

RAPHAEL REZENDE PIRES

**EFEITOS DA GEOMETRIA, DA FORÇA AXIAL E DA
ROTAÇÃO NO REPARO POR ATRITO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2007

RAPHAEL REZENDE PIRES

**EFEITOS DA GEOMETRIA, DA FORÇA AXIAL E DA ROTAÇÃO NO
REPARO POR ATRITO**

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

Área de Concentração: Tribologia e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco

UBERLÂNDIA – MG

2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P667e Pires, Raphael Rezende, 1980-
Efeitos da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito /
Raphael Rezende Pires. - 2007.
68 f. : il.

Orientador: Sinésio Domingues Franco.

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

Inclui bibliografia.

1. Soldagem - Teses. 2. Materiais - Teses. I. Franco, Sinésio Domin-gues. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Gradua-ção em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU:

621.791

**Aos meus pais João Adolfo e Sueli,
Exemplos de minha vida,
E meus irmãos, Rogério, Rodrigo e João Adolfo Júnior.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Sinésio Domingues Franco, pela segura orientação científica, apoio e oportunidade concedida de fazer parte de um extraordinário grupo de trabalho.

Aos professores do Laboratório de Tribologia e Materiais Alberto Arnaldo Raslan e Rafael Ariza Gonçalves, pelas discussões e auxílio na minha formação acadêmica.

Aos engenheiros Valdir Borges Souza Junior, Juliano Oséias de Moraes, Henry Fong Hwang e Camila Monteiro Formoso, pelo apoio e por estarem sempre presentes nos momentos mais difíceis.

Aos alunos de iniciação científica Maíra Prata Jardim, Rodrigo Muniz e Lucas Antônio Caixeta, pela ajuda e participação imprescindível na realização deste trabalho.

À secretária Eunice Helena Nogueira, pela constante atenção e por ser sempre prestativa.

À técnica Ângela Maria da Silva Andrade, pela simpatia, ajuda e companheirismo.

Ao técnico Flávio Alves dos Santos, pelo companheirismo e disposição.

A toda a equipe de trabalho do projeto UPPA, que nunca desanimaram, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos colegas de pós-graduação, pela união e motivação.

Aos amigos do LTM que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao engenheiro Marcelo Torres Piza Paes, pela oportunidade e auxílio técnico.

Aos meus amigos pelo apoio e companheirismo.

Em especial aos meus pais, irmãos e familiares, que sempre confiaram em mim, e sem os quais esta jornada jamais seria possível.

À Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras, pelo apoio financeiro.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

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

Resumo

As intervenções realizadas na indústria do petróleo, com o objetivo de reparar estruturas e membros mecânicos representam hoje um alto custo financeiro. Essas operações envolvem ainda um elevado risco, por se tratar de áreas com perigo de explosão. A soldagem a arco voltaico consiste em uma das técnicas mais empregadas no sentido de realizar tais reparos, principalmente submersos. Contudo, a mesma possui uma série de inconvenientes, dentre os quais podem se destacar: realização de práticas de “doca seca” ou de soldas hiperbáricas, presença de poros no cordão de solda (quando em condições submersas), fragilização pela adsorção de hidrogênio da atmosfera, formação de fases frágeis com baixa tenacidade à fratura e altas energias de soldagem envolvidas. Nesse sentido, o reparo de trincas por atrito apresenta uma série de vantagens, por consistir de um processo realizado dentro da fase sólida. Menores temperaturas estão envolvidas e o processo não é influenciado pelo ambiente externo, minimizando os problemas no reparo de estruturas submersas.

Assim, este trabalho teve como objetivo a otimização dos parâmetros do processo de reparo por atrito, dando-se especial atenção aos efeitos da geometria, da força axial e da rotação sobre a qualidade do reparo. O estudo foi realizado através de investigações metalográficas nos reparos obtidos, bem como análises via levantamento de perfis de microdureza Vickers e testes de dobramento na seção do reparo. Através de uma sistemática variação destes parâmetros foram selecionadas geometrias, forças rotações e comprimentos de queima, que levaram à obtenção de reparos isentos de defeitos. Dentre os parâmetros investigados, destacou-se a forte influência da geometria do pino e do furo na obtenção de reparos ótimos.

Palavras-chave: Reparo por Atrito, Geometrias do Pino e do Furo, Força Axial, Velocidade de Rotação, ZTA.

PIRES, R. R., Effects of the Geometrie, of the Axial Force and of the Rotation in the Friction Welding Repair. 2007. 68 f. Master Dissertation in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia - MG.

Abstract

Interventions made in the oil industry for repairs in structures and mechanical components, represents nowadays high financial costs. It is even worse since the operations are made in explosion risk areas. The electric arc welding is one of the most common techniques in this kind of repair. However, this technique has many inconveniences, some of them are: hyperbaric welding, need of drydock structure, welding bead porosity, material embrittlement due to hydrogen adsorption and brittle phases formation with low fracture toughness.

By consist in a process carried out in the solid-phase, the scratch repair by friction shows many advantages. Lower temperatures are involved and the process is not affected by external environment, therefore the problems in submersed structure repairs are minimized.

Consequently, the proceedings had the purpose of the optimization of the parameters of the scratch repair by friction process, presenting a special effort in the effects of the geometry, the axial-force and the rotation on the quality of the repair. The study was accomplished through metallographic investigations in the obtained repairs, and analysis by the survey of hardness profile and flexure tests on the repair section. Throughout systematic variations of these parameters, some geometries were selected, as well as forces, rotations and burn-off length, which led the acquirement of repairs free of imperfections. Amongst the investigated parameters, the highlighted was the great influence of the geometry of the whole and the consumable rod, in the obtention of optimized repairs.

Keywords: *Friction welding, Rod and Whole Geometry, Axial Force, Rotation Speed, HAZ.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Trincas em tanques de armazenamento de um FPSO da PETROBRAS	2
Figura 2.1: Sequência de execução da solda por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força; (C) Início da união soldada; (D) Solda completada (AWS, 1991)	8
Figura 2.2: Configuração convencional “ <i>continuous drive</i> ”	10
Figura 2.3: Método “ <i>counter rotation</i> ”	11
Figura 2.4: Configuração “ <i>centre drive</i> ”	11
Figura 2.5: Configuração “ <i>twin welds</i> ”	11
Figura 2.6: Soldagem por atrito radial	11
Figura 2.7: Método “angular reciprocating”	12
Figura 2.8: Método “linear reciprocating” (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992)	12
Figura 2.9: Processo de soldagem orbital (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992)	12
Figura 2.10: Comportamento das variáveis: Força (F), Rotação (n), Torque M(t) , Potência consumida N(t) , Temperatura T(t) e comprimento de queima ΔL(t) , ao longo das fases do processo de soldagem por atrito (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992).	15
Figura 2.11: Ciclos de soldagem propostos por Lebedev e Chernenko (1992)	18
Figura 2.12: Ciclos do processo. (A) ciclo de variação apenas da rotação ao longo do tempo; (B) ciclos com variação da força e rotação ao longo do processo (SOUSA, 2006)	19
Figura 2.13: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito, (http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/friction_index.html)	22
Figura 2.14: Croqui do processo “ <i>Tapered Plug Welding</i> ”	22

Figura 2.15: Croqui do processo FHPP, geometrias cilíndrica e cônica (http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/friction_index.html)	23
Figura 2.16: Croqui do processo de reparo por costura “Stitch Welding”, pinos sobrepostos ao longo de um caminho de interesse (http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/friction_index.html)	26
Figura 3.1: Conjunto mostrando pórtico de sustentação, cabeça de reparo e mesa uniaxial	28
Figura 3.2: Montagem da cabeça de reparo no pórtico	28
Figura 3.3: Conjunto mostrando a mesa de deslocamento uniaxial	29
Figura 3.4: Unidade hidráulica de potência	30
Figura 3.5: Fluxo de informações dos sinais analógicos de controle e monitoração das variáveis do processo de reparo de trinca	32
Figura 3.6: Interface gráfica de comunicação do software de controle	33
Figura 3.7: Fotomicrografias do aço carbono ASTM A36; (A) vista geral e (B) vista em detalhe (Nital 2%)	36
Figura 3.8: Fotomicrografias do aço carbono ABNT 1010; (A) vista geral e (B) vista em detalhe (Nital 2%)	36
Figura 3.9: Geometria dos pinos e blocos utilizados nos ensaios preliminares: A) Pino e bloco da geometria 1; B) Pino e bloco da geometria 2	37
Figura 3.10: Pinos utilizados na primeira fase: A) Pino da geometria A; B) Pino da geometria B; C) Pino da geometria C; D) Pino da geometria D; E) Pino da geometria E	41
Figura 3.11: Blocos utilizados na primeira fase: A) Bloco da geometria A; B) Bloco da geometria B; C) Bloco da geometria C; D) Bloco da geometria D; E) Bloco da geometria E	41
Figura 3.12: Bloco de reparo por costura, geometria D: (1) Primeiro passe, as linhas tracejadas indicam os furos que serão abertos no segundo passe; (2) Segundo passe, furos abertos após o preenchimento dos furos realizados no primeiro passe	47
Figura 3.13: Bloco de reparo por costura, geometria A: (1) Primeiro passe, as linhas tracejadas indicam os furos que serão abertos no segundo passe; (2)	

Segundo passe, furos abertos após o preenchimento dos furos realizados no primeiro passe	47
Figura 3.14: Posicionamento dos perfis de microdureza e indicação das regiões interfaciais pino/bloco	50
Figura 3.15: Dispositivo usado nos ensaios de dobramento	51
Figura 3.16: Ilustração do procedimento de dobramento	52
Figura 3.17: Disposição, dentro do bloco de reparo, das amostras para ensaio do tipo dobramento lateral transversal	53
Figura 3.18: Disposição das amostras para ensaio do tipo dobramento de raiz transversal	54
Figura 3.19: Amostra para teste de dobramento de raiz	54
Figura 4.1: Sinais adquiridos para o Ensaio 1, (1.500 kgf e 5.000 rpm – geometria 1). Obs.: os sinais de rotação não puderam ser adquiridos	56
Figura 4.2: Sinais adquiridos para o Ensaio 2, (2.000 kgf e 5.000 rpm – geometria 1)	57
Figura 4.3: Evolução dos sinais adquiridos para o Ensaio 3, (2.500 kgf e 5.000 rpm - geometria1)	57
Figura 4.4: Sinais adquiridos para o Ensaio 4, (3.000 kgf e 5.000 rpm – geometria 1)	58
Figura 4.5: Sinais adquiridos para o Ensaio 5, (3.500 kgf e 6.000 rpm – geometria 1)	58
Figura 4.6: Sinais adquiridos para o Ensaio 6, (3.500 kgf e 7.000 rpm – geometria 1)	59
Figura 4.7: Sinais adquiridos para o Ensaio 7, (1.500 kgf e 5.000 rpm – geometria 2)	59
Figura 4.8: Sinais adquiridos para o Ensaio 8, (1.500 kgf e 5.000 rpm - geometria 2)	60
Figura 4.9: Sinais adquiridos para o Ensaio 9, (2.000 kgf e 5.000 rpm - geometria 2)	60
Figura 4.10: Sinais adquiridos para o Ensaio 10, (2.500 kgf e 5.000 rpm - geometria 2)	61
Figura 4.11: Sinais adquiridos para o Ensaio 11, (3.000 kgf e 5.000 rpm - geometria 2)	61
Figura 4.12: Sinais adquiridos para o Ensaio 12, (3.500 kgf e 5.000 rpm - geometria 2)	62
Figura 4.13: Tempos despendidos para o processo de preenchimento dos ensaios 1 a 6 da Tabela 3.4, (geometria 1). Valores obtidos mediante apreciação dos gráficos dos respectivos ensaios	64

Figura 4.14: Tempos despendidos no preenchimento dos ensaios 7 a 12 da Tabela 3.4 (geometria 2). Valores obtidos mediante apreciação dos gráficos dos respectivos ensaios, sendo todos realizados com rotação de 5000 rpm	64
Figura 4.15: Trecho inicial da curva do deslocamento em função do tempo para o ensaio 06	66
Figura 4.16: Macrografias dos ensaios de 1 a 6, referentes à geometria 1 (ver tabela 3.4)	67
Figura 4-17: Macrografias dos ensaios de 7 a 12 (ver tabela 3.4), realizados com a geometria 2	69
Figura 4.18: Micrografias das amostras produzidas com a geometria 1: (A) e (B) extremidades da interface inferior pino/bloco, esquerda e direita respectivamente para o ensaio 01; (C) extremidade esquerda da interface inferior, ensaio 04; (D) extremidade direita da interface inferior, ensaio 05; (E) extremidade direita da interface inferior, ensaio 06; (F) extremidade central da interface inferior	71
Figura 4.19: Micrografias dos reparos executados com a geometria 2: (A) interface inferior central, (B) imagem anterior com maior ampliação; (C) interface inferior esquerda; (D) interface lateral inferior esquerda; (E) interface inferior esquerda; (F) interface lateral inferior esquerda; (G) interface inferior direita; (H) interface inferior esquerda, (I) ampliação da imagem anterior	73
Figura 4.20: Perfis verticais de microdureza Vickers, realizados com carga de 50 gf para os ensaios de 01 a 06, geometria 1	74
Figura 4.21: Perfil vertical de Microdureza Vickers, realizado com carga de 50 gf, para os ensaios 01 e 04, geometria 1	75
Figura 4.22: Perfil vertical de microdureza Vickers, realizado com carga de 50 gf, para os ensaios 05 e 06, geometria 1	76
Figura 4.23: Perfil horizontal de microdureza Vickers, situado a 5 mm da interface inferior e realizado com carga de 50 gf, para os ensaios de 01 a 06, geometria 1	76
Figura 4.24: Perfil vertical de microdureza Vickers para os ensaios 08 e 11, geometria 2	77

Figura 4.25: Perfil vertical de microdureza Vickers, para os ensaios 11 e 12, geometria 2	78
Figura 4.26: Micrografias relativas à amostra do ensaio 12. (A) interface lateral direita a 8 mm da interface inferior; (B) imagem anterior com maior aumento; (C) interface lateral esquerda a 8 mm da interface inferior; (D) imagem anterior com maior aumento	79
Figura 4.27: Tempos despendidos para os processamentos descritos na Tabela 3.8	80
Figura 4.28: Curvas de torque resistivo em função de parâmetros do processo, geometria A	82
Figura 4.29: Potência média em função dos parâmetros de processamento	83
Figura 4.30: Energia de soldagem associada aos parâmetros do processo	84
Figura 4.31: Imagens ilustrativas de blocos de reparo após o seu preenchimento: Ensaio 16: 2.000 kgf / 7.000 rpm; Ensaio 17: 2.000 kgf / 7.000 rpm; Ensaio 18: 2.000 kgf / 4.000 rpm; Ensaio 03: 2.000 kgf / 7.000 rpm; Ensaio 19: 2.000 kgf / 4.000 rpm; Ensaio 20: 2.000 kgf / 7.000 rpm	85
Figura 4.32: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria A	86
Figura 4.33: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria B	86
Figura 4.34: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria C	87
Figura 4.35: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria D	87
Figura 4.36: Macrografias dos ensaios da matriz da Tabela 3.8, geometria E	88
Figura 4.37: Micrografias: (1.1), (1.2) e (1.3) interface inferior esquerda, central e direita da amostra 273A; (2.1), (2.2) e (2.3) interface inferior esquerda, central e direita da amostra 275C; (3.1), (3.2) e (3.3) interface inferior esquerda, central e direita da amostra 273E; Microscopia óptica	91
Figura 4.38: Micrografia da amostra 374A (3.500 kgf, 7.000 rpm, geometria A): (1) Interface direita superior; (2) Mesma imagem anterior com maior aumento; (3) Microestrutura interfacial superior do pino; (4) Microestrutura interfacial superior do bloco (ZTA); MEV	92
Figura 4.39: Micrografias: (1.1), (1.2) e (1.3) interface inferior esquerda, central e direita da amostra 273B; (2.1), (2.2) e (2.3) interface inferior esquerda, central e direita da amostra 374B; (3.1), (3.2) e (3.3) interface inferior esquerda, central e direita da amostra 374D;	

Microscopia óptica.....	93
Figura 4.40: Ferrita de Widmanstätten e Alotriomórfica, a 5 mm acima da interface inferior central, na região do pino de queima da amostra 374A (3.500 kgf / 7.000 rpm / geometria A); Microscopia óptica	95
Figura 4.41: Micrografia da interface inferior lateral esquerda, para ensaios da Tabela 3.8: (1) amostra 273A (2.000 kgf / 7.000 rpm), material do pino; (2) amostra 345A (3.500 kgf / 4.000 rpm), material do pino e do bloco; Microscopia óptica	96
Figura 4.42: Amostra 374A (3.500 kgf, 7.000 rpm, geometria A): (1) Macrografia; (2) Micrografia da região destacada em (1); (3) Imagem anterior com maior aumento na microestrutura do pino; (4) Imagem (2) com maior aumento na ZTA. Imagens 2, 3 e 4 obtidas através de MEV	96
Figura 4.43: Micrografia da interface inferior pino/bloco, ensaios referentes à Tabela 3.8: (1) amostra 241B (2.000 kgf, 4.000 rpm, geometria B); (2) amostra 273D (2.000 kgf, 7.000 rpm, geometria D); Microscopia óptica	97
Figura 4.44: Micrografia da região central do pino para a amostra 273A (2.000 kgf, 7.000 rpm, geometria A) da Tabela 3.8, destacando: (1) a presença de linhas de cisalhamento; (2) micrografia com maior aumento da região indicada pela área em destaque, evidenciando a presença de micro-vazios; MEV.	98
Figura 4.45: (1) Micro-vazio da amostra 273A; (2) Espectro de raios-X para o ponto 2, assinalado na figura anterior	99
Figura 4.46: Perfis verticais de microdureza, para os ensaios realizados com a geometria A	101
Figura 4.47: Perfis verticais de microdureza, para os ensaios realizados com a geometria C	101
Figura 4.48: MEV na ZTA inferior da amostra 374A: (1) indentação a 0,6 mm abaixo da interface inferior; (2) imagem com maior aumento realizada a direita da indentação da imagem (1)	102
Figura 4.49: Perfil vertical de microdureza, para as amostras 275C e 374C	103
Figura 4.50: Perfil horizontal de microdureza realizado a 10 mm da interface inferior, para as amostras 275C e 374C	104

Figura 4.51: Perfil vertical de microdureza, para as amostras 241A e 273A	104
Figura 4.52: Perfil horizontal de dureza a 5 mm da interface inferior, para os ensaios referentes à geometria A	105
Figura 4.53: Perfil vertical de microdureza, para os ensaios realizados com a geometria B	106
Figura 4.54: Perfil vertical de microdureza, para os ensaios realizados com a geometria D	106
Figura 4.55: Microscopia óptica: (1) amostra 273B, indentação a 0,8 mm abaixo da interface inferior; (2) e (3) amostra 241B, região a 8,4 mm acima da interface inferior	107
Figura 4.56: Microscopia óptica: (1) amostra 241D, indentação a 6,2 mm acima da interface inferior; (2) amostra 374D, indentação a 2,2 mm acima da interface inferior	107
Figura 4.57: Perfil vertical de microdureza, para as amostras 273B e 374B	108
Figura 4.58: Perfil vertical de microdureza, para os ensaios realizados com a geometria E	109
Figura 4.59: Perfil vertical de microdureza, para as amostras 273E e 374E	109
Figura 4.60: Microscopia óptica de indentações na amostra 374E: (1) região da ZTA, a 1 mm abaixo da interface inferior; (2) região do pino, a 2 mm acima da interface superior	110
Figura 4.61: Janela de parâmetros do processo, para as geometrias do tipo A, C e E, indicando as prováveis condições obtidas após o processamento com apenas um ciclo	111
Figura 4.62: Gráficos do ensaio nº 3, ciclos de 2.000 kgf e 3.500 kgf, ambos a 5.000 rpm	113
Figura 4.63: Gráficos do ensaio nº 8, ciclos de 7.000 rpm e 6.000 rpm, ambos a 3.500 kgf	114
Figura 4.64: Gráficos do ensaio nº 6, 1º ciclo de 2.000 kgf e 7.000 rpm e 2º ciclo de 3.500 kgf e 6.000 rpm	115
Figura 4.65: Tempos decorridos ao longo do primeiro ciclo e tempos totais para os ensaios da tabela 3.10	116

Figura 4.66: Macrografia dos ensaios da tabela 3.10, realizados com dois ciclos de processamento:

- (A) Ensaio 1: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 7.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 7.000 rpm;
- (B) Ensaio 6: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 7.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 6.000 rpm;
- (C) Ensaio 7: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 6.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 6.000 rpm;
- (D) Ensaio 3: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 5.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 5.000 rpm;
- (E) Ensaio 8: 1º Ciclo: 3.500 kgf / 7.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 6.000 rpm 117

Figura 4.67: Perfis verticais de microdureza Vickers, para os ensaios realizados com processamentos a dois ciclos 118

Figura 4.68: Perfil vertical de microdureza Vickers, para os ensaios:

- 1: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 7.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 7.000 rpm;
- 3: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 5.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 5.000 rpm 119

Figura 4.69: Perfil vertical de microdureza Vickers, para os ensaios:

- 1: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 7.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 7.000 rpm;
- 6: 1º Ciclo: 2.000 kgf / 7.000 rpm - 2º Ciclo: 3.500 kgf / 6.000 rpm 120

Figura 4.70: Perfis horizontais de microdureza Vickers, realizados a 10 mm acima da interface inferior 120

Figura 4.71: Faixa de operação para ensaios a dois ciclos, e cujo apenas o parâmetro força axial é variado 121

Figura 4.72: Bloco de reparo preliminar, geometria D, após ensaios de preenchimento:

- (A) primeiro passe; (B) segundo passe de preenchimento..... 123

Figura 4.73: Macroestrutura da região de reparo por costura (Stitch Welding) das amostras de dobramento, retiradas do bloco de reparo preliminar

- (geometria D) 123

Figura 4.74: Amostras retiradas do bloco de reparo por costura preliminar; imagens realizadas após a realização do ensaio de dobramento transversal lateral ... 123

Figura 4.75: Amostras retiradas do bloco de reparo por costura, geometria A: imagens realizadas após o ensaio de dobramento transversal lateral 125

Figura 4.76: Amostras retiradas do bloco de reparo por costura, geometria A: imagens realizadas após o ensaio de dobramento transversal de raiz 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Capacidade máxima operacional da unidade de processamento por atrito	30
Tabela 3.2: Composição química dos materiais utilizados (% em peso)	35
Tabela 3.3. Classificação dos aços estruturais em função do limite de escoamento, (CBCA, 2006)	35
Tabela 3.4: Parâmetros utilizados dentro da fase de ensaios preliminares	38
Tabela 3.5: Velocidades lineares em função da rotação e da geometria da ponta dos pinos de processamento utilizados nos ensaios preliminares	39
Tabela 3.6: Descrição dos parâmetros geométricos das geometrias utilizadas nos ensaios da primeira fase	40
Tabela 3.7: Planejamento fatorial 2 x 2 x 5	42
Tabela 3.8: Descrição dos parâmetros utilizados nos eventos realizados na primeira fase	43
Tabela 3.9: Velocidades lineares em função da rotação e da geometria da ponta dos pinos de processamento utilizados nos ensaios da primeira fase	44
Tabela 3.10: Descrição dos parâmetros utilizados nos preenchimentos realizados na segunda fase, com dois ciclos de processamento. Comprimento de queima de 3mm / 7,5mm e forjamento de 3500 kgf / 3 s	45
Tabela 4.1: Valores de potência média para cada ensaio de preenchimento.....	82
Tabela 4.2: Ângulos de dobramento das amostras obtidas dos blocos de reparo otimizados	124

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM: American Society of Metals
ASTM: American Society for Testing and Materials
AWS: American Welding Society
CBCA: Centro Brasileiro de Construção em Aço
CCP: Cartão de Controle da Pressão
CCV: Cartão de Controle da Vazão
CPF: Cartão lógico de Processamento da Força axial
CPR: Cartão lógico de Processamento da velocidade de Rotação
EDS: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X)
FHPP: Friction Hydro Pillar Processing
FPSO: Floating, Production, Storage and Offloading
LTM: Laboratório de Tribologia e Materiais
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
PID: Proporcional Integral Derivativo
SP: Sensor de Posição
SR: Sensor de Rotação
TP: Transdutor de Pressão
TWI: The Welding Institute
UFU: Universidade Federal de Uberlândia
UPPA: Unidade de Processamento de Pinos por Atrito
VRP: Válvula Reguladora de Pressão
VRV: Válvula Reguladora de Vazão
ZTA: Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	-	Raio de curvatura do êmbolo
Al ₂ O ₃	-	Óxido de alumínio (alumina)
C	-	Carbono
Cr	-	Cromo
Cu	-	Cobre
e	-	Deformação percentual da superfície mais externa
F	-	Força [kgf]
M	-	Torque [N.m]
Mst	-	Valor para torque estacionário
M(t)	-	Torque em função do tempo
n	-	Velocidade de rotação [rpm]
N(t)	-	Potência em função do tempo
Ni	-	Níquel
Nst	-	Valor para potencia estacionária
T	-	Temperatura
T(t)	-	Temperatura em função do tempo
Mn	-	Manganês
Mo	-	Molibdeno
P	-	Fósforo
S	-	Enxofre
Si	-	Silício
ΔL(t)	-	Comprimento de queima em função do tempo
Δl	-	Comprimento de queima [mm]
φ	-	Diâmetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
2.1 - SOLDAGEM POR ATRITO	07
2.1.1 - Métodos de Geração de Energia	09
2.1.2 - Variações do Processo de Soldagem por Atrito	10
2.1.3 - Fases do Processo	13
2.1.4 - Influência dos Parâmetros do Processo na Qualidade da União	16
2.1.5 - Ciclos de Soldagem	17
2.1.6 - Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito	19
2.2 - PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO “ <i>FHPP</i> ”	21
2.2.1 - Descrição e Caracterização do Processo	21
2.2.2 - Influência das Geometrias do Pino e do Furo na Qualidade da União	22
2.2.3 - Influência dos Parâmetros do Processo na Microestrutura e Propriedades Mecânicas da União	24
2.3 - O REPARO DE TRINCAS POR ATRITO.....	25
2.3.1 - Reparo por Costura “ <i>Stitch Welding</i> ”	25
2.3.2 - Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Reparo.....	26
CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.1 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE REPARO DE TRINCAS POR ATRITO	27
3.1.1 - Componentes Mecânicos	27
3.1.2 - Sistema de Controle do Processo de Reparo de Trincas	31
3.1.2.1 - Instrumentação do Sistema de Controle	31
3.1.2.2 - Programa de Controle do Processo de Reparo.....	33
3.2 - MATERIAIS ENSAIADOS	34
3.3 - ENSAIOS DE PREENCHIMENTO	37
3.3.1 - Ensaios Preliminares	37
3.3.2 - Ensaios de Otimização de Parâmetros.....	39
3.3.2.1 - Primeira Fase: Planejamento Fatorial	39

3.3.2.2 - Segunda Fase: Ensaios com Dois Ciclos de Processamento.....	44
3.3.3 - Ensaio de Reparo por Costura “ <i>Stitch Welding</i> ”	45
3.3.3.1 - Procedimento de Reparo	46
3.4 - PREPARAÇÃO METALOGRAFICA.....	48
3.4.1 - Macrografia	48
3.4.2 - Micrografia	49
3.5 - ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	49
3.6 - TESTE DE DOBRAMENTO	50
3.6.1 - Dobramento Transversal Lateral.....	52
3.6.2 - Dobramento Transversal de Raiz.....	53
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1 - ENSAIOS PRELIMINARES.....	55
4.1.1 - Gráficos do Processo de Preenchimento.....	56
4.1.2 - Caracterização Metalográfica.....	66
4.1.3 - Ensaios de Microdureza Vickers.....	74
4.2 - ENSAIOS DE PREENCHIMENTO: OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS	80
4.2.1 - Primeira Fase	80
4.2.1.1 - Gráficos do Processo de Preenchimento	80
4.2.1.2 - Caracterização Metalográfica	84
4.2.1.3 - Ensaios de Microdureza Vickers.....	100
4.2.1.4 - Determinação dos Parâmetros Ótimos	110
4.2.2 - Segunda Fase: Ensaios com Dois Ciclos de Processamento	112
4.2.2.1 - Gráficos do Processo de Preenchimento	112
4.2.2.2 - Caracterização Metalográfica	116
4.2.2.3 - Ensaios de Microdureza Vickers.....	118
4.2.2.4 - Determinação dos Parâmetros Ótimos	121
4.3 - ENSAIO DE REPARO POR ATRITO “ <i>STITCH WELDING</i> ”	122
4.3.1 - Ensaios de Dobramento.....	122
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	127
CAPÍTULO 6 - TRABALHOS FUTUROS	131
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As questões relacionadas à indústria de minas e energia, frente a sua importância mundial, vem chamando a atenção, principalmente nos dias atuais, em que são feitos diversos questionamentos com respeito à capacidade e exploração consciente dos recursos minerais e energéticos à disposição do homem. Associam-se ainda os fatores sócio-econômicos inerentes, que em muitos casos tornam-se um forte limitante nesta área, além das cobranças realizadas no sentido da conscientização ambiental.

Estas observações vêm exaltar a importância e a constante necessidade de desenvolvimento da indústria do petróleo e de produção de energia, as quais, por este motivo, vem ocasionando um salto no crescimento científico e tecnológico.

A quebra de barreiras da ciência é conseguida mediante grandes esforços para superar problemas e paradigmas, os quais, a priori, apresentam-se intransponíveis; a superação de tais dificuldades traz consigo uma gama de inovações, nas mais diversas áreas do conhecimento científico. Novos materiais são gerados, visando atender às inúmeras condições de aplicação, e como consequência, técnicas de processamento são aprimoradas e inovadas. Gera-se assim, um amplo crescimento tecnológico, com vastas aplicações nos mais diversos setores produtivos, devendo ser dentro deste contexto, compreendido o **desenvolvimento do procedimento de reparo de trincas por atrito**.

A indústria “*offshore*” é hoje um dos ramos comerciais que mais possibilita a geração e exploração de novas tecnologias, podendo ser citada uma referência nacional, a **Petróleo Brasileiro S.A** (PETROBRAS), a qual é mundialmente reconhecida por ser uma das precursoras na exploração e prospecção de poços de petróleo em águas profundas (profundidades superior a 400 m), e hoje em dia em águas ultra profundas, envolvendo ambientes com laminas d’água superiores a 2.000 m, (http://www2.petrobras.com.br/portugues/ads/ads_Tecnologia.html).

Fica evidente, que para se manter determinado nível de pioneirismo, grandes esforços realizados no sentido de minimização de custos, ao longo de todo o processo, torna-se uma ferramenta de suma importância para a ampliação do crescimento, o que se aplica a qualquer setor produtivo da sociedade.

Onerosas quantias são despendidas com práticas de manutenção, e estas, se tratando de instalações *offshore*, possuem elevado valor agregado e alto risco, por se tratar de um ambiente hostil e de grande periculosidade. Além dos custos inerentes ao próprio processo de manutenção, existe um forte agravante: a necessidade de paradas na linha de produção. Foi estimado por Blakemore (1993) que em geral, tais procedimentos de manutenção podem alcançar cifras da ordem de £5milhões por dia.

Dentre as principais causas de paradas de produção e intervenções para a prática de manutenção, com maior percentual de reincidências, encontram-se os danos ocorridos pela falha de sistemas ou estruturas por fadiga (TEBBETT et al., 1988). A Figura 1.1 ilustra a presença de trincas originárias por fadiga de baixo ciclo, de dimensões relativamente grandes, nas paredes de tanques de armazenamento em plataformas semi-submersíveis (FPSO – *Floating, production, storage and offloading*).



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

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 citado por MEYER, 2002).

Esta prática apresenta, tradicionalmente, um significativo risco de incêndio, quando do seu empreendimento em ambientes com alto risco de combustão, a qual necessita, frequentemente, de paradas na linha de produção.

Outro forte inconveniente desta técnica é a elevada temperatura alcançada no processo, o qual é realizado mediante a fusão tanto do material de adição, quanto do metal de base. Nesta condição, sérios agravantes de origem metalúrgica podem ocorrer, principalmente em ambientes submersos e a elevadas pressões hidrostáticas, o que exige procedimentos bastante dispendiosos.

O material processado (fundido) está sujeito a sérios inconvenientes associados à fusão e solidificação, tais como a adsorção de gases (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio) da atmosfera pela poça de fusão, privilegiando a formação de fases frágeis de baixa tenacidade à fratura, além da fragilização pelo hidrogênio. Adicionalmente, pode-se ter a formação de poros no interior do cordão de solda. A presença de tais complicações, no reparo realizado podem levar à reprovação do mesmo, e à necessidade de repetição do procedimento de manutenção.

Existem técnicas de soldagem por atrito como um método alternativo de reparo, frente aos já empregados, devido às necessidades da realização de práticas mais seguras e flexíveis de manutenção no reparo em estruturas “*offshore*”, e que minimizem as paradas de produção.

O potencial reparo de trincas, mediante soldagem por atrito, também conhecido como costura por atrito (*Stitch Welding*), nada mais é do que a sobreposição de eventos, realizados através da técnica de processamento de pinos por atrito, ao longo do comprimento de uma falha a ser reparada. Esta prática consiste no preenchimento de um furo (cavidade previamente aberta com uma geometria característica) por intermédio da introdução coaxial de um pino (consumível), estando este submetido a uma velocidade de rotação, e a esforços de compressão contra a cavidade do furo.

Devido ao calor gerado pela interação entre as superfícies em contato, o material do pino é mantido em uma condição viscoplástica, permitindo a existência de um fluxo de material, que se desenvolve ao longo da direção axial do consumível, promovendo-se, assim, o completo preenchimento do furo. Deste modo, longos defeitos podem ser reparados pelo emprego consecutivo deste procedimento.

Por ser um processo realizado no estado sólido, com ausência de material fundido, esta não apresenta os inconvenientes metalúrgicos apresentados pela soldagem a arco elétrico, e prestando-se otimamente para realização em condições subaquáticas, visto que este processo não sofre influências da pressão ambiente (NIXON, 1986).

Devido ao seu curto ciclo térmico e baixo aporte de calor, o processo poderá, potencialmente, vir a ser empregado em linhas de transporte de petróleo, gás e metanol, sem a necessidade de paradas de produção. Tem-se assim, um método com elevado potencial de uso na indústria *offshore* em atmosferas explosivas, possibilitando baixos riscos de ignição (BLAKEMORE, 1999).

Resultados positivos já vêm sendo obtidos há vários anos com a utilização de soldagem de pinos por atrito em plataformas e estruturas marítimas do mar do norte. A técnica foi empregada com sucesso na fixação de anodos de sacrifício, visando a proteção catódica de estruturas de aço contra a corrosão marítima (NICHOLAS, 1984).

Visando o reparo de trincas em membros que falharam mediante a ciclos de fadiga, estudos citados por Blakemore (1995), têm mostrado uma boa performance das soldas por atrito, no estado como soldado (sem tratamento térmico). Esse bom desempenho tem sido atribuído, em parte, à presença de tensões residuais compressivas dentro da união soldada.

Em vista das grandes potencialidades práticas da técnica de reparos por atrito e seu atrativo emprego, destacando-se a indústria do petróleo, este trabalho apresenta como objetivo a otimização de parâmetros de reparo de trincas por atrito através da técnica de processamentos de pinos. Para tal, será, nesse estudo, utilizado o equipamento desenvolvido no laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia (SOUSA, 2006). Tais parâmetros serão investigados dentro da faixa de operação deste equipamento, ou seja, limitado a, no máximo, 8000 rpm de velocidade de rotação e 5.000 kgf de força axial; possibilitando assim, ao final desta dissertação, a sugestão, além da faixa ideal de trabalho destes parâmetros, o par de geometrias, tanto para o pino quanto para o orifício no substrato, que conduz às melhores uniões metalúrgicas na interface pino/bloco.

Para melhor clareza e compreensão do processo de pesquisa, este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo II, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto, abordando tanto o processo de soldagem por atrito, bem como as práticas mais recentes de processamentos de pinos e o reparo por costura *Stitch Welding*.

No Capítulo III, são apresentados os procedimentos experimentais para a realização dos ensaios, uma completa descrição dos materiais ensaiados, os pares de geometrias avaliadas e a faixa de parâmetros estudados. Faz-se ainda uma descrição do equipamento utilizado, e as técnicas empregadas para avaliação que conduzirão à otimização dos parâmetros do processo.

No Capítulo IV apresentam-se os resultados obtidos juntamente com a sua discussão, em função da sequência de realização dos ensaios.

No Capítulo V apresentam-se as principais conclusões.

No Capítulo VI são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e continuação da pesquisa.

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

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de reparo de trincas por atrito é considerado por alguns como um método não convencional, advindo da soldagem por atrito, a qual já vem sendo trabalhada desde meados do século passado. Apesar de já se conhecer bastante a respeito deste processo de união de peças no estado sólido, pouco ainda se sabe a respeito de suas variações, que levaram ao desenvolvimento das técnicas de processamento de pinos e reparos por atrito. Estes processos, desenvolvidos no início da década de 90, possuem um restrito número de publicações, sendo a maioria destes trabalhos de acesso limitado, pelo alto custo financeiro. Outro forte agravante na redução de trabalhos sobre o referido assunto, vem a ser as limitações impostas pelas patentes, que garantem os direitos às instituições proprietárias. Tais questões contribuíram fortemente para um baixo número de referências apresentadas neste trabalho.

Devido à sua grande relevância e semelhança com respeito aos aspectos fenomenológicos, inicialmente, neste capítulo, será dada uma ênfase ao processo de soldagem por atrito, e, posteriormente, ao processo de reparo de trincas por atrito.

2.1 Soldagem por Atrito

A solda por atrito é uma técnica bastante conhecida, com seu uso bem difundido industrialmente após a Segunda Guerra Mundial, mais precisamente em 1956 na União Soviética, com sua patente sendo garantida neste mesmo ano a Chudikov (MEYER, 2002).

A técnica de soldagem por atrito consiste em um processo de soldagem em estado sólido, que produz soldas pela rotação ou movimento relativo entre a superfície de duas peças sob a ação de forças compressivas. Por conseguinte, calor é gerado mediante a superação das forças de atrito, e um deslocamento plástico de material, nas superfícies em

contato, é conseguido; desse modo é formada uma união metalúrgica entre as peças (AWS, 1991).

Apesar de ser considerado um processo em estado sólido, alguns autores admitem em determinadas circunstâncias, a possibilidade da formação de um filme de material fundido entre as superfícies em atrito (WICHELHAUS, 1975 citado por MEYER, 2002). Contudo, as características finais da solda não devem evidenciar a formação de uma estrutura fundida em decorrência do intenso trabalho a quente a que é submetido o material; por este motivo, a grande maioria dos autores considera que, durante o processo de soldagem, não há fusão de material (CROSSLAND, 1971).

A execução do processo de soldagem é exemplificada na Figura 2.1, onde inicialmente, tem-se a movimentação relativa de uma das peças a serem unidas (Figura 2.1A). Posteriormente, estas peças são postas em contato, e devido à geração de calor por atrito, um fluxo plástico entre as peças é favorecido, (Figura 2.1B e C). No final, cessa-se a rotação, e a força axial pode ou não ser mantida por um dado intervalo de tempo, caracterizando a etapa de forjamento, o qual, ao final desta, finda-se o processo de soldagem.

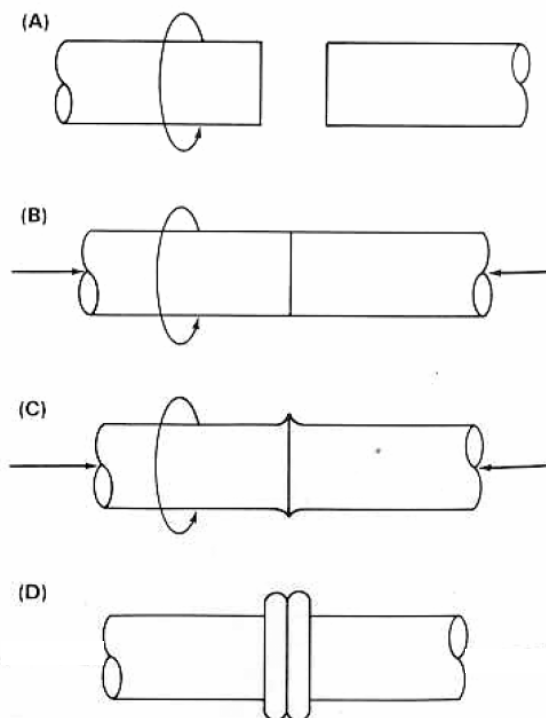


Figura 2.1: Sequência de execução da solda por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força; (C) Início da união soldada; (D) Solda completada (AWS, 1991).

Como aspecto característico apresentado após a soldagem por atrito, as superfícies unidas apresentam: a ausência de uma região fundida; estreita zona termicamente afetada (ZTA); formação característica de material deformado plasticamente ao redor da união (*flash*).

A resistência da união soldada é função: das propriedades dos materiais empregados; do grau de deformação plástica na interface durante o aquecimento; dos parâmetros do processo.

Considera-se como condições necessárias para o sucesso da formação de uma forte união metalúrgica, a remoção dos filmes de óxido, bem como de materiais adsorvidos das superfícies a serem unidas, além da existência de substancial deformação plástica das camadas superficiais do metal (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992).

2.1.1 - Métodos de Geração de Energia

Como apresentado pela AWS (1991), existem dois métodos distintos para a geração de energia, mediante a conversão de energia mecânica em energia térmica, para a obtenção da união soldada.

- O primeiro método, denominado **soldagem por atrito contínua ou convencional**, consiste em acoplar uma das peças a serem unidas a uma unidade motora, de modo a ser acelerada a uma dada velocidade de rotação constante, enquanto a outra peça, fixa, é impelida contra a que está em movimento, sendo ambas postas em contato íntimo pela ação de uma força normal predeterminada. Após um dado intervalo de tempo ou de deslocamento axial das peças (comprimento de queima), é cessada a rotação, e uma força igual ou superior à utilizada no processo é mantida por alguns segundos, completando o denominado estágio de forjamento, e finalizando o processo.

Neste processo, a energia total fornecida é função da potência total empregada pelo motor e pela força axial utilizada. Deste modo, uma potência relativamente alta do motor é requerida.

- No segundo método, a **soldagem por atrito inercial**, a peça girante é acoplada a um volante de inércia, acelerado-a a uma dada velocidade de referência. Posteriormente, o volante é então desacoplado da unidade propulsora e as peças postas em contato íntimo. Neste método, a velocidade varia ao longo do processo, de um valor máximo até zero, mediante a transferência da energia armazenada no volante para a execução da união. No método inercial, as variáveis do processo são: o momento de inércia do volante; a velocidade de rotação; a força axial; a força e o tempo de forjamento.

2.1.2 - Variações do Processo de Soldagem por Atrito

O processo de soldagem por atrito apresenta algumas alternativas para o tipo de movimentação relativa entre as superfícies a serem unidas. Estas variações apresentam entre si algumas vantagens e desvantagens, e a opção por um ou outro método é realizada conforme a aplicação prática.

De acordo com a American Welding Society (AWS) (1991), os métodos de soldagem por atrito podem ser divididos em métodos convencionais e os não-convencionais. Os métodos convencionais serão a seguir sucintamente descritos.

O primeiro método é o convencional, no qual uma peça é mantida estacionária enquanto a outra é rotacionada. Essa é a configuração mais comumente utilizada, e está esquematizada na Figura 2.2. Este processo é de vasta aplicação na indústria automotiva, na união de eixos e hastes de válvulas.

Uma segunda variação é o método com rotação contrária (*“Counter Rotation”*), onde ambas as peças são mantidas em rotação, mas com sentido de giro oposto (Figura 2.3). Este processo é empregado quando altas velocidades de rotação são requeridas.

Quando da união de duas peças muito longas ou de difícil rotação das mesmas, devido à ausência de um eixo de revolução, um terceiro membro pode ser utilizado para ser posto em rotação, enquanto as demais partes permanecem fixas. Tal método é denominado *“Centre Drive”* (Figura 2.4). Esta prática possui alguns inconvenientes relacionados à configuração do equipamento, o qual se torna mais complexo.

O método *“Twin Welds”* implica na rotação de duas peças contra uma terceira, a qual é mantida estacionária e em posição intermediária em relação às outras duas. A Figura 2.5 ilustra tal configuração.

Outra variação convencional do processo é a soldagem por atrito radial (Figura 2.6). Essa é uma prática viável, tanto para a união de tubos, quanto para o reparo dos mesmos (LEEUWEN; FRICH, 1986). Este método consiste na aplicação de esforços compressivos na direção radial sob um anel de união. Esta variação possui como desvantagem uma complexa configuração do sistema de fixação e rotação do anel sob os tubos de menor diâmetro, e a aplicação dos esforços de maneira síncrona sob a superfície do anel.



Figura 2.2: Solda por atrito contínua (convencional) *“continuous drive”* (AWS, 1991).

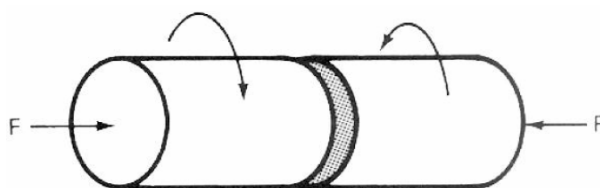


Figura 2.3: Método “counter rotation” (AWS, 1991).

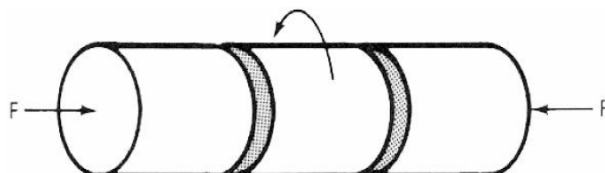


Figura 2.4: Configuração “centre drive” (AWS, 1991).

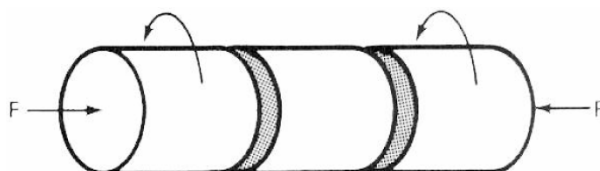


Figura 2.5: Configuração “twin welds” (AWS, 1991).

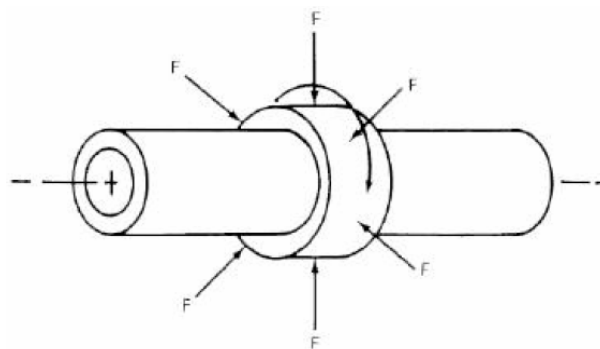


Figura 2.6: Soldagem por atrito radial (AWS, 1991).

Como métodos não-convencionais de soldagem por atrito, destacam-se:

A. Os processos “*Angular Reciprocating*” e “*Linear reciprocating*”, ilustrados respectivamente nas Figuras 2.7 e 2.8, que envolvem a aplicação de um movimento oscilatório entre as superfícies a serem soldadas. Estas práticas possuem grande aplicação na soldagem de materiais poliméricos;

B. O processo de soldagem orbital (Figura 2.9), onde ambas as peças são postas em rotação e no mesmo sentido, mas neste caso, com uma excentricidade entre eixos das peças. Neste método, a taxa de geração de calor tende a ser mais uniforme ao longo do

plano de atrito. Como aspectos negativos, destacam-se a elevada força inercial, devido às altas velocidades de rotação e o projeto complexo do equipamento.

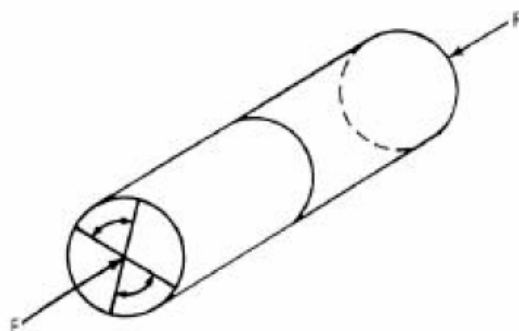


Figura 2.7: Método “*angular reciprocating*” (AWS, 1991).

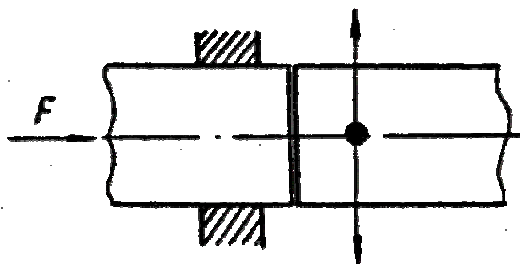


Figura 2.8: Método “*linear reciprocating*” (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992).

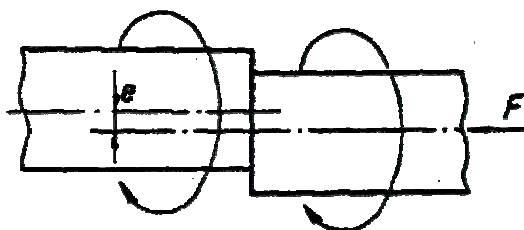


Figura 2.9: Processo de soldagem orbital (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992).

C. Outros processos considerados não-convencionais, mas de alta empregabilidade prática merecem destaque, tal como o revestimento por atrito; o método de união de chapas “Friction Stir Welding”; o “Friction Hydro Pillar Processing” ou processamento de pinos por atrito e o “Stitch Welding”, empregado no reparo de trincas por atrito. Devido à maior relevância destes dois últimos processos para este trabalho, os mesmos serão mais adiante discutidos.

2.1.3 - Fases do Processo

O processo de soldagem por atrito pode ser dividido em algumas fases, na medida em que o processo ocorre. Como descrito por Souza (2006), diversos autores propõem a divisão do processo de soldagem por atrito em fases distintas. A AWS (1991) e a American Society of Metals - ASM (ASM, 1993) fazem referência à divisão do processo em apenas duas fases. Demais autores, citados por Meyer (2002) fazem distinção de três, quatro, ou até cinco fases do processo.

Uma distinção bem detalhada e clara é feita por Lebedev e Chernenko (1991), que dividem o processo em seis fases. Esta divisão é apresentada neste trabalho, em virtude do seu melhor detalhamento e exposição dos fenômenos ocorridos, sendo feita a esta algumas analogias com respeito à divisão apresentada por Meyer (2002).

A ilustração do esquema de divisão do processo de soldagem em seis fases, proposto por Lebedev e Chernenko (1991), é apresentada na Figura 2.10. Nessa figura são apresentados o comportamento dos parâmetros básicos, a velocidade de rotação n e a força axial F , além de ser caracterizado ainda o comportamento das curvas, em função do tempo, de torque $M(t)$, potência $N(t)$, deslocamento das superfícies em contato $\Delta L(t)$ e temperatura $T(t)$.

Na fase inicial τ_1 , ocorre a interação mecânica entre as asperidades das superfícies em contato, as quais estão submetidas a uma elevada tensão, devido à baixa área efetiva de contato. Tais interações ocorrem inicialmente na presença de uma lubrificação limítrofe, devido à presença de filmes de óxido e gases adsorvidos, os quais são rapidamente destruídos pela intensa deformação plástica e pelo efeito de amaciamento do material, tendo-se posteriormente um atrito seco. Os contaminantes e resíduos presentes são expelidos para o exterior da união devido à dinâmica do processo, onde as forças radiais promovem o fenômeno conhecido como hidro-extração (CROSSLAND, 1971). Neste estágio, o torque tende a diminuir com o incremento da velocidade de rotação, sendo ao final deste período, o principal efeito caracterizado pela maior perda de resistência mecânica nas regiões externas da união devido às mais elevadas velocidades relativas alcançadas.

Na segunda fase τ_2 , ocorre um significativo aumento dos parâmetros observados. Neste intervalo há uma elevação no número de interações entre as asperidades, devido à propagação da área real de contato para regiões interiores da superfície de atrito. Devido a estas interações, a temperatura sofre um abrupto aumento, de modo que as propriedades mecânicas, tais como, limite de escoamento e a resistência mecânica são fortemente reduzidas, favorecendo-se assim o crescimento da componente adesiva do atrito. De acordo com Hutchings (1992), a componente adesiva eleva-se mediante o aumento da dutilidade

entre o par de materiais em contato. Deste modo, evidencia-se uma abrupta elevação do torque, o qual atinge ao final desta fase, seu valor máximo.

Na terceira fase τ_3 , a temperatura continua aumentando, mas com taxas menos expressivas que as observadas na fase anterior. Este aumento de temperatura na zona de atrito, bem como a intensa deformação plástica envolvida, podem acarretar a formação de um filme viscoplástico de baixa resistência ao cisalhamento. Tal material comporta-se semelhantemente a um filme lubrificante, reduzindo-se assim o coeficiente de atrito, e, por conseguinte, o decréscimo no torque resistivo é averiguado. A partir desse momento, a temperatura se estabiliza, bem como a taxa de encurtamento axial e o torque. Nessa fase, nota-se a extrusão de material para as extremidades da união, originando a formação de rebarbas (material do *flash*).

Na quarta fase τ_4 , observa-se um comportamento quase estacionário ou em regime permanente da temperatura, da geração de calor, do torque e do comprimento de queima. Ao final deste período, a superfície de atrito atinge condições ideais para a formação de uma adequada união metalúrgica, devido à uniformização da deformação plástica e das condições de aquecimento, além de contar com a extração, para a região da rebarba, de filmes óxidos e partículas contaminantes.

A quinta fase τ_5 , compreende o período de desaceleração, cujo processo de frenagem ocasiona o segundo pico na curva do torque, em decorrência da redução da velocidade de rotação e aumento do coeficiente de atrito. Com o fim do movimento relativo, tem-se a formação intensificada das uniões metalúrgicas.

A sexta fase, conhecida como fase de forjamento, implica na intensificação do mecanismo de adesão, mediante a aplicação de um esforço normal de compressão por alguns segundos, com o intuito de elevar propriedades mecânicas, tais como: o limite de resistência e a dureza. Ao fim desta fase, tem-se a conclusão do processo de soldagem.

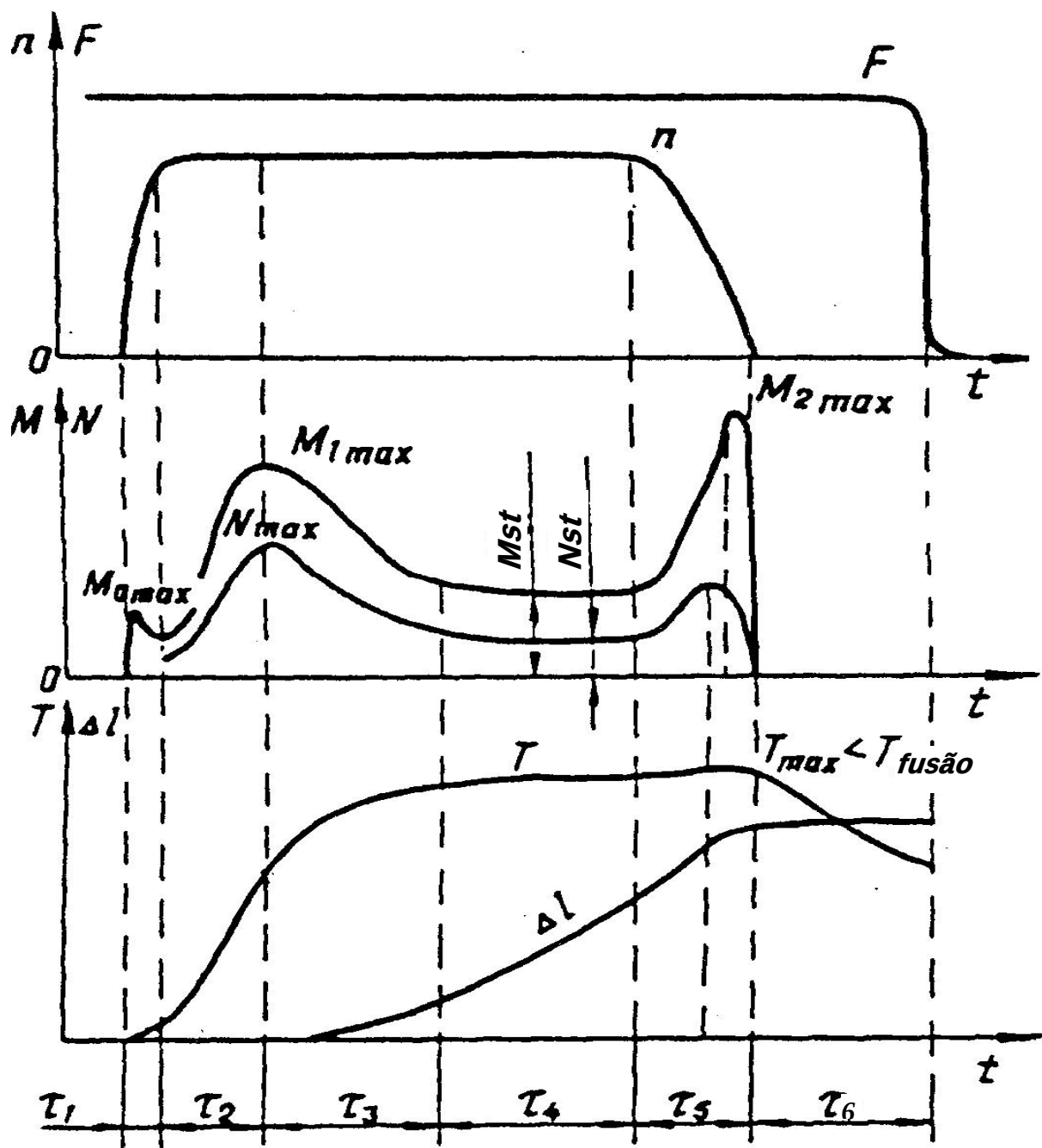


Figura 2.10: Comportamento das variáveis: Força (F), Rotação (n), Torque $M(t)$, Potência consumida $N(t)$, Temperatura $T(t)$ e comprimento de queima $\Delta L(t)$, ao longo das fases do processo de soldagem por atrito (LEBEDEV; CHERNENKO, 1992).

2.1.4 - Influência dos Parâmetros de Processamento na Qualidade da União

Como parâmetros do processo de soldagem por atrito podem ser destacados seis; quais sejam: força axial, velocidade de rotação, taxa de queima, tempo de aquecimento, tempo requerido para desaceleração, bem como a força e o tempo de forjamento. Destes, os quatro primeiros merecem maior atenção, devido à sua superior relevância na qualidade da união, e serão a seguir considerados com mais detalhes.

- **Força Axial:** O parâmetro força axial é de significativa relevância no processo. Ela deve ser conservada a valores que sejam capazes de manter as superfícies de atrito em íntimo contato, de modo a evitar a presença de partículas indesejáveis na interface e a formação de filmes de óxido. Contudo, valores muito elevados podem conduzir o processo a difíceis condições de controle, em vista de elevadas temperaturas locais e das altas taxas de queima. Ellis (1972) apresentou de forma bem detalhada a influência da força axial na qualidade da união. Além desta controlar de forma preponderante os tempos de soldagem, a mesma atua no perfil e nas características da ZTA. As maiores forças conduzem a um estreitamento da ZTA, a qual se propaga, na direção axial, semelhantemente a um perfil cônico, com origem no centro da solda e estendendo-se para o exterior. Para as forças mais baixas, a ZTA é apresentada com um perfil mais abrangente, propagando-se de forma paralela à superfície de atrito. Recomenda-se o emprego de maiores forças para a obtenção de uma microestrutura mais refinada, evitando-se a formação de ferrita de widmanstatten, proporcionando-se assim um relativo ganho nas propriedades de tração, dureza e tenacidade (ELLIS, 1972; AWS, 1991).

- **Velocidade de Rotação:** Este parâmetro possui uma grande faixa de variação, sem provocar sensíveis perturbações na qualidade da solda (AWS, 1991). Segundo Vill (1962 citado por MEYER, 2002), existem certas velocidades ótimas para cada combinação de materiais e aplicações. Nas mais altas velocidades de rotação, as interações entre as asperidades são acompanhadas por uma ação de polimento entre as superfícies em atrito. Este comportamento pode estar relacionado às condições viscoplásticas do material interfacial, o que conduz a um maior tempo de aquecimento para serem alcançadas as condições plásticas ideais, favorecendo-se assim a propagação de calor e intensificação da ZTA. As altas velocidades irão ocasionar, além do maior volume de material aquecido, uma menor taxa de resfriamento, e queda nas propriedades mecânicas, tais como limite de resistência e dureza (ELLIS, 1972). Já as mais baixas velocidades implicarão em menor aporte térmico, e um menor aquecimento periférico na superfície em atrito. Contudo, principalmente em elevadas pressões axiais, é necessário uma unidade com maior potência a fim de superar os esforços resistivos a baixa rotação. As baixas rotações podem ser também um certo agravante, devido às mais altas taxas de resfriamento, podendo

ocasionar, dependendo do meio de resfriamento, a formação de fases com excessiva dureza. Foi observado que, maiores velocidades privilegiarão uma estrutura mais grosseira de Widmanstätten, com propriedades mecânicas de resistência inferiores às aquelas obtidas a baixas rotações.

- **Taxa de Queima:** Este parâmetro descreve a velocidade com que ocorre o deslocamento entre a superfície de atrito das peças em contato. O comprimento de queima é um parâmetro utilizado para controlar o ciclo de soldagem, ou seja, início e fim do processo, além de ter significativa influência na qualidade da união. Este parâmetro é fortemente influenciado pela força axial e velocidade de rotação, de modo que, dependendo do tipo de equipamento utilizado (*continuous drive*), altas forças e baixas velocidades propiciam taxas de queima mais elevadas (MEYER, 2002). Ellis (1972) demonstrou que as maiores taxas de queima tendem a desenvolver maiores valores de limite de resistência. O controle do processo através do comprimento de queima apresenta a desvantagem de se necessitar de um adequado alinhamento entre as seções a serem unidas, bem como a presença de largos *flashes* (rebarbas) e defeitos superficiais. Esses fatores levam a uma redução na qualidade da união soldada.

- **Tempo de aquecimento:** O tempo de aquecimento é definido como sendo o período de tempo compreendido entre o contato inicial das superfícies de atrito e o final da fase de frenagem (velocidade nula). Este parâmetro é por sua vez dependente da força aplicada e da velocidade de rotação, sendo inversamente proporcional ao primeiro parâmetro e diretamente proporcional à velocidade. Este parâmetro é de importância na quantidade de calor gerado e propagado ao longo da região soldada e ZTA. A microestrutura final depende tanto do nível de aquecimento atingido ao longo do processo, como das taxas de resfriamento (ELLIS, 1972).

2.1.5 - Ciclos de Soldagem

A técnica de soldagem por atrito oferece a possibilidade de os parâmetros do processo poderem ser alterados ao longo de uma solda. Este evento permite, dentre alguns aspectos, melhorar a qualidade da união soldada, privilegiando a formação de um ou outro tipo de microestrutura final. Além do mais, a utilização da soldagem em ciclos, melhora o controle da energia de soldagem envolvida, bem como a taxa de geração de calor e a energia dissipada.

Foi apresentado por Lebedev e Chernenko (1992) a proposição de cinco tipos de ciclos de pressão, que podem ser empregados na soldagem por atrito (Figura 2.11). 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. Esta escolha envolve ainda a

capacidade e potência do motor propulsor empregado. No caso, por exemplo, de baixa potência e união de grandes seções, recomenda-se o emprego de ciclos favorecendo a baixas pressões iniciais e altas velocidades de rotação.

Além dos ciclos de pressão apresentados na Figura 2.11, existe a possibilidade de ser alterada somente a velocidade de rotação (Figura 2.12 A) ou proceder a variações de ciclo simultâneas, tanto da força axial, quanto da velocidade (Figura 2.12 B). Estas alternativas vêm oferecer uma maior flexibilidade ao processo, aliado às demais possibilidades de ciclos de soldagem.

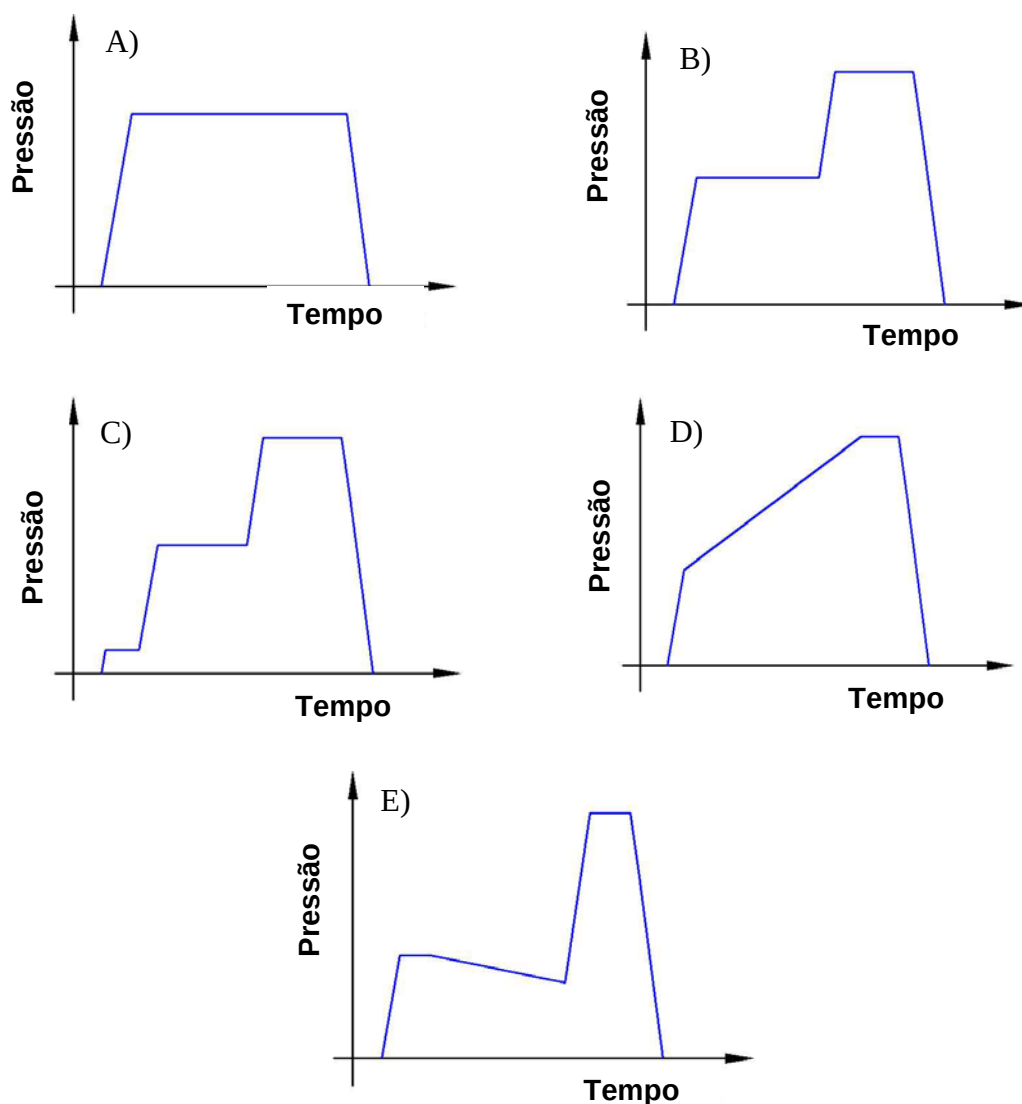


Figura 2.11: Ciclos de soldagem propostos por Lebedev e Chernenko (1992).

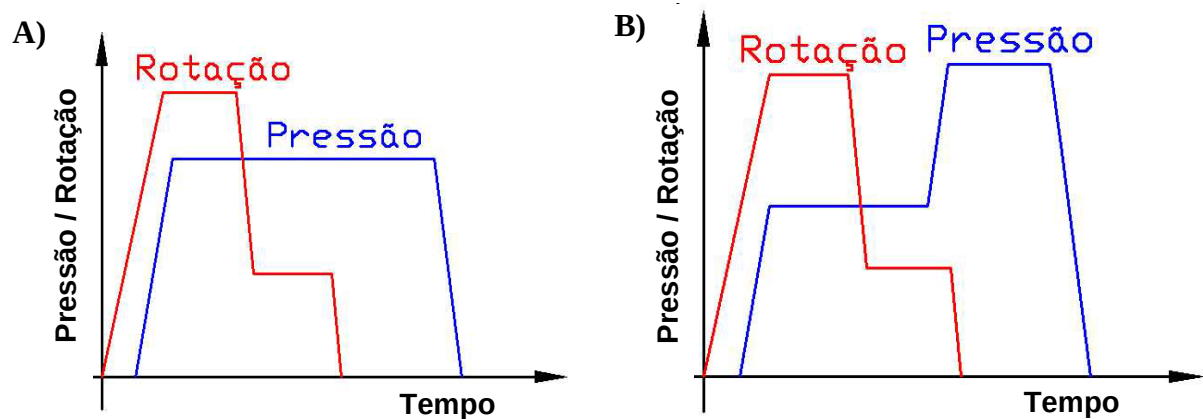


Figura 2.12: Ciclos do processo. (A) ciclo de variação apenas da rotação ao longo do tempo; (B) ciclos com variação da força e rotação ao longo do processo (SOUSA, 2006).

2.1.6 - Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito

Como em qualquer tipo de processo, os mesmos apresentam certos aspectos vantajosos, mediante determinadas condições práticas. Contudo, estes também apresentam consigo algumas limitações. A seguir será feita uma descrição dos aspectos positivos e limitantes do processo, com base nas descrições apresentadas por: Ellis (1972), Nicholas (1984), Blakemore (1993), Blakemore (1999), Pinheiro (2001) e Meyer (2002).

Vantagens do processo:

- ✓ Em geral, não é necessária uma atenção especial com a limpeza das superfícies a serem unidas, uma vez que o processo é considerado ser auto-limpante, tendendo mediante à dinâmica do processo a eliminar as impurezas, as quais ficam presas no material do “flash” (rebarba);
- ✓ Não é necessário o emprego de um fluxo de metal de enchimento e gás protetor. O processo é considerado limpo, sem emissão de gases tóxicos à saúde do operador, além de ser mais seguro devido à ausência de faíscas, radiação ou risco com problemas elétricos envolvendo altas tensões;
- ✓ Há a completa ausência de problemas associados a fenômenos de solidificação, tais como: porosidade, segregação e adsorção de hidrogênio, uma vez que o processo ocorre dentro da fase sólida;
- ✓ Caracteriza-se pela formação de uma estreita ZTA;

- ✓ Baixo calor introduzido e os rápidos ciclos do processo são aspectos característicos, que o tornam favorável a aplicações em oleodutos operantes, linhas de gás e metanol;
- ✓ O processo permite a união de metais dissimilares, difíceis ou até mesmo impossíveis de serem soldados por outros processos;
- ✓ O processo pode ser automatizado, possibilitando a produção seriada de soldas com elevado controle de qualidade, além de o equipamento poder ser operado a longas distâncias, adequado para aplicação em áreas classificadas e de difícil acesso pelo operador;
- ✓ O processo pode facilmente ser implementado para uso em atmosferas explosivas, sendo atrativa sua aplicação na indústria petrolífera, além da possibilidade da realização de soldas sem a necessidade de paradas na linha de produção;
- ✓ Baixo custo operacional, simplicidade de operação, baixo consumo de energia e o curto ciclo de soldagem, fazem do custo efetivo do processo ser atrativo em comparação a outros processos de fabricação;
- ✓ Não há a necessidade da utilização de operadores com habilidades manuais específicas;
- ✓ Na grande maioria dos casos, a resistência da solda é igual ou até mesmo superior à dos metais de base.

Limitações do processo:

- ✓ Pelo menos uma das peças deve possuir um eixo de revolução, de modo que a peça possa girar sobre o eixo do plano de soldagem;
- ✓ Um dos materiais a serem unidos deve ser passível de deformação plástica;
- ✓ A preparação e o alinhamento das peças podem ser um ponto crítico, para o desenvolvimento uniforme da deformação plástica e aquecimento da superfície de atrito;
- ✓ O processo é normalmente limitado para a execução de juntas de topo planas ou angulares (cônicas);
- ✓ Custo inicial elevado com o equipamento e ferramentas.

2.2 - Processamento de Pinos por Atrito

O processamento de pinos por atrito, também conhecido como “*Friction Hydro Pillar Processing*” (FHPP), como já mencionado anteriormente, é um processo novo, desenvolvido ao longo da década de 90, e caracterizado como um processo de soldagem por atrito não-convencional. Esta técnica apresenta um forte atrativo industrial, principalmente para indústrias do petróleo, devido à capacidade de utilização do processo no reparo de trincas em estruturas *offshore*, tubulações de gás e petróleo, bem como na indústria naval.

Em virtude do restrito número de publicações acerca desta técnica, relativamente pouco se conhece sobre a sua completa fenomenologia envolvida, bem como a real influência dos parâmetros do processo e suas faixas ótimas de operação, visto que estes também dependem do tipo de material trabalhado.

2.2.1 - Descrição e Caracterização do Processo

A realização do processamento de pinos por atrito pode ser dividida em duas etapas: **a.** abertura de um furo cego (não passante), com implemento de geometrias tanto cilíndricas, quanto cônicas; **b.** preenchimento deste furo por meio de um pino (consumível), inicialmente rotacionado, e posteriormente introduzido coaxialmente ao furo, sendo, então, submetido a um esforço normal de compressão.

Devido às interações surgidas entre as superfícies em contato, calor é gerado por atrito, propiciando o aquecimento e consequente redução do limite de escoamento do material. Este efeito térmico permite a formação de um fluxo plástico, que, mediante as forças existentes, propaga-se axialmente ao longo da seção do consumível (pino de queima), promovendo o completo preenchimento do orifício (THOMAS; NICHOLAS, citado por MEYER, 1992). Um esquema do processo é apresentado na Figura 2.13.

O processamento de pinos por atrito, patenteado por Thomas e outros (1995), sendo assegurado ao TWI é derivado da técnica denominada “*Tapered Plug Welding*”, ilustrado na Figura 2.14. Este processo foi apresentado por Andrews e Mitchell (1990), visando o reparo de estruturas *offshore*, sob condições subaquáticas. O “*Tapered Plug Welding*” difere-se do processamento de pinos por atrito, pelo fato de se trabalhar com orifícios passantes, onde a maior concentração de deformação plástica encontra-se nas paredes laterais, e não ao longo de grande parte da seção transversal do pino, que se verifica no preenchimento FHPP.

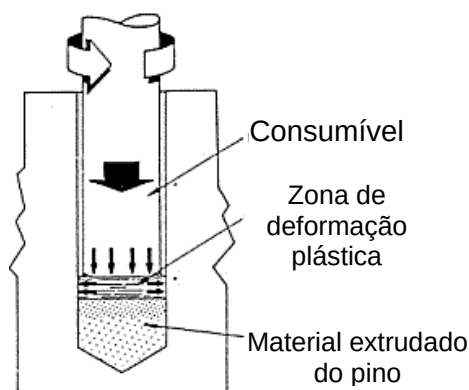


Figura 2.13: Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito,
(<http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/friction_index.html>).

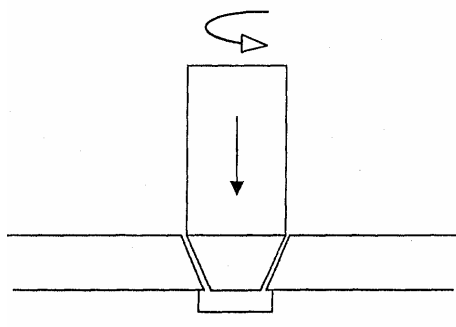


Figura 2.14: Croqui do processo "Tapered Plug Welding".

As mesmas vantagens tecnológicas apresentadas para a soldagem por atrito podem ser atribuídas à técnica do processamento de pinos por atrito. Como o processo é realizado no estado sólido, este não é influenciado pela pressão ambiente (NIXON, 1986), o que evidencia a sua aplicação em locais subaquáticos, a elevadas profundidades.

Em vista do intenso trabalho mecânico a quente que o consumível (pino) está sujeito, suas propriedades mecânicas de limite de resistência e dureza finais tendem a ser mais elevadas que aquelas apresentadas pelo material de origem, podendo estas, ainda, ser alteradas mediante práticas de tratamento térmico (THOMAS, 1997 citado por MEYER, 2002).

2.2.2 - Influência das Geometrias do Pino e do Furo na Qualidade da União

Duas configurações geométricas distintas foram desenvolvidas para o processamento de pinos por atrito, sendo uma geometria constituída por uma forma cilíndrica e outra por um perfil cônico (Figura 2.15).

A geometria cilíndrica é preferida para as condições de reparo em estruturas de parede grossa, e o perfil cônico, preferencial às estruturas de paredes mais finas; nas

estruturas com espessuras muito elevadas, ter-se-ia excessivo aumento do diâmetro do pino cônico. Isso resultaria na necessidade de se utilizar equipamentos mais robustos, tornando o processo inconveniente para aplicações práticas (NICHOLAS, 1995; PINHEIRO et al., 2001).

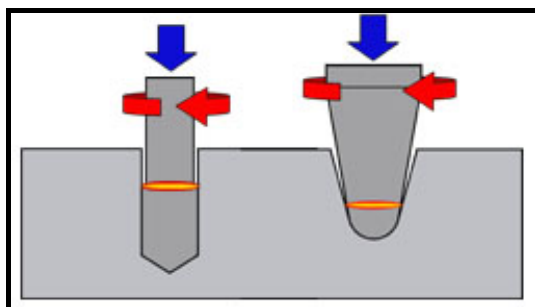


Figura 2.15: Croqui do processo FHPP, geometrias cilíndrica e cônica

(http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/friction_index.html).

Foi proposto por Thomas e Nicholas (1992 citado por MEYER, 2002), que, devido à intensa deformação plástica na região de processamento do pino, um material suficientemente viscoso se formaria, permitindo a distribuição das tensões no pino de forma hidrostática, ou seja, as pressões na ponta do consumível seriam iguais às aquelas verificadas nas paredes laterais. Dentro deste contexto, foi proposto que o perfil cônico favoreceria a decomposição da força axial em uma componente normal à interface pino/bloco, intensificando as condições de fluxo plástico e as uniões metalúrgicas (NICHOLAS, 1995). Contudo, Meyer (2002) argumentou que as condições do material viscoplástico não são suficientes para a existência de um comportamento hidrostático das forças, sendo verificado que as mesmas atuam diferentemente, tanto nas paredes laterais, quanto na ponta do pino.

Deste modo, Meyer (2002) sugere que as diferenças nas condições das uniões metalúrgicas, bem como das propriedades mecânicas e microestruturas obtidas para a geometria cônica, são mais coerentemente compreendidas mediante diferenças na duração do processo e no ciclo termomecânico. Foi admitido, que o perfil cônico permite a realização de uniões com cargas axiais mais elevadas, com o intuito de intensificar a qualidade da união, sem, contudo, ocasionar taxas de queima muito elevadas.

As características geométricas do pino e do orifício apresentam um fator de extrema importância na obtenção de completos preenchimentos, sem a presença de falhas na região do reparo. É de conhecimento, que a região de preenchimento, compreendida entre o fundo do furo e as paredes laterais inferiores, é considerada um ponto de concentração de defeitos, decorrentes da falta de união metalúrgica, e de estreitamento da ZTA (PAULY, 1999 citado por MEYER, 2002).

Em seu trabalho, Meyer (2002) investigou mais detalhadamente o efeito de modificações geométricas implementadas nas pontas dos pinos e no fundo dos orifícios, com o objetivo de eliminar tais defeitos. A avaliação foi procedida por meio da utilização, tanto de pinos cilíndricos, quanto cônicos, com pontas planas, chanfradas e arredondadas, sendo também, confeccionado, o fundo dos furos com características semelhantes, com fundo chanfrado ou arredondado.

Foi constatada a presença de defeitos principalmente nas condições em que eram utilizados blocos chanfrados, e pinos de ponta plana ou chanfrada. Quando da utilização de blocos com fundos arredondados, houve um grande incremento na qualidade da solda nas extremidades inferiores da região de preenchimento, independentemente do tipo de geometria do pino empregada. Tal fato sugeriu então, ser a geometria do bloco, de maior importância no incremento da qualidade do reparo, sendo a responsável pela eliminação da falta de união.

Em síntese, Meyer (2002) mostrou que o emprego de uma geometria que favoreça o melhor aporte térmico na superfície inferior, bem como condições menos restritivas ao fluxo plástico, são de fundamental importância na obtenção de uniões com qualidades superiores.

Estes estudos compreendem um primeiro passo na busca da melhor compreensão dos efeitos geométricos e uma base para as investigações futuras.

2.2.3 - Influência dos Parâmetros do Processo na Microestrutura e Propriedades Mecânicas

Ao longo de investigações da influência dos parâmetros força axial e velocidade de rotação, Meyer (2002) demonstrou que, a ZTA tende a ser maior com velocidades de rotação mais elevadas. Tal fato pode estar relacionado às maiores energias de soldagem aportadas, quando do uso de altas rotações.

A influência da velocidade sobre o tempo de processamento não ficou muito clara. O tempo de processamento variou de forma pouco representativa, e de modo não correlacionado com a velocidade. Um comportamento semelhante foi verificado para os valores de dureza e para as propriedades mecânicas, que não mostraram uma clara correlação com a velocidade de rotação. Apenas uma leve tendência a mais baixos valores de dureza foi notado, quando do emprego de rotações mais elevadas.

O parâmetro força axial atua de forma marcante nos tempos de processamento, com nítida redução destes tempos com o aumento da força. Em decorrência de tal comportamento e das mais elevadas taxas de queima, foi observado que a ZTA sofre um

estreitamento com aumento de força, visto que os menores tempos conduzem a uma menor propagação de calor.

Para aumentos da força axial, Meyer (2002) observou que existe uma leve tendência à obtenção de maiores valores de limite de resistência e de dureza, na região do reparo.

Como reportado por Ellis (1972), por ser o tempo de processamento uma indicação da qualidade final obtida no processo, a força axial assume neste sentido um papel de maior destaque frente à velocidade de rotação.

Como base nos resultados apresentados por Meyer (2002), verifica-se que, dentro da região de reparo, bem como na ZTA, as propriedades mecânicas, avaliadas em termos de dureza, limite de escoamento e limite de resistência são relativamente aumentadas, e uma queda na capacidade de alongamento é observado. Contudo, a avaliação do efeito dos parâmetros do processo sob tais propriedades não é algo que se mostrou bem definido, o que ficou mais nítido nos perfis de microdureza.

Em geral, a interface pino/bloco são de sutil identificação, e caracterizam-se pela formação de ferrita acicular e martensita, como resultado das mais altas taxas de resfriamento. A porção mais central da região de processamento é composta, mais pronunciadamente, por uma ferrita acicular, com as regiões de aquecimento mais elevadas sendo caracterizadas pela formação de uma ferrita de Widmanstätten mais grosseira, com maior disposição à forma de plaquetas.

Estas variações microestruturais, na região de reparo são os resultados do curto ciclo térmico do processo, representado por altas taxas de geração de calor, que se propaga axialmente ao pino, combinado com taxas de resfriamento distintas para cada região do reparo.

2.3 - O Reparo de Trincas por Atrito

2.3.1 - Reparo por Costura “Stitch Welding”

O processo conhecido como costura por atrito “*stitch welding*”, nada mais é do que a própria técnica potencializada para o reparo de trincas por atrito. Esta consiste na realização de sobreposições de uma sequência de processamentos de pinos por atrito, ao longo de uma dada distância, efetivando-se assim o completo preenchimento ou restauração da região de interesse. Uma ilustração do processo é apresentada na Figura 2.16.

Os estudos e as práticas experimentais realizadas com o processamento de pinos por atrito são, em suma, conduzidos de modo a compreender melhor a fenomenologia do processo, a fim de se poder estendê-la à prática do reparo por costura “*stitch welding*”.

Devido às características do processo, esta não só é de interesse para as aplicações “*in-situ*” de reparos em estruturas “*offshore*”, tais como oleodutos, gasodutos e estruturas de navios, como também possui extensão para potenciais aplicações em reparos de tanques em usinas nucleares, devido à alta qualidade do reparo executado (PINHEIRO, 2001).

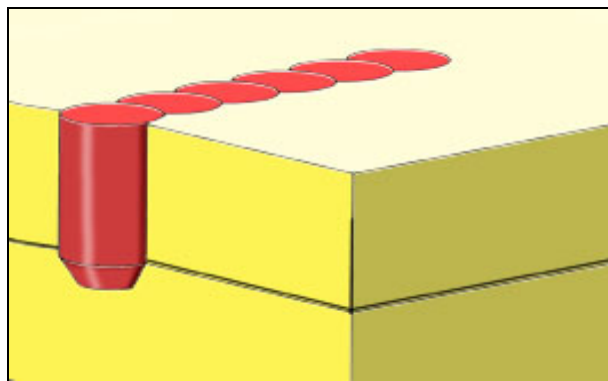


Figura 2.16: Croqui do processo de reparo por costura “*stitch welding*”, pinos sobrepostos ao longo de um caminho de interesse

(<http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/friction_index.html>).

2.3.2 - Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Reparo

Diferentemente de um único processamento, o reparo por atrito submete a região já processada a novos ciclos térmicos de aquecimento. Este procedimento assemelha-se a um procedimento de tratamento térmico, onde, tanto a região processada pelo pino, quanto a ZTA estarão passíveis de sofrerem modificações microestruturais termicamente induzidas.

Como observado por Meyer (2002), estes efeitos térmicos podem levar a modificações nas propriedades mecânicas do reparo. Em suma, estas modificações não mostraram ser fortemente pronunciadas, seja na microestrutura ou nas propriedades mecânicas, quando comparado com o processamento simples. Pode ser verificado por Meyer (2002), nos perfis de microdureza, que a presença de valores de pico em relação ao comportamento geral foi diminuído, mostrando-se uma maior homogeneidade dos valores obtidos.

As características apresentadas acima vêm corroborar o emprego da técnica, de modo a não desabonar suas potencialidades. Contudo, a mesma necessita ainda de maiores investigações, principalmente no que tange ao desenvolvimento de geometrias e parâmetros ótimos, buscando-se assim potencializar ao máximo o emprego da técnica de reparos por atrito.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Descrição do Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito

O equipamento destinado à realização dos ensaios de reparo, denominado de Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA), foi desenvolvido pelo laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia, em parceria com a Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS) (SOUZA, 2006). Para uma melhor compreensão deste aparato, o mesmo será resumidamente abordado em duas frentes: uma voltada para a descrição dos componentes mecânicos, e uma segunda caracterizando o sistema de controle, bem como a interface entre máquina e operador.

3.1.1 Componentes Mecânicos

A Unidade de Processamento por Atrito é constituída basicamente de três partes, a saber:

- ◆ Pórtico de sustentação;
- ◆ Cabeça de reparo;
- ◆ Unidade hidráulica de potência;

O pórtico de sustentação, mostrado na Figura 3.1, foi desenvolvido de modo a oferecer sustentabilidade à cabeça de reparo, bem como, aos esforços gerados quando do funcionamento da mesma. Esta estrutura permite também, o acoplamento de uma mesa de fixação e deslocamento uniaxial da amostra, a qual será detalhada mais adiante.

O pórtico foi projetado para suportar uma carga de até 70 kN. A montagem da cabeça de reparo à estrutura do pórtico é realizada por meio de pinos, como mostra a Figura 3.2, de modo a possibilitar a variação da distância entre a cabeça de reparo e a mesa de

fixação. Esta alternativa permite uma maior flexibilidade para supostas alturas de corpos de prova a serem processados, bem como para a inserção de novos dispositivos de controle da mesa e instalação de possíveis implementações futuras.



Figura 3.1: Conjunto mostrando pórtico de sustentação, cabeça de reparo e mesa uniaxial.



Figura 3.2: Montagem da cabeça de reparo no pórtico.

A plataforma de deslocamento uniaxial da amostra é um dispositivo solidário á base do pórtico, Figura 3.3. A ela foi acoplada uma morsa para fixação dos corpos de prova e um

conjunto redutor e servo motor. Esta plataforma, então, além de permitir uma rígida fixação das amostras a serem processadas, possibilita que as mesmas sejam rapidamente posicionadas em relação ao pino de preenchimento, sendo o deslocamento uniaxial controlado via interface computacional. Mas a sua primordial função é permitir a execução de ensaios de recobrimento por atrito, onde um pino confeccionado no material de interesse é rotacionado e impelido contra a superfície a ser revestida, a qual deve estar animada de movimento relativo em relação ao pino. Visando a execução de tal procedimento, a mesa de deslocamento foi especificada de forma a suportar um esforço normal máximo de 50 kN e tangencial de 10 kN, além de um curso de deslocamento de 300 mm e capacidade de torque do servo-motor de 2,6 N.m com rotação máxima de 6.000 rpm.

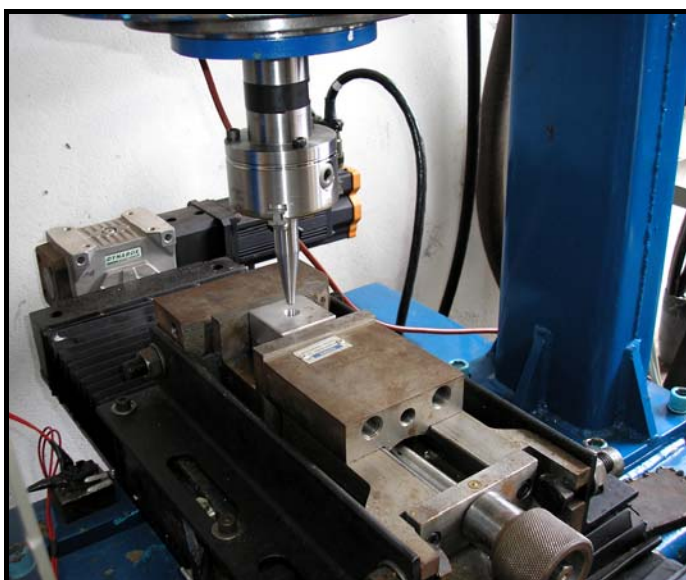


Figura 3.3: Conjunto mostrando a mesa de deslocamento uniaxial.

A próxima parte a ser descrita da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito é a cabeça de reparo. Este é o dispositivo mecânico mais complexo e de primordial importância no equipamento, e, certamente, é a que possui maior valor agregado.

A cabeça de reparo é constituída por um cilindro hidráulico, cuja haste interna é vazada e ao longo do seu comprimento interior, está acoplado por meio de mancais um eixo. Este eixo por sua vez, possui uma de suas extremidades montada a um motor hidráulico, fazendo-se uso de um acoplamento deslizante (SOUZA, 2006). Assim, o eixo é então provido tanto de um movimento de translação na vertical e de um movimento de rotação. Na outra ponta do eixo está conectado um dispositivo para fixação do pino de “queima”.