

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

FACUNDO SEBASTIÁN LÓPEZ

**MONTAGEM E AVALIAÇÃO DE UMA
MÁQUINA DE SOLDA POR FRICÇÃO**

Porto Alegre
2010

FACUNDO SEBASTIÁN LÓPEZ

**MONTAGEM E AVALIAÇÃO DE UMA
MÁQUINA DE SOLDA POR FRICÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Telmo Strohaecker

Porto Alegre
2010

FACUNDO SEBASTIÁN LÓPEZ

**MONTAGEM E AVALIAÇÃO DE UMA
MÁQUINA DE SOLDA POR FRICÇÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Telmo Strohaecker, UFRGS
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Dornelles Ramos, IFRS
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

PhD. Thomas G.R. Clarke, UFRGS
Doutor pelo Imperial College – Londres, Reino Unido

Prof. Dr. Mario Wolfart Júnior, IFRS
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGE3M: _____
Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Porto Alegre, Dezembro de 2010.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgia e de Materiais (PPGE3M) pela oportunidade de realização de trabalhos e excelente predisposição dos funcionários.

Aos diretores, funcionários, colegas e bolsistas do Laboratório de Metalurgia Física (LA-MEF) da UFRGS: ao Prof. Telmo R. Strohaecker pela orientação e correção minuciosa deste trabalho; ao Prof. Afonso Reguly pelas conversas orientadoras; ao Gabriel A. Tarnowski por ter me incorporado ao laboratório e encaminhado no área de projetos mecânicos; ao Leandro V. de Andrade com quem temos trabalhado no desenvolvimento do equipamento; ao Germán C. Tarnowski por ter me encorajado a utilizar o \LaTeX ; ao Fabiano Mattei pelas inúmeras conversas de estratégias de controle hidráulico; ao Guillermo A. Mudry pela predisposição e assistência no diagnóstico da máquina de solda; ao Fabiano Bertoni pelo constante assessoramento em desenho computacional avançado; ao grupo de Robótica, Controle e Automação (RCA) pela monitoração das vibrações durante algumas avaliações; ao Rogério e ao Rodrigo pela operação da máquina de eletroerosão, ao Diego Belato Rosado pela preparação das amostras e à equipe de Tecnologia Submarina (TS) pelo espírito de superação.

À Fundação de Apoio a UFRGS (FAURGS) por ministrar as bolsas de projeto.

Agradeço também às pessoas que ajudaram muito, mesmo estando longe: Eng. Cristina Haupt da Faculdade de Engenharia da Universidad Nacional de Misiones (UNaM) por me propor a fazer um mestrado e pela gestão da bolsa inicial; aos meus pais: Miguel A. López e Beatriz I. Eibl pelo apoio e exemplo de disciplina e perseverança.

Por último agradeço especialmente a Viviana M. Ferreyra pelo incentivo, apoio incondicional e finais de semana cedidos para conclusão do trabalho.

RESUMO

Um processo alternativo à solda por arco para aplicação em materiais de difícil junção ou em ambientes submersos é a solda por fricção. Neste trabalho foi desenvolvido um equipamento de solda por fricção para pesquisas e determinação de parâmetros ótimos de soldagem em diferentes meios. Para verificar o desempenho do equipamento foi utilizado o processo de solda por fricção de pinos consumíveis. Os registros das variáveis de soldagem permite avaliar o comportamento do sistema para a faixa de operação utilizada. Diferentes uniões de aço de baixo carbono e aço de baixa liga foram obtidas. Mediante análises macrográficas da junta foi avaliada a zona afetada pelo calor e a presença de regiões com possível falta de preenchimento. O controle servohidráulico desenvolvido apresenta uma resposta dinâmica adequada para esta aplicação, no entanto são apresentadas algumas propostas de melhorias.

Palavras-chave: Máquina de solda por fricção, pinos consumíveis, controle servohidráulico, parâmetros de solda.

ABSTRACT

An alternative process to the conventional arc welding for mating difficult-to-join materials or in underwater environment is friction welding. During this work a friction welding equipment was developed for research and determination of optimum welding parameters under different environments. To evaluate the equipment performance the friction hydro pillar processing method was used. Data acquisition of the welding parameters allows assessing the system behavior within the operational range. Joints of low carbon and low alloy steels have been obtained. Macrographic analyses of the weld joint were performed to evaluate the heat affected zone and the presence of unfilled regions. The servohydraulic control developed have shown an adequate dynamic response for this application, nevertheless some improvements are proposed.

Keywords: friction welding equipment, servohydraulic control, welding parameters, friction hydro pillar processing.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS	11
1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 Processo de Solda por Fricção	15
2.1.1 Princípios Básicos do Processo	15
2.1.2 Etapas Características	16
2.1.3 União de materiais similares	17
2.1.4 União de materiais dissimilares	18
2.1.5 Soldabilidade dos Aços	20
2.1.6 Vantagens e Limitações do Processo	20
2.1.7 Variantes do Processo	23
2.1.8 Solda por Fricção de Pinos Consumíveis	25
2.2 Máquinas de Solda por Fricção	27
2.2.1 Classificação pelo Método de Acionamento	27
2.2.2 Equipamentos Desenvolvidos	29
3 PROJETO DA MÁQUINA DE SOLDA POR FRICÇÃO	36
3.1 Descrição Geral	36
3.2 Circuito de Controle Hidráulico	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 Materiais	43
4.2 Geometria dos Componentes	43
4.3 Procedimento de Soldagem	45
4.4 Testes Preliminares	47

4.5	Avaliação Visual	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	Testes Preliminares	49
5.2	Composição Química e Soldabilidade	51
5.3	Aquisição de Dados	52
5.4	Caracterização das Macrografias	56
6	CONCLUSÕES	58
7	TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A COMBINAÇÃO DE MATERIAIS SOLDADOS POR FRICÇÃO	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Processo básico de solda por fricção	16
Figura 2:	Evolução dos parâmetros durante a solda por fricção	17
Figura 3:	Soldabilidade dos aços em função do CE	21
Figura 4:	Radial Friction Welding	23
Figura 5:	Friction Surfacing	23
Figura 6:	Friction Lap Seam Welding	24
Figura 7:	Friction Co-extrusion Cladding	25
Figura 8:	Linear Friction Welding	25
Figura 9:	Solda por Fricção de Pinos Consumíveis	27
Figura 10:	Máquina com acionamento inercial	28
Figura 11:	Ciclo de solda com acionamento inercial	29
Figura 12:	Máquina com acionamento contínuo	29
Figura 13:	Ciclo de solda com acionamento contínuo	30
Figura 14:	Classificação dos tipos de solda por fricção	31
Figura 15:	Componentes básicos de uma máquina de solda por fricção	32
Figura 16:	a) Equipamento da Proserv - Offshore para solda por fricção; b) Pino ros- cado, soldado por fricção a topo	33
Figura 17:	Equipamento do Instituto de pesquisa GKSS	34
Figura 18:	Unidade desenvolvida na Universidade Federal de Uberlândia.	34
Figura 19:	Solda submersa	35
Figura 20:	Esquema do sistema de solda	36
Figura 21:	Bloco de válvulas	37
Figura 22:	Esquema da caixa de rolamentos	38
Figura 23:	Projeto da máquina de solda por fricção	39
Figura 24:	Esquema básico de controle em malha fechada	39
Figura 25:	Esquema da servoválvula MOOG - G761	40
Figura 26:	Esquema da servoválvula MOOG D661 com sistema jato-receptor	41
Figura 27:	Motor hidráulico Parker	41
Figura 28:	Cilindro hidráulico	41

Figura 29:	Desenho computacional	42
Figura 30:	Estação de solda	42
Figura 31:	Geometria do Furo no Bloco	44
Figura 32:	Geometria da Ponta do Pino	44
Figura 33:	Seção pino - bloco	45
Figura 34:	Programa de Procedimento de Soldagem	45
Figura 35:	Representação gráfica da matriz de teste	47
Figura 36:	Corte por eletroerosão a fio dos CPs.	48
Figura 37:	Curvas de aquecimento do motor em função da rpm	50
Figura 38:	Instabilidade no controle de força	50
Figura 39:	Soldas a topo sobre bloco	51
Figura 40:	Solda submersa	51
Figura 41:	Registros do teste RO06	53
Figura 42:	Registros do teste RO03	54
Figura 43:	Registros do teste RO09	55
Figura 44:	Sequência do processo	55
Figura 45:	Macrografias dos corpos de prova. Ampliação dos vazios	56
Figura 46:	Macrografias em função da matriz de experimento	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Análise das publicações ISI sobre o tópico: <i>Friction welding</i>	12
Tabela 2:	Influência dos parâmetros de solda nas propriedades mecânicas da junta . .	28
Tabela 3:	Tabela comparativa entre FRW Direto e FRW Inercial	30
Tabela 4:	Placa de características	42
Tabela 5:	Especificação química do BS 4360	43
Tabela 6:	Especificação química do AISI/SAE 4140	43
Tabela 7:	Programação de parâmetros para os testes	47
Tabela 8:	Composição química do material do bloco - BS4360	52
Tabela 9:	Composição química do material do pino - AISI 4140	52

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação de Engenharia em Minas, Metalúrgica e de Materiais
FRW	Friction Welding
ROV	Remotely Operated Vehicle
TWI	The Welding Institute
SFPC	Solda por Fricção de Pinos Consumíveis
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
CE	Carbono Equivalente
IIW	International Institute of Welding
HTLA	Heat Treatable Low Alloy
HSLA	High Strength Low Alloy
CP	Corpo de Prova

1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem aplicados tanto na fabricação de componentes quanto no reparo de equipamentos e estruturas em operação movimentam milhões de dólares ao ano. Na fabricação de peças em série, procuram-se processos que reduzam os custos de manufatura e inspeção, que apresentem alta repetibilidade e baixo índice de rejeição. Na manutenção, um dos principais objetivos dos desenvolvimentos de processos de soldagem consiste na realização de reparos rápidos e com desempenho pelo menos igual ao componente original. Desta maneira, consegue-se manter a linha em operação e estender a vida útil do equipamento. Por consequência, pesquisas sobre novas técnicas e/ou métodos são conduzidas para dar resposta às demandas da indústria.

A técnica de reparo de estruturas metálicas mais amplamente utilizada é a tradicional solda por arco. Porém métodos alternativos são pesquisados para situações onde a soldabilidade do material base ou o ambiente tem um papel fundamental na qualidade da solda. Este é o caso particular de estruturas offshore e tubulações submersas, onde a coexistência de um arco elétrico e aço fundido num ambiente totalmente agressivo representam uma situação propensa à introdução de potenciais pontos de falha (1).

Na mesma linha, a exploração de recursos naturais em ambientes de complexidade crescente impõem novos desafios para os quais as barreiras tecnológicas devem ser superadas.

Neste sentido, o interesse pelas técnicas de soldas em estado sólido tem sido incrementado acentuadamente nos últimos anos como exemplificado na Tabela 1, baseado na análise no banco de dados de artigos da *ISI Web of Knowledge* sobre trabalhos científicos relacionados ao tópico¹: Solda por fricção.

Tabela 1: Análise das publicações ISI sobre o tópico: *Friction welding*

Field: Publication Year	Record Count	% of 2384	Bar Chart
2009	724	30.3691 %	
2008	637	26.7198 %	
2007	410	17.1980 %	
2006	337	14.1359 %	
2010	276	11.5772 %	
Field: Publication Year	Record Count	% of 2384	Bar Chart

A tendência crescente do número de artigos relacionados ao processo de solda por fricção pode ser considerado um indicador da importância atual deste assunto. Os processos de solda

¹Dados de 2010 correspondem até o mês de Julho

em estado sólido, como a solda por fricção, são uma alternativa viável para unir materiais difíceis de soldar e, inclusive, combinações consideradas não-soldáveis (2). Na solda por fricção o calor para a solda é produzido pelo movimento relativo entre as duas superfícies em contato. Este método baseia-se na conversão de energia mecânica diretamente em energia térmica através da fricção das superfícies a serem unidas. O fato da união na solda por fricção ocorrer abaixo do ponto de fusão limita a extensão das reações metalúrgicas que causam fragilização, trincas e porosidade. Além disso, o processo não é tão sensível à absorção de gases e contaminação atmosférica reduzindo, assim, a importância do ambiente na qualidade do reparo.

A qualidade e características da solda são altamente influenciadas pelos parâmetros do processo, motivo pelo qual é absolutamente necessário realizar ensaios e determinar os valores adequados para alcançar um reparo confiável. A solda por fricção envolve geração de calor através de fricção, dissipação de calor, deformação plástica, escoamento de material e difusão química. A interação entre todos esses fatores durante a solda acarreta grandes dificuldades no momento de desenvolver modelos preditivos para o processo (2).

A parte experimental tem um papel importante na ciência, na engenharia e na indústria. Na experimentação, aplica-se um tratamento sobre o objeto em estudo para, logo, medir suas respostas e tentar identificar os fatores que regem seu comportamento (3). Quando modelos teóricos são complexos demais pelo grande número de variáveis, por exemplo, modelos empíricos ou tabelas de referência são compiladas a partir da experiência acumulada.

Motivação

Pela importância tecnológica das técnicas de soldagem em estado sólido e devido à necessidade de realizar experimentos para alcançar o estágio de conhecimento para transferir esta tecnologia à indústria: foi projetada, construída e avaliada uma máquina para realizar pesquisas sobre o processo de solda por fricção.

Objetivos

Para atender a motivação propõe-se o objetivo: “Desenvolver uma máquina capaz de realizar soldas por fricção do tipo pontual seguindo um processo de soldagem controlado.”

O equipamento desenvolvido para pesquisa de solda por fricção deve atender os seguintes requisitos:

- Permita a programação dos parâmetros e do procedimento de soldagem.
- Permita o registro das variáveis de processo para posterior análise.
- O equipamento deve ser versátil na adequação de corpos de prova de diferentes geometrias.
- Deve ser possível realizar soldas submersas.

Este trabalho trata, principalmente, sobre a descrição, avaliação e ajustes do equipamento durante os primeiros testes mediante a execução de soldas de topo e soldas pelo processo de

solda por fricção de pinos consumíveis (SFPC). Também são abordadas as dificuldades que se apresentaram ao longo do projeto e de como foram solucionadas, sendo que algumas melhorias são propostas em função da análise de desempenho.

O resultado deste trabalho forma a base para as próximas pesquisas que poderão quantificar as variáveis de resposta, tais como microestrutura, dureza, tenacidade, vida em fadiga e correlacionar com os parâmetros de execução. E, com estes testes, responder as questões inerentes aos processos de soldagem:

1. Os materiais podem ser soldados de forma adequada? Para quais condições?
2. Quais serão as propriedades mecânicas da união?

Outra aplicação para o equipamento de solda surge da interação com equipes de áreas de atuação afins. Consiste na execução de soldas com defeitos intencionais, tais como falta de preenchimento e inclusões de óxidos, para desenvolver e calibrar técnicas de inspeção não destrutivas.

Espera-se que a informação contida neste trabalho seja uma referência útil para aqueles que empreendam a tarefa de projetar e fabricar um equipamento de características similares .

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de Solda por Fricção

A solda por fricção é um processo de solda no estado sólido onde forças compressivas são aplicadas entre as peças a serem soldadas, as quais são rotadas ou movimentadas uma em relação a outra gerando calor e deslocando material em estado plástico das superfícies em atrito e, por esse meio, criando a solda (4).

A união de materiais no estado sólido pode ser uma alternativa atrativa para os processos de solda por fusão. Deve ser destacado que, metais que convencionalmente são difíceis de soldar e combinações de materiais dissimilares podem ser soldados utilizando um processo e estado sólido (5).

Dixon (6) define os processos de estado sólido como aqueles nos quais é produzida a união das superfícies de atrito a temperaturas menores que a de fusão do material sem inclusão de materiais de brazagem ou metal de adição. Pressão pode ou não ser aplicada. Estes processos envolvem difusão e deformação para produzir uniões de alta qualidade entre os dois materiais, tanto similares como dissimilares. Uniões dissimilares são realizadas para aplicações onde diferentes propriedades são necessárias no mesmo componente ou quando representa uma economia de fabricação.

2.1.1 Princípios Básicos do Processo

O método de solda por fricção, denominado na literatura em inglês como FRW (Friction Welding), baseia-se na conversão direta de energia mecânica para energia térmica, a partir do movimento relativo das superfícies a serem unidas, sem aplicação de calor de qualquer outra fonte. Sob condições normais não há fusão na interface. A Figura 1 esquematiza uma solda típica, onde uma peça estacionária é mantida em contato contra a peça giratória sob pressão até a interface atingir a temperatura de solda. A velocidade de rotação, a pressão axial e o tempo de solda são as principais variáveis controladas para obter a combinação necessária de temperatura e pressão para formar a solda. Estes parâmetros são ajustados de maneira que a interface seja aquecida até a faixa de “temperatura plástica” adequada para a solda. Uma vez atingido o valor, uma maior pressão é exercida para trazer as interfaces em contato íntimo. Durante esses estágios há difusão atômica entre as partes, permitindo a união metalúrgica entre ambas as peças (2).

Através de estudos empíricos o processo é bem compreendido, ensaios e pesquisas tendo sido realizado sobre uma ampla gama de materiais. Estudos que servem como referência de partida para aplicações específicas.

São listados cinco dos fatores principais que influenciam na qualidade da solda:

- velocidade relativa das superfícies
- pressão aplicada
- temperatura das superfícies
- propriedades dos materiais
- condições da superfície e presença de filmes

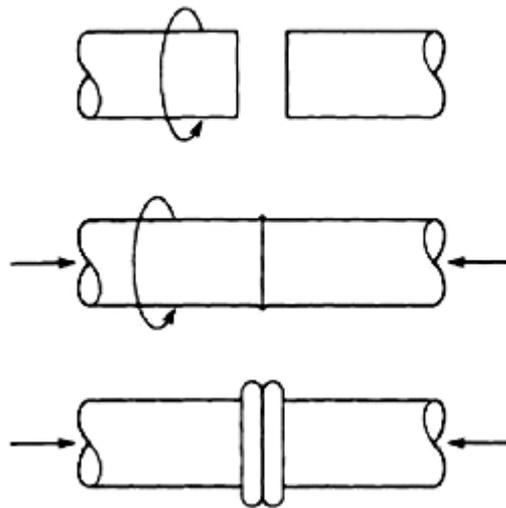


Figura 1: Processo básico de solda por fricção
Fonte: ASM Handbook

Dos fatores, os três primeiros estão relacionados a parâmetros de processo, enquanto que os últimos dois são relacionados aos materiais a serem unidos. Durante a FRW, a velocidade, a pressão aplicada e a duração são as três variáveis controladas. A temperatura na superfície é um parâmetro crítico para assegurar boas soldas, sendo esta dependente das condições do processo e dos materiais envolvidos. Apesar de não ser medida ou controlada diretamente os efeitos de temperatura insuficiente ou excessiva podem ser, geralmente, observadas através de inspeção visual da solda efetuada. As propriedades dos materiais e das superfícies afetam tanto as forças de fricção quanto as características de forja (2). No capítulo 3 será discutida uma lista completa de variáveis que permitem controlar o resultado do processo.

2.1.2 Etapas Características

A descrição baseada na curva de torque de fricção, apresentada no ASM Handbook (7), divide o processo em três etapas como descrito a seguir e apresentado na Figura 2:

1. **Etapa de Fricção:** O torque aumenta rapidamente após o primeiro contato. Logo alcança um pico e diminui antes de estabilizar marcando o fim da etapa 1. O rápido aumento e queda gradativa do torque está associada ao intertravamento, microsoldas e ruptura de asperezas e subsequente amolecimento do material pelo aquecimento.

2. **Etapa de Aquecimento:** O torque mantém-se relativamente constante durante a etapa 2, indicando que o processo alcança um equilíbrio entre encruamento por deformação e amolecimento devido ao aumento da temperatura.
3. **Etapa de Forja:** A etapa começa no instante em que o eixo é desacelerado. Para efetuar a forja a carga axial é aumentada. O torque aumenta novamente formando um segundo pico antes de cair até zero. Este pico varia com a desaceleração e a força aplicada. Sob algumas circunstâncias o pico de torque pode ser suprimido. Como a força de frenagem pode ser controlada, o tempo de frenagem pode ser uma das variáveis controladas do processo. Quando a frenagem é quase instantânea o torque cai abruptamente e uma força axial maior é aplicada para produzir a forja. Quando a força axial permanece constante, menores taxas de frenagem levam a picos mais altos. Se a força axial é incrementada na fase 3, o tempo de frenagem é diminuído, mas o pico ainda aumenta em decorrência do maior carregamento. Aumentar o torque por fricção contribui na forja torsional, a qual é mais efetiva que a forja unicamente por aumento da carga axial.

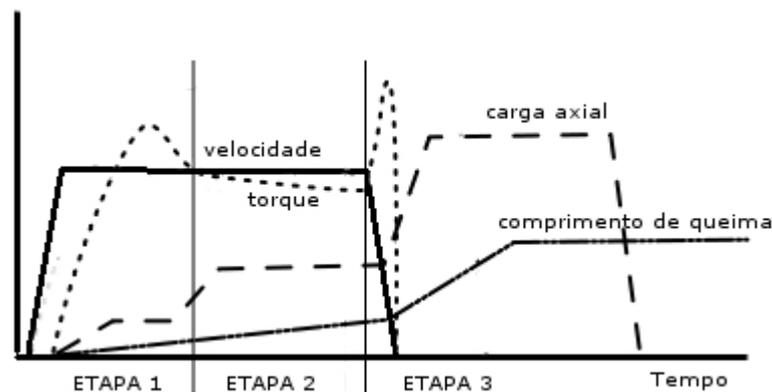


Figura 2: Evolução dos parâmetros durante a solda por fricção

2.1.3 União de materiais similares

A FRW pode ser utilizada para soldar uma ampla faixa de materiais similares e combinações dissimilares que não podem ser unidas por métodos convencionais. Combinações de metais, cerâmicos, compósito de matriz metálica e polímeros tem sido unidos através de este método (2).

Os dois requisitos principais para formar boas soldas por fricção são: primeiro, que os materiais a serem unidos possam ser forjados e, segundo, que os materiais gerem fricção na interface de solda. O primeiro requerimento elimina soldas de materiais similares em materiais frágeis como cerâmicas, ferro fundido, etc. Mas, em alguns casos, é possível soldar materiais dúcteis a estes materiais. A segunda condição elimina ou dificulta a solda de materiais que contém elementos de liga para lubrificação a seco, como grafite, aditivos para usinagem e ligas com chumbo.

A relativa facilidade com que é realizada a solda por fricção de um metal com ele mesmo está associado ao fato que, por apresentarem as mesmas propriedades, o calor é distribuído uniformemente e as características de deformação são idênticas em ambos os lados da interface. Isto resulta em soldas simétricas com boas propriedades. Em geral as variáveis de processo não variam significativamente para diferentes ligas dentro do mesmo tipo de material. Não obstante, podem haver diferenças significativas nas variáveis de processo entre diferentes tipos de materiais (2). Devido ao aquecimento localizado gerado pela FRW, a zona afetada pelo calor (ZAC) está sujeita a resfriamento rápido pela efetiva transferência de calor para o metal base. Esta têmpera pode alterar significativamente as propriedades mecânicas e até exigir tratamento térmico pós-solda. Por exemplo, a fim de restabelecer a ductilidade, tratamentos de alívio de tensões ou revenido podem ser requeridos em materiais com temperabilidade elevada. Ligas que obtêm sua resistência por trabalho a frio perderão essa propriedade na ZAC e suas propriedades não podem ser recuperadas com tratamento térmico pós-solda (2).

2.1.4 União de materiais dissimilares

Enquanto que muitas soldas de metais similares são realizadas por fricção devido a questões econômicas, muitas soldas de materiais dissimilares são realizadas por fricção, uma vez que esta é a única alternativa. Exemplos deste tipo de união inclui combinações de metais dissimilares com ampla diferença de pontos de fusão e combinações que formam fases incompatíveis quando soldadas por fusão. Exemplos citados na referência (2) incluem: Cobre com aço AISI 1018, aço ferramenta M2 com aço AISI 1045, liga de Níquel 718 com aço AISI 1045, aço inoxidável AISI 302 como aço AISI 1020, Alumínio AISI 6061 com inox AISI 302 e Cobre com ligas de Alumínio.

Uma matriz de várias combinações de materiais metálicos soldados por fricção é apresentado no Apêndice A.

Uma descrição geral sobre combinações de metais dissimilares obtida de Elmer e Kautz (2) é apresentada a seguir:

Aços de baixo Carbono com aços de médio Carbono. Em geral, estas combinações são unidas para uma ampla gama de condições, inclusive aços de alto teor de Carbono (C) são soldados com aços ligados usando solda por fricção. Ferramentas de aço rápido são soldadas à hastes de aço liga para inúmeras aplicações em máquinas ferramentas. Aços com teores de Carbono tão altos como 1%, como o aço AISI 52100, podem ser unidos com ligas de menor teor de C. Tratamentos térmicos pré-solda são requeridos em alguns casos para ajustar as propriedades na interface e tratamentos pós-solda para reverter as regiões de interface do aço com alto C.

Aços Inoxidáveis com outros metais Os aços inoxidáveis são relativamente fáceis de soldar por fricção contra outros metais. Por exemplo, o aço inox austenítico com aços de baixa liga, Titânio e Cobre com inox e Alumínio 1100 com inox. Combinações estas que podem ser utilizadas como camadas intermediárias para realizar uniões de pares incompatíveis. Para exemplificar esta técnica o ASM Handbook menciona uma pesquisa do R. Armstrong (1991)

onde, para conseguir a união entre Alumínio 5083 com o aço inox é utilizada uma solda intermédia de Al 1100 que, após usinada, serve de base para soldar o Al 5083, obtendo-se uma união de alta eficiência.

2.1.4.1 *Problemas na união de materiais dissimilares*

Os problemas inerentes à solda por fricção de materiais dissimilares envolvem fatores como: interface de união, fases de baixo ponto de fusão, fases frágeis e diferença de expansão térmica. As soldas podem ser afetadas por contaminantes (Enxofre e Fósforo em ligas ferrosas, Bismuto em ligas de Cobre) na interface de união. Estes contaminantes causam problemas tipo fragilização a quente mesmo em baixas concentrações. Portanto, práticas de limpeza devem ser incluídas no procedimento de preparação dos componentes a serem soldados.

Interfaces de União. Combinação de metais altamente dissimilares são muito sensíveis à preparação superficial. Em soldas de aço inox com o Al, o óxido formado no Al absorve contaminantes como água e hidrocarbonetos, formando camadas superficiais que prejudicam a solda. Se esta camada não for removida antes da solda, a resistência da união pode ser comprometida. Superfícies tratadas geralmente causam problemas durante a solda por fricção. Aços cementados ou nitretados são difíceis de soldar pelo inerente baixo coeficiente de fricção e baixa forjabilidade. Na maioria dos casos a soldabilidade é melhorada se a camada tratada é removida das superfícies atritantes.

Formação de fases de baixo ponto de fusão. Algumas combinações de materiais tem fases de baixo ponto de fusão associadas à mistura de constituintes na interface da solda. Combinações como ligas de base ferrosa com ligas de Titânio e ligas de Al com ligas de Magnésio são propensas à sofrerem este inconveniente. Eutéticos de baixo ponto de fusão são encontrados nestes sistemas metalúrgicos e uma grande atenção deve ser objeto de estudo de parâmetros para prevenir a formação de fase líquida durante o processo de soldagem.

Formação de fase frágil. Alguns materiais, quando combinados, são suscetíveis de formar uma fase frágil. Duas são as principais causas; por contaminantes superficiais que fragilizam a interface ou devido a formação de fase intermetálica entre os constituintes das ligas sendo soldadas.

Diferença de expansão térmica. Certas combinações são difíceis de soldar por apresentarem uma grande diferença no coeficiente de expansão térmica. Materiais de baixa expansão como metais refratários, cerâmicas, ligas Fe-Ni-Co podem falhar ou ser submetidas a altas solicitações durante o resfriamento quando soldadas com materiais de alto coeficiente como o inox austenítico ou superligas em base Níquel ou Cobalto. No emprego destas combinações o projetista deve levar em conta os grandes esforços que sofrerá a estrutura se os lugares da solda estão restringidos quando exposto a amplas variações de temperatura.

2.1.5 Soldabilidade dos Aços

Soldabilidade é um termo usado para se referir a relativa facilidade com a qual um metal pode ser soldado utilizando práticas convencionais. Algumas dificuldades podem apresentar-se quando as taxas de resfriamento associadas aos ciclos térmicos da soldagem produzem microestruturas (por exemplo, martensita) que são susceptíveis à fratura frágil ou trinca induzida por hidrogênio. Talvez o método mais popular para avaliar a suscetibilidade dos aços a formar estas microestruturas seja através da fórmula do carbono equivalente (CE), (8).

O CE é uma relação empírica que considera os elementos que influenciam significativamente a soldabilidade dos aços num valor único. Permite determinar a necessidade de aplicar um tratamento térmico pré- ou pós-soldagem. Uma das fórmulas desenvolvidas pelo International Institute of Welding (IIW), para o cálculo do CE de aços ao carbono e ligados apresenta-se na equação 1.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Si + \%Ni + \%Cu}{15} \quad (1)$$

O resultado da equação 1 é de interpretação prática. Os limites sobrepõem-se na literatura, mas em resumo, quando o material tem baixo valor de CE, geralmente, apresenta boa soldabilidade. Sendo o CE do material menor que 0.45 % é pouco provável que ocorra uma trinca por solda e nenhum tratamento térmico é requerido. Com valores de CE entre 0.45 e 0.60 %, há probabilidade de trinca e pré-aquecimento, na ordem dos 95 aos 400 °C, faz-se necessária. Quando o CE é maior que 0.60 %, a probabilidade é alta e tanto pré-aquecimento como tratamento pós-solda deverão ser realizados para obter soldas com propriedades adequadas.

A Figura 3 apresenta a soldabilidade de varias famílias de aços como função do carbono equivalente. O número 1 indica a presença de Mo na liga; 2, Cr + Ni + Mo + Si; 3, Cr ou V ou Ni + Si.

As trincas induzidas por Hidrogênio (H), também conhecidas como trincas a frio, são defeitos formados pela contaminação da microestrutura da solda por este elemento. O Hidrogênio (H) dissocia-se dos lubrificantes orgânicos (salienta-se a importância da limpeza superficial), das moléculas d'água que, inevitavelmente, estão presentes na umidade do ar e no ambiente das soldas submersas. Contudo a solubilidade do H é muito maior em aço fundido do que em estado sólido ¹. Isto quer dizer que, um processo de solda onde os materiais não são fundidos, como é o caso, tem maior probabilidade de sucesso na união de componentes com valor comprometido de CE.

2.1.6 Vantagens e Limitações do Processo

A solda por fricção apresenta uma série de vantagens (1; 7) frente a outros processos de união, tais como solda por fusão e brasagem.

¹Na ordem de 30ppm em peso, acima da linha de *liquidus* a 1500°C, e menos de 1 ppm em estado sólido a 400 °C, (10)

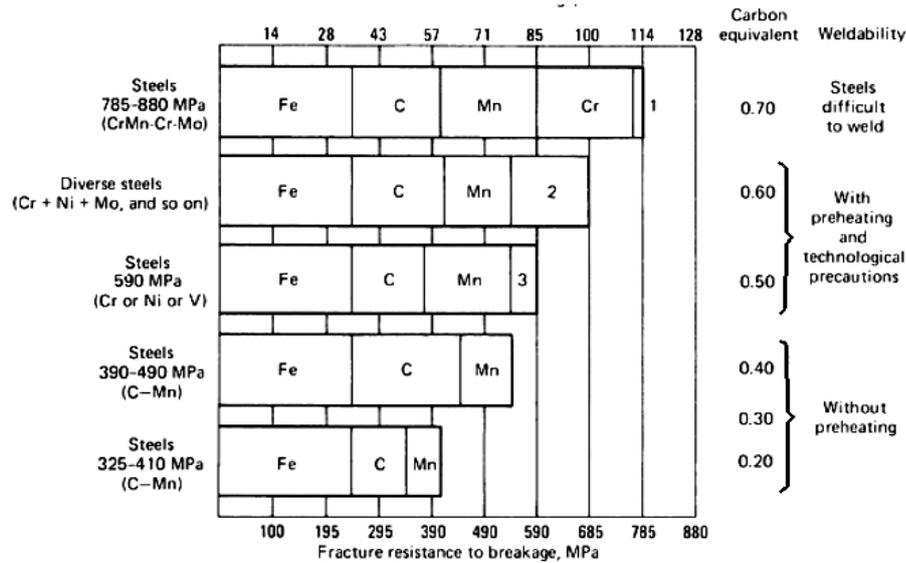


Figura 3: Soldabilidade dos aços em função do CE

Fonte: ASM Handbook, (9)

- No caso de soldas entre tubos, não é necessária atenção especial à limpeza superficial, pois a FRW tende a remover películas de contaminantes e eliminá-las junto à rebarba².
- Pode ser realizada em qualquer plano.
- Dispensa o uso de metais de aporte, fundente ou gás protetor.
- Por se tratar de um processo automatizado é mais seguro para o operador. Não há respingo de metais, radiação nem fumaça. Não há risco envolvendo arco elétrico.
- Por ser um processo em estado sólido, não apresenta defeitos associados ao fenômeno de fusão-solidificação.
- É possível realizar uniões de transição entre materiais dissimilares, que são impossíveis de unir por outros métodos.
- Alta repetibilidade. Alta produtividade. Menor custo em mão de obra, não requer operador qualificado.

Entre as limitações citam-se:

- A área de soldagem, ao menos uma das partes deve ser de revolução de maneira que possa rotar em torno do eixo do plano de soldagem. Geometrias típicas incluem: Barra com barra, barra com tubo, barra com chapa, tubo com tubo e tubo com chapa.
- Ao menos um dos materiais deve ser plasticamente deformável nas condições de solda.
- O par em contato deve gerar calor por fricção.

²Excesso de material deformado plasticamente localizado ao redor da solda

- A preparação e alinhamento das peças é crítico para produzir contato e aquecimento uniforme.
- Alto capital em equipamento e ferramentas.

Estudos prévios à implementação do processo devem ser realizados para garantir um desempenho adequado da união. A Norma DIN EN ISO 15620 (11) se ocupa de aspectos práticos do processo. Nesta Norma são enumerados os fatores que podem afetar a solda por fricção:

1. Quantidade, distribuição e forma de inclusões não metálicas nos materiais de base;
2. Formação de fase intermetálica na solda;
3. Formação de fase de baixo ponto de fusão na solda;
4. Porosidade no metal base;
5. Amolecimento térmico de materiais endurecidos;
6. Endurecimento do material soldado na zona afetada pelo calor;
7. Hidrogênio no metal base.

Com referência à qualidade dos produtos fabricados utilizando um processo de solda por fricção; a bibliografia (11) recomenda tomar medidas adequadas com respeito as condições de pré-solda, solda e pós-solda.

Condições de pré-solda: Uma série de condições devem ser mantidas para garantir a repetibilidade nas propriedades das soldas por fricção. Entre outras pode-se mencionar a análise química, microestrutura, resistência e dureza, tolerâncias dimensionais e geométricas e condições de fornecimento dos materiais a serem unidos. A preparação das superfícies de contato deve remover camadas de sujeira, graxa, óxidos e filmes protetores, exceto quando demonstrado que a contaminação superficial não tem efeitos prejudiciais nas propriedades da junta. O mesmo critério é aplicado às irregularidades nas superfícies de contato.

As extremidades de cada componente devem ser preparadas de maneira tal que as superfícies de atrito pertençam a planos normais ao eixo de rotação. Essas extremidades podem ser cônicas de maneira tal que a superfície de contato seja reduzida nos estágios iniciais da solda diminuindo o torque no primeiro contato.

O torque e as forças axiais são suportadas pelas ferramentas de fixação. As forças não devem ser tão altas como para deformar ou marcar os componentes além de níveis permissíveis. Adaptações adequadas devem ser utilizadas para evitar deslizamentos axiais e amassamento de componentes ociosos. Uma atenção especial deve ser dada ao alinhamento dos eixos dos componentes ao posicioná-los na máquina.

Condições de pós-solda: Quando necessário, procedimentos de usinagem posterior e/ou tratamentos térmicos pós-soldagem devem ser especificados em concordância com as condições de operação esperadas.

2.1.7 Variantes do Processo

Variantes à configuração utilizada para descrição do processo de solda por fricção utilizam o mesmo princípio para aproveitar as possibilidades deste método de união. A literatura (11) menciona 14 processos adicionais baseados em fricção, reproduzidos a seguir utilizando a denominação internacional:

1. **Radial Friction Welding.** Um método pelo qual componentes ocos podem ser unidos utilizando um anel intermediário o qual é rotado entre eles em quanto que sujeito a forças radiais (Figura 4).

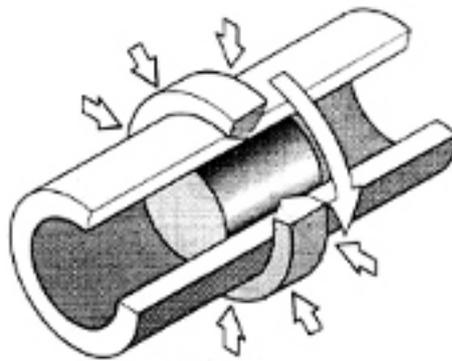


Figura 4: Radial Friction Welding
Fonte: Nicholas, 2003 (12)

2. **Friction Stud Welding.** Pelo qual um pino sólido ou oco é soldado por fricção contra um componente maior.
3. **Friction Surfacing.** Um método de deposição, onde a fricção entre o material superficial e o substrato promove as condições termo-mecânicas para adesão (Figura 5).

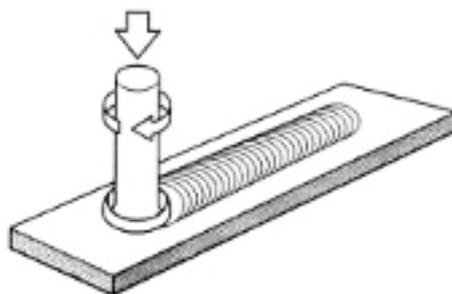


Figura 5: Friction Surfacing
Fonte: Nicholas, 2003 (12)

4. **Friction Taper Plug Welding.** Método pelo qual um componente cônico sólido ou oco é soldado por fricção num furo cônico em outro componente.

5. **Friction Taper Stitch Welding.** Um método de acordo com o anterior pelo qual uma série de corpos cónicos são soldados de maneira sobreposta.
6. **Friction Stir Welding.** Método pelo qual uma ferramenta não consumível é rotacionada entre as superfícies a topo ou sobrepostas e trasladada para gerar calor e escoamento de material.
7. **Friction Seam Welding.** Similar ao anterior, mas uma ferramenta consumível é rotacionada e trasladada entre as superfícies dos componentes.
8. **Friction Lap Seam Welding.** Uma técnica onde uma roda giratória não consumível de alta velocidade é friccionada e trasladada contra os componentes sobrepostos (Figura 6).

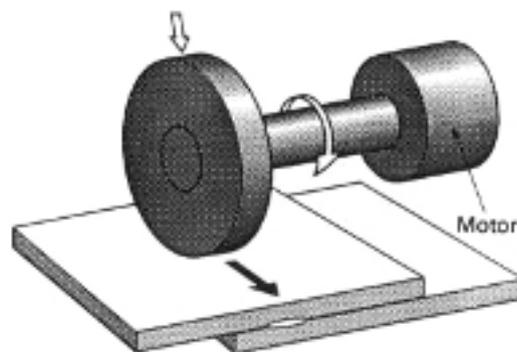


Figura 6: Friction Lap Seam Welding
Fonte: Nicholas, 2003 (12)

9. **Friction Plunge Welding.** Método pelo qual um componente de material duro, com ranhuras especialmente usinadas, é soldado por fricção num componente de material mais mole para produzir trava mecânica e união metalúrgica.
10. **Third Body Friction Welding.** Método pelo qual dois componentes são soldados por fricção utilizando material de um terceiro componente. O material do terceiro corpo pode ter a forma de um sólido, pó ou cavacos de metal.
11. **Friction co-extrusion cladding.** Método pelo qual um componente interno pode ser revestido com um componente externo sendo rotacionado e forçado coaxialmente através de uma matriz especial (Figura 7).
12. **Friction Hydro-pillar Processing.** Método pelo qual um pino sólido ou tubular é rotacionado sob força axial, dentro de uma cavidade em ordem de preenche-la completamente. O método pode ser utilizado para reparo, fabricação, revestimento e reprocesso de materiais.

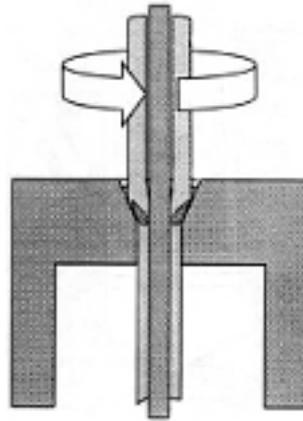


Figura 7: Friction Co-extrusion Cladding
 Fonte: Nicholas, 2003 (12)

13. **Friction Brazing.** Método com liga de brasagem pré-alocada, onde a energia para produzir a união é desenvolvida por fricção através de um movimento relativo de um componente sob leve pressão contra a superfície de brasagem no outro componente.
14. **Linear Friction Welding.** Método em qual um componente é oscilado linearmente apoiado na face do outro componente (Figura 8).

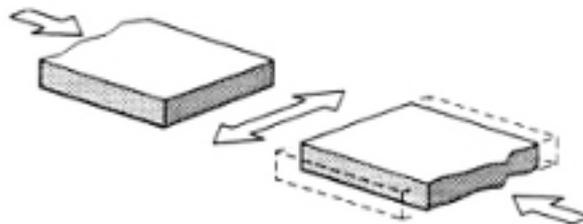


Figura 8: Linear Friction Welding
 Fonte: Nicholas, 2003 (12)

2.1.8 Solda por Fricção de Pinos Consumíveis

Solda por Fricção de Pinos Consumíveis (SFPC) é o nome adotado neste trabalho para se referir ao método anteriormente listado como *Friction hydro-pillar processing*. O estudo deste processo é relativamente recente, quando comparado às técnicas convencionais de solda por fricção. Foi patenteado pelo TWI em 1993 e registrado nos Estados Unidos em 1995 (13).

Existem escassas informações sobre o processo e são, basicamente, dois ou três grupos que pesquisam SFPC no mundo (14).

Desde a concepção, o processo foi pensado como um método de união para aplicação na indústria pesada ou reparo de estruturas de aço de grande espessura e, como todos os processos de solda por fricção, SFPC é factível de ser automatizado.

A possibilidade de realizar reparos de trincas submersas e de sobrepor sucessivas SFPC formando uma “costura” foi apresentado por Nicholas em 1995 (1). Uma lista de vantagens e

potenciais aplicações na indústria petroquímica fazem deste processo uma técnica estratégica para aplicação de métodos alternativos de fabricação, reparo e manutenção. O processo será executado para avaliar o desempenho da máquina desenvolvida para estudo de processo de solda por fricção tipo pontual.

Lista de vantagens compilada por Nicholas:

- União em estado sólido, reprocessamento e manufatura de novos materiais.
- Penetração profunda, fenda estreita para reparos e uniões de materiais ferrosos e não ferrosos.
- Adequado para automatização e controle a distância.
- Pode ser operado para reparos em ambientes de risco tais como ambientes submersos, altamente magnéticos e radiação.
- Grandes seções, capacidade de união de materiais dissimilares.
- Requer menor quantidade de material de solda, para maior espessura mais eficiente economicamente.
- Ambientalmente amigável.
- Baixo custo dos consumíveis.
- Rápido, tendo furos de 50 mm preenchidos em menos de 10 segundos.

Uma excelente definição do processo é reproduzida a seguir.

Definição 2.1.8.1 (Thomas e Nicholas, 1997) *“A técnica de SFPC envolve rotacionar um pino consumível em um furo essencialmente circular concêntrico sob uma carga axial, para gerar uma sucessão de camadas plastificadas localizadas. As camadas plastificadas aderem-se e comprimem uma fina série de interfaces de cisalhamento helicoidal rotativa adiabática, em parte de forma esférica. Durante SFPC o consumível é totalmente plastificado através do diâmetro do furo e ao longo da espessura da peça. O material plastificado desenvolve-se a uma taxa maior que a taxa de alimentação axial do pino, o que significa que a superfície de atrito sobe ao longo do consumível para formar o depósito de material dinamicamente recristalizado. O material plastificado na interface rotacional é mantido numa condição suficientemente viscosa como para transmitir forças hidrostáticas, ambas axiais e radiais, para o interior do buraco, permitindo a união metalúrgica.”*

A Figura 9 representa o processo como foi descrito na definição. As setas indicam a direção do movimento circular e da aplicação da força axial. O material plastificado transmite o carregamento na forma de pressão contra o fundo e as laterais do furo.

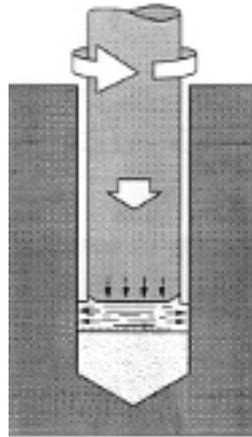


Figura 9: Solda por Fricção de Pinos Consumíveis

Fonte: Nicholas, 2003 (12)

Baseado numa compilação realizada pelo A. Meyers (1) sintetiza-se no apêndice a influência das principais variáveis utilizadas para controle do processo sobre as propriedades mecânicas da união.

2.2 Máquinas de Solda por Fricção

2.2.1 Classificação pelo Método de Acionamento

Existem dois métodos principais de solda por fricção: solda por acionamento direto e por acionamento inercial. Estes métodos utilizam um motor girando a velocidade constante e energia cinética armazenada num volante de inércia, respectivamente, para realizar o aporte de energia na solda (2).

2.2.1.1 Acionamento Inercial

Na solda por fricção com acionamento inercial, um volante de inércia e a parte rotante são montadas no eixo, o qual é levado à velocidade requerida. O motor de acionamento é, então, desacoplado e as duas partes fazem contato com uma pressão axial predeterminada. O volante com rotação livre desacelera sob a ação do atrito na interface. Por outro lado, a energia cinética armazenada no volante é convertida em energia térmica nas superfícies em contato. A solda é completada quando o volante para. Uma força de forja pode ser subsequentemente utilizada (7). Um esquema da configuração e da evolução dos parâmetros durante o processo é apresentada nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

2.2.1.2 Acionamento Direto

Na solda com acionamento direto (Figura 12), o eixo é acelerado até uma velocidade determinada e as partes são colocadas em contato sob força axial. A rotação e a força são mantidas por um período específico, determinados por tempo ou distância, de maneira que a energia por

Tabela 2: Influência dos parâmetros de solda nas propriedades mecânicas da junta

Parâmetro de solda	Propriedades Mecânicas
Velocidade	Com altas velocidades de rotação são necessários maiores tempos para atingir a condição de plastificação. Isto permite a condução de calor para o interior da peça resultando numa ZAC mais larga e menor taxa de resfriamento. Maiores velocidades resultam em menor dureza. O aumento da velocidade de rotação acarreta um aumento do tamanho de grão. Maiores velocidades resulta em menor resistência a tração. Baixas velocidades reduzem o tempo de aquecimento e aumentam a taxa de resfriamento, resultando em maior dureza.
Força Axial	Este parâmetro controla o gradiente de temperatura, a potência de acionamento requerida, a largura da ZAC e a taxa de encurtamento. Existe uma relação linear entre a força normal e a taxa de queima. A resistência aumenta progressivamente com a força. A força aumenta a taxa de queima, diminuindo a geração de calor aumentando a taxa de resfriamento. Por tanto, incrementasse a dureza. Soldas realizadas com forças maiores resultam em regiões mais estreitas onde a dureza é menor que no material base. Ou seja, quanto maior a força, mais afunilado será o perfil de durezas na região de transição.
Tempo de Solda	Curtos tempos aumentam a resistência. A ZAC é estreita e, por isso, a taxa de resfriamento é maior. É o parâmetro mais importante para controlar a dureza. Maiores tempos de solda propiciam menor taxa de resfriamento e menor dureza.
Forja	O aumento da força axial aplicada na última fase da solda controla as condições de aquecimento, pois ejeta o material plastificado que transporta o calor para o flash. A aplicação da forja tem dois efeitos benéficos na resistência da solda: romper as inclusões grosseiras e o refino dos grãos de Austenita por trabalho a quente, o que reduz a tendência de formação de estrutura de Widmanstätten.

Fonte: A. Meyers, 2002 (1)

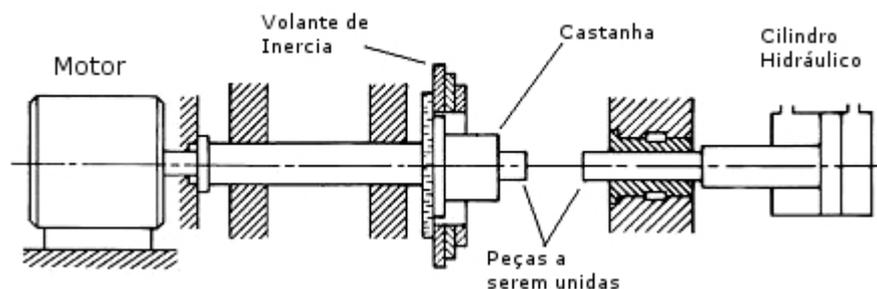


Figura 10: Máquina com acionamento inercial

fricção incrementará a temperatura nas superfícies em contato conseguindo plastificar o material e adequando-o à solda. O eixo é desacoplado do motor e aplica-se o freio para desacelerar o conjunto rotativo. Ao mesmo tempo a força axial é mantida constante ou aumentada para com-

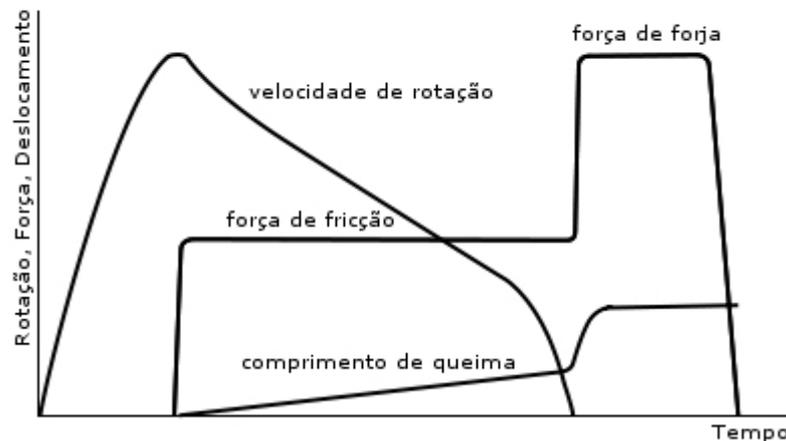


Figura 11: Ciclo de solda com acionamento inercial

pletar o processo (7). A descrição do processo pode ser acompanhada no gráfico das variáveis apresentado na Figura 13.

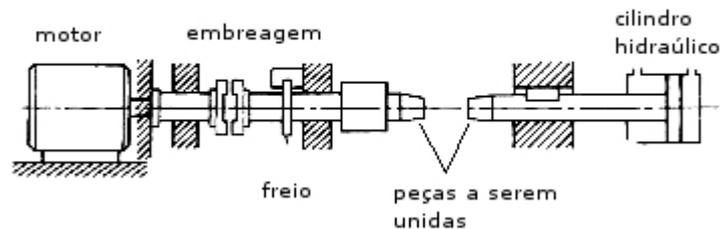


Figura 12: Máquina com acionamento contínuo

Para aços, a velocidade periférica recomendada varia de 75 a 215 m/min. Em geral, maiores velocidades correspondem a soldas de baixo aporte de energia e são usados para soldar materiais sensíveis ao calor, como aços temperáveis. A força de fricção é aplicada gradualmente para ajudar a superar o pico de torque no contato inicial. Para aços ao carbono uma pressão de fricção de aproximadamente 70 MPa na interface de contato é necessária para formar uma boa união. Depois que o motor for desacoplado da peça, é aplicada a força de forja para completar a solda. Tipicamente um valor de 140 MPa na interface de união é empregado. O calor gerado por deformação plástica é a fonte primária de calor durante a etapa de forja (2).

A Tabela 3 resume e compara as características de ambos os métodos de acionamento mais difundidos.

Outras classificações em função do movimento relativo e do acionamento são apresentadas na Figura 14.

2.2.2 Equipamentos Desenvolvidos

O conceito da máquina é dependente da aplicação, pois em função da mesma serão definidos os pré-requisitos para um projeto que consiga obter qualidade e repetibilidade nas soldas.

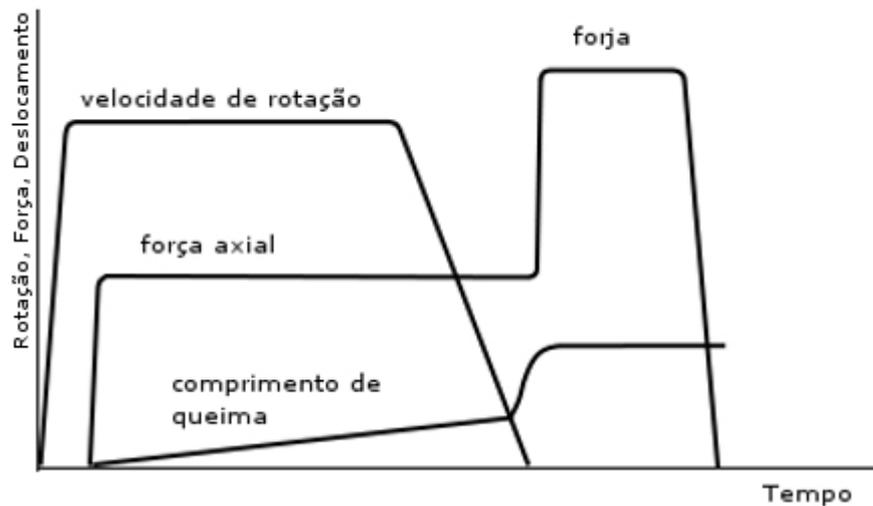


Figura 13: Ciclo de solda com acionamento contínuo

Tabela 3: Tabela comparativa entre FRW Direto e FRW Inercial

Parâmetro de Processo	FRW Direto	FRW Inercial
Parâmetros de Solda	Velocidade de rotação	Momento de inércia do volante
	Duração da rotação ou distância de queima	Velocidade de rotação
	Força axial	Força axial
Conversão da Energia em Calor	Energia constante num tempo estabelecido	Energia armazenada no volante; duração determinada pelos parâmetros de solda
Aporte de Energia	Baixo	Alto
Taxa de Geração de Calor	Baixa	Alta
Duração do Ciclo	Similar	Similar
Largura da ZAC	Larga	Estreita
Rigidez do Sistema	Menor rigidez	Maior rigidez e maiores forças nas pinças de fixação

Fonte: ASM Handbook, 1994

A Norma DIN EN ISO 15620 (11) especifica as partes geralmente encontradas numa máquina de solda por fricção e os ciclos operacionais mínimos.

A máquina deve ser equipada com um sistema de controle automático o qual, depois de fixadas as peças, desenvolverá um ciclo de solda controlado sem intervenção de um operário e incorporará:

- Início de uma sequência que traz as peças em contato a uma determinada velocidade.
- Estabelecimento e manutenção de uma força de fricção e velocidade relativa durante o ciclo de aquecimento.
- Estabelecimento e manutenção de uma força de forja durante um determinado tempo de



Figura 14: Classificação dos tipos de solda por fricção

forja ou distância de forja ou combinação de ambos para completar a solda.

Dentre os antecedentes de desenvolvimentos de máquinas de solda por fricção, dois trabalhos são de especial interesse por apresentarem as características de projetos utilizados com sucesso na técnica de solda por atrito de pinos consumíveis. Seguidamente são comentadas as principais características de ambos projetos. No trabalho do Meyers (1) é descrito o sistema de solda utilizado para realizar uma pesquisa sobre os mecanismos de união e propriedades do processo. O sistema consiste, principalmente, de quatro componentes: a unidade hidráulica, o bloco de válvulas, a cabeça de solda e o sistema de controle. O sistema foi projetado e construído como uma máquina portátil de solda por fricção de pinos para uso subaquático por uma empresa de manutenção de plataformas offshore. A Figura 16 mostra um cabeçote de solda acoplado a um veículo operado remotamente (ROV) e uma barra roscada soldada a topo por fricção.

A unidade hidráulica é acionada por um motor elétrico de 50 kW suprindo até 115 l/min a 315 bar. A pressão máxima de óleo pode ser regulada enquanto a bomba ajusta automaticamente a vazão. O sistema entrega o fluido através de mangueiras de 60 m de comprimento que conectam com o bloco de válvulas. O excessivo comprimento somado à flexibilidade das

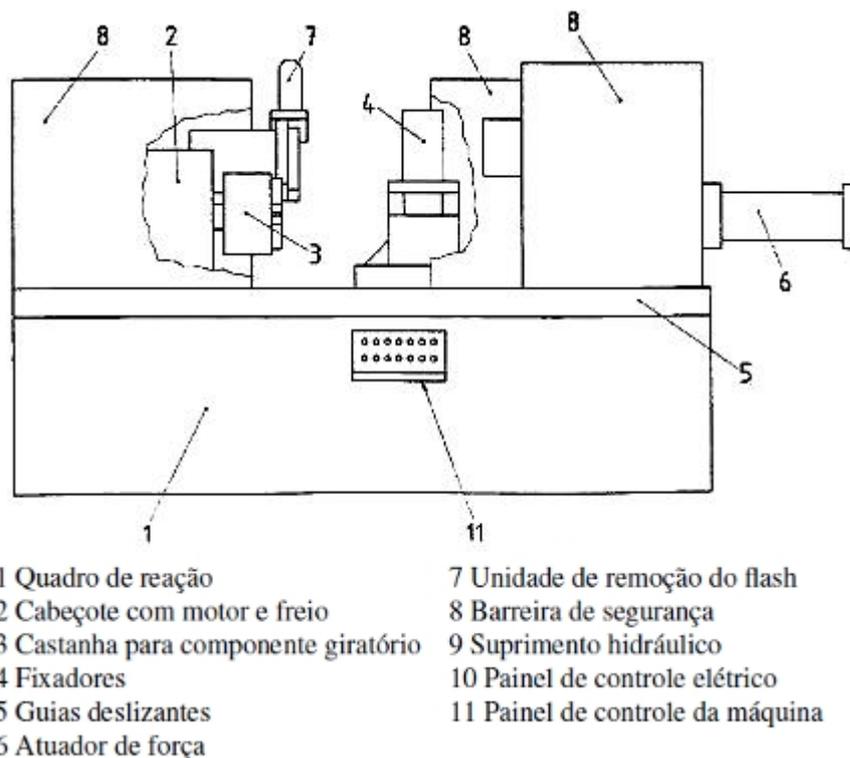


Figura 15: Componentes básicos de uma máquina de solda por fricção

mangueiras, produz um retardo na elevação de pressão quando maior potência é requerida. Este fenômeno acarreta alguns problemas, especialmente, no primeiro contato entre pino e chapa base a altas rotações quando o sistema, as vezes, estola³ devido à baixa pressão (1).

O bloco de válvulas regula a vazão e pressão fornecida pela unidade. Todas as operações da cabeçote do soldagem são conduzidas por servo válvulas proporcionais controladas eletricamente.

O cabeçote de soldagem, apresentada na Figura 17, tem aproximadamente 600 mm de comprimento e 160 mm de diâmetro. Consiste num motor de deslocamento fixo na parte superior e um pistão hidráulico dentro da parte inferior do cilindro. O pistão desloca o eixo axialmente até 50 mm e aplica a força requerida. Os consumíveis são fixados no mandril no extremo do eixo. A velocidade de rotação é monitorada com um sensor indutivo dentro do alojamento e um sensor de proximidade linear mede o movimento axial do pistão. A cabeça de solda é fixada na estrutura através do alojamento.

O sistema de controle baseado no computador recebe as informações dos sensores e faz o controle de acordo com os parâmetros de solda. Este sistema regula o processo de solda pelo comprimento de queima. A velocidade de rotação e a pressão no cilindro podem ser mudados várias vezes durante a solda, o que possibilita modificar as condições de operação durante o progresso da solda. Os parâmetros do processo são salvos como projetos pelo sistema de controle. Os mesmos podem ser definidos antes de iniciar a solda. Os parâmetros são

³Travamento devido ao torque resistente excessivo.

apresentados em tempo real durante a solda e salvos junto ao projeto. Estes gráficos podem ser impressos ou visualizados novamente, mas não tem a opção para exportar os dados registrados. Por este motivo foi desenvolvido um sistema adicional para registrar os dados de processo e dados complementares. O sistema baseia-se num computador padrão conectado a uma placa para condicionamento de sinais. O software apresenta gráficos das variáveis em tempo real para todos os sinais gerados durante a solda. Os dados são guardados e exportados para posterior análise.

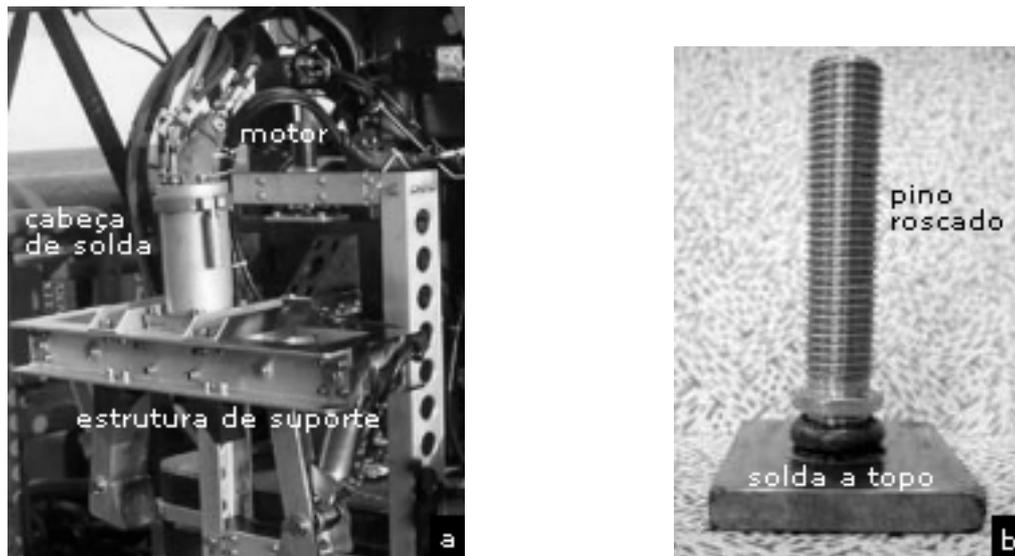


Figura 16: a) Equipamento da Proserv - Offshore para solda por fricção; b) Pino roscado, soldado por fricção a topo

Fonte: Folheto da Proserv-Offshore

Um equipamento similar foi desenvolvido no Brasil (15). A Unidade de Processamento de Pinos por Atrito, da Universidade de Uberlândia, possui um conjunto mesa de sustentação - pórtico, cabeça de reparo, unidade hidráulica e sistema de aquisição e controle. O pórtico tem a função de suportar a cabeça de reparo. Confeccionado em aço ABNT 1020 projetado para suportar uma carga vertical de até 70 kN. A mesa sustenta o pórtico e as chapas de reparo de até 500 mm de largura, as quais são fixadas mediante presilhas.

Em ambos projetos, à cabeça de reparo corresponde um conceito muito interessante. Na mesma são combinados o movimento rotacional com o deslocamento axial e são alocados os sensores de posição e velocidade de rotação, resultando num projeto compacto, como mostra a Figura 18. O movimento rotacional é transmitido por um motor hidráulico de deslocamento fixo com velocidade nominal de 8000 rpm e potência de 50 kW. O eixo é inserido numa haste vazada e é suportado por rolamentos. A haste possui movimento de translação axial e, através dos mancais, transmite esse movimento ao eixo. O cilindro foi projetado para uma pressão de 12 MPa, pressão que produziria uma carga axial de 70 kN no pino de queima. O acoplamento deslizante utilizado tem curso de 45 mm, torque nominal de 45 Nm e torque de pico de 90 Nm. A carga axial e tangencial sobre os rolamentos foi limitada para 50 kN e 10 kN, respectivamente.

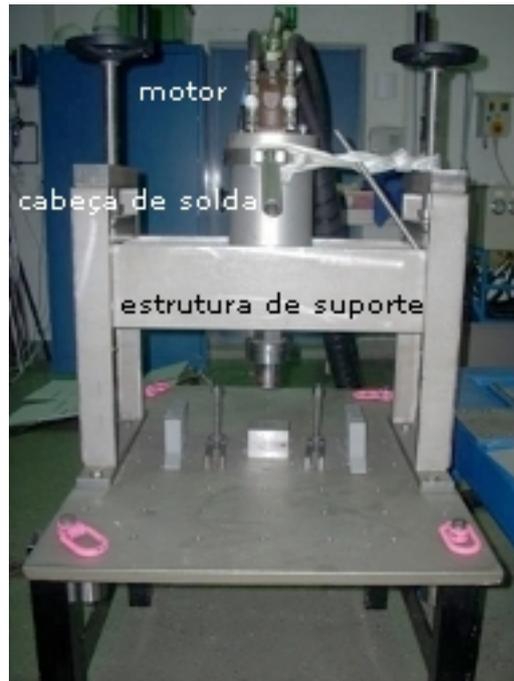


Figura 17: Equipamento do Instituto de pesquisa GKSS



Figura 18: Unidade desenvolvida na Universidade Federal de Uberlândia.
Fonte: Pires, 2007 (16).

A unidade hidráulica reúne o reservatório de óleo, as bombas, os motores, bloco de válvulas e acessórios necessários para acondicionar o fluido. O motor elétrico e bomba que impulsionam a haste tem capacidade de 1.5 kW, pressão de 12 MPa e vazão de 5 l/min, o que resulta numa velocidade de deslocamento da haste de 11 mm/s. O conjunto moto-bomba responsável por impulsionar o motor hidráulico tem potência de 75 kW, vazão de 99 l/min e pressão na ordem de 35 MPa, o que garante um torque máximo de 57 Nm. O bloco está equipado com servo válvulas proporcionais para controlar a pressão e vazão da haste e a vazão no motor. O sistema

de controle é composto, principalmente, por condicionadores de sinais, placas de controle PID⁴ e computador com placa de aquisição.

Há interesse em reproduzir soldas submersas e, para isso, uma solução é apresentada na Figura 19 obtida do trabalho de Ambroziak e Gul (17). Em este conceito a máquina inteira é colocada dentro de um contentor de líquido utilizando ganchos (ver Figura 17) e correntes para içar o equipamento.



Figura 19: Solda submersa
Fonte: Ambroziak e Gul, 2007

⁴Algoritmo de controle Proporcional - Integral - Derivativo

3 PROJETO DA MÁQUINA DE SOLDA POR FRICÇÃO

3.1 Descrição Geral

Com base nos antecedentes mencionados na seção 2.2, nos requerimentos do processo e, tratando-se de um equipamento de pesquisa, foi concebido um sistema que se adequasse à infraestrutura disponível no laboratório onde foi desenvolvido o projeto.

O sistema completo é composto de: Unidade hidráulica central, distribuidor hidráulico, bloco de válvulas, quadro de reação, base móvel e sistema de controle. A Figura 20 mostra um esquema geral do sistema.



Figura 20: Esquema do sistema de solda
Fonte: Folhetos MTS

- **Unidade hidráulica:** A unidade central, modelo 505 SilentFlo da MTS System Corporation, trabalha com até quatro bombas de deslocamento variável em paralelo entregando uma vazão máxima de 450 l/min a 210 bar de pressão. Os conjuntos motor-bomba estão alocados dentro do reservatório hidráulico possibilitando baixos níveis de ruído em operação. Os mesmos são acionados sequencialmente em função da demanda. O sistema está equipado com trocadores de calor e torres de resfriamento em circuito fechado para manter a temperatura do fluido de trabalho.
- **Distribuidor hidráulico:** É um arranjo de válvulas, filtros e acumuladores que recebe o fluido desde a unidade central e encarrega-se de derivar às diferentes estações de ensaio.

Através de válvulas solenóides, operadas pelo controlador, é possível aplicar, gradualmente, dois níveis de pressão no sistema e, também, isolar os servo-atuadores da unidade de potência durante interrupções normais ou de emergência. Os acumuladores tem a função de suavizar as flutuações de pressão e compensar os picos de demanda nas linhas de pressão e retorno. O distribuidor disponibiliza pressão piloto para o circuito de controle das servo-válvulas sem aplicar pressão nos atuadores.

- **Bloco de válvulas:** Sobre o bloco são montadas as válvulas que direcionam o fluido para o acionamento do motor, o movimento do cilindro e o resfriamento do motor. O bloco tem disponível tomadas de pressão para registrar a pressão diferencial na entrada e saída do motor e do cilindro. A Figura 21 mostra uma imagem do bloco com as mangueiras conectadas. As duas tampas, na parte superior, protegem o espaço reservado para as válvulas durante a montagem ou manutenção.

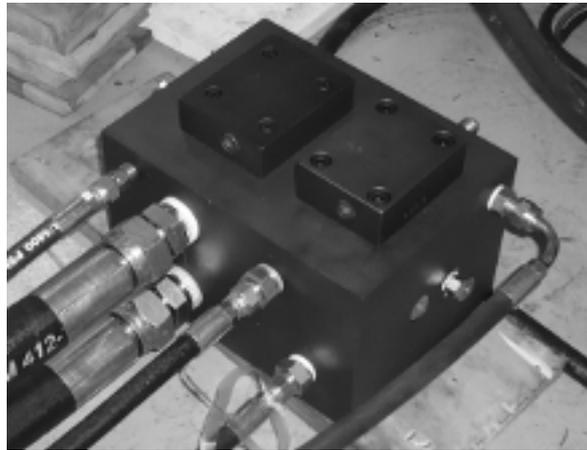


Figura 21: Bloco de válvulas

- **Quadro de reação:** É composto por quatro elementos descritos a seguir: Mesa base, duas colunas e fechamento superior. A função principal do quadro é estrutural, este deve suportar as forças de reação que se originam na aplicação das cargas axiais e de torção nos elementos sendo soldados. A rigidez foi uma premissa de projeto que permite manter a referência dos instrumentos de medição e o alinhamento inicial. O quadro também tem a função de suportar componentes fundamentais, como o cilindro hidráulico, base de fixação e acessórios do equipamento. As colunas são utilizadas de guia para o deslocamento da base do motor.
- **Base do motor:** Este dispositivo suporta o motor hidráulico e transmite o torque de reação, através de buchas poliméricas, para as colunas. A base do motor desloca-se verticalmente utilizando as colunas como guia e descarregando a força axial do cilindro na interface de solda mediante uma *gaiola*, que aliás protege a integridade do motor hidráulico. Na região inferior da base está fixada a caixa de rolamentos. Nesta são montados

um par de rolamentos cônicos em uma disposição face a face, mostrado na Figura 22, e o eixo que transmite o giro do motor para a pinça de fixação do consumível. Os rolamentos encontram-se em banho de óleo o qual é mantido em circulação entre a caixa e um reservatório pelo efeito centrífugo dos rolamentos cônicos. Este fenômeno permite a renovação constante do óleo dos rolamentos sem a utilização de bomba externa de lubrificação.

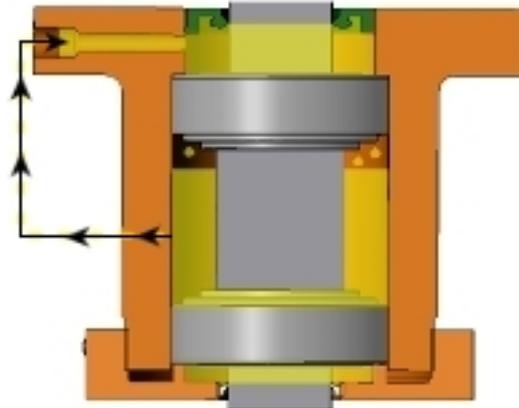


Figura 22: Esquema da caixa de rolamentos

- Sistema de controle:** Composto por um controlador modelo FlexTest GT da MTS de 4 canais e um computador dedicado que permite a programação de procedimentos, calibração de sensores, visualização e registro de parâmetros de controle da estação de trabalho. Cada canal tem duas entradas e uma saída. As entradas correspondem sinais de realimentação de controle. O sistema de solda trabalha com três sinais de entrada, a seguir: 1) Velocidade de rotação: utiliza-se um sensor indutivo próximo ao acoplamento junto com um condicionador externo, que geram uma voltagem proporcional às revoluções por minuto do motor; 2) Deslocamento: um sensor resistivo fixado entre o quadro de reação e a base do motor, produzem um sinal proporcional à posição absoluta; 3) Força: uma célula de força encontra-se entre a haste do cilindro e a base do motor o que permite controlar a pressão na interface de união. São necessários dois sinais de saída: 1) Controle de velocidade: uma servo válvula proporcional é comandada pelo controlador para manter o valor desejado das rpm do motor e desacelerar na etapa de frenagem; 2) Controle de força ou deslocamento: uma servo válvula proporcional de menor porte deve controlar o deslocamento ou força exercida pelo cilindro hidráulico para permitir o posicionamento dos componentes na montagem e aplicar carga axial durante o processo de soldagem. Com esta configuração é necessário alocar dois canais do controlador.

A Figura 23 mostra o conceito da máquina de SFPC onde são identificáveis algumas das partes componentes acima descritas. Para vincular o pino consumível ao eixo giratório é usado uma pinça tipo porta-ferramenta de fresa. Este acessório facilita a montagem rápida de consumíveis sem necessidade de ranhuras ou chavetas para transmissão de torque. No suporte dos

corpos de prova foi implementado uma bacia de aço inoxidável que permite a realização de soldas submersas para pesquisar a influência do ambiente nas propriedades da união e possíveis estratégias para superar as dificuldades que este possa impor.

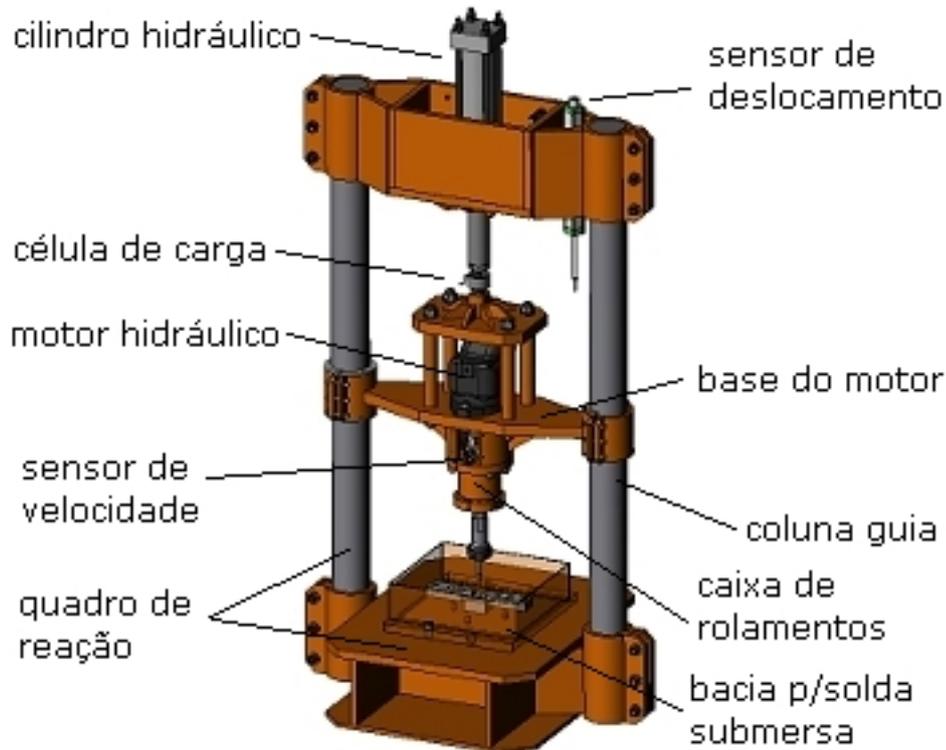


Figura 23: Projeto da máquina de solda por fricção

3.2 Circuito de Controle Hidráulico

A máquina de solda é controlada por dois sistemas hidráulicos independentes porém coordenados. Por um lado temos o sistema que controla a velocidade de giro do motor e, por outro, o da força/deslocamento do cilindro. Um diagrama de blocos, aplicável a ambos os atuadores, relaciona os diversos componentes intervenientes no sistema de controle em malha fechada, (ver Figura 24).

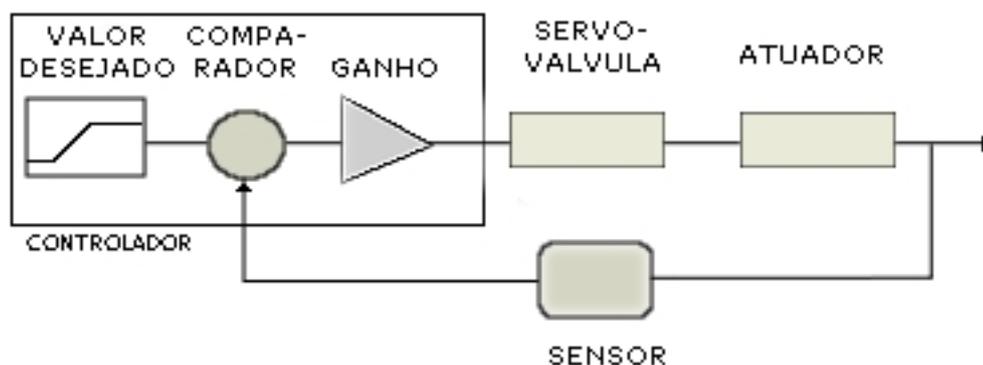


Figura 24: Esquema básico de controle em malha fechada

O valor desejado é um sinal gerado pelo controlador em função da programação da sequência de soldagem. O comparador verifica a diferença entre o valor desejado e o valor real, enviado pelo sensor de realimentação, gerando um sinal de erro. A este sinal é aplicada a lei de controle com os correspondentes ganhos, que são dependentes das características do sistema, obtendo-se o sinal de controle. A servoválvula recebe este sinal elétrico e transforma-o em uma variação proporcional do comando hidráulico. Por sua vez, o atuador opera na direção e na velocidade próximas ao do valor desejado, o sensor capta a variação realimentando a malha de controle.

As servoválvulas tem a capacidade de regular dinamicamente a vazão de óleo de uma maneira proporcional. Quando uma corrente i é aplicada no motor torque, o defletor rota ligeiramente no plano da Figura 25 aumentando a resistência ao fluxo de óleo num dos bocais. Isto cria uma diferença de pressão nos condutos de comando que desloca o carretel na direção contrária. Com a ponta do defletor vinculada ao carretel, origina-se uma força restitutiva que equilibra o deslocamento com o sinal de entrada, isto é, comporta-se como uma realimentação mecânica. Desta maneira o deslocamento do carretel é proporcional ao sinal de comando i . Ao se mover o carretel comunica a passagem de pressão de óleo **P** com a linha **A** e a passagem **B** com tanque **T**, propiciando o movimento numa das direções.

A servoválvula apresentada na Figura 25 é utilizada para comandar o cilindro hidráulico.

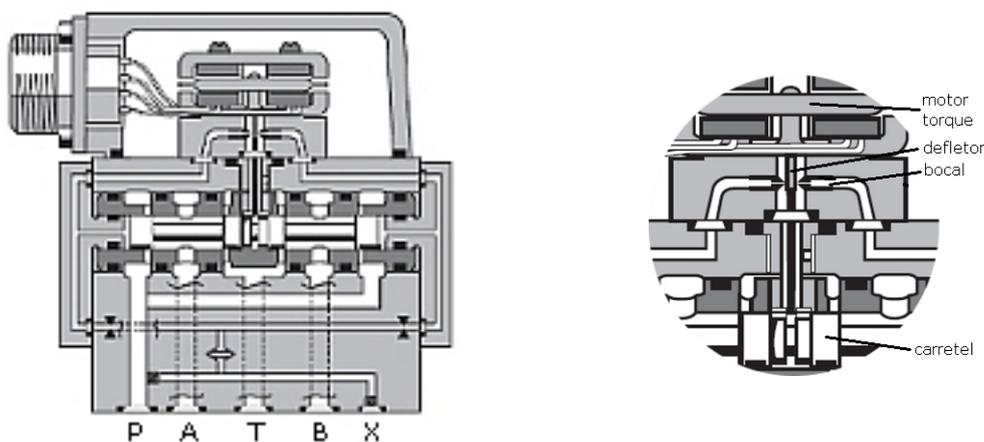


Figura 25: Esquema da servoválvula MOOG - G761

Fonte: Catálogo MOOG (18)

A outra válvula, utilizada para controlar a velocidade de giro do motor, funciona sob um princípio similar, porém tem algumas diferenças importantes. O modelo D661 da Moog implementa o sistema jato-receptor. O defletor flexível é substituído por um jato de óleo direcionado pelo motor torque na direção de receptores que se comunicam com os condutos de controle do carretel. Por sua vez, a posição do mesmo é continuamente realimentada mediante eletrônica embarcada (ver Figura 26). Consegue-se uma resposta proporcional à corrente de entrada, com excelente comportamento dinâmico e maior tolerância às impurezas e contaminantes presentes no fluido. Como medida de segurança, durante a reposição do consumível, um sinal de

habilitação a disposição do operador deve ser ativado para permitir o acionamento do motor.

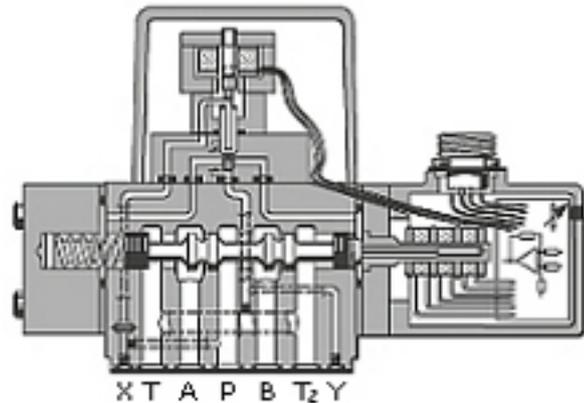


Figura 26: Esquema da servoválvula MOOG D661 com sistema jato-receptor
Fonte: Catálogo MOOG (19)

O cilindro hidráulico da Figura 28 tem capacidade próxima de 50 kN a 160 bar e 220 mm de curso. Um regulador de pressão é implementado no bloco de válvulas para limitar a pressão da linha de comando do cilindro e proteger a célula de força ante possíveis sobrecargas. O motor hidráulico de pistões axiais e deslocamento fixo (27) atinge uma rotação contínua máxima de 8100 rpm com uma vazão de 153 l/min. Para manter a temperatura dentro do limite de operação o catálogo do fabricante (20) recomenda circular uma pequena vazão de óleo hidráulico através da armadura do motor. Este requisito é atendido mediante a incorporação de uma derivação adicional no bloco de válvulas e um regulador tipo válvula de agulha.

Com o objetivo de aumentar a estabilidade na malha de controle do motor, incrementa-se o efeito de amortecimento hidráulico adicionando uma passagem estrangulada entre a linha de pressão e de retorno (21).



Figura 27: Motor hidráulico Parker



Figura 28: Cilindro hidráulico

O desenvolvimento da máquina de solda foi auxiliado pela utilização de ferramentas de desenho computacional. Diferentes conceitos podem ser avaliados e descartados antes da fabricação dos componentes. O desenho assistido por computador facilita a planificação da montagem,

consideração dos espaços para manipulação das ferramentas e a geração de planos para fabricação. São apresentadas, lado a lado, as Figuras 29 e 30 para destacar a fidelidade do desenho renderizado da última versão do projeto com o sistema real montado e pronto para ser testado nas instalações do laboratório.



Figura 29: Desenho computacional



Figura 30: Estação de solda

A placa característica (tabela 4) resume a capacidade nominal dos componentes principais do equipamento, assim como características dimensionais. A potência dispensada vai depender das condições de funcionamento e da combinação de variáveis utilizadas durante o processo.

Tabela 4: Placa de características

Acionamento	Direto
Força Axial	± 50 kN
Curso	220 mm
Velocidade de Rotação	0 ~ 8.100 rpm
Torque @ 200 bar	50 Nm
Potência	32 kW
Dimensões	790 x 1554 x 600 mm

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para realizar os testes de solda por fricção são utilizados dois materiais dissimilares. Os blocos de base são usinados em aço estrutural soldável BS 4360. A especificação da composição química mostra-se na Tabela 5. Estes aços aplicam-se na construção de embarcações, estruturas offshore, equipamento fora de estrada e vasos de pressão.

Tabela 5: Especificação química do BS 4360

Especificação	Grau	C max	Si	Mn max	P max	S	Nb
BS 4360	43D	0.16	0.50	1.50	0.04	0.04	0.003-0.10

Fonte: British Standard Specification,(22)

Quanto aos pinos consumíveis são preparados em SAE 4140. A especificação química deste aço ao Cromo-Molibdênio mostra-se na Tabela 6. Um texto de referência nos tópicos de solda (9) recomenda que este material, por vezes classificado como *HTLA*¹ e outras como *HSLA*², requer, devido a dureza, ser soldado numa condição de recozido, seguido por tratamento térmico para compensar os efeitos da formação de Martensita e evitar trincas a frio.

Tabela 6: Especificação química do AISI/SAE 4140

Especificação	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SAE 4140	0.38-0.43	0.15-0.35	0.75-1.00	.035	0.04	0.8-1.1	0.15-0.25

Fonte:ASM Handbook

Para estimar a soldabilidade destes aços utiliza-se o conceito do carbono equivalente explicado no capítulo 2.

4.2 Geometria dos Componentes

Para este trabalho adotam-se geometrias com base nos resultados de pesquisas anteriores. Investigações de parâmetros, para o processo SFPC, tiveram em conta a geometria do furo e do pino como variável de estudo (1; 16); demonstrando que a geometria tem grande influência no escoamento do material plastificado e exerce uma função preponderante na obtenção de reparos livres de defeitos. Dá-se ênfase no arredondamento do fundo do furo como característica

¹HTLA (Baixa Liga Tratável Termicamente)

²HSLA (Alta Resistência Baixa Liga)

favorável ao total preenchimento do reparo. Especificamente, adequa-se em escala a combinação de geometrias destacados nas conclusões da referência (16), como apresentando o melhor desempenho de quatro combinações avaliadas.

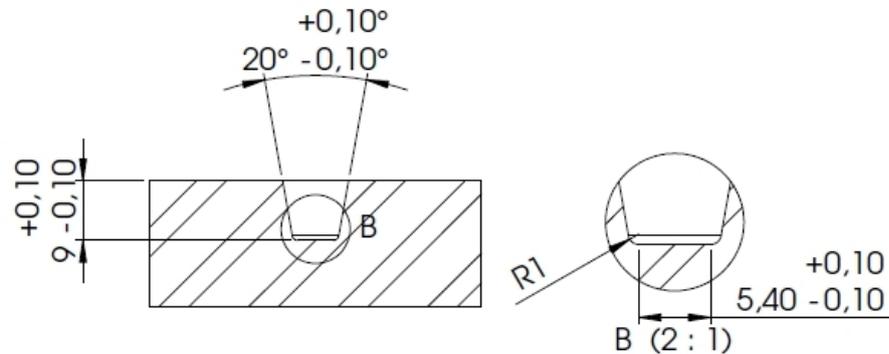


Figura 31: Geometria do Furo no Bloco

As dimensões que correspondem ao bloco são: 50 mm x 50 mm x 25 mm de espessura sendo que o furo, com cotas mostradas na Figura 31, sendo realizado no centro da face maior. O bloco é fixado à base por pinças de ajuste rápido e centralizado manualmente. Para solda submersa, os blocos são posicionados dentro de uma bacia de aço inox.

Os pinos são barras cilíndricas com 10 mm de diâmetro e, aproximadamente, 100 mm de comprimento. A forma da ponta é apresentada na Figura 32.

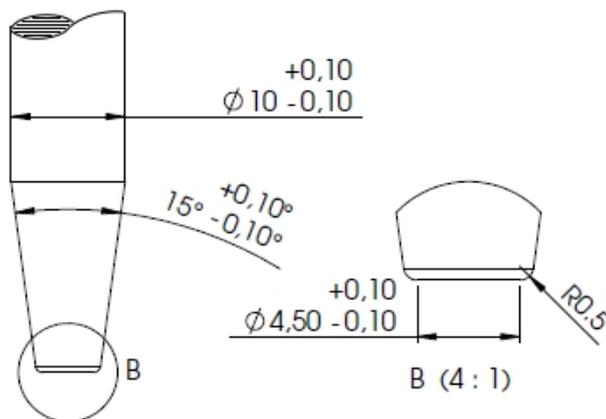


Figura 32: Geometria da Ponta do Pino

O desenho da Figura 33 esquematiza a seção do pino centralizado, em contato com o fundo do furo. Observa-se a região de contato inicial, assim como a folga existente entre o pino e o bloco. Esta diferença de diâmetro não pode ser pequena ao ponto de produzir travamento por efeito de cunha. Por outro lado, também não pode ser ampla demais, pois o material escoaria continuamente fazendo com que o plano de fricção permanecesse estacionário resultando num processo diferente à SFPC. A diferença de volume deve ser compensada pelo deslocamento do consumível.

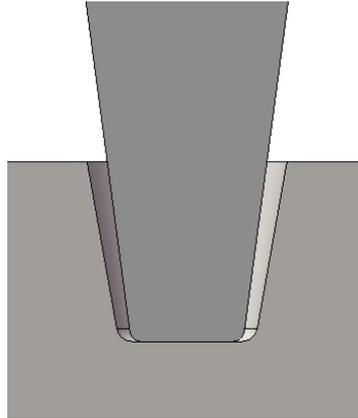


Figura 33: Seção pino - bloco

4.3 Procedimento de Soldagem

A etapa prévia ao processo de soldagem é tão importante quanto o processo em si mesmo. Consiste na limpeza e fixação dos corpos de prova de maneira a deixá-los concêntricos. Em seguida, o consumível preso na pinça é posicionado, no *modo manual*, dentro do furo com uma pré-carga de 500 N. Nesta condição o sensor de deslocamento é zerado, ou seja, para toda análise no capítulo 5 o deslocamento zero é referido a posição correspondente a ponta do pino em contato com o fundo do furo, ver Figura 33. Em seguida o pino é afastado alguns milímetros e está pronto para iniciar o processo.

A implementação de sistemas de controle por computador, nos processos de fabricação e reparo, geram um grande impacto, tanto na qualidade, velocidade e repetibilidade, como nos custos das soldas. A Figura 34 é uma captura da tela do controlador mostrando a sequência do programa de soldagem, descrito passo a passo seguidamente.

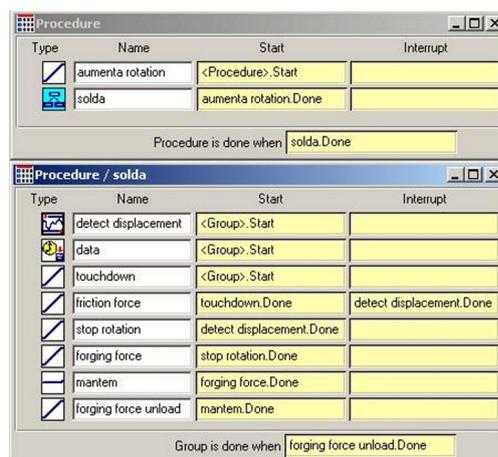


Figura 34: Programa de Procedimento de Soldagem

1. **umenta rotação:** O primeiro passo que o controlador realiza ao receber a ordem de INICIO, consiste no aumento da velocidade de giro do motor até o valor programado com a taxa de velocidade especificada.

2. **solda**: Verifica que a velocidade programada foi alcançada e ativa o sub-programa **solda**, dentro do qual são imediatamente iniciados os três passos seguintes.
3. **detect displacement**: O processo é controlado por deslocamento prescrito. Quando o sistema detectar que o deslocamento real coincide com o programado, gera um sinal que pode ser utilizado como *gatilho* para acionar uma sequência do programa.
4. **data**: Este passo inicia o registro de dados para pós-processamento.
5. **touchdown**: Juntamente inicia o deslocamento vertical descendente, controlado por força. Utiliza-se uma taxa de carregamento baixa para suavizar o contato inicial.
6. **friction force**: Quando o passo anterior atinge o valor estabelecido é ativado o controle de carga de fricção que aumenta rapidamente o carregamento e mantém a pressão sobre o consumível. Este processo pode ser interrompido pelo detetor de deslocamento.
7. **stop rotation**: É ativado quando o detetor de deslocamento envia o sinal. O motor é desacelerado bruscamente até parar a rotação.
8. **forging force**: Com o motor bloqueado, aplica-se o carregamento axial de forja, geralmente maior que o carregamento de fricção.
9. **mantem**: Alcançado o valor de forja, tem a função de manter o carregamento por um tempo determinado.
10. **forging force unload**: Retira o carregamento axial do componente soldado. Fim do processo.

Na Tabela 7 listam-se os valores configurados para cada solda. Os corpos de prova (CP) são designados pelo código ROXX, “Run Order” mais um número sequencial de dois dígitos. O detector de deslocamento é ajustado em 4 mm e o carregamento no contato inicial em 300 N de compressão. A taxa de aquisição é configurada em 100 Hz, isto é, um dado a cada 0.01 s para cada canal de registro.

Os parâmetros de processo são escolhidos em torno de valores publicados para solda por fricção, dentro dos limites do equipamento e onde espera-se que o motor não venha a estolar. A distribuição dos carregamentos corresponde ao primeiro bloco de uma matriz de projeto de experimento tipo central composto. É o mais popular dentre as várias classes de projetos para metodologia de superfície de resposta, principalmente, porque contempla a experimentação sequencial. Consiste em dois níveis para cada variável controlada mais um nível central. As combinações de carregamentos podem ser representadas num gráfico de três eixos por um cubo, quais vértices e ponto central indicam a combinação das variáveis do processo, ver Figura 35. Esta distribuição visa facilitar a determinação da influência significativa das variáveis controladas numa variável de resposta quantificada.

Tabela 7: Programação de parâmetros para os testes

CP	Velocidade, rpm	Força, N	Forja, N
RO01	5500	12000	24000
RO02	4000	15000	30500
RO03	7000	9000	30500
RO04	4000	9000	17500
RO05	5500	12000	24000
RO06	7000	9000	17500
RO07	7000	15000	17500
RO08	4000	15000	17500
RO09	5500	12000	24000
RO10	4000	9000	30500
RO11	7000	15000	30500
RO12	5500	12000	24000

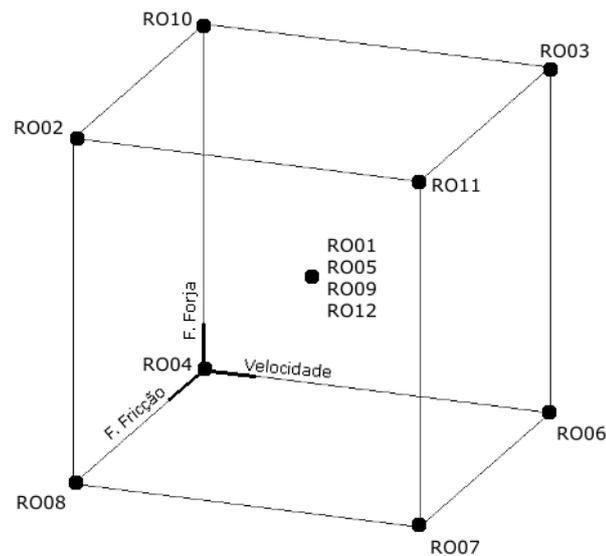


Figura 35: Representação gráfica da matriz de teste

4.4 Testes Preliminares

Antes de completar a matriz de ensaios, foram realizados vários testes que serviram para ajustar os ganhos do controlador assim como fazer uma avaliação geral da máquina de solda e os dispositivos acessórios. Estes testes foram realizados em blocos de chapas de aço ASTM A36 e pinos de aço ao carbono SAE 1020. Alguns dos corpos de prova com a configuração apropriada para o processo de SFPC; outros, sem preparação especial, soldados diretamente a topo.

4.5 Avaliação Visual

Após ter realizado as soldas, os corpos de prova são cortados por eletroerosão a fio na seção transversal, como mostrado na Figura 36.

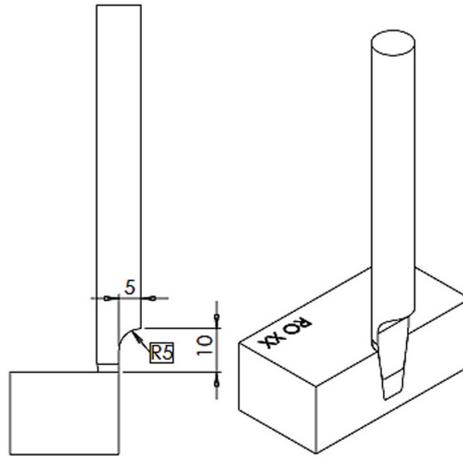


Figura 36: Corte por eletroerosão a fio dos CPs.

Desta maneira, é possível aproveitar um dos lados dos corpos de prova para obtenção da informação qualitativa do preenchimento do furo, união na interface e extensão da ZAC. Enquanto que a outra metade é reservada para pesquisas futuras visando quantificar alguma propriedade mecânica mediante ensaio destrutivo.

As superfícies a serem analisadas são sequencialmente lixadas utilizando granulometria crescente (220, 320, 400 e 600). Em seguida, as amostras são atacadas com solução de Nital 4 %, durante 10 a 15 s.

Os resultados dos procedimentos descritos neste capítulo são apresentados e discutidos no capítulo 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos testes preliminares, da execução da matriz experimental e avaliação das macrografias.

5.1 Testes Preliminares

Testes prévios aos previstos na matriz experimental do capítulo 4 foram realizados com o objetivo de:

- Avaliar o desempenho dos componentes da máquina.
- Ajustar os parâmetros de controle.
- Verificar a dificuldade de obtenção da junta soldada.

Atendendo o primeiro item, foi verificado o aquecimento da caixa de rolamentos. Utilizando um termopar colado à caixa de rolamentos, observa-se periodicamente o valor de temperatura. Após 5 minutos girando a 2000 rpm e sem carregamento atingiu o equilíbrio aos 51 °C o que foi considerado adequado. Girando acima de 6500 rpm aproximadamente, verifica-se a circulação de óleo lubrificante para o circuito externo comprovando o *efeito bomba* dos rolamentos cónicos.

Foi modificado o sistema de refrigeração do motor hidráulico. Originalmente, um orifício calibrado derivava o óleo da linha de pressão (a jusante da servoválvula) para circulação através da carcaça do motor. Esta configuração resultava numa vazão de refrigeração dependente da pressão na linha, ou seja, da carga no motor. Agora, uma válvula de agulha instalada a montante da servoválvula e depois de uma reguladora de pressão envia o óleo para o lavado; independente da carga e do acionamento da servoválvula. As curvas da Figura 37 mostram os registros de elevação de temperatura na carcaça do motor em função do tempo e da velocidade de rotação, sem carga, com temperatura do óleo a 44 °C e fixada a posição de abertura da válvula reguladora de fluxo de lavagem. A temperatura do motor hidráulico é um fator a ser observado, pois deve ser mantido abaixo dos 90 °C para preservar a vida útil das vedações. A execução das soldas demora menos de 20 segundos e o funcionamento do equipamento não é contínuo, permitindo alguns minutos de resfriamento enquanto o próximo par pino-bloco é posicionado para o teste seguinte. Com a modificação, o fluido hidráulico continua circulando através da carcaça do motor resfriando-o mesmo com o motor bloqueado.

As buchas guias de deslizamento tem comportamento adequado, resistindo ao momento de giro e permitindo o deslocamento linear. Contudo, o aperto dos parafusos do suporte das buchas guias gera um compromisso entre rigidez torsional e atrito no sentido do deslizamento.

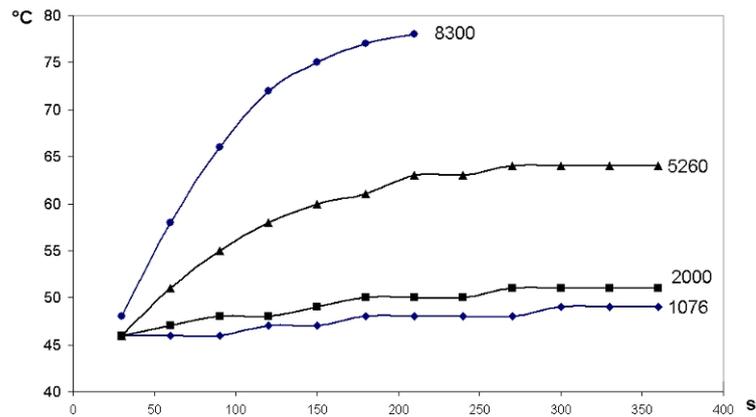


Figura 37: Curvas de aquecimento do motor em função da rpm

Esta situação pode ser melhorada substituindo o material das buchas guia por outro de menor coeficiente de atrito com o material das colunas.

As pinças utilizadas para fixar os pinos consumíveis apresentaram capacidade suficiente para evitar o escorregamento dos pinos quando submetidos a fricção; não foram observadas marcas de deslizamento na região de fixação do pino. Também o sistema de fixação do bloco base é adequado para resistir às reações durante o processo. O sistema de fixação pino-bloco é versátil, pois acomoda pinos e blocos de várias geometrias num procedimento de montagem rápido e confiável.

Inicialmente houveram dificuldades que impediam a conclusão do processo. Situações como travamento do motor, instabilidade no controle de força (ver Figura 38) e desempenho deficiente do controle de velocidade do motor foram corrigidos adicionando filtros de sinal e ajustando os ganhos do controlador. A origem deste tipo de instabilidade corresponde a correções excessivas do sistema que tendem a ocasionar oscilações de amplitude constante ou crescente com o tempo.

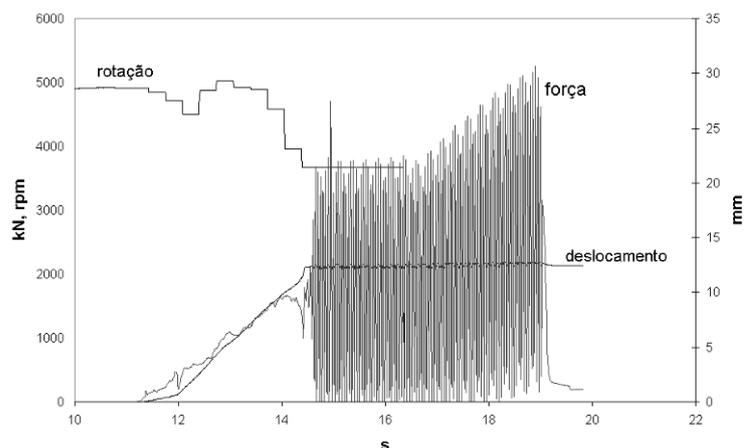


Figura 38: Instabilidade no controle de força

Os parâmetros de controle foram ajustados realizando sucessivos testes até obter uma resposta satisfatória. Num trabalho futuro pode-se desenvolver um modelo da malha de controle do equipamento para quantificar o desempenho dinâmico e ajustar os ganhos por procedimentos matemáticos. Vários ensaios foram conduzidos utilizando tanto o procedimento de SFPC como de solda por fricção a topo, uma estratégia que dispensa usinagem na preparação dos corpos de prova e tem comportamento equivalente desde o ponto de vista do equipamento. A imagem da Figura 39 mostra um bloco sobre o qual foram realizadas sucessivas soldas a topo, removendo o pino com serra manual e soldando logo ao lado.

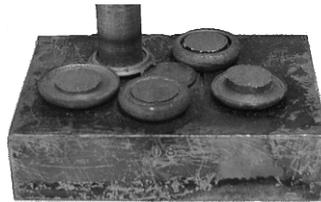


Figura 39: Soldas a topo sobre bloco

Sem se referir a qualidade da solda, durante o estágio de testes preliminares, foi verificada a relativa facilidade de se unir efetivamente ambas as partes, bloco e pino de aço, inclusive num teste de solda submersa. As fotografias da Figura 40 mostram a preparação da bacia com água de torneira, o nível d'água está acima da aresta superior do bloco; à direita, o aspecto do pino recém soldado.

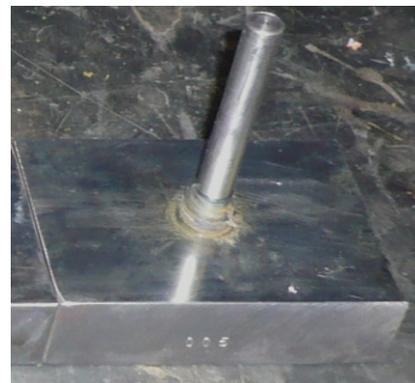


Figura 40: Solda submersa

5.2 Composição Química e Soldabilidade

As composições químicas destes materiais foram determinadas através de espectrometria de emissão óptica, modelo SPECTROLAB, sendo realizadas três queimas em cada uma das peças, a fim de obter uma média aritmética como resultado final. Os resultados das medições são ordenados nas Tabelas 8 e 9, para o material do bloco e do pino, respectivamente.

A partir da composição química calcula-se o valor do CE para cada um dos materiais anteriormente mencionados e que fazem parte do processo de soldagem.

Tabela 8: Composição química do material do bloco - BS4360

Elemento Químico	C	Si	Mn	Ni	S	Cr	P
% em massa	0.15	0.39	1.40	0.025	0.008	0.026	0.019

Fonte: Belato, (23)

Tabela 9: Composição química do material do pino - AISI 4140

Elemento Químico	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	P	S
% em massa	0.37	0.27	0.88	0.040	0.15	0.96	0.019	0.005

Fonte: Belato, (23)

$$CE_{(BS\ 4360)} = 0.15\%C + \frac{0.026\%Cr}{5} + \frac{1.4\%Mn}{6} + \frac{0.39\%Si + 0.025\%Ni}{15} = 0.42\% \quad (2)$$

$$CE_{(4140)} = 0.37\%C + \frac{0.96\%Cr + 0.15\%Mo}{5} + \frac{0.88\%Mn}{6} + \frac{0.27\%Si}{15} = 0.76\% \quad (3)$$

Apesar dos critérios de soldabilidade para outros métodos de soldagem nem sempre serem válidos para solda por fricção (11), os altos valores de CE obtidos prevêm uma certa dificuldade na obtenção de soldas livre de defeitos durante os testes.

Com base na análise metalográfica, as microestruturas do metal base e do metal de adição, revelam-se similares, constituídas por ferrita, perlita fina e perlita grossa. No material do pino há maior quantidade de perlita, em função do maior teor de carbono. As microestruturas apresentam textura alinhada devido à presença de perlita bandeada, característica do processo de laminação (23).

5.3 Aquisição de Dados

Uma das principais características do equipamento é a capacidade de registrar e apresentar as variáveis em tempo real durante a execução da solda. Montando-se um gráfico com estes registros, obtém-se uma série de curvas como apresentadas na Figura 41. Observa-se a evolução da velocidade de rotação, a força axial aplicada e o deslocamento do pino em função do tempo.

Destaca-se a capacidade de registrar as variáveis do processo de cada solda com alta taxa de aquisição (100 Hz), capaz de detectar pequenas variações importantes para a pós-análise e correlação com a caracterização dos resultados.

Para o corpo de prova RO06 foi estabelecido, conforme a matriz experimental da Tabela 7 do capítulo 4, os seguintes parâmetros de soldagem: 7000 rpm, 9 kN e 17.5 kN. A sequência do programa (ver Figura 34, página 45) pode ser interpretada através do acompanhamento simultâneo das curvas da Figura 41. Como pode ser lido na escala da esquerda, as revoluções por

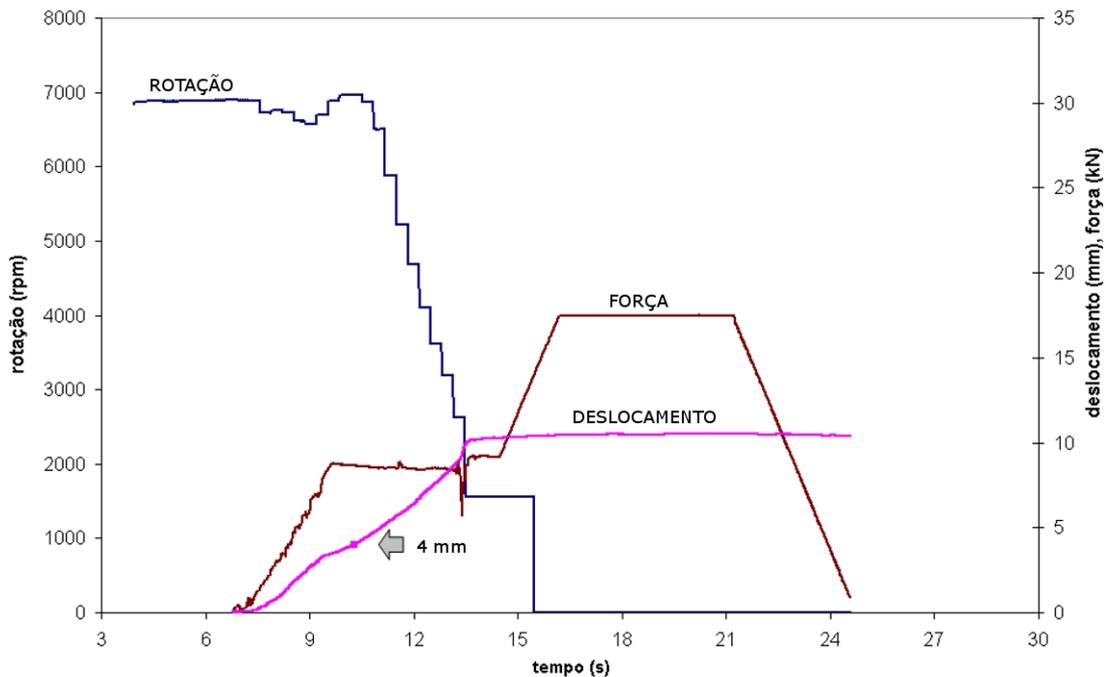


Figura 41: Registros do teste RO06

minuto estão no valor programado quando a aquisição começa, inicia a aplicação de carga axial, a baixa taxa, para lograr uma aproximação suave até os 300 N de compressão, imediatamente, aumenta a taxa de carregamento para atingir os 9 kN, lidos na escala à direita. A seta indica o valor de programação do *gatilho*, como explicado na seção 4.3, que dá início a parada do motor e sequência do programa.

Para o resto dos ensaios foram obtidos gráficos com aspecto similar ao apresentado na Figura 41, foram graficados os processos correspondentes aos corpos de prova RO03 (ver Figura 42) e RO09 (ver Figura 43).

Algumas vezes, ocorre que a força de fricção não alcança o valor desejado para o teste, pois antes, já tem atingido o deslocamento programado.

Neste trabalho, o valor de deslocamento serve unicamente para estabelecer um critério de procedimento. Alcançado este, o deslocamento continua a aumentar, consequência da carga axial presente e relativa baixa taxa de frenagem. Para respeitar o valor de deslocamento o motor deveria parar instantaneamente.

Ao analisar em detalhe cada uma das curvas consegue-se tanto avaliar o processo em si como realizar um diagnóstico de desempenho do sistema. Em referência a última afirmação e começando com a curva de rotação, observa-se uma oscilação da velocidade em torno do valor de referência. Deve-se ao aumento de torque resistivo (ver Figura 2, página 17) na interface de contato perturbando o controle de velocidade que, logo, deve ser compensado. Avançando até a porção de frenagem, chama a atenção a desaceleração em degraus. Ocorre que a elevada taxa de aquisição do controlador consegue registrar o tempo de resposta do condicionador de pulsos (ver capítulo 3). Um condicionador com menor tempo de resposta deve ser implementado para

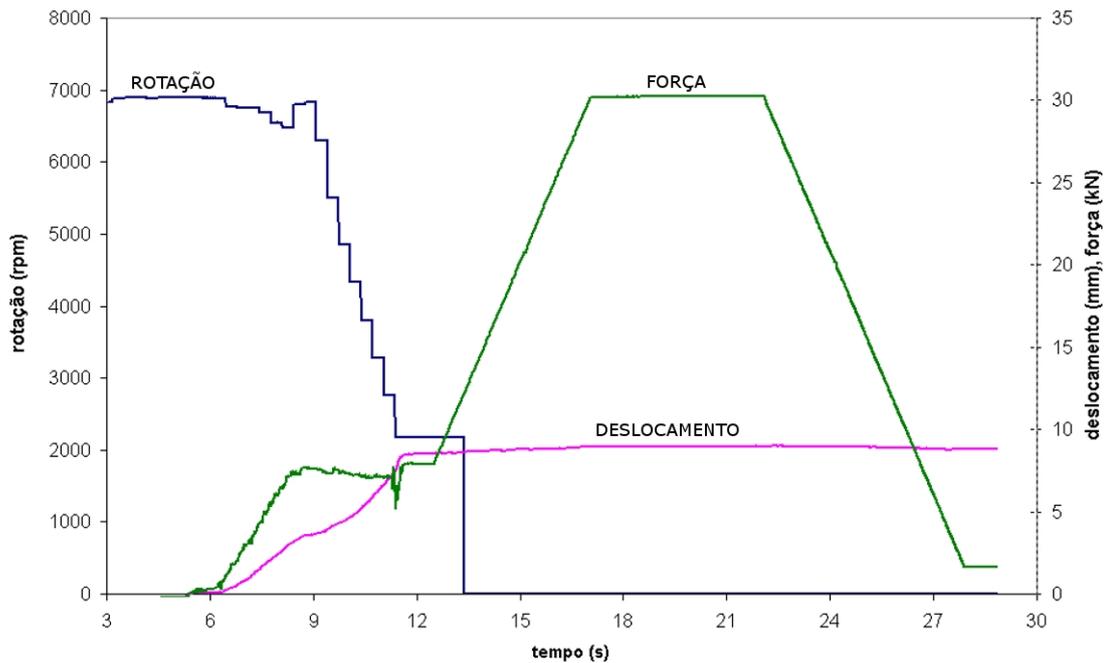


Figura 42: Registros do teste RO03

melhorar o desempenho da malha de controle de velocidade. Os dados de força axial também apresentam uma particularidade que diz respeito à máquina. Em todos os testes registra-se uma queda brusca de força, em forma de vale estreito, que, rapidamente, é restabelecida. Este fenômeno ainda não foi explicado e merece a realização de testes específicos para compreensão e correção desta deficiência. Duas hipóteses são: a) Há uma frequência de ressonância na faixa de operação do equipamento; b) O segundo pico de torque no momento de desaceleração (ver Figura 2, página 17), se reflete na célula de carga, pois esta não tem uma rótula que possa isolar momentos fletores ou torsionais. O conhecimento da evolução do torque durante o processo de solda brinda informação relevante para o pesquisador, pois esta variável define os limites das fases do processo, como foi apresentado na seção 2.1.2. Para tal fim, pode-se instalar uma mesa instrumentada que registre diretamente o torque de reação na fixação da chapa base.

A rotação do motor adiciona ruído no sinal de força, pois quando o motor encontra-se bloqueado durante a aplicação do carregamento de forja, a curva não apresenta as irregularidades observadas na porção da fase de fricção.

Graficando os registros dos ensaios tem-se informação do processo de solda e pode-se inferir particularidades no comportamento do sistema mecânico. Os testes permitiram identificar algumas deficiências do equipamento que podem ser corrigidas implementando modificações menores. Especificamente, substituir o condicionador de sinal de rotação, por outro, de menor tempo de resposta e trocar o material das buchas guias, por outro, de menor coeficiente de atrito com o material da coluna.

A sequência mostrada na Figura 44 captura as imagens do processo de SFPC: quadro 1, aproximação do consumível em rotação; quadro 2, no contato inicial algumas faíscas são visí-

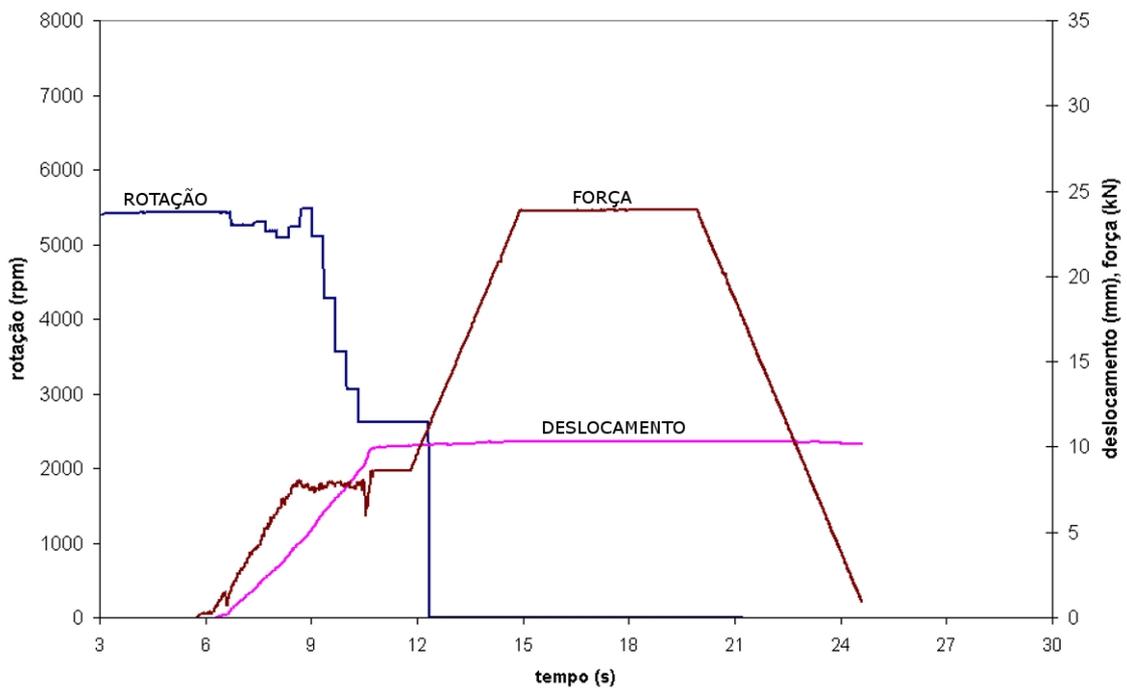


Figura 43: Registros do teste RO09

veis; quadro 3, observa-se o material plastificado na forma de rebarba incandescente; quadro 4, motor bloqueado e aplicação da força de recalque.

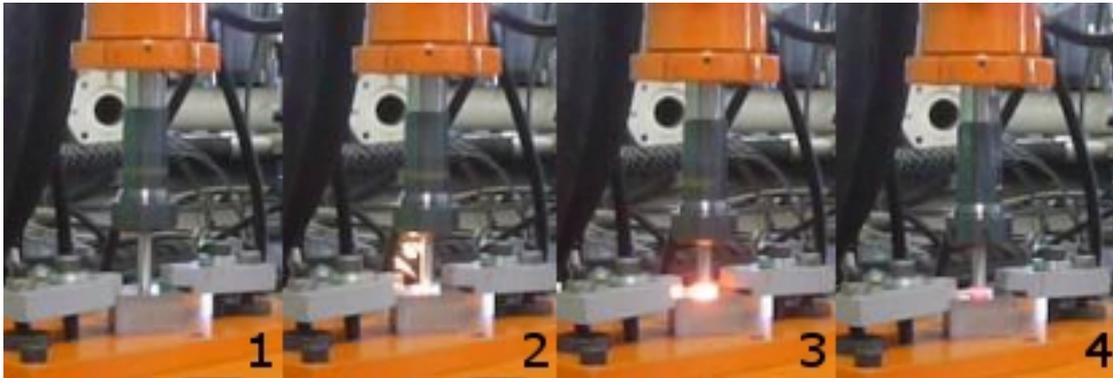


Figura 44: Sequência do processo

Numa avaliação subjetiva do processo, pode-se dizer que não causa incômodo aos olhos, mesmo olhando diretamente para o local de maior intensidade, também não gera fumaça. Características relevantes para alocar um equipamento na planta de produção, pois dispensa a necessidade de preparar uma área isolada com cortinas e exaustores. O processo pode ser filmado de perto sem nenhum tipo de filtro especial. Eventualmente, são desprendidas algumas faíscas (ver quadro 2 na Figura 44), porém nenhum respingo de material foi observado.

5.4 Caracterização das Macrografias

Foram realizadas macrografias na região central de todas as soldas para observar a interface de união dos componentes. A união de ambos componentes é obtida para toda as combinações de parâmetros testados para este arranjo de materiais. Mediante as macrografias foi possível detectar uma falha característica: A falta de preenchimento nos cantos do furo, na interseção entre a base e as paredes. Este tipo de falha deve ser corrigido alterando a geometria, principalmente do furo como foi constatado por vários pesquisadores (1; 15; 16).

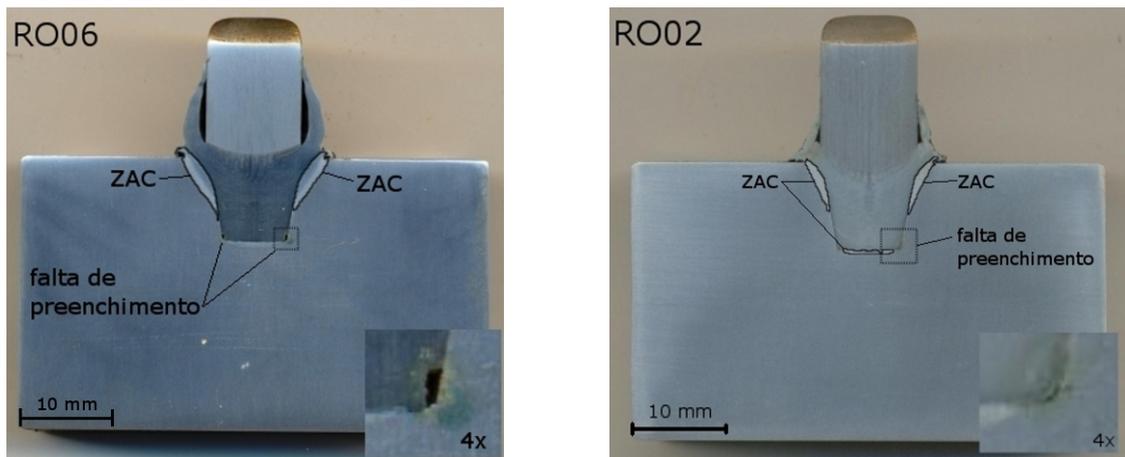


Figura 45: Macrografias dos corpos de prova. Ampliação dos vazios

Analisando a Figura 45 observa-se vazios por falta de preenchimento de diferentes tamanho nos corpos de prova RO06, à esquerda, e RO02, à direita. O ponto crítico para obter uma solda livre de falta de preenchimento é o raio de concordância empregado na base do furo. A variação dos parâmetros do processo influencia no tamanho destas falhas, por tanto, pode ser utilizada como uma maneira de compensar pequenas deficiências de geometria.

Por se tratar de um equipamento concebido para pesquisa deve ser possível alterar os parâmetros de processo dentro de uma larga faixa, porém uma máquina desenvolvida para a industria geralmente será dimensionada para os parâmetros específicos da linha de produção correspondente, resultando num projeto mais simples e de menor custo.

A Figura 46 superpõe as macrografias resultantes com a representação espacial da matriz de ensaios. Dentro dos limites da matriz de ensaio, o fator decisivo para uma solda livre de defeitos é a geometria do furo. Avaliando as macrografias pode-se dizer que as melhores soldas, do ponto de vista do preenchimento, foram obtidas para as combinações de baixa velocidade e alta carga de fricção. As soldas realizadas a maior velocidade apresentam uma ZAC (região mais clara da macrografia) mais larga que inicia mais perto da base do furo original.

A ampla faixa de parâmetros para as quais é obtida a solda, sugere que, quando dominadas as relações existentes entre as variáveis controladas do processo e a microestrutura resultante, será possível maximizar as propriedades de interesse para cada aplicação específica.

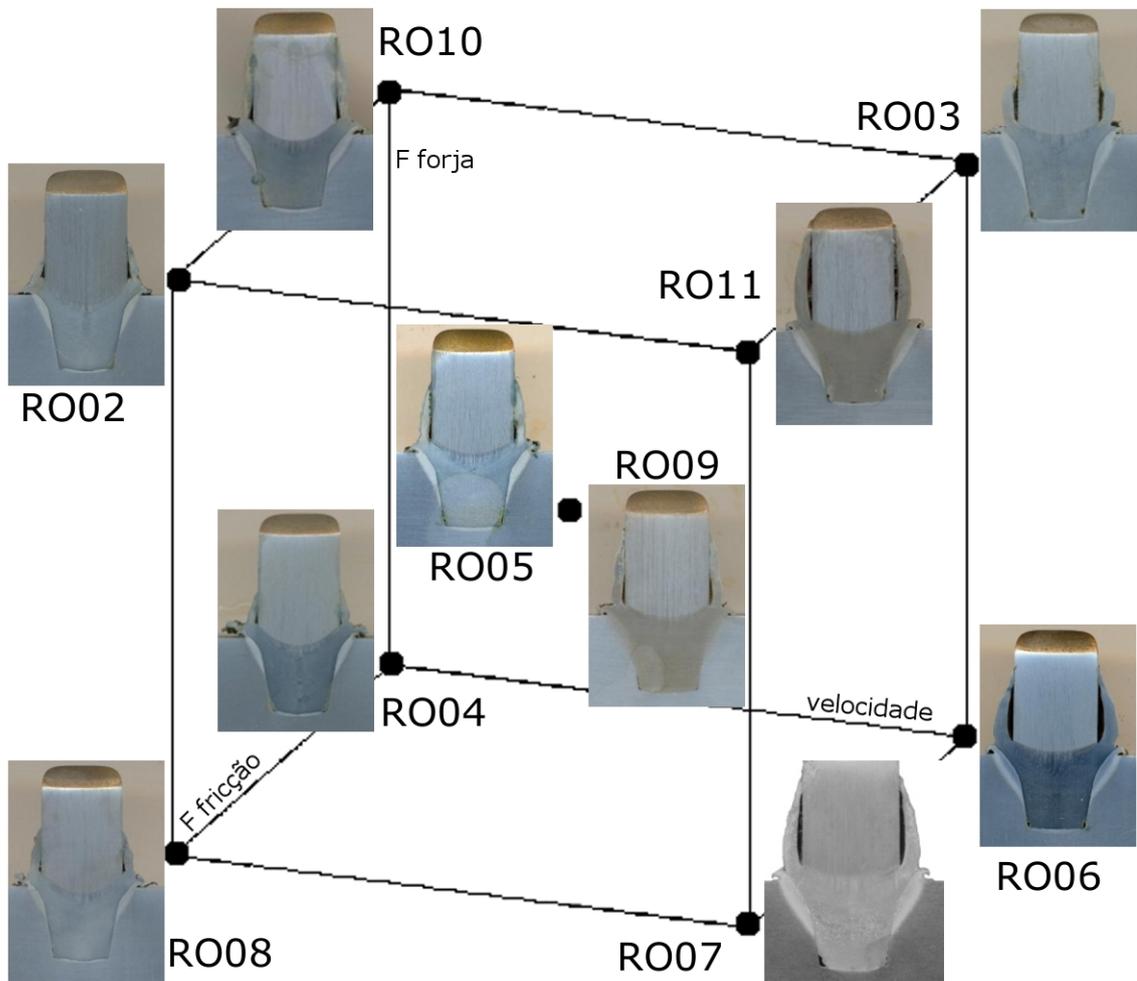


Figura 46: Macrografias em função da matriz de experimento

6 CONCLUSÕES

Foi projetada, construída e testada uma máquina para realizar soldas por fricção tipo pontual. Dos testes apresentados neste trabalho podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- O equipamento é adequado para realizar pesquisa de otimização de parâmetros.
- Algumas modificações podem ser implementadas para melhorar o desempenho do equipamento.
- A aquisição de dados permite ter o registro do processo de soldagem de cada corpo de prova.
- Podem ser utilizados diferentes materiais, geometrias e ambientes.
- Modificando a sequência do programa, é possível testar diferentes estratégias de soldagem.

A concretização deste equipamento resulta o ponto de início para diversas pesquisas na área de solda em estado sólido que, com certeza, resultará em benefício para o desenvolvimento técnico-económico da indústria nacional e regional com uma tecnologia alternativa aos métodos de solda por fusão.

7 TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração desta dissertação foram identificados trabalhos futuros que resultariam numa contribuição para pesquisas na área de solda em estado sólido:

- Implementar uma mesa instrumentada para registro de torque.
- Desenvolver um dispositivo para pressurizar a bacia de solda submersa.
- Modelar matematicamente as malhas de controle.

REFERÊNCIAS

- [1] MEYERS, A. *Friction Hydro Pillar Processing: Bonding Mechanism and Properties*. Tese (Doutorado) — Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, 2002.
- [2] ELMER, J. W.; KAUTZ, D. D. Fundamentals of friction welding. In: *ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering*. United States: ASM International, 1994. v. 6, cap. Fundamentals of Solid-State Welding.
- [3] BRADLEY, N. *The Response Surface Methodology*. Dissertação (Mestrado) — Indiana University South Bend, 2007.
- [4] STOTLER, T. Procedure development and practice considerations for inertia and direct-drive friction welding. In: *ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering*. United States: ASM International, 1994. v. 6, cap. Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding.
- [5] DUNKERTON, S. B. Procedure development and practice considerations for diffusion welding. In: *ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering*. United States: ASM International, 1994. v. 6, cap. Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding.
- [6] DIXON, R. Welding, brazing and soldering. In: *ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering*. United States: ASM International, 1994. v. 6, cap. Introduction to Solid-State Welding.
- [7] TSANG, S. Friction welding. In: *ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering*. United States: ASM International, 1994. v. 6, cap. Solid-State Welding, Brazing, and Soldering Processes.
- [8] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME Boiler & Pressure Vessel Code*. New York, 2004.

- [9] LIU, S.; INDACOCHEA, J. E. Weldability of steels. In: *ASM Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. United States: ASM International, 1993. v. 1, cap. Fabrication Characteristic of Carbon and Low-Alloy Steels.
- [10] SOMERS, R. B. Introduction to the selection of carbon and low-alloy steels. In: *ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering*. United States: ASM International, 1994. v. 6, cap. Selection of Carbon and Low-Alloy Steels.
- [11] DIN EN ISO 15620 - Friction Welding of Metallic Materials. 2000.
- [12] NICHOLAS, E. Friction processing technologies. *Welding in the World*, 2003.
- [13] THOMAS, W. et al. *FRICITION FORMING*. US005469617A 28 Nov. 1995.
- [14] PINHEIRO, G. A. *Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Joint Properties*. Tese (Doutorado) — GKSS - Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Germany, 2008.
- [15] SOUZA, R. J. *Desenvolvimento, projeto e construção de um equipamento de reparo de trincas por atrito*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- [16] REZENDE, R. P. *Efeito da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Uberlândia, 2007.
- [17] AMBROZIAK, A.; GUL, B. Investigations of underwater fhpp for welding steel overlap joints. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Politechnika Wroclawska, Wroclaw, Poland, VII, p. 67–76, 2007.
- [18] DIVISION, M. I. C. *G761 Series Servovalves*. Catalog.
- [19] DIVISION, M. I. C. *D660 Series Servo-Proportional Control Valves with Integrated Electronics*. Catalog.
- [20] PARKER. *Hydraulic Motor/Pump Series F11/F12: Fixed Displacement*. 2004. Catalog.
- [21] MERRIT, H. E. *Hydraulic Control Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [22] BRITISH Standard Specification BS 4360 - Weldable Structural Steels. 1990.
- [23] ROSADO, D. B. *ANÁLISE DE MICROESTRUTURAS EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS SAE 4140 E BS 4360 ATRAVÉS DO PROCESSO FHPP*. 2009. Trabalho de Diplomação - UFRGS.

APÊNDICE A COMBINAÇÃO DE MATERIAIS SOLDADOS POR FRICÇÃO

	tungsten copper PM	tungsten PM	titanium and titanium alloys	free cutting steel	steel PM	steel casting	steel, high-alloyed (austenitic)	steel, high-alloyed (ferritic)	steel, low-alloyed	steel, unalloyed	niobium	nickel alloys PM	nickel and nickel alloys	molybdenum PM	magnesium and magnesium alloys	copper and copper alloys	hard metal, tool steel	cast iron	aluminium PM	aluminium and aluminium alloys
aluminium and aluminium alloys	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•					•	•	•	•	•	•
aluminium PM																				•
cast iron						•	•	•	•	•										
hard metal, tool steels																		•		
copper and copper alloys	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•						•				
magnesium and magnesium alloys											•				•					
molybdenum PM														•						
nickel and nickel alloys			•				•	•	•	•			•							
nickel alloys PM			•						•	•			•							
niobium			•				•	•			•									
steel, unalloyed		•	•	•	•	•	•	•	•	•										
steel, low-alloyed		•	•	•	•	•	•	•	•											
steel, high-alloyed (ferritic)				•	•	•	•	•												
steel, high-alloyed (austenitic)		•	•	•	•	•	•													
steel casting				•	•	•														
steel PM				•	•															
free cutting steel				•																
titanium and titanium alloys			•																	
tungsten PM	•	•																		
tungsten copper PM	•																			

Fonte: DIN EN ISO 15620