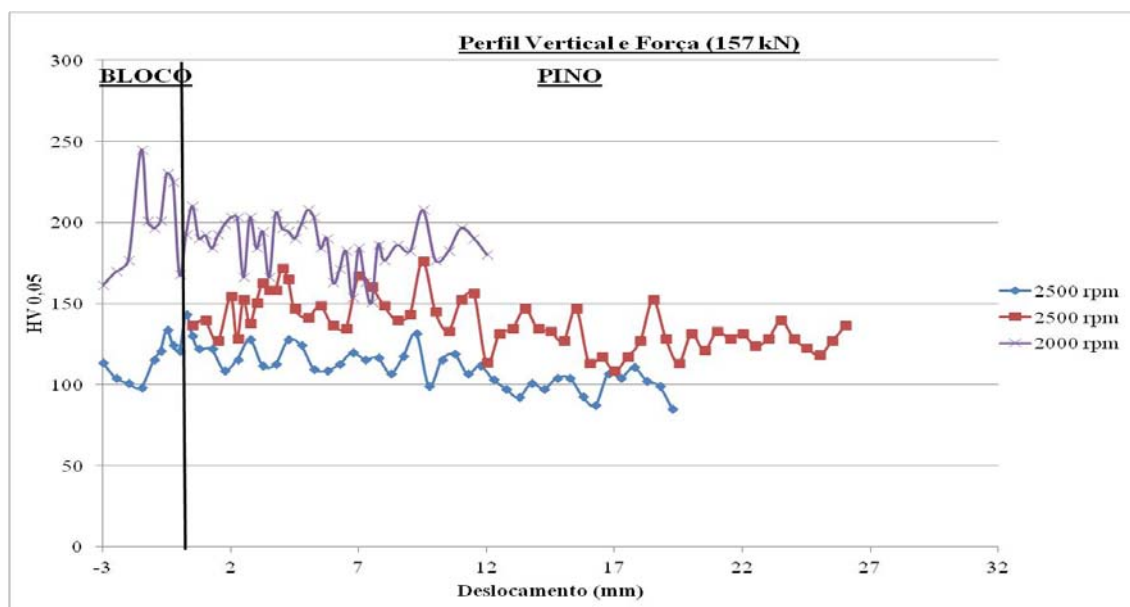


Figura 6.43: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios D1 (2500 rpm), D2 (2500 rpm) e D11 (2000 rpm).

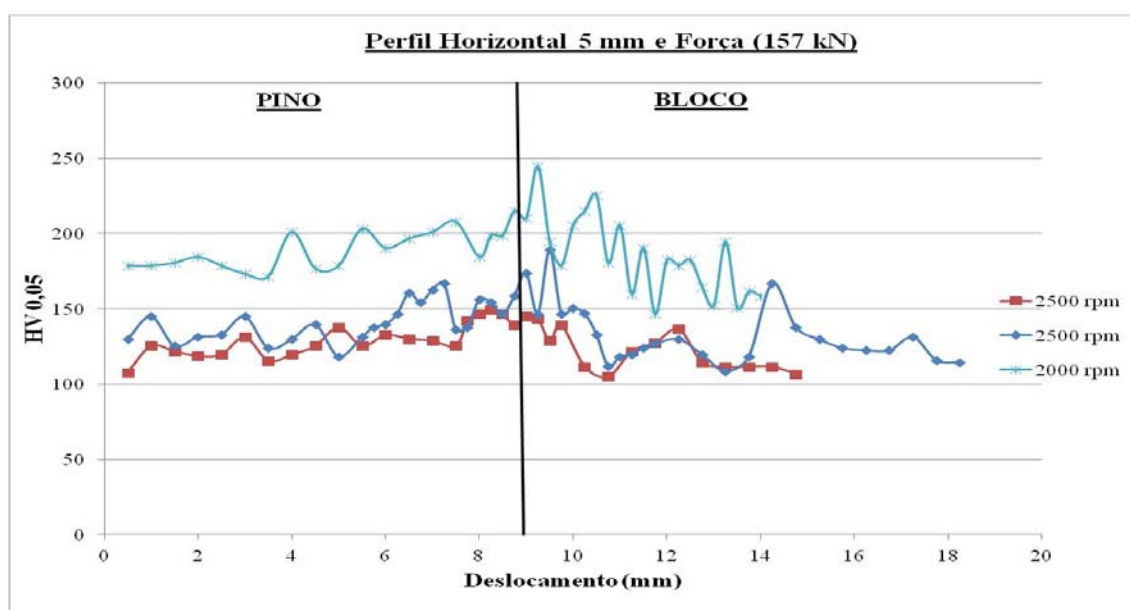


Figura 6.44: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5mm para os ensaios D1 (2500 rpm), D2 (2500 rpm) e D11 (2000 rpm).

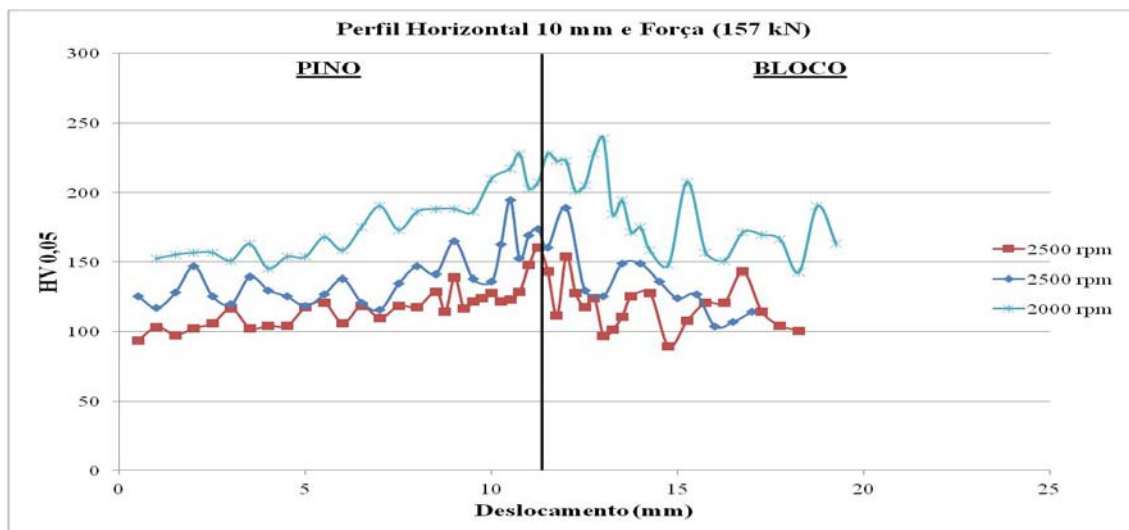


Figura 6.45: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10mm para os ensaios D1 (2500 rpm), D2 (2500 rpm) e D11 (2000 rpm).

Analisando as figuras, nota-se que o ensaio D11 apresenta os maiores valores de microdureza nos três perfis. Esse fato está relacionado ao aumento de rotação, o que aumenta o tempo de aquecimento e, conseqüentemente, reduz a dureza na região de união. Vale lembrar, que os ensaios nos ensaios D1 e D2 foram estabelecidos 201 kN de força, mas atingiram somente 157 kN.

As figuras 6.46, 6.47 e 6.48 mostram os valores de microdureza nos perfis vertical, horizontal 5 mm e horizontal 10 mm para ensaios D3, D4, D12 e D13, que variam a rotação e mantém a força em 49 kN.

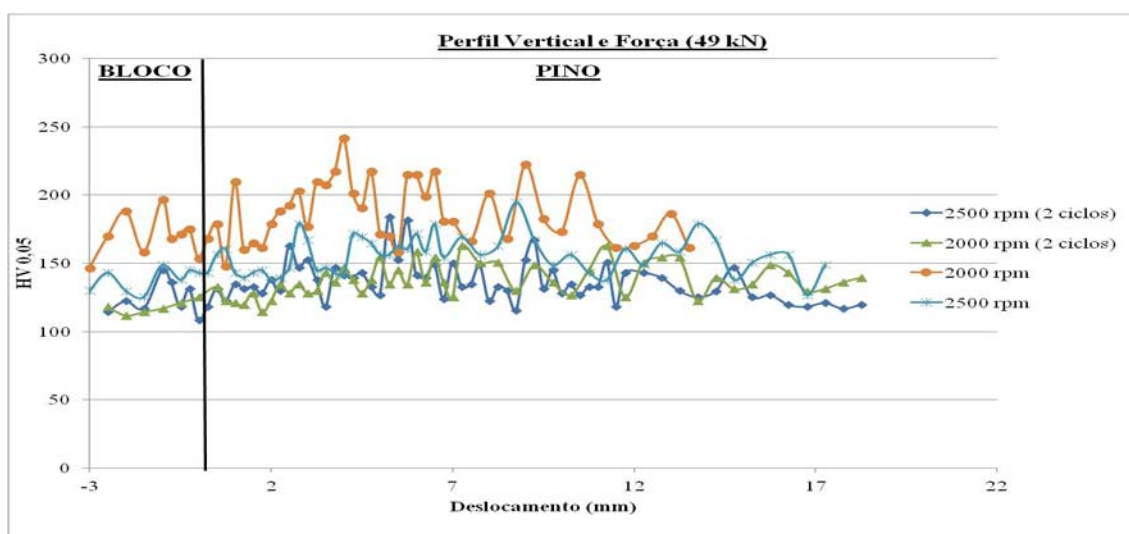


Figura 6.46: Perfil Vertical de Microdureza Vickers para os ensaios D3(2500 rpm), D4 (2000 rpm), D12(2000 rpm) e D13(2500 rpm).

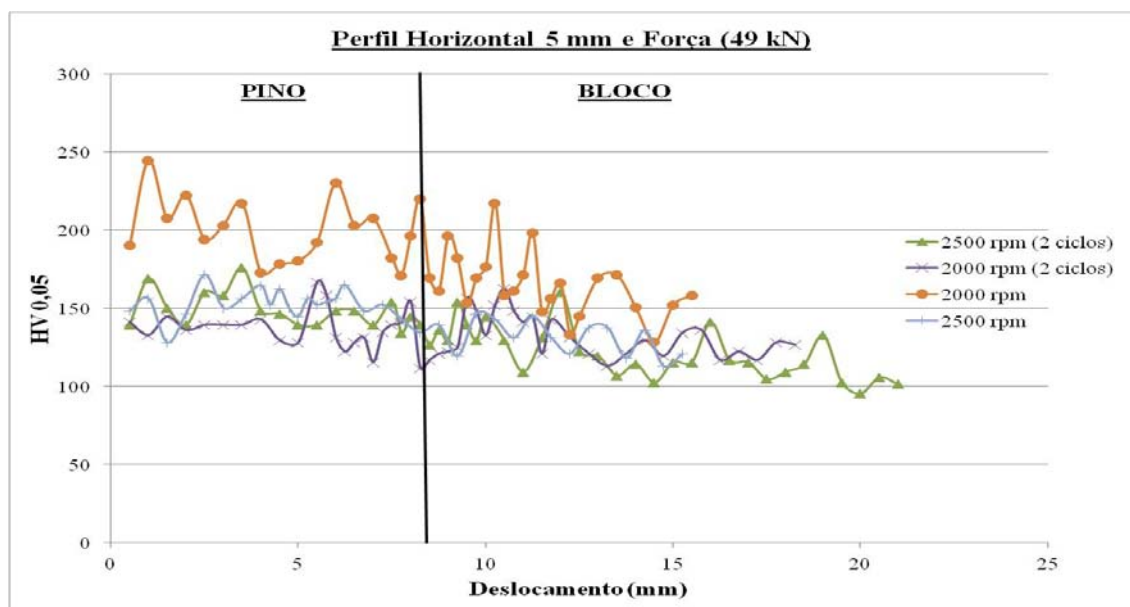


Figura 6.47: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 5mm para os ensaios D3 (2500 rpm), D4 (2000 rpm), D12 (2000 rpm) e D13 (2500 rpm).

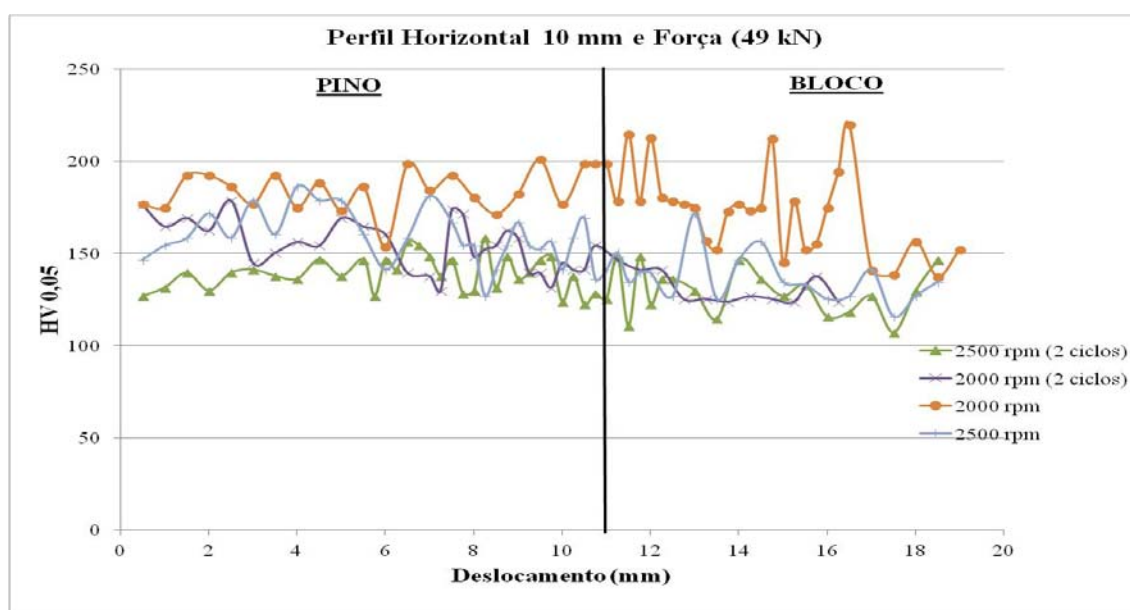


Figura 6.48: Perfil Horizontal de Microdureza Vickers a 10 mm para os ensaios D3 (2500 rpm), D4 (2000 rpm), D12 (2000 rpm) e D13 (2500 rpm).

Os ensaios apresentados nas figuras de 6.47 a 6.49 têm o mesmo comportamento dos ensaios anteriores com força de 49 kN. Portanto a variação dos valores de microdureza está relacionado ao tempo de aquecimento durante a execução dos ensaios.

Através dos ensaios de microdureza mostrados nas figuras de 6.37 a 6.48 pode-se notar que os valores de microdureza ficam próximos dos valores do material base. Também se

percebe que não há um aumento significativo nos valores de microdureza na região de união metalúrgica. Isso está relacionado ao fato do calor se propagar por grande parte do material base e material consumível na maioria dos ensaios, como é ilustrado na figura 6.49.



Figura 6.49: Foto de uma amostra após o ensaio de reparo por atrito com ilustração da região aquecida.

6.3.5. Faixa de Operação

Com a implantação do segundo ciclo de força foi possível aumentar a janela de operação do equipamento. Ressalta-se que essa zona de operação é dependente da geometria e do material utilizados no ensaio. A figura 6.50 mostra a nova zona de operação do equipamento.

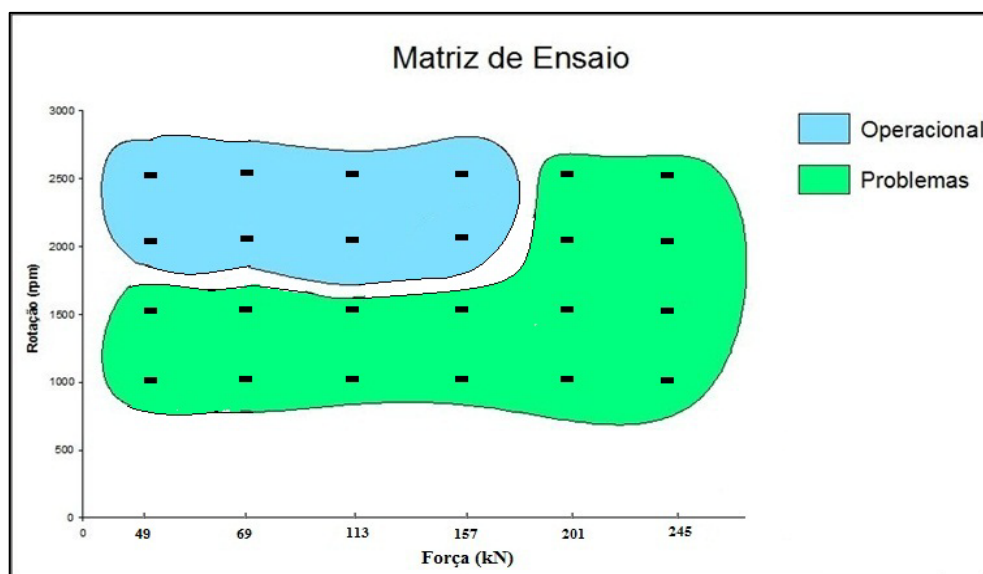


Figura 6.50: Faixa de operação final com a inclusão dos dois ciclos de força.

Pode-se notar que nem todas as áreas objetivadas na figura 6.50 foram atendidas. A parte inferior da área 2 e a área 1 não foram atendidas, pois nestes pontos a rotação pré-estabelecida é relativamente baixa e o processo não pôde ser controlado. O controle do equipamento faz com que a rotação oscile muito nesses pontos, devido a grandes mudanças de torque durante o processo. Assim, optou-se por operar o equipamento com rotações acima de 1.800 rpm. A força ficou limitada a 157 kN, mas isso não foi devido ao controle do equipamento e sim à geometria e ao comprimento de queima utilizados.

Ressalta-se que esta limitação de força ocorre enquanto há rotação do pino, pois após cessar essa rotação, o ensaio entra na fase de forjamento e forças mais elevadas podem ser atingidas, como mostrado nos resultados anteriores. Mesmo não atingindo todas as áreas propostas, houve um aumento de 60 % da área de operação após as alterações no equipamento e a implantação de dois ciclos.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÃO

Com o presente trabalho foi possível verificar o funcionamento da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito II e obter-se conclusões significativas sobre o mesmo. A seguir são apresentadas algumas conclusões alcançadas:

- I. As alterações das constantes do controlador PID influenciam diretamente na resposta do equipamento, podendo trazer melhorias tanto no alcance de maiores forças quanto no tempo para atingir os parâmetros pré-estabelecidos;
- II. O programa de controle com dois ciclos de força mostrou-se eficiente, uma vez que os ensaios foram controlados nos valores pré-estabelecidos e efetuou-se a mudança durante os ensaios completos;
- III. Unidade de Processamento de Pinos por Atrito II (UPPA-II), com utilização de baixas rotações (rotações abaixo de 1800 rpm) não obteve-se êxito no controle de rotação, devido ao elevado torque aplicado e ao tempo de resposta do equipamento quanto a correção dessa rotação. Com rotações de 2000 e 2500 rpm todos os ensaios propostos foram realizados sem o travamento do motor hidráulico, ou seja, apresentaram torque abaixo de 500 N.m;
- IV. A regulagem da válvula de vazão de óleo para o cilindro hidráulico, através do cartão controlador de força e regulagem mecânica da mesma, o que trouxe benefícios para o sistema de força, uma vez que reduziu o tempo para atingir os parâmetros pré-estabelecidos.
- V. A implantação de dois ciclos de força possibilitou atingir forças mais elevadas durante o ensaio de reparo. Esse aumento da força está ligado ao melhor aporte

térmico proporcionado ao ensaio durante o primeiro ciclo, que deve ser executado com valores mais baixos (na ordem de 20 kN);

- VI. A faixa de operação do equipamento foi estendida para duas áreas, sendo uma com forças mais baixas (40 kN) e outra com forças altas (157 kN) e rotação na ordem de 2000 rpm. Isso representou um aumento de 60 % da área operacional.
- VII. Para o presente material (pino consumível e base) e geometria das amostras o equipamento deve operar com forças abaixo de 160 kN e rotações acima de 1800rpm, pois isso garante o não travamento do motor;
- VIII. A qualidade do reparo por atrito, quanto a dureza do material, está de acordo com o esperado, uma vez que os valores de microdureza estão próximos aos valores apresentados pelo material base.

CAPÍTULO VIII

TRABALHOS FUTUROS

Em continuidade ao trabalho apresentado, sugerem-se alguns estudos tanto na parte de controle do equipamento quanto na parte mecânica.

1. Em relação ao controle sugere-se a aplicação de outros métodos de controle de força, tal como o método de Ziegler & Nichols, a fim de viabilizar ensaios com forças maiores;
2. Outra opção é a aquisição de um cartão controlador digital, como o cartão utilizado para rotação, pois este oferece uma flexibilidade maior na mudança dos parâmetros. Essa segunda opção depende de um investimento maior;
3. Com relação a geometria dos blocos e pinos, tem-se a sugestão de aplicar um pino com diâmetro maior para ensaios de dois ciclos, uma vez que a resistência mecânica reduz durante o ensaio. Isso aumentará a resistência mecânica e consequentemente o torque aplicado durante o ensaio;
4. Outra sugestão é estudar o valor de energia aportada durante o processo de reparo, pois este é um parâmetro que auxilia na variação da geometria e no estudo ou controle da microestrutura da região processada;
5. Estudo Estatístico da influência dos parâmetros.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREWS, R.E., MITCHELL, J. S., 1990, **“Underwater Repair by Friction Stitch Welding”**, Metals and Materials, pp 796-797.
- AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **“Welding Handbook”**. 8. ed. Miami, 1991. v. 2, (0-87171-354-3).
- BLAKEMORE, G. R.; **“Applications of state of the art portable friction welding equipment euro-join”**. EUROPEAN CONFERENCE ON JOINING TECHNOLOGY, 2., 1984, Florence; Italy. Genova: Istituto italiano dellasaldatura, 1994. p. 127-36.
- BLAKEMORE, G. R. **“Friction welding-technology for the new millennium”**. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 31., 1999, Houston, Texas. [S.n.t.]. Paper 11063-MS.
- BETHLEHEM, W., **“Geeignet zur Prozeßüberwachung: Störungen des Momentenverlaufs lassen fehlerhafte Reibschweißungen erkennen”**. Schweißen und Schneiden, 1984. 36(1): p. 23-28.

- CAMPESTRINI, L., **“Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2006.
- CROSSLAND, B., **"Friction Welding - Recommended Practices for Friction Welding"**. Contemporary Physics, 1971. 12(6): p. 559-574.
- EICHHORN, F., **"Beitrag zu den Vorgängen an der Verbindungsstelle beim konventionellen Reibschweißen von Stahl"**. Schweißen und Schneiden, 1968. 20(11): p. 563-570.
- ELLIS, C. R. G., **"Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel"**. Welding Journal, 1972(April): p. 183s-197s.
- FARIA, P. E., BRACARENSE, A. Q., **“Soldagem por Fricção”**, publicado em 2003 [infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol03.pdf), disponível em < <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol03.pdf>>.
- FORMOSO, C. M., JARDIM, M. P., FERREIRA T. C., FRANCO, V. L. D. S., FRANCO, S. D., **“Development and Implementation of a Control Software for a Friction Hydro Pillar Processing Machine”**, The International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics, Uberlândia, March 2005.
- FORMOSO, C. M., JARDIM, M. P., FRANCO, V. L. D. S., FRANCO, S. D., SOUZA, V. B. J., **“Desenvolvimento de um Sistema de Controle para uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito”**, 15º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2005.
- HWANG, H. F. **“Desenvolvimento, Projeto, Construção e Teste de um Cilindro de reparo por atrito portátil”**, em dissertação de mestrado para o programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

INMETRO, 2007, **“Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais da Metrologia”**, Editora SENAI, Rio de Janeiro, Brasil, p 65.

LACERDA, R.. **Expectativas e projeções para 2011**, Jornal da Cidade, 24 de outubro de 2010.

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

LOBÃO, E.; **Panorama Energético Brasileiro**, Jornal da Cidade, 24 de outubro de 2010

MAREGA, B. B. **“Instrumentação, controle e operacionalização de uma unidade de reparo por atrito com capacidade de carga axial de 500 kN”**, em dissertação de mestrado para o programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

MESSA, A., ESTEVES L., NEGRI F., **“Complexos Industriais Ligados à Energia”**. Relatório Setorial da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, Belo Horizonte – MG, 2009.

MEYER, A., **“Friction Hydro Pillar Processing”**. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, Germany, 2002.

MEYER, A., ROOS, A., SANTOS J. F., GIBSON D., BLAKEMORE G. e HAMMERIN R.; **"Subsea Robotic Friction-Welding-Repair System"**. Offshore Technology Conference. 30.4. - 3.5.2001, Houston: OTC, 2001.

MODENESI, P. J., **“Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas”**, em Soldagem I, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001

NEUMANN, A. e SCHÖBER D., **"Reibschweißen von Metallen"**. 1 ed. 1991, Berlin: Verlag Technik GmbH. (3-341-00904-3)

NICHOLAS, E. D., **“Friction Hydro Pillar Processing”**, 11th Annual North American Welding Research Conference, 1995.

NICHOLAS, E. D. ; **“Friction processing technologies”**. Welding in the World, v. 47, n. 11-12, p. 2-9, Nov./Dec. 2003.

NICULA, M. T., **“Estudo, análise e simulação das técnicas de sintonia de controladores PID mais empregadas atualmente em plantas industriais”**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecatrônica - UFU – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2010.

NIXON, J., 1986, **“Effects of depth on friction stud welding parameters”**, School of Welding. Cranfield, Cranfield University, England.

NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS; **Introdução ao Controle PID**.

OGATA, K., 2003, **“Engenharia de Controle Moderno”**, Pearson Education do Brasil, São Paulo, Brasil.

PAZOS, F., 2002, **“Automação de Sistemas e Robótica”**, Axcel Books do Brasil Editora.

PINHEIRO, G. A., **“Costura por fricção: Fundamentos e Aplicações”**, disponível em: < <http://www.infosolda.com.br/download/15dam.pdf>>. Acesso em 23 Fevereiro 2011

PIRES, R. R. **“Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito”**, dissertação de mestrado para o programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

PURCELL, E. M., 1912, **“Electricity and Magnetism – Berkeley physics course – volume 2”**, McGraw – Hill Book Company

SOUZA, R. J. **“Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito”**, dissertação de mestrado para o programa de pós-graduação em

engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

SPINDLER, D. E. ;"**Anwendung der Reibschweißtechnik in den USA**". in 12. Erfahrungsaustausch Reibschweißen. 4.-5.3.2002, Munich: SLV München, 2002.

THOMAS, W. D. , NICHOLAS S. D., et al., "**Friction Forming**", patent no. ep 0.602.072 b1, 1992.

THOMAS, W. M. , TEMPEL-SMITH, "**P. Friction Plug Extrusion**", gb 2.306.365, 1997.

UNFRIED, J.; HERMENEGILDO, T. F.; RAMIREZ, A. J. , "**Influência dos parâmetros de processo na zona termomecanicamente afetada (ZTMA) na soldagem por atrito com pino consumível em aços C-Mn**". Campinas: Petrobras, 2008. (Relatório interno LNLS – Petrobras, 3).

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

WANG, K. K. e NAGAPPAN P., "**Transient Temperature Distribution in Inertia Welding of Steels**". Welding Journal, 1970. 49(9): p. 419 - 426.

WICHELHAUS, G. "**Berchnung der Stoßflächentemperatur beim Reibschweißen**". In Schweißen und Schoneiden, 1975. p. 9-10