

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO
DE UM EQUIPAMENTO DE REPARO DE TRINCAS
POR ATRITO.**

ROBSON JOSÉ DE SOUZA

Uberlândia, 10 de Fevereiro de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO
DE UM EQUIPAMENTO DE REPARO DE TRINCAS
POR ATRITO.**

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de Uberlândia por:

ROBSON JOSÉ DE SOUZA

Como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre
em Engenharia Mecânica

Avaliada por:

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco - (UFU) - Orientador

Prof. Dr. Vera Lúcia D. S. Franco - (UFU) - Co-orientadora

Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho - (UFU)

Dr. Luiz Cláudio de Marco Meniconi - (Petrobras/CENPES)

Eng. Msc. Marcelo Torres Piza Paes

Uberlândia, 10 de Fevereiro de 2006

À meus pais,
Sidney de Souza e Maria Euripedes de Souza.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Sinésio Domingues Franco, pela orientação, dedicação e amizade.

À minha co-orientadora, Vera Lúcia Domingues Franco, pelo apoio e orientação durante todo o decorrer do trabalho.

Ao curso de Pós-graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho.

À PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS, pelo financiamento do projeto.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Às alunas de iniciação científica Maíra Prata Jardim e Camila Monteiro Formoso, pelo auxílio no desenvolvimento do sistema de controle do equipamento.

Aos ex-companheiros de trabalho, engenheiros Teófilo Ferreira Barbosa e Leonardo de Oliveira Cardoso, pelas suas valorosas ajudas no desenvolvimento mecânico do projeto.

Ao engenheiro Francisco Francelino Ramos Neto, por sua amizade e, especialmente, por sua participação de forma ativa em todas as etapas do trabalho.

Ao engenheiro Marcelo Torres Piza Paes, pela oportunidade dada e pelo suporte técnico oferecido.

Aos professores, funcionários e alunos do LABORATÓRIO DE TRIBOLOGIA E MATERIAIS da UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, pelo apoio, incentivo e oportunidade de discussões teóricas sobre os mais variados temas.

Finalmente, mas não por último, aos meus amigos e familiares pelo incentivo, apoio e, principalmente, por sua paciência comigo durante esse longo período.

Sumário

Resumo	I
Abstract	II
Simbologia	III
Abreviaturas	IV
Lista de Tabelas	V
Lista de figuras	VI
 CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	 01
1.1- PARCERIA ENTRE A INDÚSTRIA E A UNIVERSIDADE	01
1.2- REPARO POR ATRITO – DESAFIOS	02
 CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 07
2.1- SOLDAGEM POR ATRITO	07
2.1.1- Energia de Soldagem	08
2.1.2- Ciclos de Soldagem	10
2.1.3- Fases do Processo	11
2.1.4- Influência dos Parâmetros de Soldagem na Qualidade da Junta	14
2.1.5- Soldagem de Diferentes Tipos de Materiais	15
2.1.6- Variantes do Processo de Soldagem por Atrito	17
2.2- REPARO DE TRINCAS POR ATRITO	21
2.2.1- Aspectos Fenomenológicos	21
2.2.2- Influência das Geometrias do Pino de Queima e do Furo na Qualidade da Região de Reparo	22
2.2.3- Influência das Variáveis do Processo nas Propriedades Mecânicas e Microestrutura da Região de Reparo	24
2.2.4- Reparos por Costura	25

CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO DE REPARO DE TRINCAS POR ATRITO	27
3.1- DESENVOLVIMENTO DOS COMPONENTES MECÂNICOS	27
3.1.1- Conjunto Mesa de Sustentação – Pórtico	27
3.1.2- Projeto da Cabeça de Reparo	29
3.1.3- Unidade Hidráulica	32
3.2- SISTEMA ELÉTRICO	35
3.3- SISTEMA DE CONTROLE	36
3.3.1- Componentes do Sistema de Controle	36
3.3.2- Programa de Controle do Processo de Reparo de Trincas	41
 CAPÍTULO 4: CALIBRAÇÕES	 47
4.1- DESLOCAMENTO AXIAL	47
4.2- CALIBRAÇÃO DA FORÇA AXIAL	48
4.3- CALIBRAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO	51
4.4- ESTIMATIVA DO TORQUE	53
 CAPÍTULO 5: PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO	 55
5.1- MATERIAIS UTILIZADOS	55
5.2- GEOMETRIAS DE FUROS E PINOS EMPREGADAS	56
5.3- PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS	57
5.4- ANÁLISE DA QUALIDADE DA REGIÃO DE REPARO	58
 CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÕES	 61
6.1- AQUISIÇÃO DE DADOS	61
6.2- MACROGRAFIAS E INSPEÇÃO VISUAL	71
6.3- MICROGRAFIAS	74
6.4- ENSAIOS DE MICRODUREZA	75
 CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES	 79

CAPÍTULO 8: TRABALHOS FUTUROS	83
CAPÍTULO 9: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

Souza, R. J., 2006, Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

Resumo

Na indústria de produção de petróleo, a utilização dos processos convencionais de reparo de trincas, como o processo de soldagem a arco elétrico, são realizadas excepcionalmente em ambiente submerso e normalmente em áreas classificadas. Como consequência disso, vários defeitos podem surgir na região de reparo tais como porosidades e fragilização pelo hidrogênio. Desta forma, o desenvolvimento de uma técnica de reparo de trincas, como a de reparo de trincas por atrito, torna-se um grande atrativo para a indústria do petróleo. O processo de reparo de trincas por atrito consiste em fazer, na região da trinca, um furo cilíndrico ou cônico o qual é posteriormente preenchido por um pino também cilíndrico ou cônico. Apesar da grande potencialidade da técnica de reparo de trincas por atrito, poucos estudos foram realizados a respeito do processo. Desta forma, o presente trabalho teve por objetivo, desenvolver, projetar, construir e validar um equipamento de reparo de trincas por atrito. O equipamento projetado possui capacidade de carga axial de 50 kN, capacidade de carga tangencial de 10 kN e pode atingir velocidade de rotação de até 8000 rpm. O controle do equipamento é realizado de forma automatizada, cabendo ao usuário entrar, no programa de controle, com os parâmetros de teste a serem utilizados. Para validação e levantamento dos limites operacionais do equipamento, foram realizados ensaios com amostras de aço carbono, cujos resultados mostraram, em alguns casos, a formação da ligação metálica entre o material do pino e o furo. Ao final do trabalho, obteve-se uma infra-estrutura que permitirá um maior estudo do processo, além de permitir a otimização dos parâmetros de testes para os mais diversos materiais.

Palavras chaves: reparo de trincas por atrito; FPSO; controle, desenvolvimento de equipamento

Souza, R. J., 2006, Development, Design and Construction of a Friction Hydro Pillar Processing Equipment, Master Dissertation in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia – Brazil.

Abstract

In the offshore industry, the utilization of conventional process of arc welding processes are frequently used to repair structure defects, such as cracks. These repairs are carried out under water to reduce risks of explosion. Under water welds are subjected to hydrogen embrittlement and severe porosity. An alternative is offered by the friction hydro pillar processing (FHPP), which may be regarded as a process in which a hole is drilled and filled with a consumable rod of the same material. Despite its wide applicability, this technique has not been widely investigated. Motivated by the potentialities of this method, an infrastructure for repairing engineering structures by drilling and filling holes was designed and constructed. The equipment was designed with an axial force capacity of 50 kN, and a tangential force limited to 10 kN. The rotational speed was limited to 8000 rpm. The FHPP parameters were completely automated, where by the user has only to give them. To validate the infrastructure repair tests were carried out in plain carbon steel plats. The obtained results showed that a metallic bond between the substrate and the rod was achieved. The system enables to perform experimental tests in order to optimize the friction hydro pillar process parameters.

Simbologia

F: Força axial [KN];
f: Frequência;
 $HV_{(0,05)}$: Microdureza Vickers, carga de 50 g, [Kgf/cm²];
L: Deslocamento [mm];
M: Torque [Nm];
N: Velocidade de Rotação [rpm];
P: Pressão [MPa];
Ps: Pressão de saída do fluido hidráulico;
T: Torque resistivo [Nm];
V: Diferença de Potencial elétrico [Volts];
 V_g : Cilindrada do motor hidráulico [cm³];
 Δl : Comprimento de queima [mm];
 Δp : Diferença de pressão [MPa];
 ϕ : Diâmetro [mm];
 η_{mh} : Rendimento mecânico hidráulico;
 σ_y : Tensão de escoamento [MPa];

Abreviaturas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
API: American Petroleum Institute;
ASM: American Society of Metals;
AWS: American Welding Society;
CCP: Cartão de controle da pressão;
CCV: Cartão de controle de vazão;
CENPES: Centro de Pesquisa da Petrobras;
CLP: Controlador lógico programável;
CPF: Cartão lógico de processamento da força axial;
CPR: Cartão lógico de processamento da velocidade de rotação;
CPU: Unidade de processamento;
DIN: Deutsches Institut für Normung;
FHPP: Friction Hydro Pillar Processing;
FPSO: Floating, production, storage and offloading;
PID: Proporcional, integral e diferencial;
SP: Sensor de posição;
SR: Sensor de rotação;
FTPW: Friction Taper plug welding;
TP: Transdutor de pressão;
UPPA: Unidade de processamento de pinos por atrito;
VRP: Válvula reguladora de pressão;
VRV: Válvula reguladora de vazão;
ZAC: Zona afetada pelo calor.

Lista de Tabelas

Tabela 5.1- Composição química dos materiais utilizados na confecção das amostras	55
Tabela 5.2- Parâmetros utilizados na realização dos ensaios de validação	58
Tabela 6.1- Parâmetros de processo utilizados nos ensaios de 2 a 8	63
Tabela 6.2- Dados de entrada dos ensaios de número 10 a 20, características Geométrica das amostras	66

Lista de Figuras

Figura 1.1- Trincas em tanques de armazenamento de um FPSO da PETROBRAS	3
Figura 1.2- Geometria característica do processo “friction taper plug welding”	4
Figura 1.3- Geometria característica do processo de reparo de trincas por atrito	4
Figura 2.1- Etapas do processo de soldagem por atrito a) etapa de aceleração radial e avanço, b) etapa de aplicação da força de soldagem e c) etapa de forjamento	8
Figura 2.2- Ciclo típico do processo de soldagem convencional	9
Figura 2.3- Ciclo típico do processo de soldagem inercial – utilização de volante de inércia	9
Figura 2.4- Ciclos de soldagem propostos por Lebedev e Chernenko	10
Figura 2.5- Ciclos do processo com mais de um estágio. a) Força e rotação variam ao longo do tempo; b) Apenas a rotação varia ao longo do tempo	11
Figura 2.6- Variação das variáveis: Força (F), Rotação (n), Torque (M), Potência consumida (N), Temperatura (T) e Comprimento de queima (Δl). Ao longo das fases do processo de soldagem por atrito	13
Figura 2.7- Foto de diferentes componentes mecânicos, fabricados pelo processo de soldagem por atrito, especial atenção para as válvulas fabricadas de diferentes tipos de materiais	15
Figura 2.8- Tabela de soldabilidade de diferentes tipos de metais apresentada pela AWS e DIN	17
Figura 2.9- Figura esquemática do processo “Center Drive”	19
Figura 2.10- Figura esquemática do processo de soldagem em orbital	19
Figura 2.11- Figura esquemática do processo de soldagem por vibração	19
Figura 2.12- Figura esquemática do processo de soldagem por atrito radial	19
Figura 2.13- Representação esquemática do processo “Friction Stir Welding”	20
Figura 2.14- Geometria convencional utilizada no processo de reparo de trincas por atrito, a qual promove vazios na região entre o fundo do furo e a parede lateral	23
Figura 2.15- Geometria de furo com fundo arredondado, que após os testes não apresentou vazios na região de transição entre o fundo do furo e a parede lateral	23
Figura 2.16- Processo de reparo por costura, pinos sobrepostos ao longo de uma linha	25

Figura 3.1- Conjunto mesa de sustentação – pórtico e cabeça de reparo	28
Figura 3.2- a) Detalhe do sistema de ajuste de altura do pórtico, b) Mesa de sustentação – detalhe do local onde será fixa a amostra, ou inserida a mesa de deslocamento mono-axial.	28
Figura 3.3- Desenho esquemático da cabeça de reparo	29
Figura 3.4- Análise por elementos finitos das tensões equivalentes de von Misses [MPa] no cilindro externo, quando submetido a uma pressão interna de 12 MPa	31
Figura 3.5- Análise das tensões equivalentes de von Misses [MPa] na haste hidráulica quando submetida a uma pressão externa de 12 MPa.	31
Figura 3.6- Foto da unidade hidráulica – Reservatório de óleo e moto-bombas	32
Figura 3.7- Diagrama esquemático da unidade hidráulica	34
Figura 3.8- Desenho esquemático da alimentação elétrica dos motores	35
Figura 3.9- Fluxo de informação dos sinais analógicos de controle e monitoração das variáveis do processo de reparo de trincas	38
Figura 3.10- Representação esquemática dos cartões lógicos de condicionamento de sinal	39
Figura 3.11- Representação esquemática do circuito conversor de 24 Volts p/ 5 Volts	40
Figura 3.12- Representação esquemática do circuito conversor de 5 Volts p/ 24 Volts	40
Figura 3.13- Laço principal do programa de controle do processo de reparo de trincas e Recobrimento	42
Figura 3.14- Subrotina de retorno da haste	43
Figura 3.15- Subrotina – fase de recobrimento	44
Figura 3.16- Subrotina da fase de “queima do pino”	45
Figura 3.17- Subrotina da fase de forjamento do pino de queima	46
Figura 4.1- Curva de calibração do sensor de posição	48
Figura 4.2- Curva de calibração do sinal de saída da força axial, enviado para o cartão de controle PID da força axial	50
Figura 4.3- Curva de calibração da aquisição da força axial, advindo do cartão condicionador de sinal da força (circuito subtrator)	50
Figura 4.4- Curva de calibração do sinal de saída da velocidade de rotação, enviado para o cartão de controle PID	50
Figura 4.5- Curva de calibração da aquisição da velocidade de rotação, advindo do cartão condicionador de sinal da velocidade de rotação (conversor de frequência em tensão)	52
Figura 5.1- Microestrutura do material utilizado para a convecção de: a) chapa de reparo, b) pino de queima	56
Figura 5.2- Geometria dos pinos utilizados durante os ensaios de validação do equipamento	56

Figura 5.3- Diferentes geometrias das chapas de reparo usadas nos ensaios de validação	57
Figura 5.4- Posicionamento das linhas de perfil de microdureza	59
Figura 6.1- Dados adquiridos durante a execução do ensaio Nº 1	62
Figura 6.2- Dados adquiridos durante o ensaio 2	63
Figura 6.3- Dados adquiridos durante o ensaio 4	64
Figura 6.4- Dados adquiridos durante o ensaio 6	64
Figura 6.5- Dados adquiridos durante o ensaio 16	67
Figura 6.6- Dados adquiridos durante o ensaio 18	69
Figura 6.7- Dados adquiridos durante o ensaio 19	69
Figura 6.8- Dados adquiridos durante o ensaio 20	70
Figura 6.9- Macrografia do ensaio 2, indicando não haver total preenchimento do furo por parte do pino, além de não existir nenhum ponto com ligação metálica	71
Figura 6.10- Macrografia do ensaio 4. Presença de vazios indicados por manchas escuras e ausência de formação de ligação metálica	72
Figura 6.11- Macrografia do ensaio 6. a) com manchas escuras indicando a presença de vazios; e b) Ampliação mostrando vazios na interface entre a chapa de reparo e o pino de queima, indicando ausência de ligação metálica	72
Figura 6.12- Foto da seção transversal do ensaio 15. Presença de vazios nas laterais e na região de transição fundo/parede lateral, e possível presença de regiões com ligação metálica	73
Figura 6.13- Foto da seção transversal do ensaio 20. Presença de vazios nas laterais e na região de transição fundo/parede lateral, e possível presença de regiões com ligação metálica	74
Figura 6.14- Figuras da análise microestrutural da amostra 15: a) Região de interface inferior entre o pino e o furo e b) microestrutura do pino de queima	75
Figura 6.15- Figuras da análise microestrutural da amostra 20: a) Região de interface inferior entre o pino e o furo e b) microestrutura do pino de queima	75
Figura 6.16- Perfil de microdureza horizontal da amostra referente ao ensaio 20	76
Figura 6.17- Perfil de microdureza vertical da amostra referente ao ensaio 15	77
Figura 6.18- Perfil de microdureza vertical da amostra referente ao ensaio 20	77

Capítulo I

INTRODUÇÃO

1.1 Parceria entre a indústria e a universidade

Com a criação das várias estatais no Brasil ao longo das décadas de 50 e 60, um novo horizonte para o desenvolvimento tecnológico e científico brasileiro foi aberto. Pois, a partir de então, fez-se necessário o surgimento de tecnologia nacional capaz de competir com as empresas estrangeiras já a muito engajadas nos mais diversos setores da indústria. Dentre as estatais então criadas, pode-se destacar dentre outras a Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS).

Desde a sua criação, a PETROBRAS teve por objetivo não só o aumento da sua produção de petróleo, como também a ampliação de suas reservas. Para alcançar tais objetivos a mesma implementou diversos programas para desenvolvimento de tecnologia de extração de petróleo em águas profundas e ultra-profundas. Como fruto desse investimento, hoje a PETROBRAS é líder mundial no que tange a exploração de petróleo em águas profundas e ultra-profundas (www.petrobras.com.br).

Além do caráter estratégico e financeiro desses programas, deve-se também enfatizar o fato de que, os mesmos, em grande parte, foram executados em parceria com universidades brasileiras, levando à geração de novos conhecimentos científicos, e um amplo desenvolvimento tecnológico.

Desta forma, fica evidente que a parceria entre a universidade e a indústria brasileira, foi e ainda é o caminho não só para o aumento da competitividade da indústria brasileira no mercado nacional e internacional, mas também um veículo importante na geração de conhecimento técnico-científico, além de ser de suma importância na formação de uma mão de obra altamente qualificada, visto que tais parcerias promovem a formação de mestres e doutores nas mais diversas áreas.

1.2 Reparo por atrito – desafios

Atualmente, uma das grandes preocupações das empresas é diminuir o número de paradas de um equipamento para manutenção, bem como o tempo de duração da mesma, pois a cada intervenção registram-se perdas não só pelo custo da manutenção, mas também pelo custo da parada, total ou parcial, da produção. Esses custos são consideravelmente elevados quando se trata da indústria de produção de petróleo, principalmente quando a intervenção é realizada em águas profundas, ultra-profundas ou em áreas classificadas.

Nessas situações, a utilização dos tradicionais processos de reparo de trincas, tais como soldagem por arco elétrico, tornam-se essencialmente críticos. Da mesma forma, técnicas que dependem da utilização de mergulhadores, como a utilização de grampos mecânicos, passam a ser limitadas à profundidades de apenas 300 m, sendo, portanto, inviáveis na extração de petróleo em águas profundas e ultra-profundas. Além das dificuldades técnicas apresentadas agrega-se também a esses processos de manutenção o alto custo dos mesmos, seja pela necessidade da alta qualificação da mão de obra, ou ainda, pelo tipo de equipamento a ser empregado.

Desta forma, o desenvolvimento de uma técnica de reparo, tal como a de reparo de trincas por atrito, torna-se não só atrativa, mas também uma necessidade para a indústria de extração de petróleo. Como vantagens dessa técnica, citam-se: a) pouco influenciada pelo ambiente marinho, b) pode ser parcialmente ou totalmente automatizada, eliminando-se assim a necessidade de utilização de mergulhadores, e c) baixos riscos quando da sua utilização em áreas classificadas ou em ambientes explosivos. As Figuras 1.1 a) e b) ilustram duas trincas presentes em tanques de armazenamento em plataformas semi-submersíveis (FPSO – *Floating, production, storage and offloading*), onde o emprego da técnica de reparo de trincas por atrito pode vir a oferecer baixos riscos quando comparado aos demais processos de reparo de trincas utilizados atualmente.

O processo de reparo de trincas por atrito ou FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*) foi desenvolvido em 1990 por Andrews e Mitchel (1990), sendo originado do processo *Friction Taper Plug Welding* - FTPW. O processo FTPW consiste em fazer um furo passante cônico na peça e preenchê-lo através da deformação plástica de um pino também cônico (Figura 1.2). O processo FTPW já vem sendo utilizado na indústria petrolífera há mais de 25 anos na fixação de pinos em equipamentos e estruturas de extração de petróleo (plataformas, FPSO's e dutos submarinos, com o objetivo de fixar ânodos de sacrifício dentro d'água), sendo utilizado em plataformas do mar do norte deste 1974. A utilização e aplicação desse processo foram bem descritas por Blackmore (BLACKMORE, 2000) e Grey (GREY, 1995).

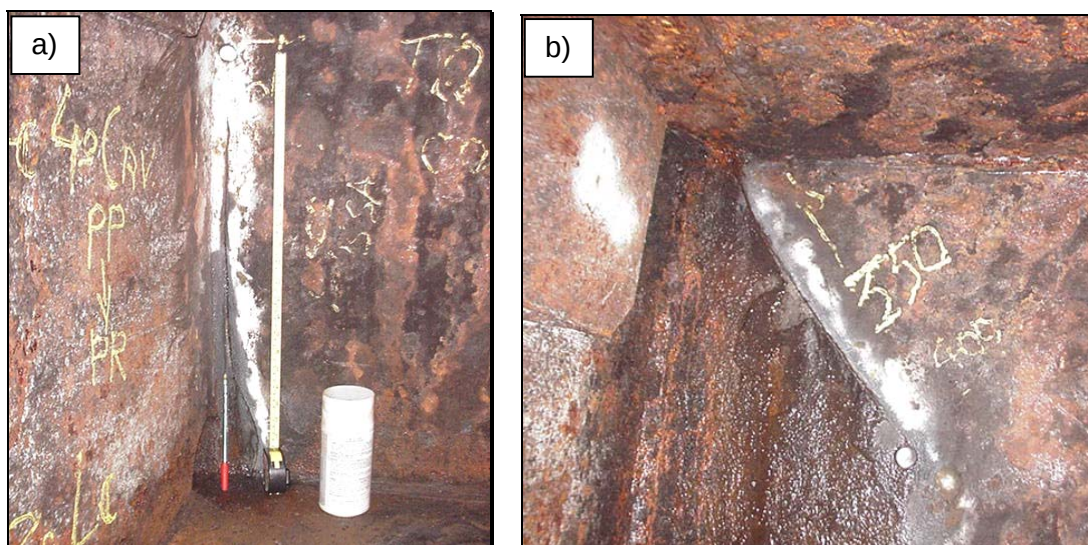


Figura 1.1: a) e b) Trincas em tanques de armazenamento de um FPSO da PETROBRAS

O processo de reparo de trincas por atrito consiste em fazer, na região da trinca, um furo cônico ou cilíndrico, sendo que, ao contrário do FTPW, tem-se necessariamente um furo não passante. Após a realização do furo, ele é preenchido por um pino também cônico ou cilíndrico (Figura 1.3). Nesse processo, o pino é submetido a elevadas cargas axiais e elevada rotação, o que provoca, devido ao calor gerado pelo atrito, um aumento da temperatura do pino, e da superfície do furo. Com o aumento de temperatura há uma diminuição no valor do limite de escoamento do pino, facilitando-se, assim, o fluxo plástico do mesmo e seu forjamento dentro do furo. Garante-se, dessa forma, que haja um íntimo contato entre as superfícies do furo e do pino, fazendo com que ocorra não só o preenchimento do furo pelo material do pino, mas também a formação de uma ligação metálica entre as superfícies do furo e do pino após o término do movimento relativo. Devido ao atrito e às deformações a que o material é submetido, a união acontece entre as paredes da cavidade e o consumível (pino de queima), em um intervalo de tempo que pode variar substancialmente, sendo esse valor função do material, da velocidade relativa, da pressão axial, da profundidade da cavidade e temperatura de preaquecimento.

Apesar da grande potencialidade da técnica de reparo de trincas por atrito, poucos estudos foram realizados a respeito do processo, sendo que até o ano de 2002, o número de publicações a respeito desse assunto limitava-se a menos de uma dezena (MEYER, 2002).

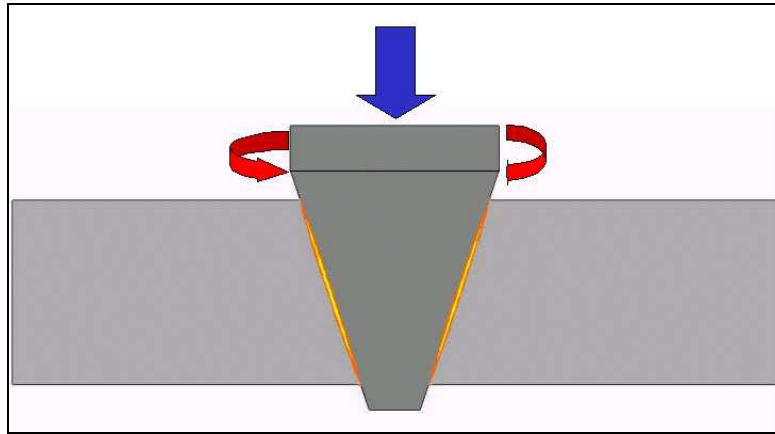


Figura 1.2: Geometria característica do Processo “Friction Taper Plug Welding”

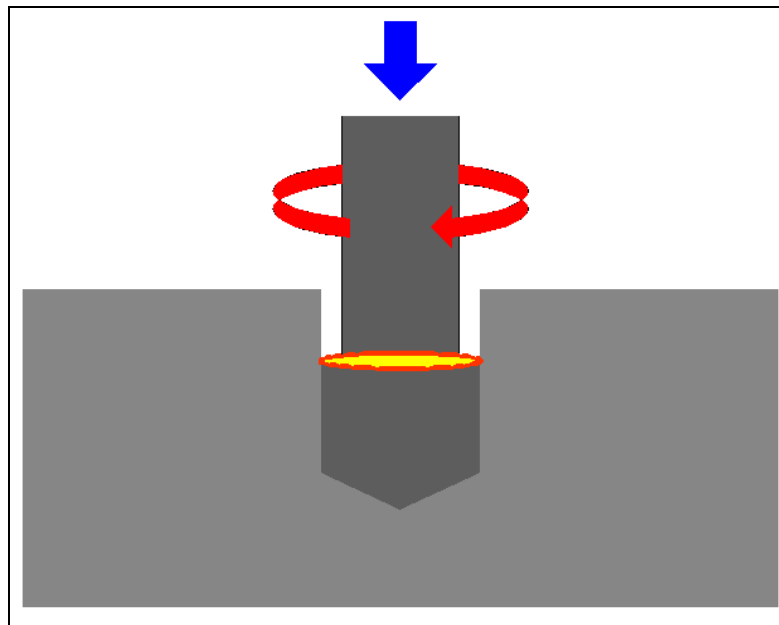


Figura 1.3: Geometria característica do processo de reparo de trincas por atrito.

Desta forma, o presente trabalho teve por objetivo, desenvolver, projetar, construir e validar um equipamento de reparo de trincas por atrito. O equipamento é capaz de trabalhar com diferentes valores de rotações e forças axiais. Os valores de força axial e velocidade de rotação são passíveis de alteração durante o ciclo do processo, sendo, portanto, possível de se realizar o processo em mais de um estágio. Com isso, pode-se avaliar o efeito da velocidade de rotação e da força axial nas propriedades mecânicas e qualidade da região de reparo, bem como avaliar a influência da utilização de mais de um estágio na região de reparo, ou ainda, verificar as implicações advindas quando da utilização de diferentes geometrias de pinos ou furos.

Outro aspecto importante a ser mencionado, é a possibilidade de utilização do equipamento, mediante algumas adaptações, para o estudo de outros processos, tais como: soldagem por atrito convencional (*Friction Welding*), soldagem por atrito por mistura (*Friction Stir Welding*), costura por atrito (*Friction Stitch Welding*), etc.

Os assuntos abordados neste trabalho foram organizados com a seguinte estrutura: O Capítulo I apresenta as motivações para o desenvolvimento do projeto; O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos processos de soldagem por atrito e de reparo de trincas por atrito; O Capítulo III mostra o desenvolvimento dos diversos componentes mecânicos e eletrônicos do equipamento; O Capítulo IV relata os procedimentos utilizados para a calibração do equipamento e conseqüente determinação das funções de transferência; No Capítulo V é apresentada a metodologia para a realização dos ensaios de validação do equipamento; No Capítulo VI é feita uma discussão a respeito dos resultados obtidos; No Capítulo VII são apresentadas as principais conclusões; No Capítulo VIII estão presentes algumas das várias sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, no Capítulo IX são citadas as referências bibliográficas utilizadas na confecção dessa dissertação.

Capítulo II

Revisão Bibliográfica

O processo de reparo de trincas por atrito foi desenvolvido em 1990 ([Andrews and Mitchel, 1990](#)) e patentado em 1993 ([Thomas et al., 1992](#)). Devido ao seu caráter recente e ainda o limitante de seu estudo por outros institutos devido à sua patente, existe, atualmente, um número bastante restrito de publicações abordando as características do mesmo. Entretanto, o processo de reparo de trincas por atrito é originado do processo de soldagem por atrito, possuindo ambos os processos o mesmo princípio físico. As diferenças fundamentais entre os dois processos são: A presença de um consumível (pino) no processo de reparo de trinca por atrito e os diferentes valores de pressão axial e velocidade de rotação.

Devido a tais características, preferiu-se dividir esta revisão bibliográfica em dois sub-ítem. O primeiro refere-se ao processo de soldagem por atrito e suas variantes, e o segundo ao processo de reparo de trincas por atrito.

2.1 Soldagem por atrito

O processo de soldagem por atrito é um processo de união de peças no estado sólido, no qual duas peças são colocadas em contato com movimento relativo, sendo simultaneamente aplicada uma força axial entre os componentes. Com a geração de calor devido ao atrito das peças e o íntimo contato entre as partes decorrente da força aplicada, há a formação da ligação entre as peças ([AWS, 1991](#)).

Apesar de ser considerado um processo de soldagem em estado sólido, alguns autores consideram que, em determinadas circunstâncias, um filme de fluido metálico fundido pode ser formado na interface entre as peças. Contudo, nenhuma evidência da fusão do material pode ser obtida de forma macroscópica devido à intensa deformação à quente. Dessa forma, a grande maioria dos autores considera que durante todo o processo de soldagem por atrito não há fusão do metal de base ([Lebedev and Chernenko, 1992](#)), ([Nicholas, 1995](#)), ([Thomas and Nicholas, 1997](#)), ([Lin et al., 1999](#)).

O processo de soldagem por atrito pode ser dividido em três etapas ilustradas na figura 2.1. Primeiramente tem-se a fase de aceleração de uma das peças e a aproximação entre elas (figura 2.1a). No momento do contato entre as duas superfícies inicia-se uma segunda etapa do processo (figura 2.1b), que é a etapa de aplicação de força axial com simultâneo movimento

relativo entre as peças. Nesta etapa há a geração de calor e conseqüente aumento de temperatura nas superfícies, favorecendo, portanto, a deformação plástica do material naquela região. Finalmente tem-se a etapa de forjamento (figura 2.1c). Nessa etapa é cessado o movimento relativo entre as peças e é aplicada uma força igual ou superior à força da etapa anterior, tendo-se ao final de todo o processo a união entre as duas partes.

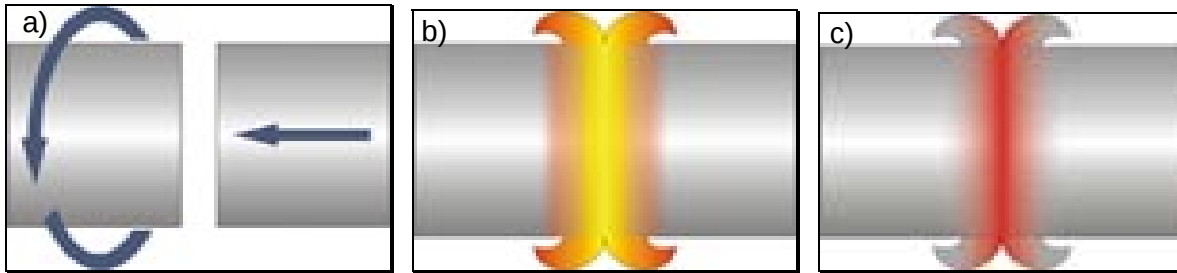


Figura 2.1: Etapas do processo de soldagem por atrito (a) Etapa de aceleração radial e avanço; b) Etapa de aplicação da força de soldagem; c) Etapa de forjamento.

2.1.1 Energia de soldagem

No processo de soldagem por atrito, a energia de soldagem pode ser obtida de duas formas distintas, a convencional e a inercial. Na forma convencional, a parte girante é acoplada a um motor, sendo, a sua rotação, mantida constante ao longo do processo (figura 2.2). Neste caso, a velocidade de rotação, força axial e tempo determinam o total de energia fornecida ao processo.

No processo inercial, a parte girante é acoplada a um volante de inércia, que é previamente acelerado até uma determinada rotação. Após atingida a rotação o volante é desacoplado do motor e as peças colocadas em contato. Nota-se, que neste caso, a velocidade de rotação da peça, ao longo do processo, varia do valor pré-determinado até zero (figura 2.3). Para a determinação da energia total fornecida ao sistema, faz-se também necessário, nesse processo, conhecer o momento de inércia do volante. O equacionamento para obtenção da energia de soldagem, em ambos os casos é descrito por Lebedev e Chernenko (1992).

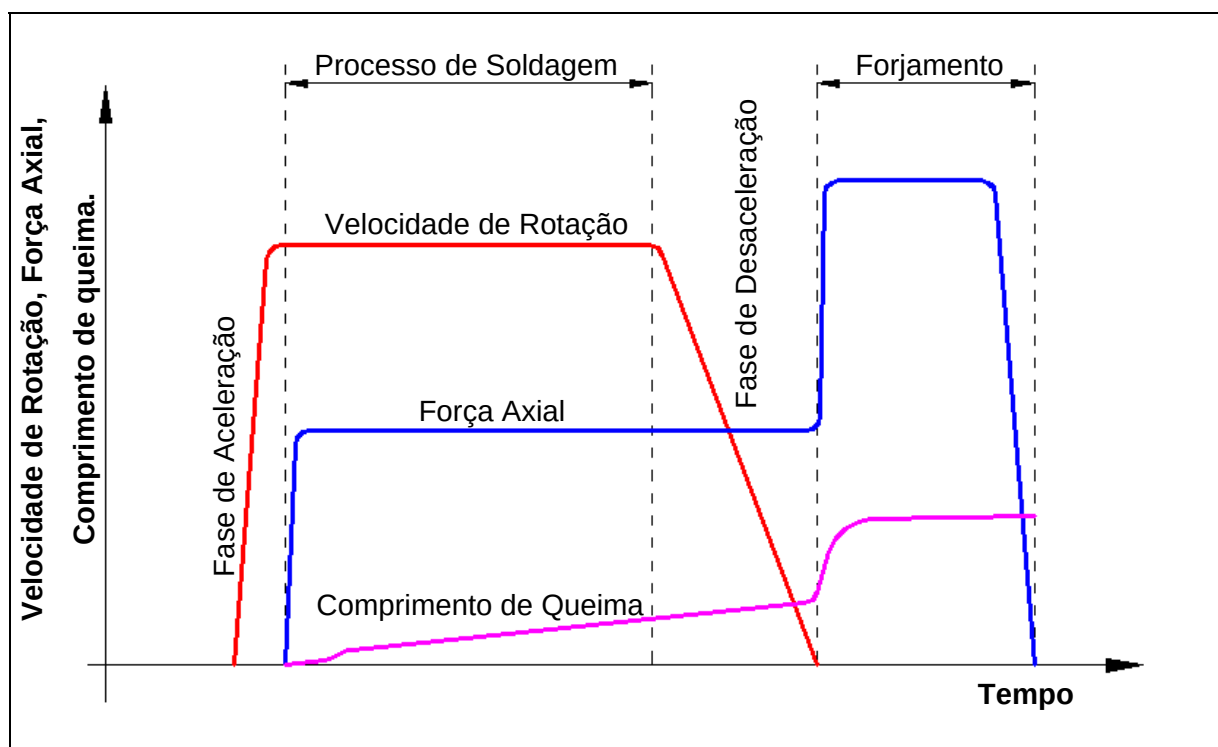


Figura 2.2: Ciclo típico do processo de soldagem por atrito convencional.

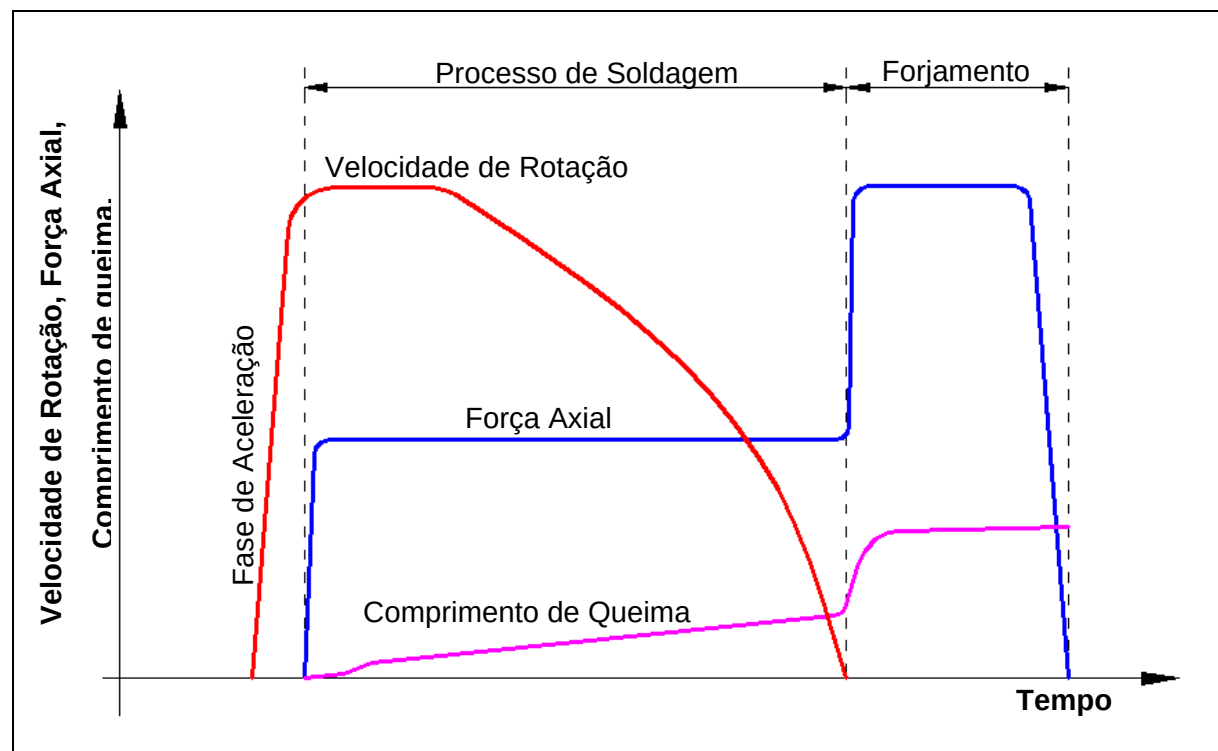


Figura 2.3: Ciclo típico do processo de soldagem inercial – utilização de volante de inércia

2.1.2 Ciclos de soldagem

Dependendo do equipamento, das propriedades mecânicas requeridas na região de soldagem e do material a ser unido, o ciclo de soldagem do processo convencional (figura 2.2) pode sofrer algumas alterações. Em equipamentos de baixa potência, por exemplo, pode-se dividir o ciclo em dois estágios. No primeiro, aplicam-se baixos valores de força axial e no segundo, após o aquecimento inicial, eleva-se o valor da mesma (figura 2.4 b). A figura 2.4 ilustra os diferentes tipos de ciclos propostos por Lebedev e Chernenko (1992).

Percebe-se, que nos ciclos propostos, apenas a força axial varia. No entanto, dependendo do processo e da necessidade, pode-se utilizar ciclos com mais de um estágio, cuja força axial e velocidade de rotação sofram alterações. Ou ainda, ciclos em que apenas a velocidade de rotação seja alterada ao longo do processo (figura 2.5).

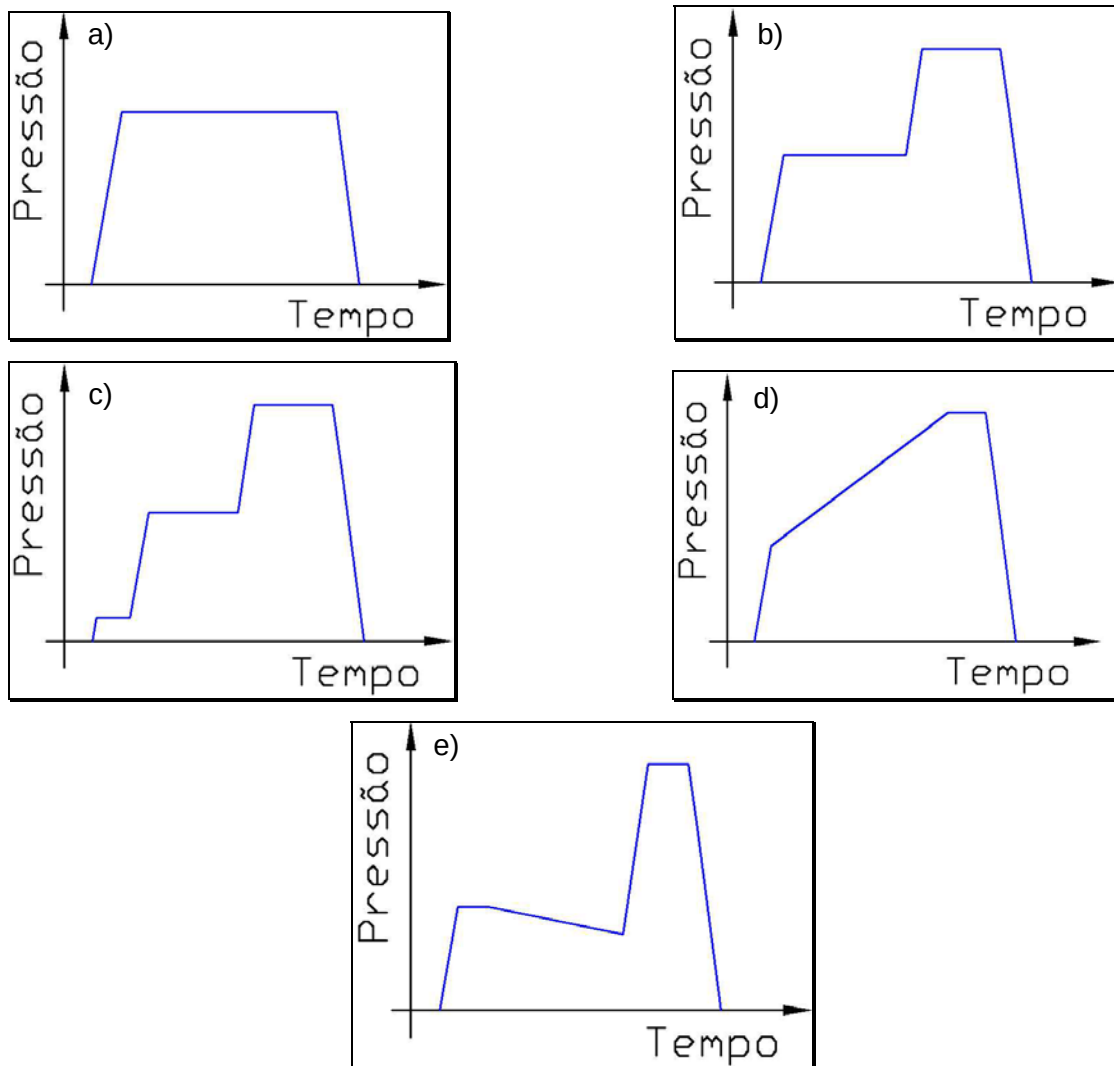


Figura 2.4: Ciclos de soldagem propostos por Lebedev e Chernenko (1992).

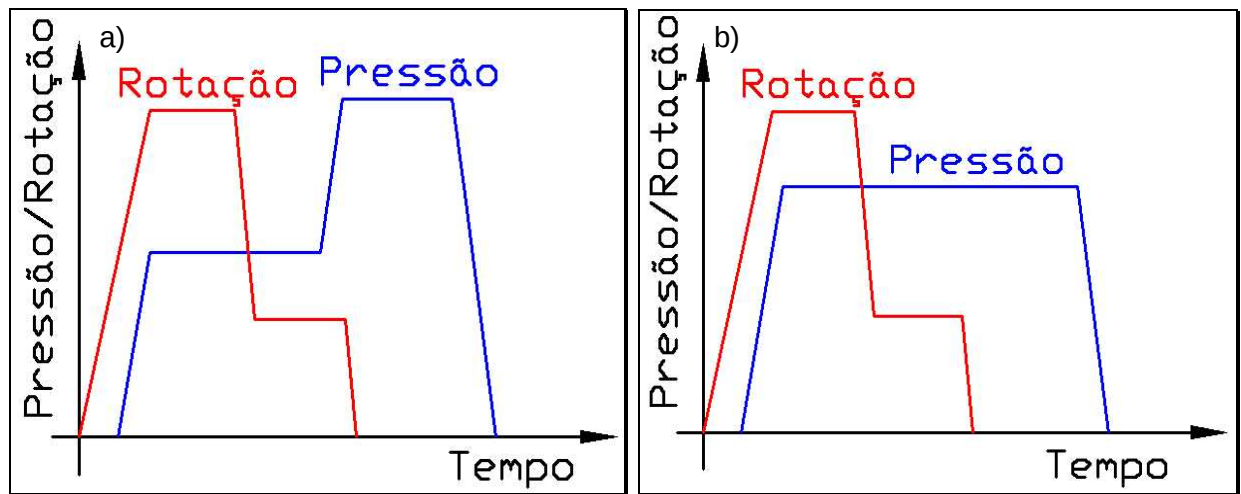


Figura 2.5: Ciclos do processo com mais de um estágio. a) Força e rotação variam ao longo do processo; b) apenas a rotação varia ao longo do processo.

2.1.3 Fases do processo

Para a melhor compreensão dos fenômenos ocorrentes durante o processo de soldagem por atrito, vários autores dividiram o ciclo básico do processo convencional em diferentes números de fase. A “American Welding Society – AWS” (AWS, 1991) e a “American Society of Metals – ASM” (ASM, 1993) dividem o ciclo em duas fases. Meyer (2002) cita autores que dividiram o ciclo de soldagem por atrito em 3, 4 e 5 fases. Uma última divisão em 6 fases é proposta por Lebedev e Chernenko (1992) que, por ser a mais detalhada, optou-se, em utilizar esta divisão para a descrição dos fenômenos ocorrentes no processo.

A divisão proposta por Lebedev e Chernenko (1992) é representada na figura 2.6. Os valores das variáveis de entrada, força e rotação, são representados no primeiro gráfico da figura. O segundo gráfico indica a variação do torque e da potência ao longo do ciclo, ao passo que o último gráfico mostra o comportamento da temperatura da interface e do encurtamento axial ao longo do processo.

Na fase τ_1 ocorre o contato inicial entre as superfícies. Há nesta fase o “amaciamento” das protuberâncias das superfícies, acompanhada de uma pequena queda no torque inicial. Com o “amaciamento” das superfícies há um aumento das regiões de contato e, conseqüentemente, quebra dos filmes de graxa ou óleo presentes nas superfícies. Ocorre também nesta fase a quebra e a expulsão de parte dos filmes de óxido presentes na interface.

Na fase τ_2 há uma grande elevação do torque, o que pode ser explicado pela ação conjunta de dois fenômenos distintos. O primeiro fenômeno diz respeito à quebra e remoção de parte dos filmes de óxido iniciada na fase τ_1 . O segundo fenômeno refere-se ao aumento da área real de contato. Óxidos, por serem inertes quimicamente, possuem um baixo valor na

componente adesiva do coeficiente de atrito. E ainda, devido a sua elevada dureza, os mesmos apresentam baixa taxa de deformação plástica, fazendo com que a componente do coeficiente de atrito referente à deformação também apresente valores reduzidos quando comparados com metais (ASM international, 1992). Desta forma, a quebra e remoção dos filmes de óxidos levam à ocorrência do contato metal-metal. Que, apresentando um maior coeficiente de atrito, provoca um aumento no torque.

Percebe-se pela figura 2.6 que na fase τ_2 , há um grande aumento da temperatura superficial das peças. Com o aumento da temperatura há uma redução no limite de resistência do material, fazendo com que haja uma maior taxa de deformação dos mesmos. Desta forma, há o aumento da área real de contato das superfícies, o que provoca o aumento da componente adesiva do coeficiente de atrito.

Na fase τ_3 , ocorre uma queda brusca no torque e um pequeno aumento de temperatura. Este pequeno aumento de temperatura é suficiente para plastificar o material, de tal forma que na interface há a formação de uma fina camada de material plástico capaz de atuar como lubrificante, mudando o regime de atrito a seco para lubrificado. Nesta fase, parte do material começa a ser extrudado para a periferia das superfícies, formando as rebarbas.

A fase τ_4 também é conhecida como fase semi-estacionária. Nesta fase, o sistema entra em regime, e a velocidade de encurtamento, a temperatura e a transferência de calor são praticamente constantes. Ao final desta fase, as superfícies de contato estão prontas para a formação da ligação metálica, pois tem-se temperaturas elevadas, o metal está plastificado, e os possíveis detritos foram removidos em direção à rebarba.

Na fase τ_5 ocorre a frenagem do sistema com a diminuição da velocidade de rotação. Ocorre nesta fase o segundo pico de torque. Esta é uma fase de fundamental importância para o processo, pois é ao final desta fase que ocorre a formação das ligações metálicas. Duffin e Bahrani (1976) realizaram estudos específicos com relação a esta fase, no qual é abordado a influência da velocidade de desaceleração nas características da união.

Finalmente, na fase τ_6 , ocorre a etapa de forjamento. Nesta fase, a velocidade de rotação é nula, sendo que ainda há a aplicação da força. Há um rápido resfriamento da interface, e ao final da mesma a união entre as partes está estabelecida.

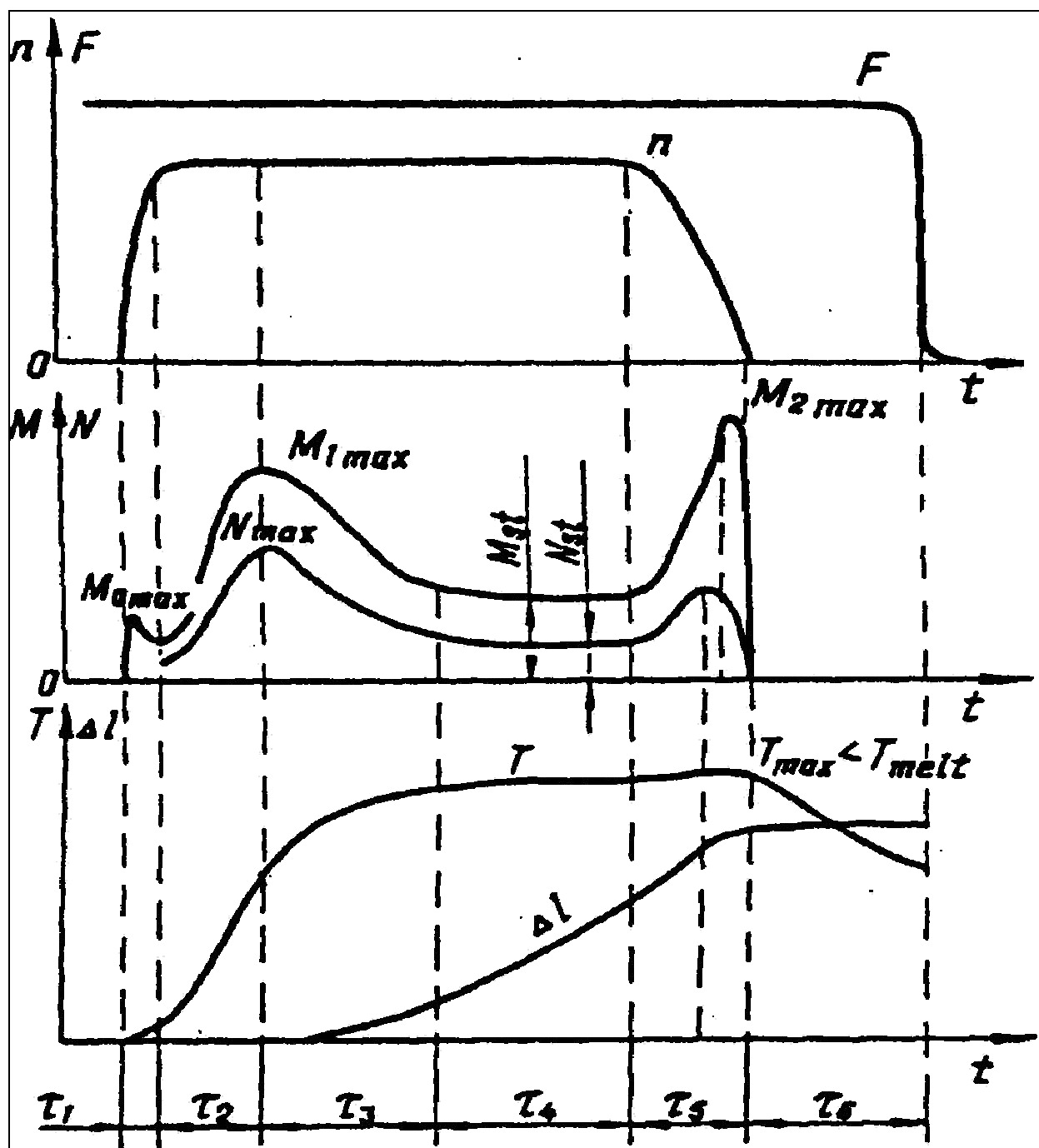


Figura 2.6: Variação das variáveis: Força (F), Rotação (n), Torque (M), Potência consumida (N), Temperatura (T) e comprimento de queima (Δl) ao longo das fases do processo de soldagem por atrito (Lebedev and Chernenko, 1992).

2.1.4 Influência dos parâmetros de soldagem na qualidade da junta

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

- **Velocidade de rotação:** Segundo Vill (1962), existe uma velocidade ótima para cada par de materiais utilizados. Elevadas velocidades de rotação levam à ocorrência de uma “lapidação” das superfícies das peças, deixando-as mais planas, fato que aumenta o tempo de aquecimento das superfícies. Maiores tempos de aquecimento provocam um aumento de temperatura em um volume maior da peça, que, por consequência, diminui a velocidade de resfriamento das partes unidas. Dessa forma, a utilização de uma elevada velocidade de rotação pode vir a aumentar a zona afetada pelo calor (ZAC), como também prejudicar as propriedades mecânicas da região da solda. Por outro lado, a utilização de baixas velocidades de rotação pode exigir que se tenha maiores forças axiais e exigir um maior torque do sistema, o que em termos de equipamento significa maior robustez. Além da questão mecânica, a utilização de baixas velocidades de rotação também pode levar a uma velocidade de resfriamento extremamente rápida, que apesar de diminuir o tamanho da ZAC, deixaria essa região potencialmente com dureza elevada e com tenacidade extremamente baixa.
- **Força axial:** A força axial usada no processo deve ser suficiente para provocar o íntimo contato entre as peças, de forma a romper o filme de óxidos e promover a formação da ligação metálica. Contudo, a utilização de forças axiais extremamente elevadas aumentam significativamente a taxa de queima das peças podendo vir a prejudicar o controle do processo. Ellis (1972), demonstrou que a força axial influencia a largura e características microestruturais da ZAC. Isto se explica pelo fato que a força axial atua diretamente nas condições de plastificação do material influenciando, portando, nas propriedades da peça. A AWS (1991), recomenda a utilização, sempre que possível, de maiores forças axiais, pois essa condição tende a favorecer a formação de uma ferrita refinada, em detrimento da ferrita de *Widmanstätten*, melhorando a tenacidade da estrutura.
- **Taxa de queima:** A taxa de queima mede a velocidade de encurtamento das peças, sendo função da velocidade de rotação e da força axial. Maiores forças axiais e menores velocidades de rotação aumentam a taxa de queima das peças, promovendo, devido ao aumento da velocidade de resfriamento, melhores

propriedades mecânicas, com uma microestrutura mais refinada. Visto que, a taxa de queima é função da velocidade de rotação e da força axial, no processo de soldagem por atrito o parâmetro de entrada é o comprimento de queima, ou encurtamento axial.

2.1.5 Soldagem de diferentes tipos de materiais

Uma das grandes vantagens do processo de soldagem por atrito é que, ao contrário dos processos convencionais de soldagem, que raramente permitem a soldagem de metais dissimilares, nesse processo há a facilidade de soldagem de diferentes pares de materiais. Isso é possível uma vez que na soldagem por atrito não há a fusão do metal de base, garantindo não só uma maior tenacidade da junta, como também, na grande maioria dos casos, propriedades mecânicas superiores às do metal de menor qualidade do par. Um bom exemplo da aplicação desse material é na confecção de válvulas de motores de combustão interna, nas quais a haste é de metal menos nobre do que o do obturador (Figura 2.7).

Quando os pares de materiais apresentarem propriedades mecânicas e plasticidades similares, suas taxas de deformação também são similares. Por consequência, a ativação do processo de união das peças também se dará de forma simultânea



Figura 2.7: Foto de diferentes componentes mecânicos fabricados pelo processo de soldagem por atrito.