



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

ANTONIO CARLOS NIEDWIESKI

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA DUREZA DA ZTA
DA SOLDA FRICÇÃO DE CARDAN**

CURITIBA-PR

2013

ANTONIO CARLOS NIEDWIESKI

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA DUREZA DA ZTA
DA SOLDA FRICÇÃO DE CARDAN**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.
Orientador: Prof. Dr. Paulo César Okimoto.

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

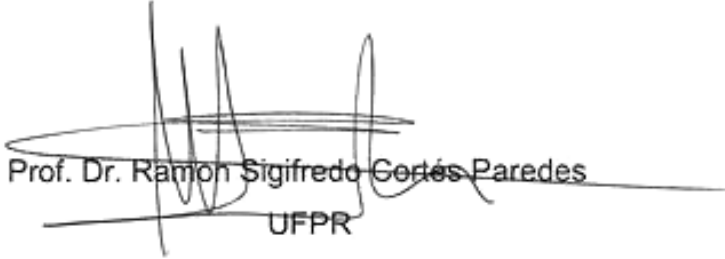
ANTONIO CARLOS NIEDWIESKI

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA DUREZA DA ZTA DA SOLDA FRICÇÃO DE CARDAN

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora :


Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR


Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR


Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

“Feci quod potui, faciant meliora potentes”
(“Fiz o que pude, façam melhor os
que puderem”, citação latina)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor orientador Paulo César Okimoto pelo direcionamento na organização das informações coletadas.

À AAM do Brasil pela oportunidade de trabalhar com a técnica da soldagem por fricção e por ter cedido seu laboratório de metalografia para preparação das amostras.

Aos engenheiros de solda Lance Kujawski e Scott Tacey (AAM USA) e Jimmy Paymaster (ETA India) pelas discussões sobre o melhor caminho a seguir para atingir os resultados desejados.

À minha família, que suportou minha ausência durante os finais de semana que dediquei ao curso, e faz todo este esforço valer a pena.

RESUMO

A Soldagem por Fricção é uma técnica relativamente recente que utiliza um ferramental de soldagem não consumível para gerar calor através da fricção e deformação plástica na junta a ser soldada, propiciando assim a formação da junta enquanto os materiais ainda estão no estado sólido. As principais vantagens da solda por fricção, sendo uma soldagem no estado sólido, são baixa distorção, ausência de defeitos relacionados ao material fundido, e alta força de ligação na junta soldada, mesmo naquelas ligas que são consideradas não soldáveis pelas técnicas convencionais. Mais do que isso, as juntas soldadas por fricção são caracterizadas pela ausência de defeitos ocasionados pelo material de adição, uma vez que a técnica não requer material de adição, e pelo baixo hidrogênio retido nas juntas soldadas, uma consideração importante quando soldando aços e outras ligas metálicas susceptíveis à fragilização por hidrogênio. Este processo está bem estabelecido como um dos mais econômicos e altamente produtivos métodos de união de metais similares e dissimilares. É largamente empregado na indústria automotiva e aeroespacial. A solda fricção é, por vezes, a única alternativa viável para superar as dificuldades encontradas em unir materiais com características muito diferentes. O objetivo deste estudo é determinar o efeito da força de fricção e velocidade de rotação na dureza da zona termicamente afetada (ZTA) dos componentes do cardan soldado usando soldagem fricção por arraste contínuo, visando atingir durezas abaixo de 400 HV em ambos componentes, um tubo baixo carbono (CE=0.40) e um garfo médio carbono (CE=0.64). O processo foi realizado mantendo a força de fricção constante em 7 toneladas e variando a rotação em 300, 600 e 750 RPM; mantendo a força de fricção constante em 5 toneladas e variando a velocidade de rotação em 300, 400, 600 e 750 RPM; e mantendo a velocidade de rotação constante em 600 RPM e variando a força de fricção em 4, 6, 8 e 10 toneladas. Após este estudo, verificou-se ser possível aperfeiçoar os parâmetros de soldagem e obter durezas abaixo de 400 HV, mesmo com um material com média temperabilidade como o material do Garfo, 38MnVS6 (CE=0.64).

PALAVRAS CHAVE: Soldagem fricção por arraste contínuo. Soldagem de cardan. Dureza ZTA cardan.

ABSTRACT

Friction welding is a fairly recent technique that utilizes a non-consumable welding tool to generate frictional heat and plastic deformation at the welding location, thereby affecting the formation of a joint while the material is in solid state. The principal advantages of frictional welding, being a solid state process, are low distortion, absence of melt-related defects and high joint strength, even in those alloys that are considered non-weldable by conventional welding techniques. Furthermore, friction welded joints are characterized by the absence of filler-induced problems or defects, since the technique requires no filler, and by the low hydrogen contents in the joints, an important consideration in welding steel and other alloys susceptible to hydrogen damage. Friction welding can be used to produce butt, corner, lap, T, spot, fillet and hem joints, as well as to weld hollow objects, such as tanks and tubes or pipes, stock with different thicknesses. This process is now well established as one of the most economical and highly productive methods in joining similar and dissimilar metals. It is widely used in automotive and aerospace industrial applications. Friction welding is often the only viable alternative in this field to overcome the difficulties encountered in joining the materials with widely varying physical characteristics. The objective in this study is to determine the effect of friction force and spindle speed in heat affected zone (HAZ) hardness of propshaft components welded using direct drive friction welding, aiming to achieve hardness below 400 HV in both components, a low carbon tube (CE=0.40) and a medium carbon yoke (CE=0.64). The process was carried out keeping friction force constant in 7 tons and varying speed in 300, 600 and 750 RPM; keeping friction force constant in 5 tons and varying speed in 300, 400, 600 and 750 RPM; and keeping speed constant in 600 RPM and varying friction force in 4, 6, 8 and 10 tons. Finishing this study we were able to verify that it is possible to adjust the welding conditions in order to achieve hardness under 400 HV, even with a material with medium hardenability like the material of the yoke, 38MnVS6 (CE=0.64).

KEYWORDS: Direct drive friction welding. Propshaft welding. Propshaft HAZ hardness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Equipamento Básico para Soldagem por Arraste e por Inércia.....	11
Figura 2: Esquema de sequência básica da Soldagem por Fricção Convencional (MODENESI, 2006)	12
Figura 3: Fotos da sequência básica da Soldagem por Fricção Convencional (Manual ETA FW).....	12
Figura 4: Soldagem Fricção por Arraste Contínuo (SOUZA, 2006).....	15
Figura 5: Esquema de sequência básica da Soldagem por Fricção Inercial.....	17
Figura 6: Soldagem por Fricção Inercial (BRACARENSE, 2000).....	17
Figura 7: Exemplo de uma máquina de soldagem por Fricção Inercial.....	18
Figura 8: Esquema da configuração básica.....	18
Figura 9: Esquema da rotação contrária.....	18
Figura 10: Esquema da configuração center drive.....	19
Figura 11: Esquema da configuração twin weld.....	19
Figura 12: Esquema da soldagem radial.....	19
Figura 13: Exemplo de solda fricção linear.....	20
Figura 14: Efeito das variáveis de processo na junta soldada e o formato do caldeamento e rebarba formados.....	20
Figura 15: Parâmetros utilizados para soldar as peças analisadas. Em destaque os parâmetros em estudo.....	22
Figura 16: Linhas de fluxo de escoamento plástico nas duas variantes do processo.....	23
Figura 17: Geometrias típicas das peças que podem ser soldadas por fricção.....	24
Figura 18: Superfícies de contato.....	24
Figura 19: Exemplos de soldagem de materiais dissimilares.....	29
Figura 20: Esquema de alterações na microestrutura <i>versus</i> diagrama TTT na ZTA.....	32
Figura 21: Microestruturas obtidas em função do tempo de resfriamento na zona fundida.....	33
Figuras 22 e 23: Microestruturas obtidas no resfriamento de um aço baixo carbono baixa liga.....	34
Figura 24: Algumas aplicações da solda fricção.....	37
Figura 25: Equipamento de solda fricção utilizado neste trabalho.....	38
Figura 26: Material base Tubo: ferrita + perlita (Nital 3%, 500x).....	39
Figura 27: Material base Garfo: perlita + ferrita (Nital 3%, 100x).....	39
Figura 28: Cardans soldados.....	40
Figura 29: Serra fita Starret ST-2001.....	41
Figura 30: Embutidora Leco PR-32.....	41
Figura 31: Politrizes Arotec Aropol 2V.....	41
Figura 32: Microdurômetro Leco LM300AT.....	41
Figura 33: Microscópio Zeiss Axiovert 40MAT.....	42
Figura 34: Espectrômetro Spectromaxx.....	42
Figura 35: Exemplo de corpo de prova embutido em baquelite, lixado, polido e atacado com Nital 3%	42
Figura 36: Corpo de prova embutido em baquelite mostrando esquema de medição da microdureza	42
Figura 37: Extensão ZTA Garfo amostra 1.....	43
Figura 38: Extensão ZTA Garfo amostra 1a.....	43
Figura 39: Extensão ZTA Garfo amostra 1b.....	44
Figura 40: Extensão ZTA Garfo amostra 1c.....	44
Figura 41: Extensão ZTA Garfo amostra 2.....	44
Figura 42: Extensão ZTA Garfo amostra 2a.....	44
Figura 43: Extensão ZTA Garfo amostra 2b.....	44
Figura 44: Extensão ZTA Garfo amostra 2c.....	44
Figura 45: Extensão ZTA Garfo amostra 3.....	45
Figura 46: Extensão ZTA Garfo amostra 3a.....	45
Figura 47: Extensão ZTA Garfo amostra 3b.....	45
Figura 48: Variação dos parâmetros da soldagem por fricção e suas conseqüências.....	46
Figuras 49 e 50: Amostras 1 e 1a.....	46
Figuras 51 e 52: Amostras 1b e 1c.....	47
Figuras 53 e 54: Formato das rebarbas das amostras 2 e 2a.....	47
Figuras 55 e 56: Formato das rebarbas das amostras 2b e 2c.....	48
Figuras 57 e 58: Amostras 3 e 3a.....	48
Figura 59: Amostra 3b.....	48
Figura 60: Perfis de dureza das amostras soldadas com força de fricção de 5 toneladas.....	50
Figura 61: Perfis de dureza das amostras soldadas com rotação de 600 RPM.....	51
Figura 62: Perfis de dureza das amostras soldadas com força de fricção de 7 toneladas.....	52
Figura 63: Representação esquemática das regiões afetadas pelo calor.....	53
Figura 64: Representação esquemática das regiões afetadas pelo calor na soldagem por fricção.....	53
Figura 65: Exemplo de zona A, interface Tubo/Garfo.....	53
Figura 66: Zona B Tubo.....	54

Figura 67: Zona B Garfo	54
Figura 68: Zona C Tubo	54
Figura 69: Zona C Garfo	54
Figura 70: Zona D Tubo	54
Figura 71: Zona D Garfo	54
Figura 72: Zona E Tubo	55
Figura 73: Zona E Garfo	55
Figura 74: Zona F Tubo	55
Figura 75: Zona F Garfo	55
Figura 76: Interface Tubo-Garfo Amostra 1 (Nital 3%, 500x).....	56
Figura 77: ZTA Tubo Amostra 1 (Nital 3%, 500x).....	56
Figura 78: ZTA Garfo Amostra 1 (Nital 3%, 500x)	56
Figura 79: Interface Tubo-Garfo Amostra 1a (Nital 3%, 500x).....	57
Figura 80: ZTA Tubo Amostra 1a (Nital 3%, 500x).....	57
Figura 81: ZTA Garfo Amostra 1a (Nital 3%, 500x)	57
Figura 82: Interface Tubo-Garfo Amostra 1b (Nital 3%, 500x).....	58
Figura 83: ZTA Tubo Amostra 1b (Nital 3%, 500x).....	58
Figura 84: ZTA Garfo Amostra 1b (Nital 3%, 500x)	58
Figura 85: Interface Tubo-Garfo Amostra 1c (Nital 3%, 500x).....	59
Figura 86: ZTA Tubo Amostra 1c (Nital 3%, 500x).....	59
Figura 87: ZTA Garfo Amostra 1c (Nital 3%, 500x).....	59
Figura 88: Interface Tubo-Garfo Amostra 2 (Nital 3%, 500x).....	60
Figura 89: ZTA Tubo Amostra 2 (Nital 3%, 500x).....	60
Figura 90: ZTA Garfo Amostra 2 (Nital 3%, 500x)	60
Figura 91: Interface Tubo-Garfo Amostra 2a (Nital 3%, 500x).....	61
Figura 92: ZTA Tubo Amostra 2a (Nital 3%, 500x).....	61
Figura 93: ZTA Garfo Amostra 2a (Nital 3%, 500x)	61
Figura 94: Interface Tubo-Garfo Amostra 2b (Nital 3%, 500x).....	62
Figura 95: ZTA Tubo Amostra 2b (Nital 3%, 500x).....	62
Figura 96: ZTA Garfo Amostra 2b (Nital 3%, 500x)	62
Figura 97: Interface Tubo-Garfo Amostra 2c (Nital 3%, 500x).....	63
Figura 98: ZTA Tubo Amostra 2c (Nital 3%, 500x).....	63
Figura 99: ZTA Garfo Amostra 2c (Nital 3%, 500x).....	63
Figura 100: Interface Tubo-Garfo Amostra 3 (Nital 3%, 500x).....	64
Figura 101: ZTA Tubo Amostra 3 (Nital 3%, 500x).....	64
Figura 102: ZTA Garfo Amostra 3 (Nital 3%, 500x)	64
Figura 103: Interface Tubo-Garfo Amostra 3a (Nital 3%, 500x).....	65
Figura 104: ZTA Tubo Amostra 3a (Nital 3%, 500x).....	65
Figura 105: ZTA Garfo Amostra 3a (Nital 3%, 500x)	65
Figura 106: Interface Garfo-Tubo Amostra 3b (Nital 3%, 500x).....	66
Figura 107: ZTA Tubo Amostra 3b (Nital 3%, 500x).....	66
Figura 108: ZTA Garfo Amostra 3b (Nital 3%, 500x)	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos parâmetros de soldagem fricção por arraste contínuo	21
Tabela 2. Comparação entre as duas variantes do processo de soldagem por atrito com rotação	22
Tabela 3. Defeitos mais comuns da solda fricção	28
Tabela 4. Possibilidade da aplicação da soldagem por atrito para alguns materiais.....	32
Tabela 5. Composição química do tubo	38
Tabela 6. Composição química do garfo	39
Tabela 7. Parâmetros em estudo.....	42
Tabela 8. Extensão da ZTA e tempo de soldagem das amostras.....	43
Tabela 9. Parâmetro variado e dureza máxima observada.....	52
Tabela 10. Parâmetro variado e dureza máxima observada.....	50
Tabela 11. Parâmetro variado e dureza máxima observada.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Tema.....	10
1.2. Problema e premissas	10
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo Geral	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
2.3. Justificativa	11
3. REVISÃO DA LITERATURA	11
3.1. Equipamento.....	11
3.2. Vantagens.....	13
3.3. Limitações.....	14
3.4. Variantes do processo de soldagem por fricção	15
3.4.1. Soldagem fricção por arraste contínuo	15
3.4.2. Controle do Tempo de Soldagem	15
3.4.3. Soldagem por fricção inercial.....	16
3.4.4. Variações do Método Convencional	18
3.4.5. Soldagem por fricção linear.....	19
3.4.6. Influência das variáveis do processo	20
3.5. Comparação entre a soldagem por inércia e a soldagem por arraste contínuo	21
3.6. Tipos de Juntas e Superfícies.....	23
3.7. Qualidade da Junta Soldada	25
3.8. Materiais para soldagem por fricção	27
3.8.1. Soldabilidade dos Aços.....	30
3.8.2. Transformações metalúrgicas	32
3.9. Aplicações da Soldagem por Fricção.....	34
4. METODOLOGIA	37
4.1. Caracterização dos Materiais.....	38
4.2. Soldagem das amostras.....	40
4.3. Preparação das amostras de solda do estudo.....	40
4.4. Análise das amostras de solda do estudo	41
5. RESULTADOS	42
5.1. Análise da Extensão da ZTA.....	42
5.2. Análise do Formato da Rebarba	46
5.2.1. Amostras do grupo 1	49
5.2.2. Amostras do grupo 2	49
5.2.3. Amostras do grupo 3	48
5.3. Análise da Dureza da ZTA do Componente Garfo	49
5.3.1. Amostras do grupo 1	49
5.3.2. Amostras do grupo 2	50
5.3.3. Amostras do grupo 3	51
5.4. Análise da Microestrutura dos Componentes	52
5.4.1. Propriedades mecânicas.....	52
6. CONCLUSÕES	67
7. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	68
8. ANEXOS	71
ANEXO I: GRÁFICOS DE SOLDAGEM DAS AMOSTRAS DO GRUPO 1	71
ANEXO II: GRÁFICOS DE SOLDAGEM DAS AMOSTRAS DO GRUPO 2	73
ANEXO III: GRÁFICOS DE SOLDAGEM DAS AMOSTRAS DO GRUPO 3	75

1 INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

A indústria de caminhões produz no Brasil, por ano, 170.000 caminhões (disponível em <<http://www.revistaocarreteiro.com.br/modules/revista.php?recid=967>> . Acesso em 20/6/2012). E cada caminhão tem um eixo cardan, que transmite a força do motor para as rodas traseiras. A soldagem utilizada na fabricação destes cardans é a solda por fricção.

É sabido que solda não é nada sem controle, tanto no sentido de ser possível controlar os parâmetros de soldagem para se obter as propriedades desejadas quanto no sentido de não se saber qual a qualidade do produto obtido por não ter havido um controle adequado dos parâmetros de soldagem.

Na soldagem 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 soldagem 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 da solda (LOPEZ, 2010).

1.2. PROBLEMA E PREMISSAS

Na solda de cardans por fricção os componentes a serem unidos são um Tubo em aço DIN St-52 e um Garfo forjado em aço DIN 38MnVS6. A norma do cliente exige uma dureza máxima de 400 HV na ZTA de ambos os materiais. Como o material do Tubo é um aço baixo carbono não há dificuldade em controlar a dureza neste componente (CE = 0.40). Já o material do Garfo apresenta maior temperabilidade (CE = 0.64), o que demanda um ajuste dos parâmetros de processo para garantir que a dureza não ultrapasse este valor.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar o efeito da variação de parâmetros de processo como força de fricção, velocidade de rotação da peça e tempo de forja na dureza da ZTA do componente de maior temperabilidade (Garfo).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ajustar os parâmetros de soldagem para se obter durezas inferiores à 400 HV na ZTA do componente Garfo.

2.3. JUSTIFICATIVA

A necessidade de se manter o controle sobre a dureza da ZTA do aço com maior temperabilidade visa garantir as características de resistência mecânica e ductilidade da peça soldada. Elevadas durezas podem gerar trincas e diminuir a vida útil da peça.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1. EQUIPAMENTO

O equipamento básico para soldagem por fricção consiste de cabeçote de fixação das peças (garras), sistemas para movimento de rotação e sistema para aplicação de forças axiais (pressão) (Figura 1).

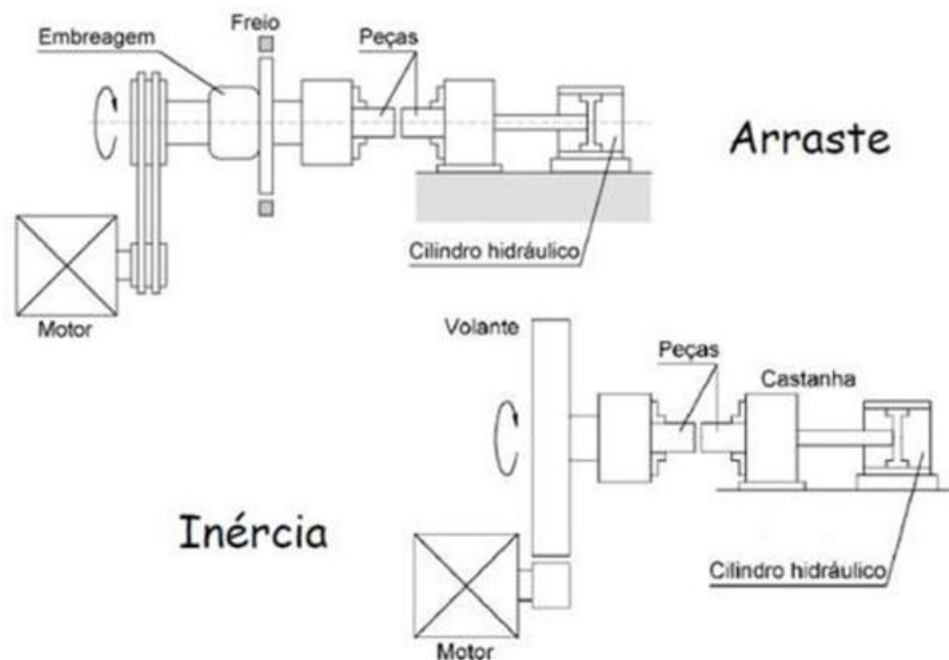


Figura 1: Equipamento Básico para Soldagem por Arraste e por Inércia

Soldagem por fricção é um processo de união de materiais no estado sólido já bem conhecido que pode ser usado numa ampla faixa de aços convencionais, bem como sistemas mais metalurgicamente desafiadores como combinações de materiais dissimilares ou superligas. As Figuras 2 e 3 ilustram os quatro estágios básicos da soldagem por Fricção por Arraste Contínuo (Direct-Drive).

Na fase de arranque, uma peça é presa em um cabeçote e é acelerada até uma velocidade pré-determinada. Para começar o estágio de aquecimento as duas peças são colocadas em contato por uma força compressiva. Inicialmente, calor é gerado pela fricção entre as duas superfícies. Isto aumenta a temperatura dos metais na interface da solda e causa o decréscimo da tensão de escoamento do metal. Quando a resistência à fluência do metal aquecido torna-se menor que a força compressiva aplicada o metal começa a deformar plasticamente a uma taxa alta. Esta deformação plástica agora gera o calor na interface. Ao mesmo tempo, o metal deformando plasticamente na interface flui radialmente para fora para criar a rebarba, carregando os óxidos e contaminantes para fora da solda. Isto ocorre durante o estágio de deformação plástica e resulta em deslocamento axial de ambas as peças reduzindo o comprimento final da peça. Finalmente, o processo é completado durante a etapa de forjamento quando a rotação pára e é aplicada uma alta força compressiva (ELMER, 1994).

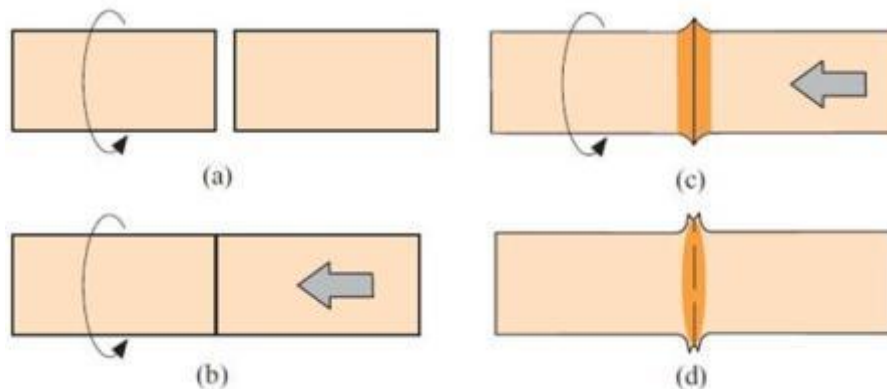


Figura 2: Esquema de sequência básica da Soldagem por Fricção Convencional (MODENESI, 2006)



Figura 3: Fotos da sequência básica da Soldagem por Fricção Convencional (Manual ETA FW)

(a) Disposição inicial das peças a serem soldadas: peça a esquerda com rotação constante e peça à direita parada.

(b) Contato inicial entre as peças, através de forças aplicadas no sentido axial. Este contato gera calor aquecendo as superfícies devido ao atrito.

(c) Deformação plástica devido à atuação da força axial e do aquecimento.

(d) Caldeamento e forjamento da junta soldada.

3.2. VANTAGENS

A soldagem por fricção tem diversas vantagens sobre os processos de solda com fusão. Uma vez que é um processo de solda no estado sólido, todos os defeitos associados com fusão e solidificação vistos em soldas por fusão típicas estão ausentes na soldagem por fricção. Durante a soldagem o calor está altamente concentrado na interface resultando em uma ZTA estreita, o que limita a variação nas propriedades mecânicas do metal base a uma pequena região. Finalmente, uma vez que um procedimento adequado está estabelecido, obtêm-se soldas de alta qualidade, consistentes dimensionalmente e reprodutíveis.

- Atenção especial com a limpeza da superfície não é necessária, uma vez que a soldagem por fricção tende a romper, deslocar, e finalmente remover os filmes de superfície na rebarba da solda;

- Consumíveis não são requeridos. Diferentemente dos processos por fusão, a soldagem por fricção não põe em risco a saúde do operador além de ser mais segura, porque não existem centelhas, radiação, fumaça, ou risco de problemas elétricos envolvendo alta tensão;

- Defeitos associados a fenômenos de solidificação, como porosidade e segregação, não estão presentes em soldagem por fricção, uma vez que ele é um processo em estado sólido;

- São possíveis juntas de metais dissimilares que são difíceis ou até impossíveis de serem soldadas por outros processos como, por exemplo: metais refratários;

- Baixos custos, simplicidade de operação, instalações simples, baixo consumo de energia, e um curto ciclo de soldagem fazem o processo efetivo para componentes normalmente produzidos por outros processos de fabricação;

- O processo é facilmente automatizado para reproduzir soldas de alta qualidade. O equipamento atual pode ser operado a distância, sendo adequado para aplicações distantes em ambientes perigosos;

- Baixo calor introduzido e rápidos ciclos de soldagem fazem com que o processo seja adequado para aplicações em oleodutos operantes, linhas de gás e linhas de metanol;

- É adequado para uso dentro de atmosferas explosivas sem risco de ignição. Isto permite que a soldagem seja seguramente executada em áreas de instalações petroquímicas sem necessidade do desligamento do equipamento;

- Habilidades manuais não são exigidas;

- Na maioria dos casos, a resistência da junta soldada é igual ou maior que a dos materiais a serem unidos.

3.3. LIMITAÇÕES

- A área de pelo menos uma peça deve ser simétrica, de forma que a parte possa girar sobre o eixo do plano de rotação.

- O processo é normalmente limitado à soldagem de juntas de topo planas;

- Material de pelo menos um componente deve ser plasticamente deformável sob as dadas condições de soldagem;

- Preparação e alinhamento das peças podem ser críticas para o desenvolvimento uniforme do atrito e aquecimento;

- Custos do equipamento e custos com ferramentas são altos;

Durante a solda fricção de aço carbono e aços baixa liga, o metal na ZTA é aquecido acima da temperatura eutetóide e transforma-se em austenita. Ao final da etapa de forjamento, este metal esfria abaixo da temperatura eutetóide e a austenita decompõe em seus vários produtos: ferrita, perlita, bainita, ou martensita. O tipo e a quantidade de cada um destes microconstituintes são função do pico de temperatura alcançado durante a solda e a taxa de resfriamento subsequente. Isto determinará a resistência final e a susceptibilidade à fratura frágil da solda, bem como a necessidade de um tratamento térmico pós-soldagem.

A temperatura de pico e a taxa de resfriamento na ZTA da solda fricção são extremamente difíceis de medir experimentalmente devido à severa deformação plástica que tem lugar na interface da solda.

3.4. VARIANTES DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO

3.4.1. Soldagem Fricção por Arraste Contínuo

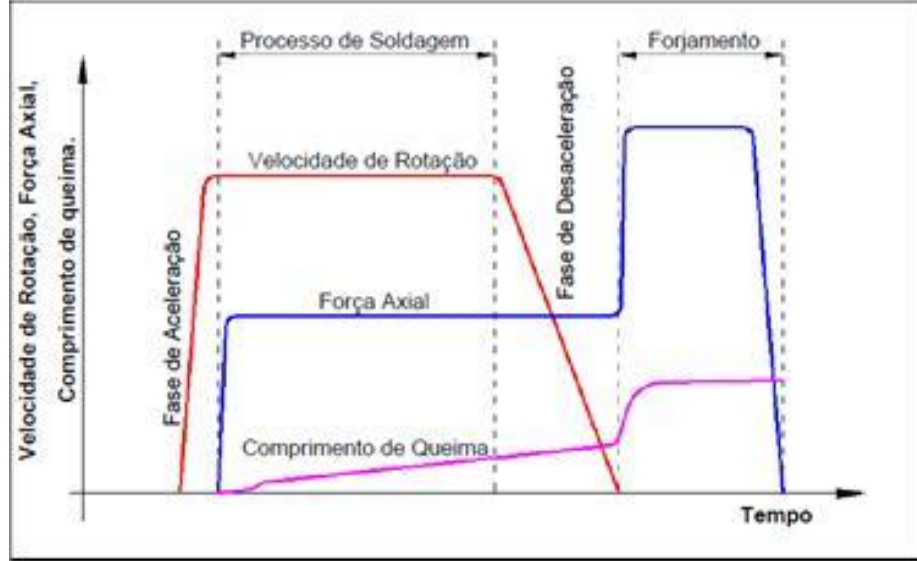


Figura 4: Soldagem Fricção por Arraste Contínuo (SOUZA, 2006)

Na soldagem por arraste contínuo as peças a serem soldadas são fixadas nos mordentes da máquina de soldar. Uma das peças é acelerada até atingir a velocidade de soldagem pré-determinada por intermédio de uma unidade motora. A outra peça que está parada é deslocada por uma força axial de atrito mantida constante até tocar a peça que está girando. Este contato provoca o aquecimento das superfícies devido ao atrito. A velocidade de rotação é mantida constante durante esta etapa. Quando as superfícies em contato atingem a temperatura de forjamento dos materiais, a unidade motora é desacoplada da peça que está em rotação e a força axial é aumentada, atingindo a força axial de forjamento. Esta é mantida até que as juntas estejam soldadas (Figura 4). O tempo de soldagem é contado de quando as peças são colocadas em contato até o momento em que cessa a rotação e inicia a fase de forjamento (DIXON, 1994).

3.4.2. Controle do Tempo de Soldagem

Uma atividade que precisa ser bem desenvolvida no âmbito da soldagem por fricção é o controle do tempo de soldagem. Como a taxa de transferência de energia em forma de calor é grande, períodos longos podem gerar zonas termicamente afetadas muito extensas, perdendo a vantagem que este método possui. Basicamente, existem duas maneiras de controle de tempo da solda por fricção:

- Controle por comprimento total de deslocamento

O fim do processo é determinado a partir da medição da distância percorrida pela peça submetida diretamente ao esforço axial, tanto no processo convencional quanto no inercial. Quando certa distância pré-determinada pelo projeto de soldagem é percorrida, a máquina provoca o fim da soldagem, não havendo mais fornecimento de energia para a junta soldada. Geralmente, este tempo coincide com o momento em que a força de forjamento é aplicada.

- Controle por parâmetros constantes

O método mais preciso para controlar o tempo de soldagem é através dos parâmetros constantes, que exige uma especialização maior do operador por ser mais complexo. Na solda convencional, existem muito mais parâmetros para determinar o tempo de soldagem, a saber:

- Frequência angular do eixo (RPM)
- Pressão de aquecimento / soldagem (MPa)
- Tempo de aquecimento / frenagem / espera / forjamento (s)

Monitorando-se estes parâmetros obtêm-se a análise completa do processo de soldagem. Na seção Anexos podem ser vistos os gráficos com estes parâmetros para os grupos de amostras estudados.

Neste trabalho o tempo de soldagem é resultado do comprimento total de deslocamento: após atingido o comprimento desejado durante a etapa de fricção, ocorre a aplicação da força de forja que dará o comprimento final total do eixo cardan, dentro de uma faixa pré-estabelecida de mínimo e máximo (STOTLER,1994).

3.4.3. Soldagem por Fricção Inercial

As peças a serem soldadas são fixadas nas garras da máquina de solda, sendo que uma das garras está ligada a um volante acumulador de energia cinética rotacional. Este volante é acelerado por uma unidade motora até atingir a velocidade de soldagem, juntamente com uma das peças a ser soldada. Quando esta velocidade é atingida, a unidade motora é desacoplada e a peça que está parada é deslocada por intermédio de uma força axial de soldagem até entrar em contato com a peça que está girando. Este contato aquece as superfícies devido ao atrito até atingir a temperatura de forjamento (Figura 5) (ALVES, 2010).

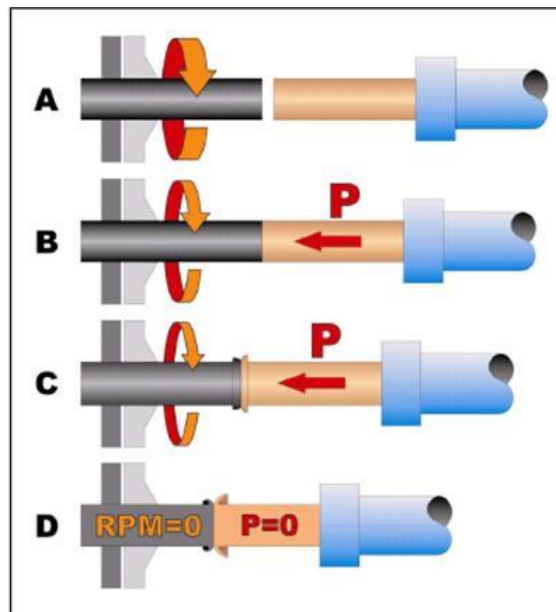


Figura 5. Esquema de sequência básica da Soldagem por Fricção Inercial

- Aproximação;
- Desligamento da unidade motora e aplicação da pressão P;
- Redução da rotação através da aplicação da pressão P;
- Término da soldagem.

Esta força axial de soldagem é mantida até a rotação cesse por completo e que as juntas estejam soldadas (Figura 6).

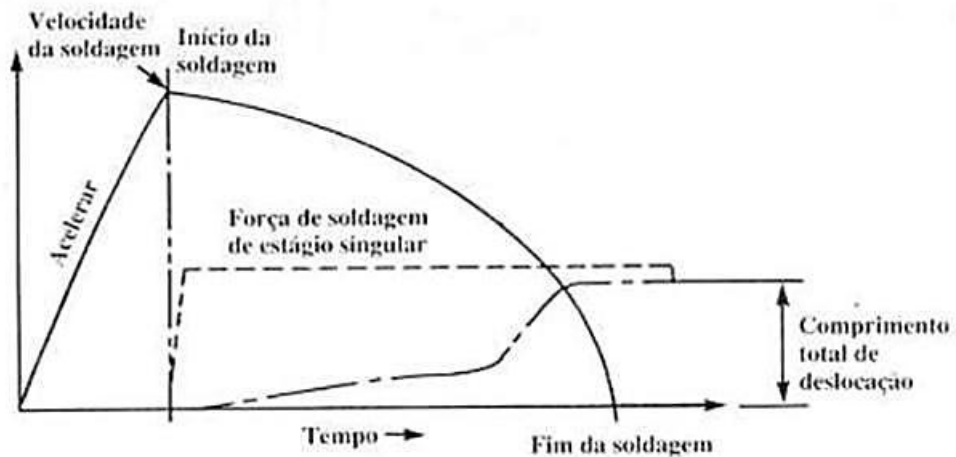


Figura 6: Soldagem por Fricção Inercial (BRACARENSE, 2000)

Como no método por Fricção Inercial a energia é descarregada em um tempo menor, isto normalmente resulta em tempos de soldagem mais curtos, menos rebarba, ZTA mais estreita e taxas de resfriamento na ZTA maiores.



Figura 7. Exemplo de uma máquina de soldagem por Fricção Inercial

3.4.4. *Variações do Método Convencional*

As variações do método convencional de soldagem por fricção convencional podem ter as seguintes configurações:

- Configuração básica: uma peça é posta em rotação e a outra é restringida de rotação (Figura 8).

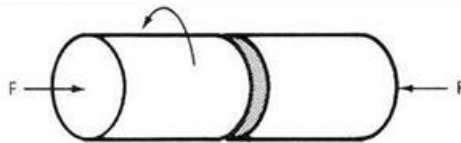


Figura 8. Esquema da configuração básica

- Rotação contrária: ambas as peças de trabalho são postas em rotação, mas em sentidos contrários (Figura 9).

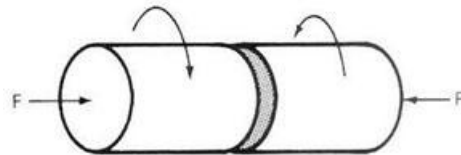


Figura 9. Esquema da rotação contrária

- Center drive: a peça do centro é posta em rotação, enquanto as outras duas são impulsionadas por forças axiais, gerando duas soldas e aumentando a produtividade (Figura 10).

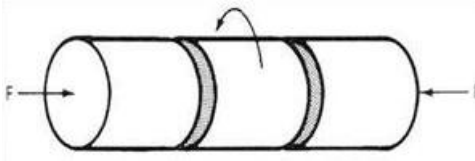


Figura 10. Esquema da configuração center drive

- Twin weld: geram duas soldas como no caso anterior, porém são as peças das extremidades que são postas em rotação (Figura 11).

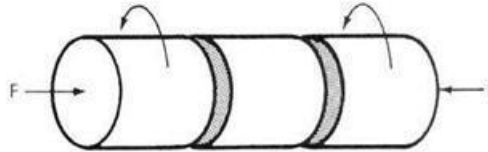


Figura 11. Esquema da configuração twin weld

- Soldagem radial: uma peça cilíndrica é soldada por uma combinação de carregamentos de compressão radiais e axiais a duas outras peças cilíndricas de menor diâmetro. É comum este tipo de trabalho no reparo de oleodutos (Figura 12)(SPINDLER, 1994).

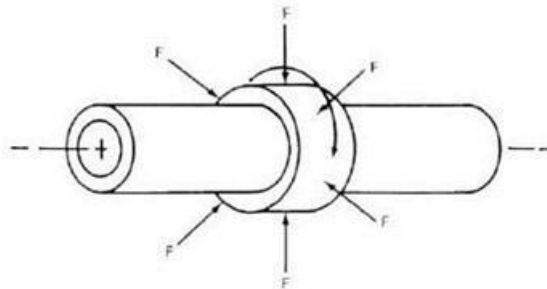


Figura 12. Esquema da soldagem radial

3.4.5. Soldagem por Fricção Linear

Na soldagem por fricção Linear aplicam-se os mesmos princípios da soldagem por rotação. Um componente é mantido parado enquanto o outro é movido a determinada velocidade e os dois são unidos. A diferença é que o componente que se move não gira, oscila lateralmente.

Os tempos de soldagem são similares não importando muito o tamanho da peça. Devido à geometria, a soldagem por fricção rotacional não tem nenhuma fricção no centro da peça que gira. Esta parte da solda aquece mais por convecção do que devido à fricção. Por outro lado, na solda por fricção linear a fricção ocorre em toda superfície sendo soldada. Isto quer dizer que as soldagens são muito rápidas e não variam muito

com o tamanho da peça. Por causa do movimento lateral na soldagem, a soldagem por Fricção Linear tem a vantagem de não precisar de partes necessariamente simétricas para soldagem (disponível em <<http://www.linearfrictionwelding.com/weld-process>>. Acesso em: 10/06/2013).



Figura 13. Exemplo de solda fricção linear

3.4.6. Influência das Variáveis do Processo

A variação das condições de soldagem muda o perfil do fluxo de material, afetando o aspecto da solda e as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada (Figura 14).

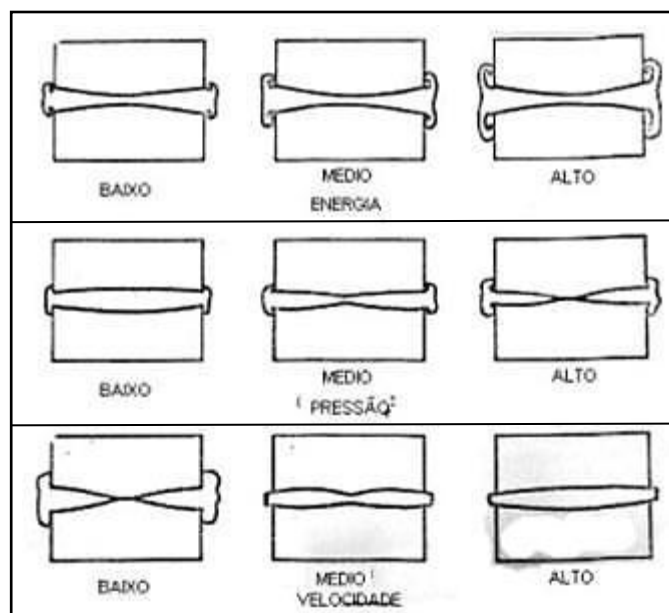


Figura 14: Efeito das variáveis de processo na junta soldada e o formato do caldeamento e rebarba formados

O aumento da força de fricção causa uma maior expulsão de material, aumentando o tamanho da rebarba formada sem ter grande influência no perfil da junta soldada. Por outro lado, o aumento da pressão afeta mais o perfil da junta soldada que o formato da rebarba: com pressões maiores tem-se um perfil de junta mais estreito que com pressões mais baixas. Já o efeito da velocidade é o de fazer o perfil da junta soldada ficar mais largo com seu aumento.

3.5. COMPARAÇÃO ENTRE A SOLDAGEM POR INÉRCIA E A SOLDAGEM POR ARRASTE CONTÍNUO

Os dois métodos para soldagem por fricção baseiam-se no mesmo princípio, transformar a energia mecânica em energia térmica capaz de unir dois materiais pelo contato das superfícies, e podem ser utilizados para obtenção de junções com as mesmas características. Entretanto, devido às peculiaridades de cada equipamento e método de soldagem, torna-se necessária a utilização de diferentes parâmetros.

A máquina de soldagem por fricção convencional possui mais parâmetros (rotação, força de acoplamento, força de soldagem, tempo de soldagem, pressão de forjamento, tempo de forjamento (Tabela 1)) que devem ser ajustados se comparada com a máquina de soldagem inercial (rotação, pressão, inércia do volante). Isso faz com que os parâmetros de soldagem e otimização do processo sejam mais difíceis. Na Tabela 2 são feitas algumas comparações entre os dois processos, relativas às variáveis de processo, aporte térmico, taxa de aquecimento, largura da ZTA, etc. A Figura 15 traz os parâmetros utilizados na soldagem de nossas amostras.

Tabela 1. Descrição dos parâmetros de soldagem fricção por arraste contínuo

Rotações da peça por minuto (RPM)	Velocidade atingida para soldar
Força de acoplamento (toneladas)	Força aplicada durante contato inicial
Tempo de força de acoplamento (segundos)	Duração de aplicação da força de acoplamento
Força de fricção (toneladas)	Força a ser aplicada durante a soldagem
Força de forjamento (toneladas)	Força a ser aplicada no forjamento após a peça atingir o comprimento desejado.
Tempo de forjamento (segundos)	Tempo de aplicação da força de forjamento

ETA FRICTION WELDING PARAMETERS AAM-BRAZIL

SPINDLE SPEED..... (RPM) 400	RIGHT CLAMP <input type="checkbox"/> ON
SOFT FORCE..... (Tonnes) 3.0	SINGLE DOOR..... <input type="checkbox"/> OFF
SOFT FORCE TIME..... (Sec) 2	SPINDLE ORIENTATION <input type="checkbox"/> ON
FRICTION FORCE..... (Tonnes) 7.0	JOB DEFLASH..... <input type="checkbox"/> OFF
FRICTION BURN-OFF DISPLACEMENT..... (mm) 8.8	DEFLASH SPINDLE SPEED..... (RPM) 0
UPSET FORCE..... (Tonnes) 18.8	SLIDE STOP POSITION FOR DEFLASH.. (mm) 0
UPSET TIME..... (Sec) 8.0	JOB TYPE NEW.....
TOTAL BURN-OFF HIGH DISPLACEMENT... (mm) 14.6	JOB TYPE..... P500 Tube yoke 1016
TOTAL BURN-OFF LOW DISPLACEMENT.... (mm) 12.6	JOB COUNT..... 1333
JOB REFERENCE DISPLACEMENT..... (mm) 305.0	OPERATOR NAME.....
INPUT JOB TOLERANCE..... (mm) 3.0	Escape Edit
SLIDE OVER TRAVEL LIMIT..... (mm) 350.0	Print
CLAMP CLOSE DISTANCE..... (mm) 58.0	O. D. OF THE JOB (mm) 400.00 AREA 0.00
CLAMP CLOSE TOLERANCE DISTANCE +/-.. (mm) 2.0	I. D. OF THE JOB (mm) 400.00
CLAMP OPEN DISTANCE..... (mm) 4.0	
CHUCK CLOSE POSITION..... (mm) 91.8	
CHUCK CLOSE POSITION TOLERANCE +/-.. (mm) 2.0	
STOPPER POSITION..... (mm) 825	
SLIDE STOP POSITION..... (mm) 75	
SLIDE LUBRICATION..... (Cycles) 150	

Figura 15. Parâmetros utilizados para soldar as peças analisadas. Em destaque os parâmetros em estudo.

Tabela 2. Comparação entre as duas variantes do processo de soldagem por fricção com rotação (BRACARENSE, 2000)

Parâmetro de processo	Fricção Convencional	Fricção Inercial
Variáveis do processo	<ul style="list-style-type: none"> Rotação [rpm] Tempo de rotação ou redução do comprimento da peça Força axial aplicada 	<ul style="list-style-type: none"> Momento de inércia do volante Rotação [rpm] Força axial aplicada
Aquecimento gerado pela fricção	Constante, enquanto durar o tempo da rotação	Depende da energia acumulada pelo volante (inércia e rotação)
Aporte térmico	Menor	Maior
Taxa de aquecimento	Menor	Maior
Largura da ZTA	Maior	Menor
Rigidez do equipamento	Menor, existindo até mesmo equipamentos portáteis	Bem maior - ocorrem altos torques e fixação das peças a serem soldadas é mais reforçada
Tempo de ciclo	Maior	Menor, devido ao tempo da rotação ser quase 90% menor

A soldagem por fricção inercial possui várias vantagens, tais como:

- Produz soldas fortes para peças de dimensões muito grandes (barras, tubos, placas, discos, etc.), podendo desenvolver peças que teriam confecção muito complicada e muito mais cara utilizando outra tecnologia.
- A utilização do volante causa um fluxo de solda helicoidal na junta soldada, fazendo com que a resistência mecânica da solda aumente.

- O controle de qualidade do processo é muito mais simples do que o processo de soldagem por fricção convencional, pois depende somente de dois parâmetros: a frequência de rotação do volante e a pressão exercida pela peça sem movimento rotativo. Isso exige menos habilidade do operador.
- É um processo mais rápido do que o convencional, produzindo uma área termicamente afetada bem menor, além de favorecer a produção em grande escala.

Mas também apresenta desvantagens:

- Podem ocorrer picos de torque instantâneos que são gerados nas máquinas por inércia quando ocorre uma parada abrupta. Tais ocorrências são responsáveis por custos maiores na fabricação das peças da máquina, o que não ocorre na máquina do método convencional.
- O processo de estabilização da velocidade de rotação é mais lento no processo inercial, exigindo maiores esforços devido à presença do volante.

As linhas de fluxo do escoamento plástico que influenciam na resistência da solda são diferentes nas duas variantes do processo. No processo de soldagem convencional elas são radiais porque, quando é aplicada a pressão final sobre a junta, ela está praticamente imóvel. No processo de soldagem por atrito inercial elas são espiraladas, pois a pressão é aplicada com a peça ainda em movimento radial. Esse detalhe é mostrado na Figura 16.

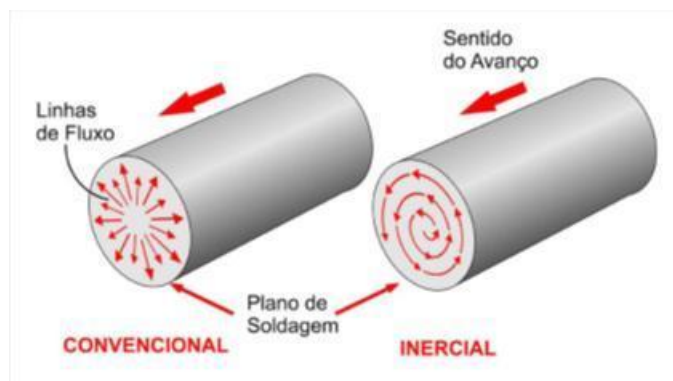


Figura 16. Linhas de fluxo de escoamento plástico nas duas variantes do processo.

3.6. TIPOS DE JUNTAS E SUPERFÍCIES

O processo de soldagem por fricção está limitado aos tipos de juntas de topo e planas, que devem ser perpendiculares e concêntricas com o eixo de rotação (Figura 17).

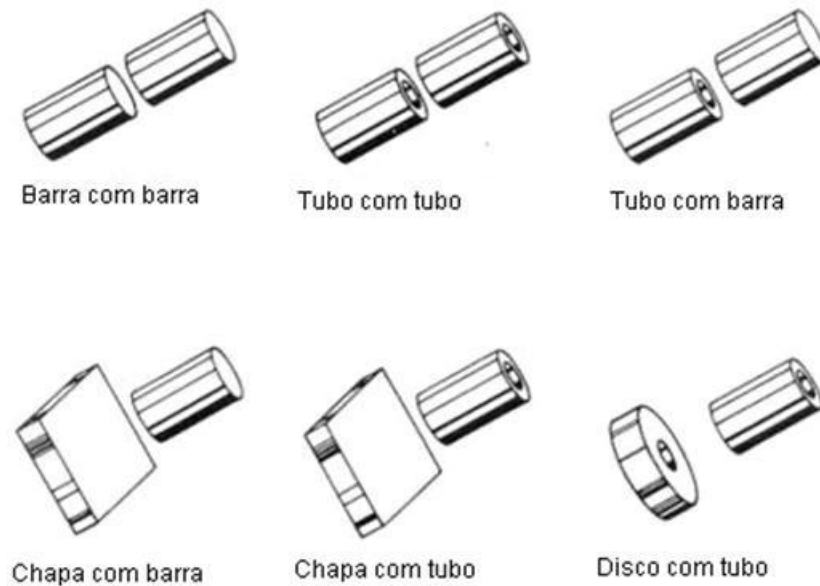


Figura 17. Geometrias típicas das peças que podem ser soldadas por fricção

A superfície a ser soldada não precisa ter acabamento perfeito. Superfícies forjadas, cortadas com tesoura, com gás ou disco abrasivo são aceitáveis (BRACARENSE, 2000). A superfície de uma peça está longe de ser uma superfície perfeita, plana e sem rugosidades e imperfeições.

A rugosidade superficial é um parâmetro importante no processo de soldagem, pois com o aumento da força normal e/ou com a repetição do deslizamento, a superfície de contato fica mais plana, aumentando a área de contato e o calor gerado. Cria-se uma camada de material plastificado que atua como “lubrificante” facilitando o deslizamento assim como a transferência de calor entre as peças. A Figura 18 mostra o que acontece com a rugosidade na superfície de contato entre duas peças conforme a soldagem é realizada.

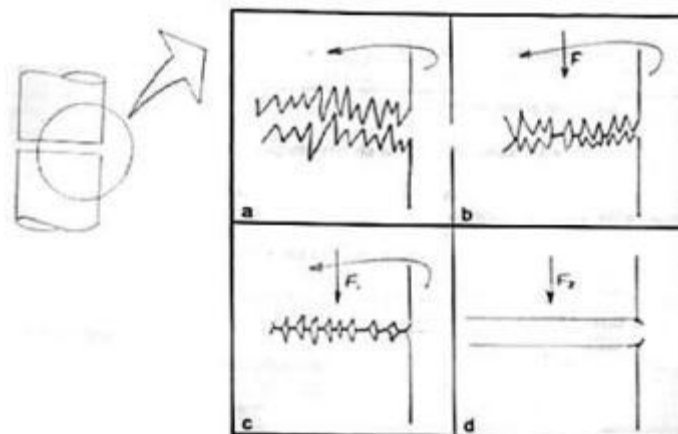


Figura 18. Superfícies de contato

Após a primeira interação entre as superfícies, a rugosidade tende a diminuir em decorrência da plastificação do material e da planificação das superfícies. O resultado deste fenômeno de planificação é a elevação da temperatura em função do atrito entre as superfícies, uma vez que as mesmas apresentam agora uma maior região de contato e uma menor resistência ao escorregamento (PACHECO, 2011).

Há dois requisitos básicos há serem atendidos antes da soldagem de dois metais por fricção:

- 1) ter duas superfícies absolutamente limpas.
- 2) colocar estas superfícies limpas em contato tão próximo que uma ligação metálica possa se estabelecer através da interface.

Contaminantes de superfície são de três tipos:

- a) Filmes orgânicos
- b) Gases absorvidos
- c) Compostos químicos do metal base, geralmente óxidos.

No curso da deformação, as superfícies comprimidas não tem mais contato com a atmosfera, então não há formação de novos filmes de óxido, e o filme existente é quebrado conforme a área de contato aumenta. Neste ponto, as forças de atração interatômicas atuam para formar a ligação metálica.

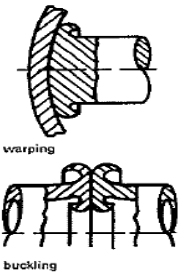
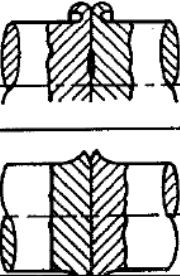
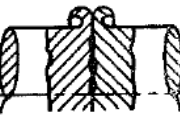
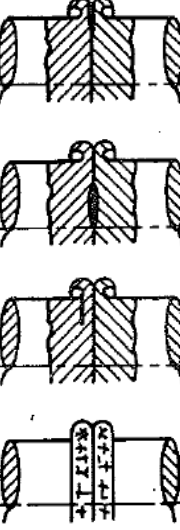
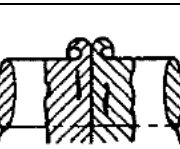
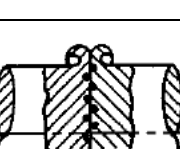
3.7. QUALIDADE DA JUNTA SOLDADA

A qualidade da solda depende da escolha correta das variáveis de processo. Por ser um tipo de soldagem no estado sólido e por não necessitar de metal de adição ou mesmo fluxos, praticamente não ocorrem defeitos como: poros devido a gases, inclusões de escória e fases frágeis. Os defeitos mais comuns são: cisalhamento na zona afetada pelo calor (baixa velocidade inicial ou volante superdimensionado) e defeitos centrais causados por pequenos orifícios no centro de uma das peças (Tabela 3).

Os ensaios mais utilizados são: a inspeção visual e a medida do comprimento da peça. Os ensaios de tração, flexão, impacto e fadiga podem ser também utilizados para o controle de qualidade da junta soldada.

Geralmente faz-se também uma metalografia da junta soldada, bem como medidas de dureza ao longo da zona afetada pelo calor (BRACARENSE, 2000).

Tabela 3. Defeitos mais comuns da solda fricção (ANSI/AWS C6.1/89; DIN EN ISO 15620)

Tipo de defeito	Características	Causa	Soluções	Figura
Deformação	Mudanças na geometria dos componentes	Calor insuficiente	Ajustar morsa; aumentar rigidez	
Defeitos de ligação	Falta de ligação interna ou externa	Preparação das superfícies; parâmetros de soldagem	Limpeza das superfícies; otimização dos parâmetros de soldagem	
Inclusões sólidas	Inclusões de material na área de contato das superfícies	Rebarbas, óleo, graxa, ferrugem	Limpeza das superfícies de contato	
Trincas	Separação de material na área externa; trincas internas; trincas junto à formação da rebarba; trincas ao longo da rebarba	Tensões internas; solda de componentes dissimilares; pressão de forja muito alta; calor insuficiente	Pré-aquecimento; ajuste dos parâmetros de soldagem; redução da pressão de forja	
Fases intermetálicas	Formação de fases na área de contato	Solda de materiais dissimilares; parâmetros de soldagem	Seleção dos materiais; ajuste dos parâmetros	
Acúmulo de carbonetos, óxidos ou nitretos	Acúmulo ao longo da área de contato	Materiais utilizados	Seleção dos materiais; ajuste dos parâmetros	

3.8. MATERIAIS PARA SOLDAGEM POR FRICÇÃO

A solda fricção pode ser usada 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 deste método. Uma matriz de várias combinações de materiais metálicos soldados por fricção é apresentada na Tabela 4.

Os dois requisitos principais para formar boas soldas por fricção são: primeiro, que os materiais a serem unidos possam ser forjados; segundo, que os materiais gerem fricção na interface da 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 soldagem por fricção de um metal com ele mesmo está associada 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. Entretanto, pode haver diferenças significativas nas variáveis de processo entre diferentes tipos de materiais. Devido ao aquecimento localizado gerado pela soldagem por fricção, a zona afetada pelo calor está sujeita a resfriamento rápido pela efetiva transferência de calor para o metal base. Esta têmpera pode alterar significativamente as propriedades mecânicas. Por exemplo, a fim de restabelecer a ductilidade, tratamentos de alívio de tensões ou revenimento podem ser requeridos em materiais com temperabilidade elevada (LOPEZ, 2010).

Uma descrição geral sobre combinações de metais dissimilares é apresentada a seguir:

- **Aços de baixo carbono com aços de médio carbono:** em geral, estas combinações são unidas por uma ampla gama de condições, inclusive aços de alto teor de carbono são soldados com aços ligados usando solda por fricção. Ferramentas de aço rápido são soldadas a hastes de aço liga para inúmeras aplicações em ferramentas. Aços com teores de carbono tão altos como 1%, como o aço AISI 52100, podem ser unidos com ligas de menor teor de carbono. Tratamentos térmicos pré-solda são requeridos em

alguns casos para ajustar as propriedades na interface e pós-solda para reaver as regiões de interface do aço com alto teor de carbono.

- **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. Estas combinações podem ser usadas como camadas intermediárias para realizar uniões de pares incompatíveis. Para exemplificar esta técnica o ASM Handbook menciona uma pesquisa de R. Armstrong (1991), onde, para conseguir a união entre o alumínio 5083 com o aço inox é utilizada uma solda intermediária de alumínio 1100 que, após usinada, serve de base para soldar o alumínio 5083, obtendo-se uma união de alta eficiência.

Os problemas inerentes à solda 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 como 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:** combinações de metais dissimilares são muito sensíveis à preparação superficial. Em soldas de aço inox com alumínio, o óxido formado no alumínio absorve contaminantes como água e hidrocarbonetos, formando camadas superficiais que prejudicam a solda. 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.

- **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 alumínio 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 dada ao estudo dos parâmetros adequados à soldagem para prevenir a formação de fase líquida durante o processo de soldagem.

- **Formação de fase frágil:** alguns materiais, quando combinados, são suscetíveis a formar uma fase frágil. Duas são as causas principais: contaminantes superficiais que fragilizam a interface ou devido à 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 (LOPEZ, 2010).

Exemplos de combinações dissimilares são: cobre com aço SAE1018; aço ferramenta com aço SAE1045; alumínio com aço inox; alumínio com aço carbono; entre outros (Figura 19).

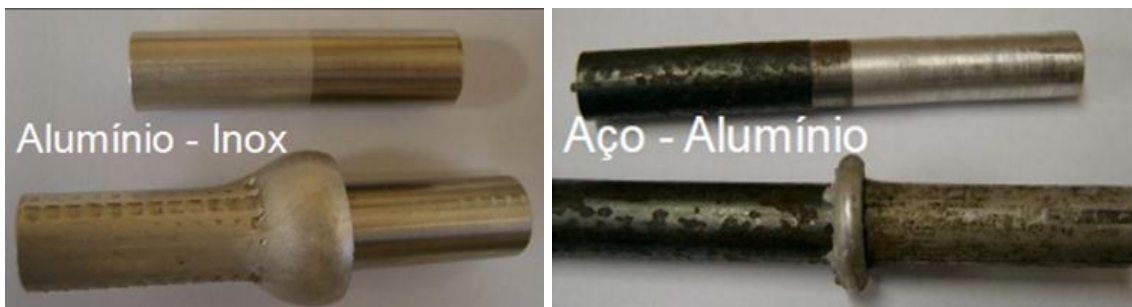


Figura 19. Exemplos de soldagem de materiais dissimilares

Tabela 4 – Possibilidade da aplicação da soldagem por atrito para alguns materiais (MODENESI, 2006)

	Ligas de zinco	Materiais de válvula (automóvel)	Vanádio	Urânio	Carbonetos de tungstênio cementados	Tungstênio	Ligas de titânio	Titânio	Tório	Tânalo	Aço de ferramenta	Aço inoxidável	Aço sinterizado	Aço-Miraging	Aço de fácil usinagem	Aço de carbono	Ligas de aço	Ligas de prata	Prata	Ligas de níobio	Níobio	Nimônico	Ligas de níquel	Níquel	Metais Moedel	Maibédmo	Ligas de magnésio	Magnésio	Chumbo	Ferro sinterizado	Niquelina	Cobre	Cobalto	Cerâmica	Ferro fundido	Carbonetos cementados	Bronze	Latão	Ligas de alumínio	Alumínio				
Alumínio																																												
Ligas de alumínio																																												
Latão																																												
Bronze																																												
Carbonetos cementados																																												
Ferro fundido																																												
Cerâmica																																												
Cobalto																																												
Cobre																																												
Niquelina																																												
Ferro sinterizado																																												
Chumbo																																												
Magnésio																																												
Ligas de magnésio																																												
Maibédmo																																												
Metais Moedel																																												
Níquel																																												
Ligas de níquel																																												
Nimônico																																												
Níobio																																												
Ligas de níobio																																												
Prata																																												
Ligas de prata																																												
Ligas de aço																																												
Aço de carbono																																												
Aço de fácil usinagem																																												
Aço-Miraging																																												
Aço sinterizado																																												
Aço inoxidável																																												
Aço de ferramenta																																												
Tântalo																																												
Tório																																												
Titânio																																												
Ligas de titânio																																												
Tungstênio																																												
Carbonetos de tungstênio cementados																																												
Urânio																																												
Vanádio																																												
Materiais de válvula (automóvel)																																												
Ligas de zinco																																												

Ligação metalúrgica da mesma resistência, (em alguns casos, seria necessário um tratamento térmico após a soldadura a fim de proceder à soldagem da mesma resistência).
 Pode soldar-se à fricção, mas podendo não produzir uma ligação da mesma resistência.
 É provavelmente soldável — não há no momento estudos sobre a soldabilidade.

3.8.1. Soldabilidade dos Aços

Segundo definição da AWS, soldabilidade é a capacidade de um material ser soldado sob condições de fabricação, impostas a uma estrutura específica, projetada adequadamente, e de desempenhar satisfatoriamente nas condições de serviço requeridas. Para facilitar a compreensão, é possível desdobrar o conceito de soldabilidade em soldabilidade operacional, soldabilidade metalúrgica e soldabilidade em serviço.

A soldabilidade operacional diz respeito diretamente à facilidade de execução da junta. Esta, por sua vez, está associada às particularidades do processo de soldagem, à habilidade do soldador e às características do material a ser soldado.

A soldabilidade metalúrgica envolve transformações de fase que ocorrem no aquecimento, na fusão, na solidificação e no resfriamento. Está associada com a natureza do material e com a transferência de calor na junta soldada e também pode afetar o desempenho da junta soldada. A soldabilidade metalúrgica é a que mais diz respeito à metalurgia da soldagem.

A soldabilidade em serviço diz respeito ao desempenho e à vida útil do equipamento soldado. Está associada tanto à escolha do metal de base e de adição para a soldagem da junta quanto à escolha do procedimento de soldagem, tais como parâmetros de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, temperatura interpasse, temperatura de pós-aquecimento, tratamento térmico pós-soldagem e outros.

Algumas dificuldades podem apresentar-se quando as taxas de resfriamento associadas aos ciclos térmicos da soldagem produzem microestruturas susceptíveis à fratura frágil ou trinca por hidrogênio. Talvez o método mais popular para avaliar a susceptibilidade dos aços carbono a formar estas microestruturas seja através da fórmula do carbono equivalente (CE).

O carbono equivalente 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 IIW para o cálculo de aços carbono é:

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

O resultado desta equação 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 soldagem 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 de 95 a 400°C se faz necessário. Quando o CE é maior que 0.60%, a probabilidade é alta e tanto pré-aquecimento quanto tratamento pós-solda deverão ser realizados para obter soldas com propriedades adequadas.

As trincas induzidas por hidrogênio, também conhecidas como trincas a frio, são defeitos formados pela contaminação da microestrutura da solda por este elemento. O hidrogênio dissocia-se dos lubrificantes orgânicos e das moléculas de água que estão presentes na umidade do ar. Contudo, a solubilidade do hidrogênio é muito maior em

aços fundidos do que em estado sólido (na ordem de 30ppm em peso, acima da linha *Liquidus* a 1500°C, e menos de 1ppm em estado sólido a 400°C). Isto quer dizer que um processo de solda onde os materiais não são fundidos tem maior probabilidade de sucesso na união de componentes com valor comprometido de CE (LOPEZ, 2010).

3.8.2. Transformações Metalúrgicas

O tempo durante o qual ocorre o aquecimento é especialmente importante porque ele não só define a microestrutura da interface, mas controla também a profundidade de aquecimento (ZTA). No fim da fase de forjamento, dependendo da taxa de resfriamento, a austenita se transforma em produtos diferentes: ferrita, perlita, bainita ou martensita. O tipo e a fração de volume final da microestrutura são uma função do pico de temperatura alcançado durante o ciclo de soldagem (Figura 20) e da taxa de resfriamento subsequente. A microestrutura determinará a resistência e a suscetibilidade final da solda à fratura frágil, bem como as outras propriedades da junta. O pico de temperatura e a taxa de resfriamento são difíceis de serem medidos experimentalmente devido às severas deformações plásticas que acontecem na interface de solda (BRACARENSE, 2000).

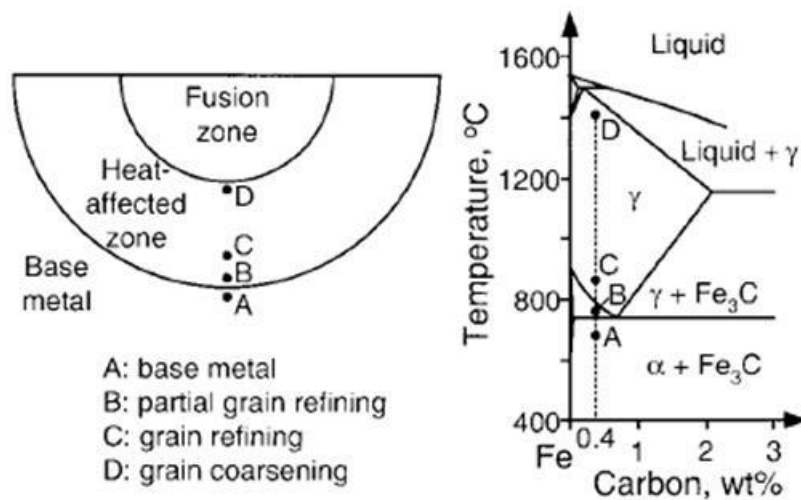


Figura 20. Esquema de alterações na microestrutura versus diagrama TTT na ZTA

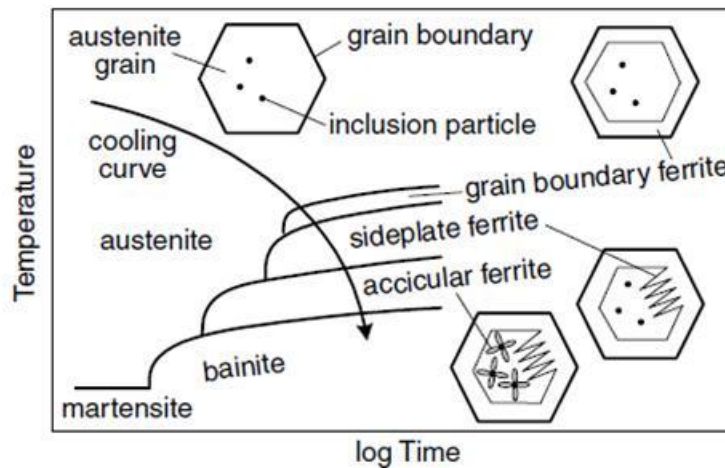
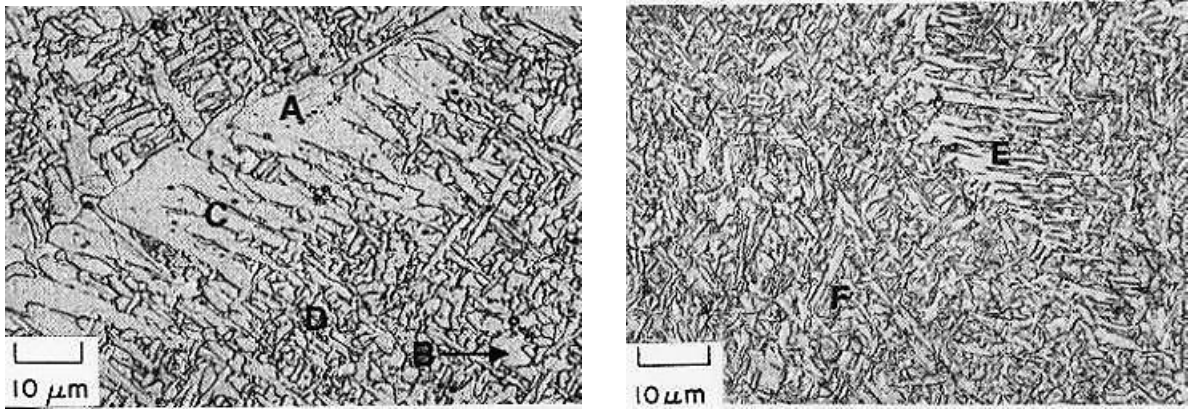


Figura 21. Microestruturas obtidas em função do tempo de resfriamento na zona fundida

Vários diagramas de transformação em resfriamento contínuo tem sido montados esquematicamente para explicar o desenvolvimento da microestrutura do metal de solda de aço baixo carbono baixa liga. Os hexágonos representam a seção transversal de grãos colunares de austenita no metal de solda (Figura 21). Conforme a austenita resfria, ferrita nucleia nos contornos de grão e cresce. A ferrita de contorno de grão é também chamada ferrita alotriomórfica, uma ferrita sem uma forma facetada regular. A mais baixas temperaturas a mobilidade da frente de crescimento planar da ferrita de contorno de grão decresce e forma-se a ferrita de Widmanstatten, ou ferrita de placas laterais. Estas placas laterais podem crescer mais rapidamente porque o carbono, ao invés de acumular-se na frente de crescimento planar, é empurrado para os lados dos picos de crescimento. Átomos substitucionais não difundem durante o crescimento de ferrita de Widmanstatten. A temperaturas até mesmo menores o avanço do crescimento da ferrita de Widmanstatten é muito lento para o interior do grão e é mais rápido se nova ferrita nuclear à frente da ferrita em crescimento. Esta nova ferrita, que é acicular, nucleia nas partículas de inclusões e é composta de pequenas agulhas orientadas aleatoriamente num arranjo de cesta trançada (ARAÚJO, 2006; PARIS, 2004).

As Figuras 22 e 23 mostram a microestrutura do metal de solda de um aço baixo carbono baixa liga. Pode-se ver na Figura 22 ferrita de contorno de grão (A), ferrita de Widmanstatten (C), e ferrita acicular (D), além de ferrita poligonal (B); e na Figura 23, bainita superior (E) e bainita inferior (F) (KOU, 2003).



Figuras 22 e 23. Microestruturas obtidas no resfriamento de um aço baixo carbono baixa liga

A ausência de ferrita de Widmanstätten indica que a taxa de resfriamento é alta, ou seja, o resfriamento ocorre rápido o suficiente a ponto de não permitir a nucleação da referida ferrita (SVENSSON, 1994).

Nos casos de metais de solda de alta resistência e baixa liga, é necessário considerar a decomposição da austenita em produtos de transformação a baixas temperaturas. Portanto, a sequência completa de transformação de fase pode ser ferrita de contorno de grão, ferrita Widmanstätten, ferrita acicular, bainita superior, bainita inferior e finalmente martensita de baixo carbono (BRAZ, 1999).

3.9. APLICAÇÕES DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO

A soldagem por fricção pode ser usada para diversas aplicações:

1. Comercial:

Muitas peças são comercialmente viáveis de serem soldadas por fricção devido ao fato da solda ser feita rapidamente e com um mínimo de cuidado com a limpeza. Usos sugeridos são: ferramentas, cilindros de ar, munições, parafusos, equipamentos marinhos, tubulações de óleo e água, equipamentos elétricos, etc.

2. Aeroespacial:

Peças soldadas por fricção são usadas em uma variedade de aplicações aeroespaciais. Itens como eixos de turbinas, vasos de pressão, tirantes, componentes de atuadores, conjuntos de engrenagens, estruturas de fuselagem aeronáutica, são alguns dos componentes adequados para solda por fricção. O processo linear pode unir materiais similares/dissimilares em quase qualquer forma, desde anéis e pás para ventiladores a contactores metálicos quadrados. Oferece significativa redução de custos em comparação com outros métodos, como usinagem de peças a partir de blocos sólidos de matéria-prima.

3. Hidráulica:

Cilindros hidráulicos e válvulas são soldados por fricção inercial. Os cilindros podem ser completamente usinados e os terminais podem ser soldados em seguida, reduzindo custos e estoques. Para formatos irregulares, o cilindro pode ser soldado a uma peça maior para reduzir custos e tempo de máquina.

4. Automotiva:

Em várias aplicações automotivas é comum o uso de diferentes cargas em vários tipos de materiais. Em alguns casos a necessidade do uso de dois tipos diferentes de metais em uma peça, como válvulas, vai de encontro ao "colocando o metal certo no lugar certo", usando um metal mais forte para o eixo e um material que suporta melhor o calor no terminal. Outras aplicações incluem eixos cardan, eixos de direção, juntas homocinéticas, etc.

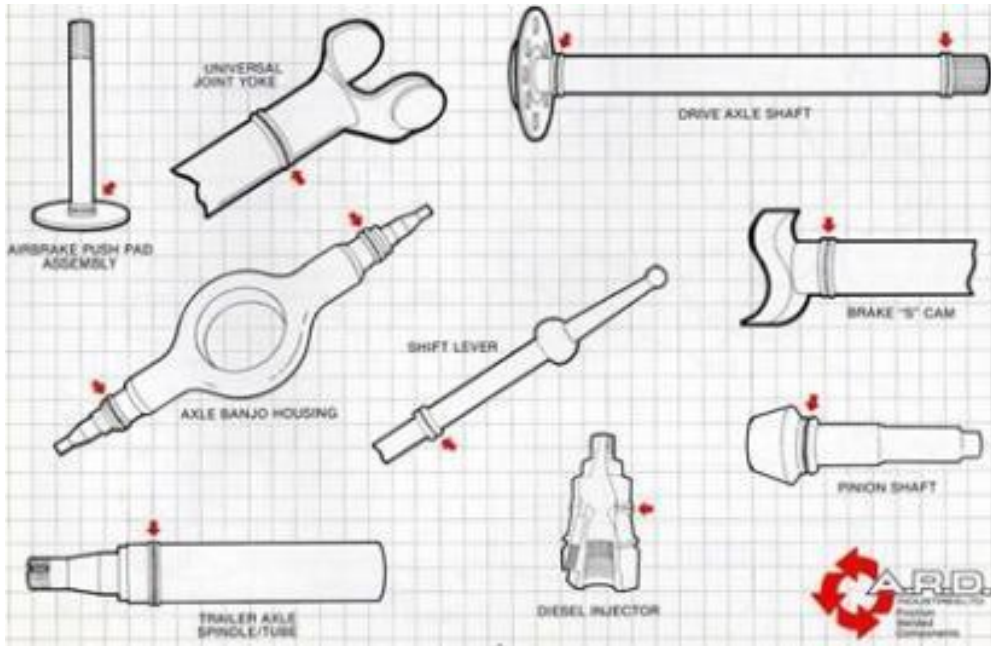
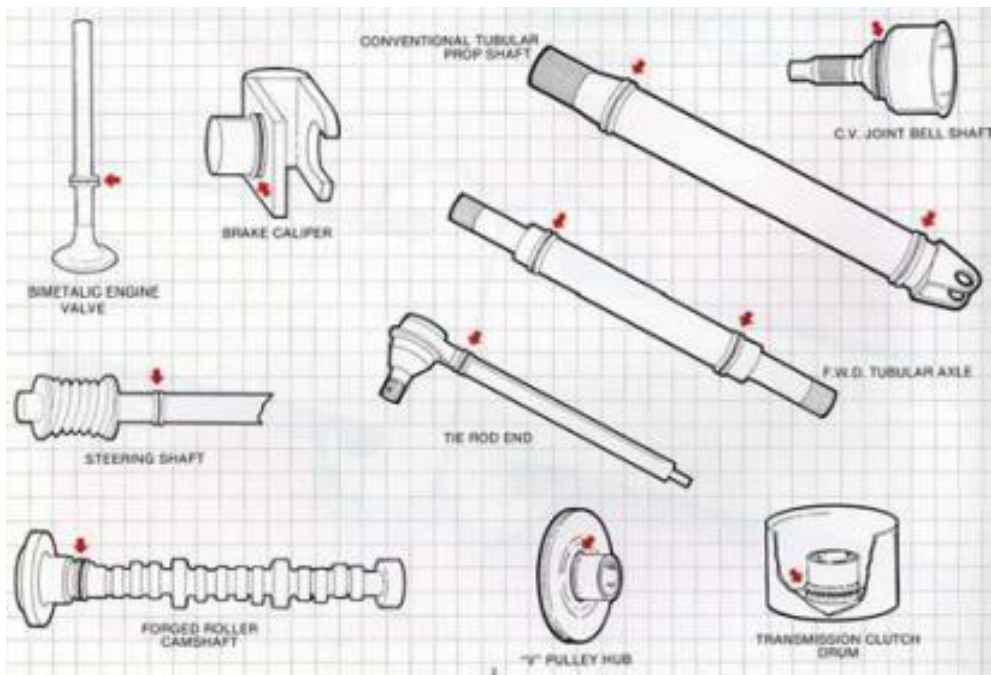
5. Bi-metálicos:

Desde 1966, a soldagem por fricção tem sido usada com sucesso para unir diversos materiais considerados não soldáveis por outros processos. As aplicações vão desde conectores elétricos, sistemas de vácuo e pressão, componentes de turbinas, juntas criogênicas, vidro a vedações metálicas e outras.

6. Agricultura:

A soldagem por fricção é usada extensivamente na indústria da agricultura por que as soldas apresentam qualidade de forjado, com 100% de ligação na área de contato. Esta ligação é forte o suficiente para suportar o alto torque e trabalho exigido pelo maquinário pesado destas indústrias (SAHOO, 2007). Uma ampla variedade de componentes para caminhões e reboques também é soldada por fricção. Estes incluem eixos viga e de banjo, válvulas de motores, eixos cardan e turbo chargers.

Abaixo alguns exemplos de peças que podem ser soldadas por fricção (Figura 24).



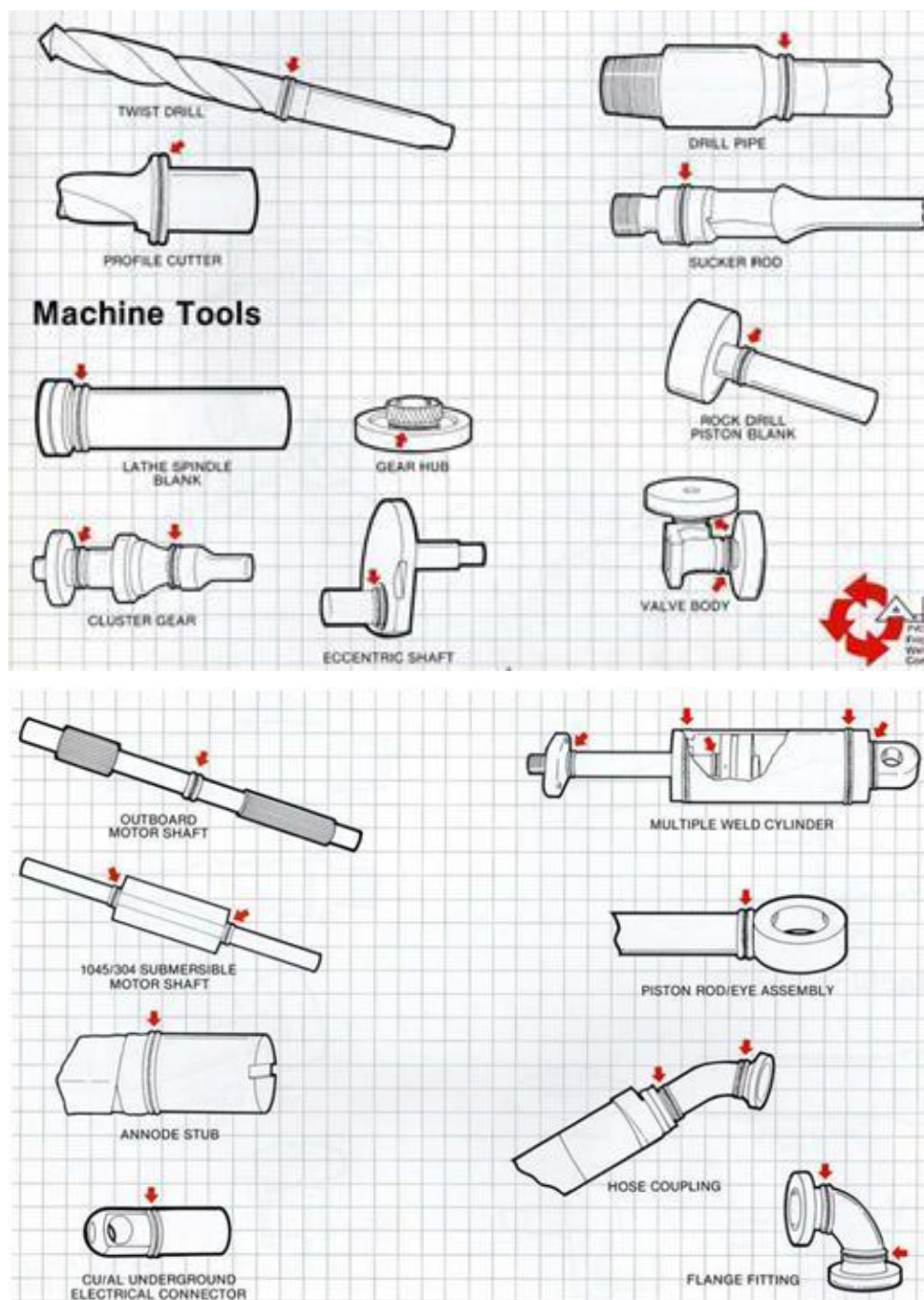


Figura 24. Algumas aplicações da solda fricção

4. METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizada uma máquina de soldagem por fricção do tipo Arraste Contínuo (Direct Drive) 40T Single Head Friction Welding Machine FW40/400S da ETA Technology PVT. LTD. – India, fabricada em 2011, para soldar os cardans para o estudo, mostrada na Figura 25.



Figura 25. Equipamento de solda fricção utilizado neste trabalho

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados foram caracterizados quanto à composição química e microestrutura.

Tabela 5. Composição química do tubo

	%C	%Mn	%Si	%S	%P
Especificado	<=0.22	<=1.70	<=0.55	<=0.015	<=0.025
Encontrado	0.162	1.32	0.288	0.0019	0.019

O carbono equivalente para o tubo foi calculado utilizando a fórmula do IIW mostrada na página 33:

$$CE = 0.162 + \frac{1.32}{6} + \frac{0.288}{15} = 0.40$$

A microestrutura do Tubo é constituída por ferrita com perlita fina (estimado 70-30%), tamanho de grão ASTM 4-5, com pequeno grau de alinhamento da estrutura (Figura 26).

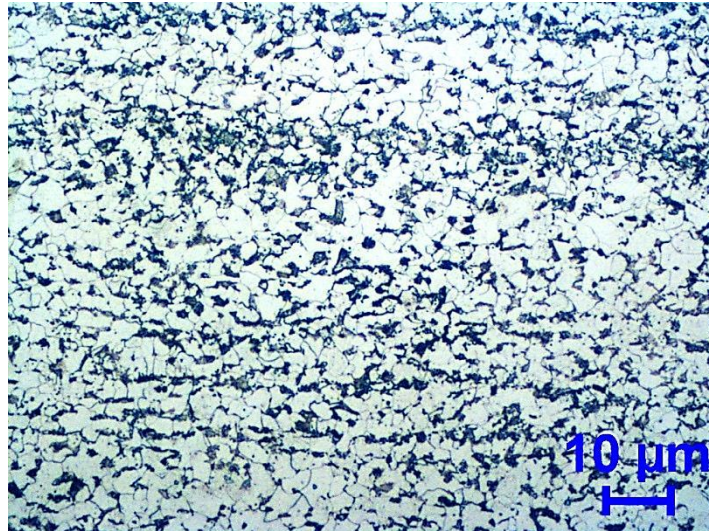


Figura 26. Material base Tubo: ferrita + perlita (Nital 3%, 500x)

Tabela 6. Composição química do garfo

	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%V	%Cr	%Mo
Especificado	0.34-	1.2-1.6	0.15-	0.02-	0.025	0.08-	0.3	0.08
38MnVS6	0.41		0.8	0.06	máx.	0.2	máx.	máx.
Encontrado	0.35	1.26	0.34	0.04	0.012	0.1	0.15	0.04

O carbono equivalente para o garfo foi calculado utilizando a fórmula do IIW mostrada na página 33:

$$CE = 0.35 + \frac{1.26}{6} + \frac{0.15+0.04+0.1}{5} + \frac{0.35}{15} = 0.64$$

A microestrutura do Garfo é constituída por perlita com ferrita (estimado 70-30%), tamanho de grão perlítico ASTM 3 e ferrítico ASTM 5 (Figura 27).

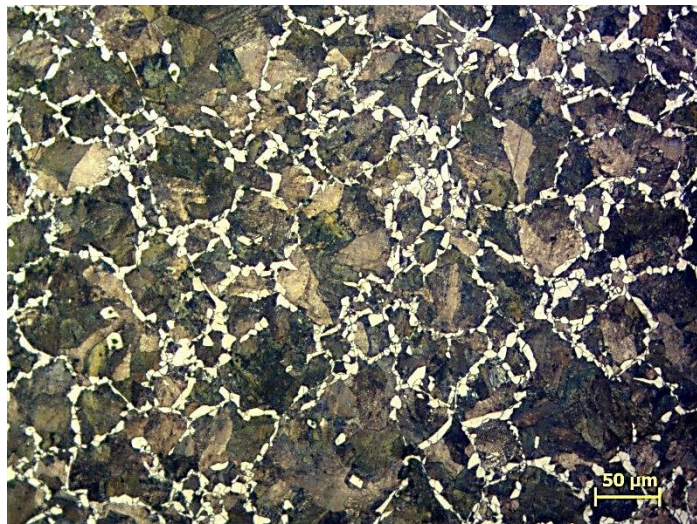


Figura 27. Material base Garfo: perlita + ferrita (Nital 3%, 100x)

4.2. SOLDAGEM DAS AMOSTRAS

Foram soldados cardans (Figura 28) variando os parâmetros força de fricção e rotação e mantendo os demais parâmetros de processo constantes. A Tabela 7 mostra os parâmetros que variaram nas amostras:

Tabela 7. Parâmetros em estudo

Amostra	Força de fricção (toneladas)	Rotação (RPM)
1	5	300
1a	5	400
1b	5	600
1c	5	750
2	4	600
2a	6	600
2b	8	600
2c	10	600
3	7	300
3a	7	600
3b	7	750

FONTE: Dados de pesquisa, 2012

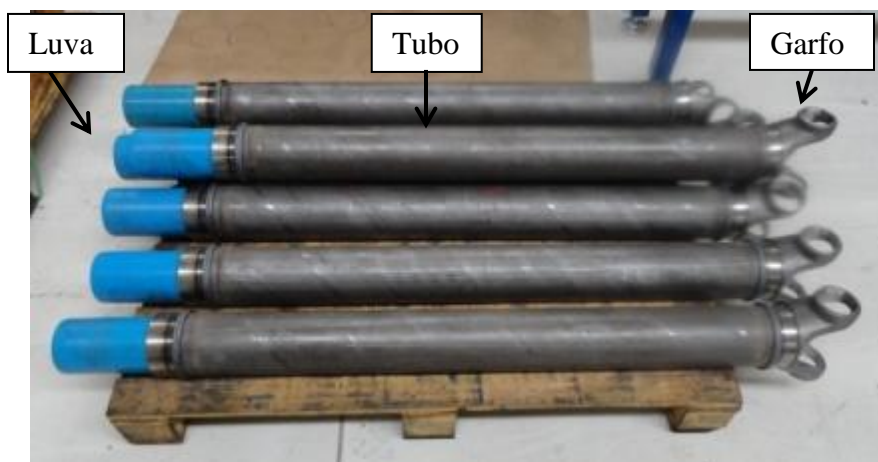


Figura 28. Cardans soldados

4.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLDA DO ESTUDO

Para a preparação das amostras foi feito o corte das peças soldadas em serra fita vertical Starret ST-2001 (Figura 29), seguido de lixamento em lixa rotativa Arotec Aropol 2V, com lixa de grana 220. Em seguida as amostras foram embutidas em baquelite utilizando uma embutidora Leco PR-32 (Figura 30), lixadas com lixas de granas 220, 400 e 600 seguido de polimento em pano de polimento com suspensão de diamante de 3 micron (Figura 31).

4.4. ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE SOLDA DO ESTUDO

Foi medida a dureza Vickers através da região soldada de 0.2 em 0.2 mm, com carga de 300g utilizando um microdurômetro automático Leco LM300AT (Figura 32). Depois da medição das durezas se realizou ataque com Nital 3% e avaliaram-se as transformações nas microestruturas da ZTA do componente Garfo utilizando microscópio Zeiss Axiovert 40MAT com sistema de aquisição de imagens Zeiss AxioVision 4.0 (Figura 33). Não foi dada a mesma ênfase ao componente Tubo por ser um material baixo carbono, cuja dureza máxima não ultrapassou 250 HV. Para caracterização da composição química dos componentes foi utilizado um espectrômetro SpectroMaxx (Figura 34). As macrofotos foram obtidas utilizando estereoscópio Stemi 2000-C.



Figura 29. Serra fita Starret ST-2001



Figura 30. Embutidora Leco PR-32



Figura 31. Polidrizes Arotec Aropol 2V

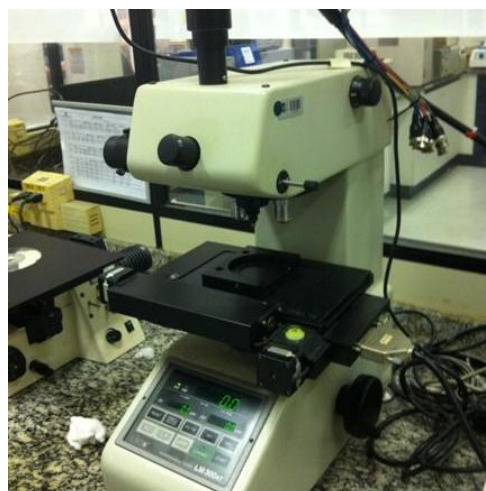


Figura 32. Microdurômetro Leco LM300AT



Figura 33. Microscópio Zeiss Axiovert 40MAT



Figura 34. Espectrômetro Spectromaxx



Figura 35. Exemplo de corpo de prova embutido em baquelite, lixado, polido e atacado com Nital 3%

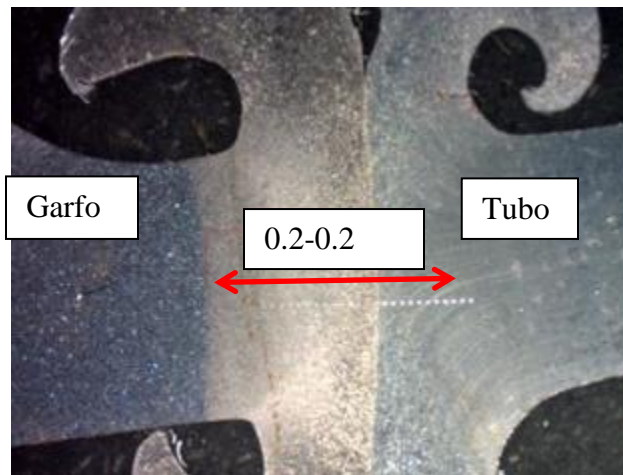


Figura 36. Corpo de prova embutido em baquelite mostrando esquema de medição da microdureza

5 RESULTADOS

5.1. ANÁLISE DA EXTENSÃO DA ZTA

Foi medida somente a extensão da ZTA do componente Garfo por ele apresentar maior temperabilidade e, portanto, necessitar de mais controle dos parâmetros de soldagem para evitar ultrapassar a dureza máxima especificada na norma do cliente (400 HV), além de ser de mais fácil visualização a transição final da ZTA para o material base.

Tabela 8. Extensão da ZTA do garfo e tempo de soldagem das amostras

Amostra	Rotação (RPM)	Força de fricção (Ton)	Extensão da ZTA do Garfo (mm)	Tempo de soldagem (s)	Dureza máxima (HV)
1	300	5	4.17	23.5	442
1a	400	5	4.45	24	442
1b	600	5	4.27	26	397
1c	700	5	4.14	24	395
2	600	4	4.42	37.5	410
2a	600	6	3.93	19	395
2b	600	8	3.69	12.5	470
2c	600	10	4.00	10	527
3	300	7	3.91	15	459
3a	600	7	3.97	15.5	433
3b	700	7	3.83	15.5	445

FONTE: Dados de pesquisa, 2012

Da análise da Tabela 8 acima se obtêm, para as amostras do grupo 1, que o aumento da rotação leva a diminuição da largura da ZTA no Garfo (Figuras 37 a 40), exceto para a amostra 1, onde a baixa velocidade gera mais fricção, reduzindo o tempo de soldagem e gerando uma ZTA mais estreita e com maior dureza. Baixas velocidades reduzem o tempo de aquecimento e aumentam a taxa de resfriamento, resultando em maior dureza.

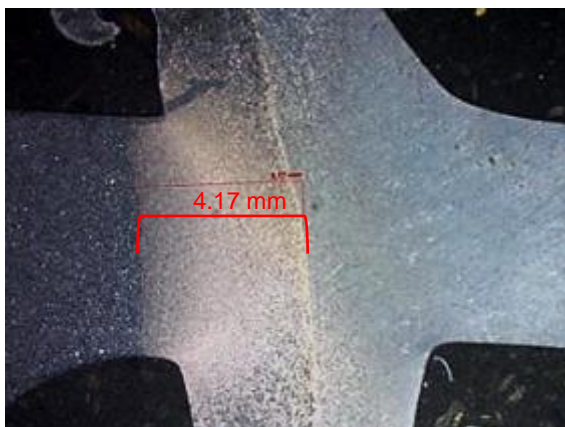


Figura 37. Extensão ZTA Garfo amostra 1

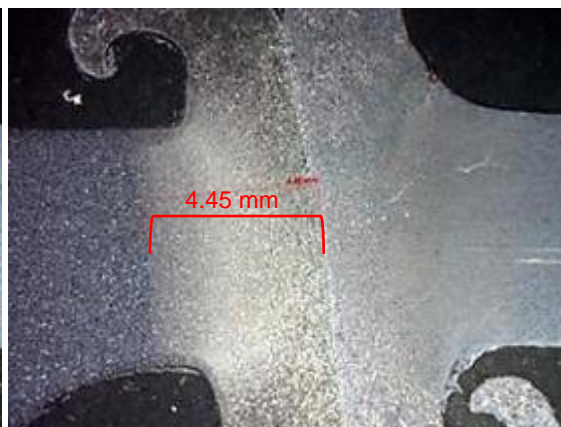


Figura 38. Extensão ZTA Garfo amostra 1^a



Figura 39. Extensão ZTA Garfo amostra 1b



Figura 40. Extensão ZTA Garfo amostra 1c

Para as amostras do grupo 2, verifica-se uma diminuição da extensão da ZTA com o aumento da força de fricção, exceto para a amostra com 10 toneladas de força de fricção (amostra 2c) (Figuras 41 a 44). Por ser uma força de fricção alta, ocorre um consumo maior do Tubo que do Garfo, permitindo que o calor se propague mais para o interior do Garfo, causando maiores transformações na sua microestrutura.

A fase de soldagem também ocorre mais rapidamente, passando de 37.5 segundos na amostra 2 (força de fricção 4 toneladas) para 10 segundos na amostra 2c (força de fricção 10 toneladas).

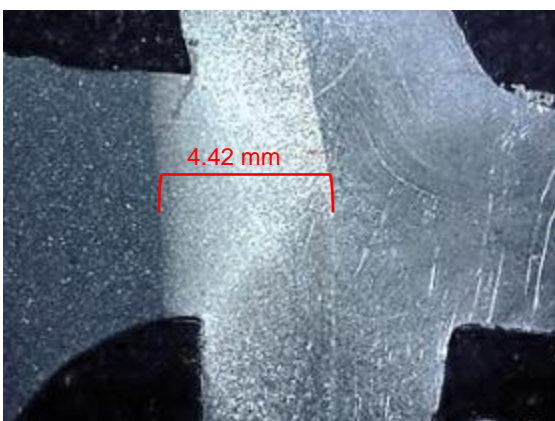


Figura 41. Extensão ZTA Garfo amostra 2

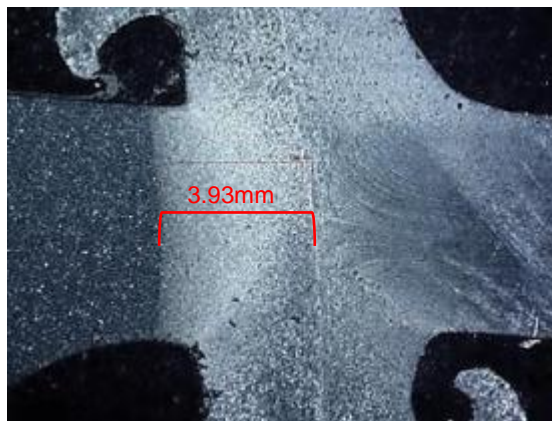


Figura 42. Extensão ZTA Garfo amostra 2a



Figura 43. Extensão ZTA Garfo amostra 2b

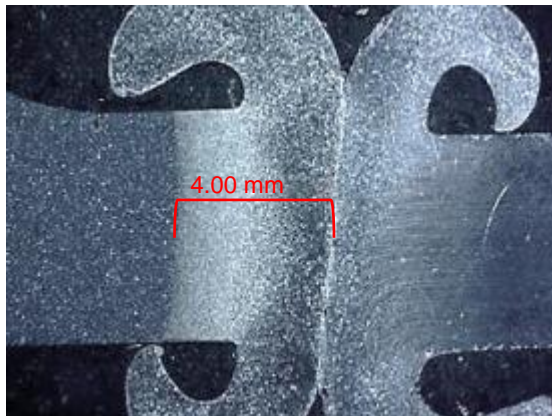


Figura 44. Extensão ZTA Garfo amostra 2c

Para as amostras do grupo 3, onde a força de fricção é de 7 toneladas, verifica-se ZTA's mais estreitas (Figuras 45 a 47) e com maior dureza, pois a maior força faz com que a solda ocorra mais rapidamente, aumentando a taxa de resfriamento e, por conseguinte, a dureza.



Figura 45. Extensão ZTA Garfo amostra 3



Figura 46. Extensão ZTA Garfo amostra 3a

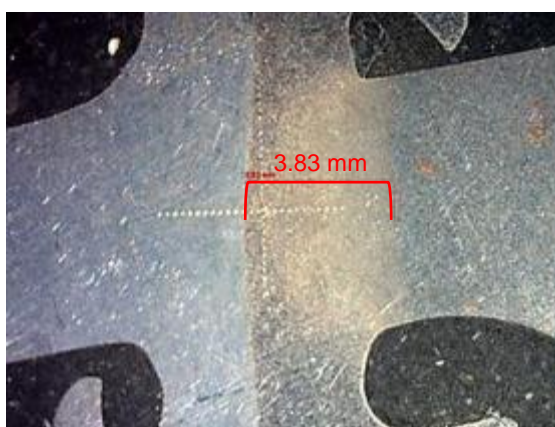


Figura 47. Extensão ZTA Garfo amostra 3b

A Figura 48 abaixo foi utilizada para verificar como a variação dos parâmetros de soldagem afetou as propriedades do material soldado.

Parâmetros de Processo – Variações e Conseqüências

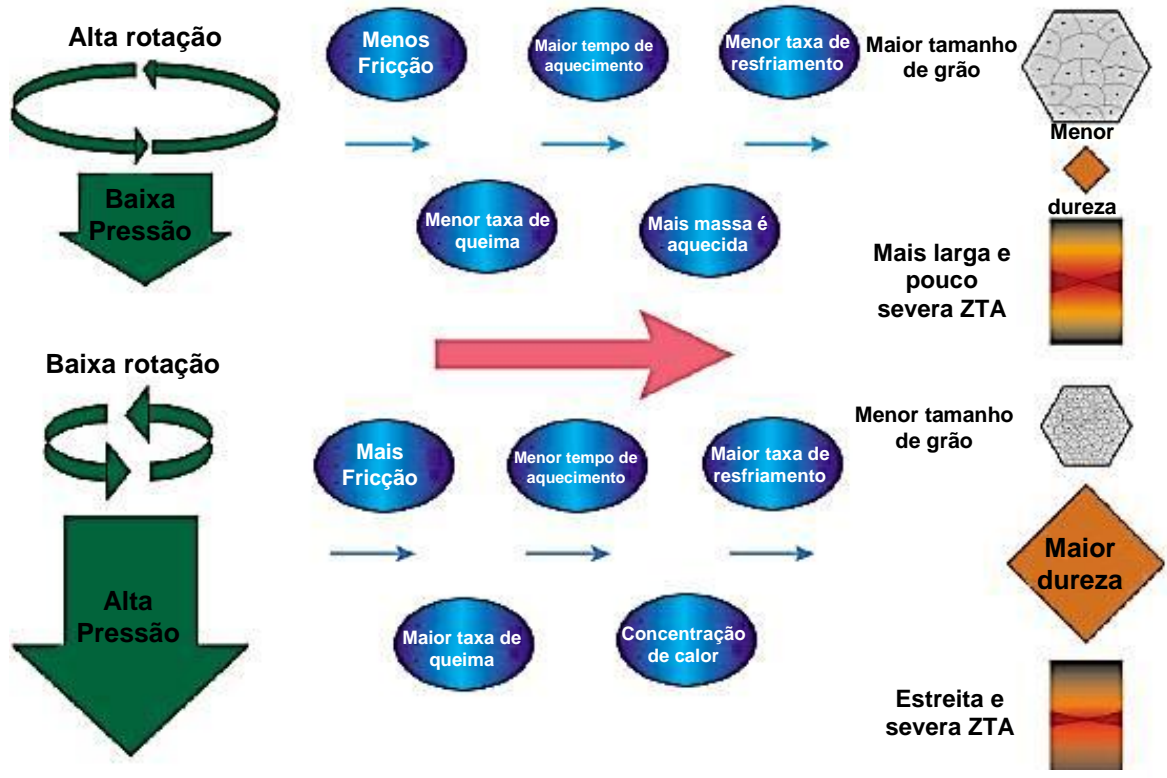


Figura 48. Variação dos parâmetros da soldagem por fricção e suas conseqüências

5.2. ANÁLISE DO FORMATO DA REBARBA

5.2.1. Amostras do grupo 1

Com a força de fricção fixa em 5 toneladas (amostras do grupo 1) nota-se que há uma tendência da rebarba não enrolar completamente no lado externo de ambos componentes, independente da rotação utilizada (Figuras 49 a 52). Nota-se a formação de cantos “quadrados” no lado interno do Garfo (mais escuro), que são concentradores de tensão e, portanto, não são desejáveis.



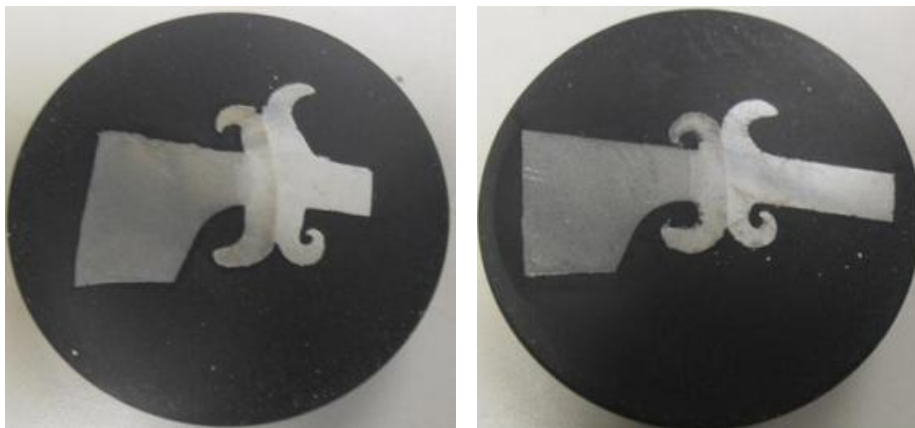
Figuras 49 e 50. Amostras 1 e 1a



Figuras 51 e 52. Amostras 1b e 1c

5.2.2. Amostras do grupo 2

Já nas amostras do grupo 2 pode ser visto que com uma menor força de fricção leva-se mais tempo para atingir o deslocamento desejado, ejetando material mais lentamente da região de junção (Figuras 53 a 56). Isto faz com que a rebarba ejetada não se enrole ou se enrole em menor grau. Conforme a força de fricção aumenta, aumenta o calor gerado e a solda se desenvolve mais rapidamente, conforme se pode observar nos gráficos destas amostras na seção Anexos. Esta força maior faz com que a rebarba se enrole mais. O ideal é que o enrolamento seja arredondado, pois cantos “quadrados” são concentradores de tensão e, portanto, não são desejáveis.



Figuras 53 e 54. Formato das rebarbas das amostras 2 e 2a



Figuras 55 e 56. Formato das rebarbas das amostras 2b e 2c

5.2.3. Amostras do grupo 3

Com a força de fricção de 7 toneladas ocorre um enrolamento maior da rebarba, independente da rotação utilizada (Figuras 57 a 59). Com rotações menores, entretanto, a rebarba tem um pouco mais de tempo para enrolar, enquanto com rotação maior ela fica um pouco mais aberta.



Figuras 57 e 58. Amostras 3 e 3a



Figura 59. Amostra 3b

A taxa de resfriamento é afetada pelo ambiente e pelo tempo de soldagem combinado com a quantia total de rebarba formado em torno da interface de solda. Se a

rebarba tem uma massa grande, então o calor armazenado dentro dela será conduzido de volta para a peça reduzindo assim a taxa de resfriamento do metal dentro da ZTA. Pequenos tempos de aquecimento resultam naturalmente em uma alta taxa de geração de calor. Isto envolve também uma alta taxa de deslocamento com a formação de uma grande rebarba onde a maioria do calor é armazenada como energia sensível. Em comparação, quando longos tempos de aquecimento são usados, todo o calor gerado na interface de solda não é armazenado na rebarba, mas muito dele tem tempo suficiente para se espalhar pelas partes soldadas. Do ponto de vista da melhoria da qualidade do cordão de solda, é desejável que se tenha pequenos tempos de aquecimento sem rebarba formada. Deste modo, a taxa de resfriamento será mais alta e as propriedades mecânicas serão melhores. Por outro lado, se for desejável a preservação da tenacidade, por exemplo, é melhor que se tenha longos tempos de aquecimento e por conseguinte uma taxa de resfriamento mais baixa (SATHIYA, 2006).

5.3. ANÁLISE DA DUREZA DA ZTA DO COMPONENTE GARFO

5.3.1. Amostras do grupo 1

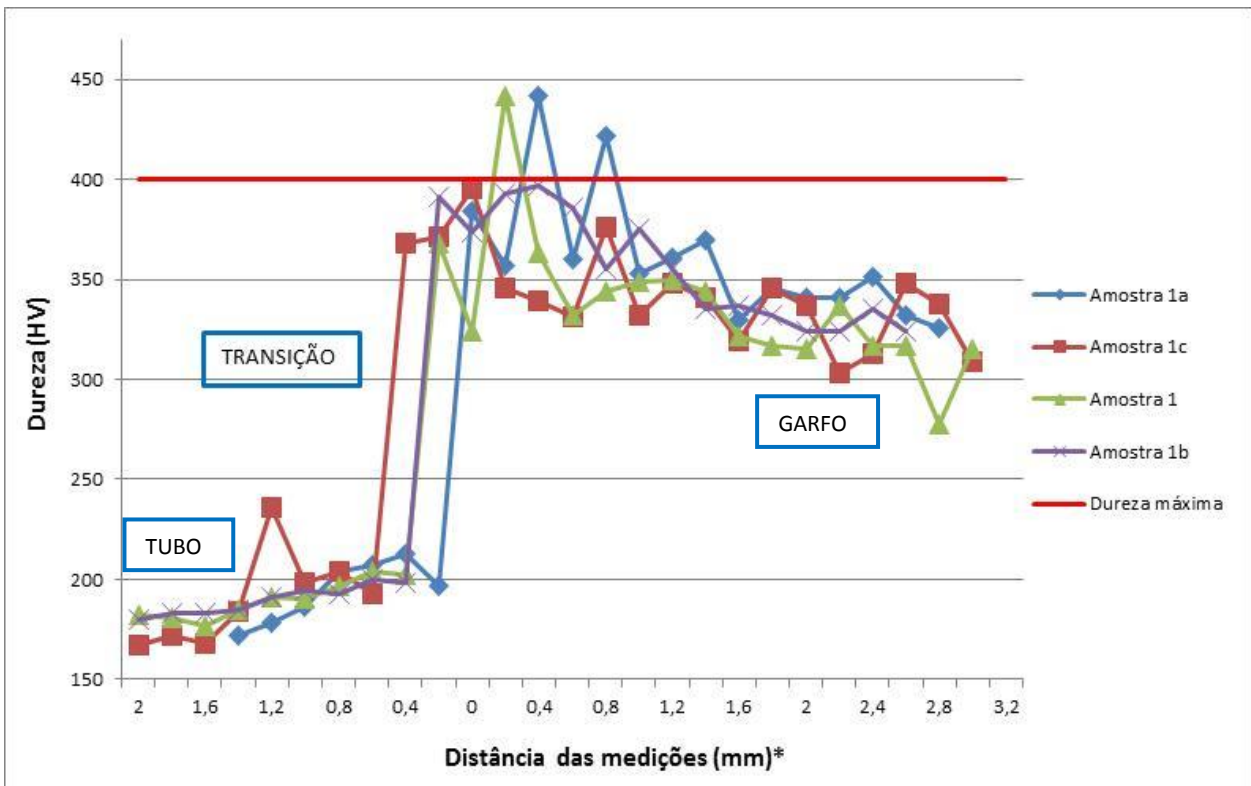
Foram soldadas quatro amostras mantendo-se a força de fricção constante em 5 toneladas e variando-se a rotação. Os perfis de dureza encontrados podem ser vistos no gráfico abaixo (Figura 60).

Tabela 9. Parâmetro variado e dureza máxima observada

Amostra	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
1	300	442
1a	400	442
1b	600	397
1c	750	395

FONTE: Dados de pesquisa, 2012

Com a força de fricção fixa em 5 toneladas notou-se que a dureza máxima da ZTA diminuiu com o aumento da rotação, mostrando ter menor influência em velocidades de rotação próximas: a dureza máxima não variou quando a rotação aumentou de 300 para 400 RPM; e é praticamente a mesma quando se passa de 600 para 750 RPM (Figura 60). A rotação mais baixa nas duas primeiras amostras faz com que o calor seja imposto por mais tempo na zona de ligação, aumentando a extensão da ZTA nesta região após o resfriamento; já nas duas últimas amostras, a rotação mais alta deve causar um pico de temperatura maior com uma taxa de resfriamento menor. Isto favorece o aumento do tamanho de grão da microestrutura, reduzindo o valor máximo de dureza na ZTA.



* O ponto zero milímetros refere-se ao ponto mais próximo à interface da solda tubo-garfo

Figura 60. Perfis de dureza das amostras soldadas com força de fricção de 5 toneladas

5.3.2. Amostras do grupo 2

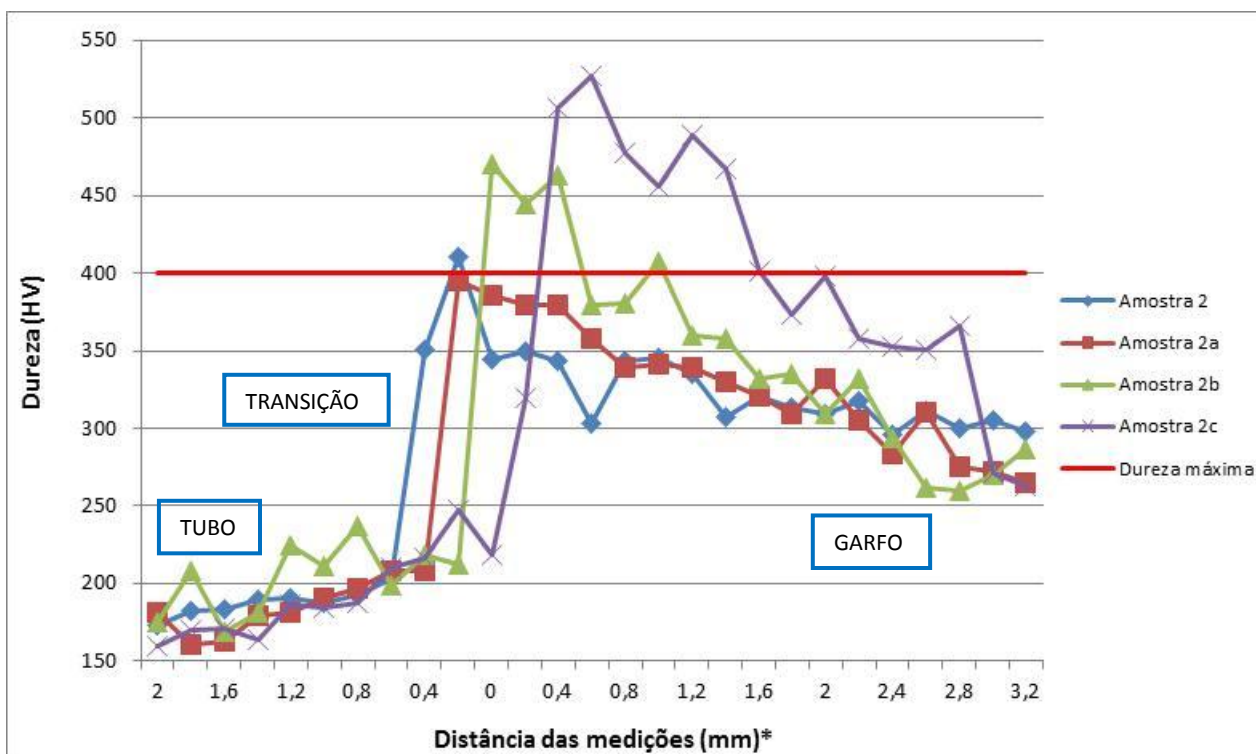
Foram soldadas quatro amostras mantendo-se a rotação constante em 600 RPM e variando-se a força de fricção. Os perfis de dureza encontrados podem ser vistos no gráfico abaixo (Figura 61).

Tabela 10. Parâmetro variado e dureza máxima observada

Amostra	Força de fricção (toneladas)	Dureza máxima (HV)
2	4	410
2a	6	395
2b	8	470
2c	10	527

FONTE: Dados de pesquisa, 2012

Mantendo-se a rotação constante notou-se um aumento na dureza máxima da ZTA com o aumento da força de fricção (Figura 61). Este fato pode ser justificado pelo fato da soldagem acontecer mais rapidamente conforme se aumenta a força de fricção (vide seção Anexos): o calor é imposto mais rapidamente, o pico de temperatura é maior, fazendo com que um resfriamento mais rápido deixe a estrutura com uma maior fração de martensita e conseqüentemente com maior dureza.



* O ponto zero milímetros refere-se ao ponto mais próximo à interface da solda tubo-garfo

Figura 61. Perfis de dureza das amostras soldadas com rotação de 600 RPM

5.3.3. Amostras do grupo 3

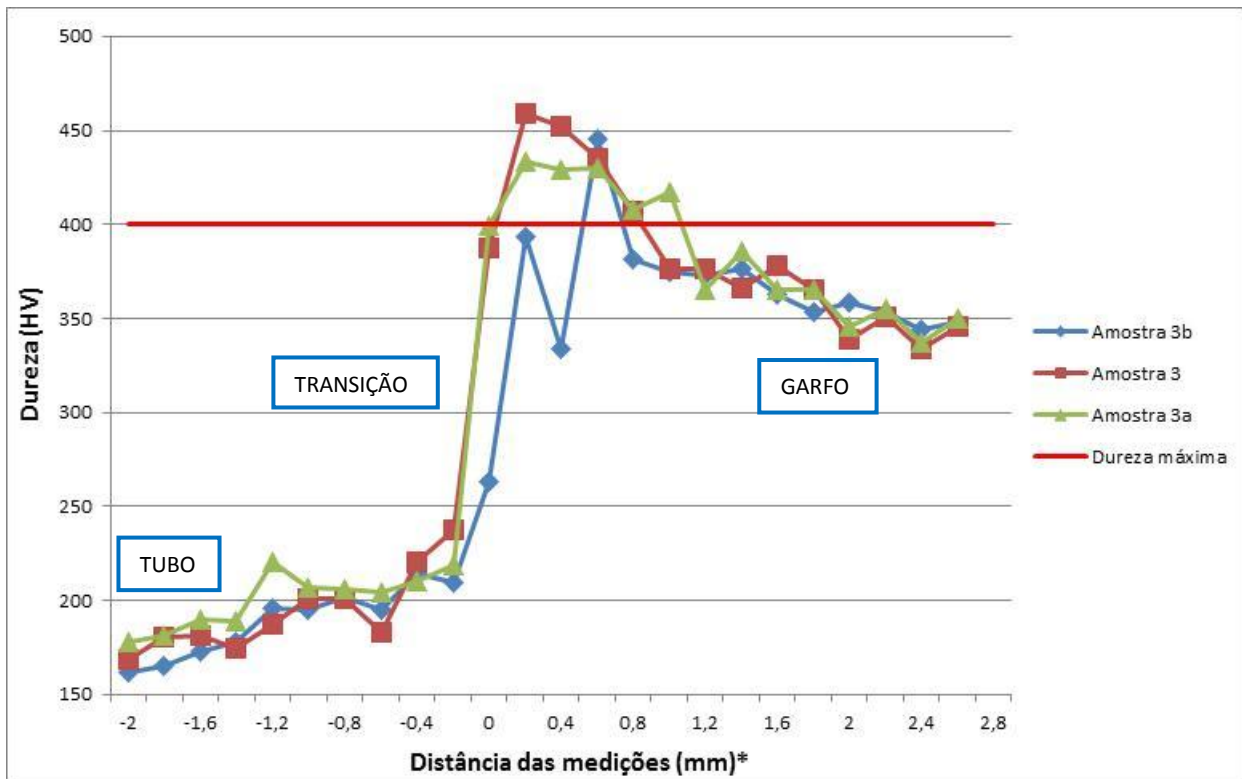
Foram soldadas três amostras mantendo-se a força de fricção constante em sete toneladas e variando-se a rotação. Os perfis de dureza encontrados podem ser vistos no gráfico abaixo (Figura 62).

Tabela 11. Parâmetro variado e dureza máxima observada

Amostra	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
3	300	459
3a	600	433
3b	750	445

FONTE: Dados de pesquisa, 2012

O pico de temperatura atingido pela força de fricção de sete toneladas causou uma dureza elevada na ZTA tanto em baixas quanto em altas rotações (Figura 62).



* O ponto zero milímetros refere-se ao ponto mais próximo à interface da solda tubo-garfo

Figura 62. Perfis de dureza das amostras soldadas com força de fricção de 7 toneladas

5.4. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DOS COMPONENTES

5.4.1. Propriedades Mecânicas

Como não há fusão do metal a ser soldado, nem material de adição, gás de proteção e escória, as propriedades mecânicas da solda são próximas a do metal de base.

A resistência à fadiga também não é muito afetada, principalmente quando o material sendo soldado for temperado e revenido após a soldagem.

Abaixo uma representação esquemática das transformações metalúrgicas que ocorrem no garfo e no tubo devido ao aquecimento gerado pela fricção (Figuras 63 e 64) e uma explicação breve do que acontece com a microestrutura em cada região (Figuras 65 a 75).

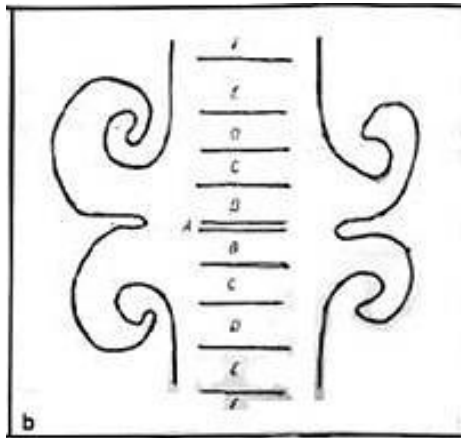


Figura 63. Representação esquemática das regiões afetadas pelo calor

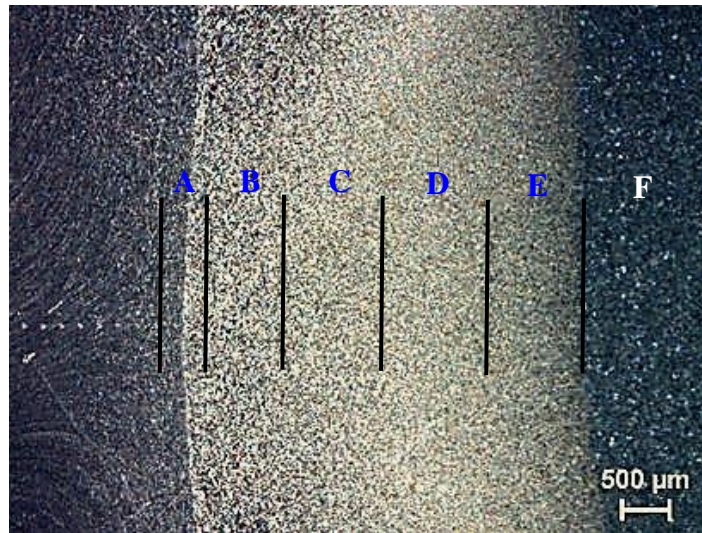


Figura 64. Representação esquemática das regiões afetadas pelo calor na soldagem por fricção

Zona A: área de deformação plástica severa. Aqui ocorrem atrito e transferência de partículas metálicas entre as peças. Considera-se que a temperatura nesta região seja de aproximadamente 1300°C e a granulação do metal é fina (Figura 65).

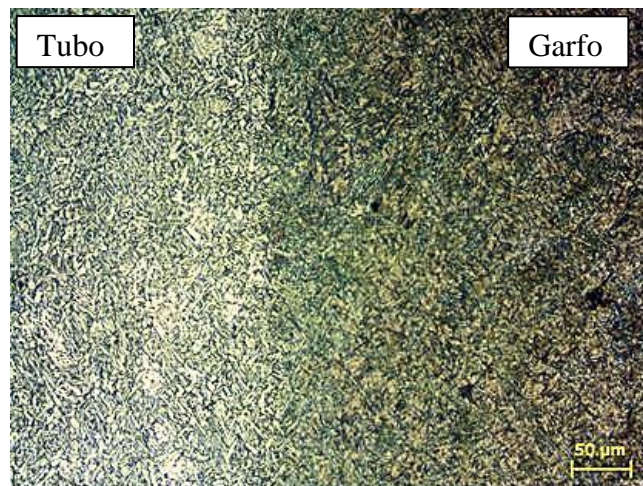


Figura 65. Exemplo de zona A, interface Tubo/Garfo

Zona B: área de grão refinado. Nesta região ocorre deformação plástica considerável, ainda que não tenha participação direta no atrito e transferência de partículas pelo caldeamento. A temperatura alcançada é de 1250°C perto do limite com a zona A e 950°C perto do limite com a zona C (Figuras 66 e 67).

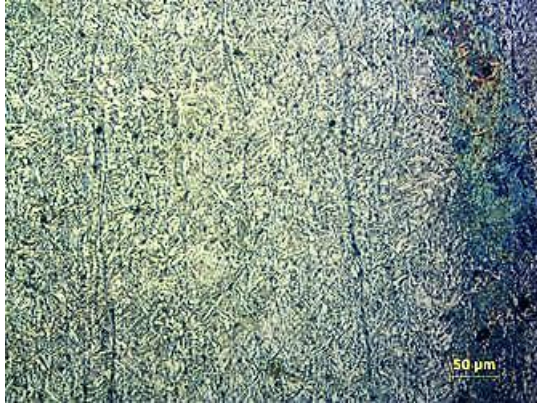


Figura 66. Zona B Tubo

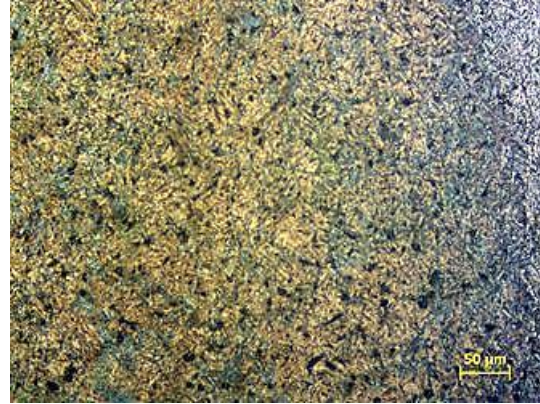


Figura 67: Zona B Garfo

Zona C: zona inter-crítica. Esta zona sofre aquecimento entre 730 e 850°C. A perlita desta região é austenitizada e a ferrita não sofre transformação (Figuras 68 e 69).



Figura 68. Zona C Tubo



Figura 69: Zona C Garfo

Zona D: zona esferoidizada. Esta região é aquecida entre 650 e 730°C. Ocorre esferoidização da perlita (Figuras 70 e 71).



Figura 70. Zona D Tubo

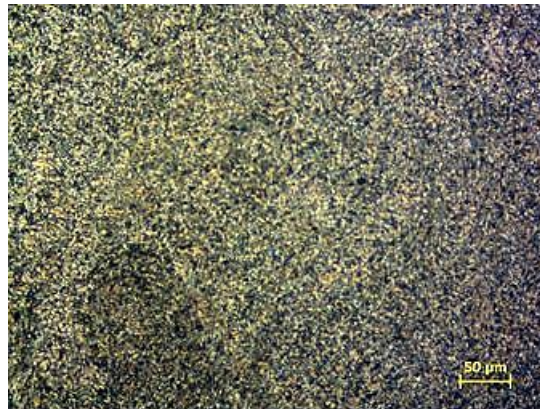


Figura 71: Zona D Garfo

Zona E: zona de recristalização da ferrita. A temperatura entre 550 e 650°C proporciona a recristalização da ferrita deformada e há pequeno crescimento de grão (Figuras 72 e 73).

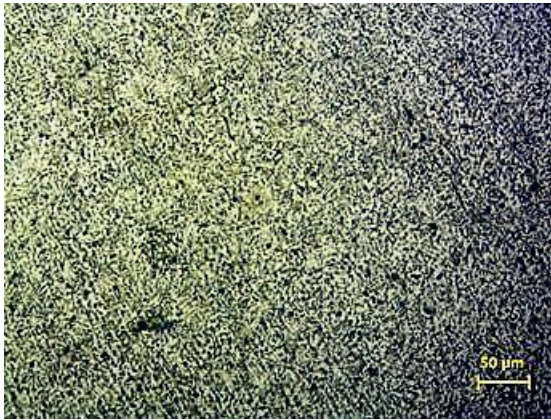


Figura 72. Zona E Tubo

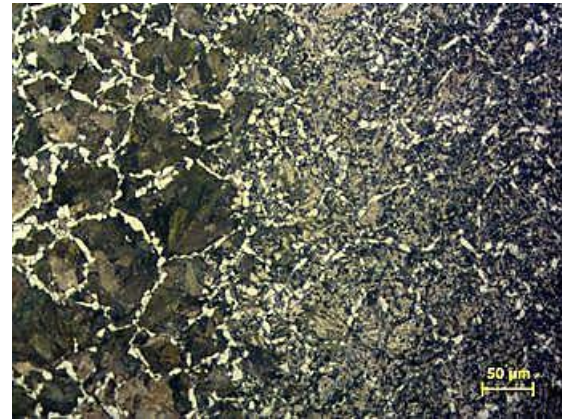


Figura 73: Zona E Garfo

Zona F: estrutura do metal base. A temperatura nesta região não é superior a 550°C. Não há transformação de fase (Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/download/61den.pdf>>. Acesso em 28/06/2012) (Figuras 74 e 75).

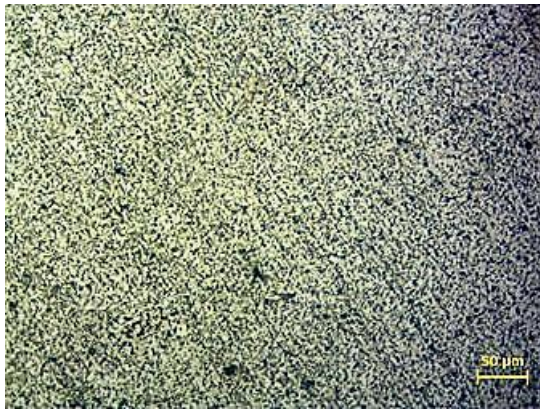


Figura 74. Zona F Tubo

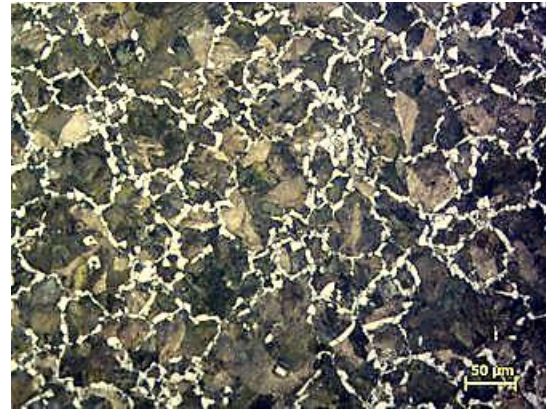


Figura 75: Zona F Garfo

As metalografias com mais detalhes da interface e das ZTA's dos três grupos de amostras estudadas estão colocadas abaixo. Os gráficos de acompanhamento das soldagens estão nos Anexos I a III.

Amostra 1

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
1	5	15	300	442

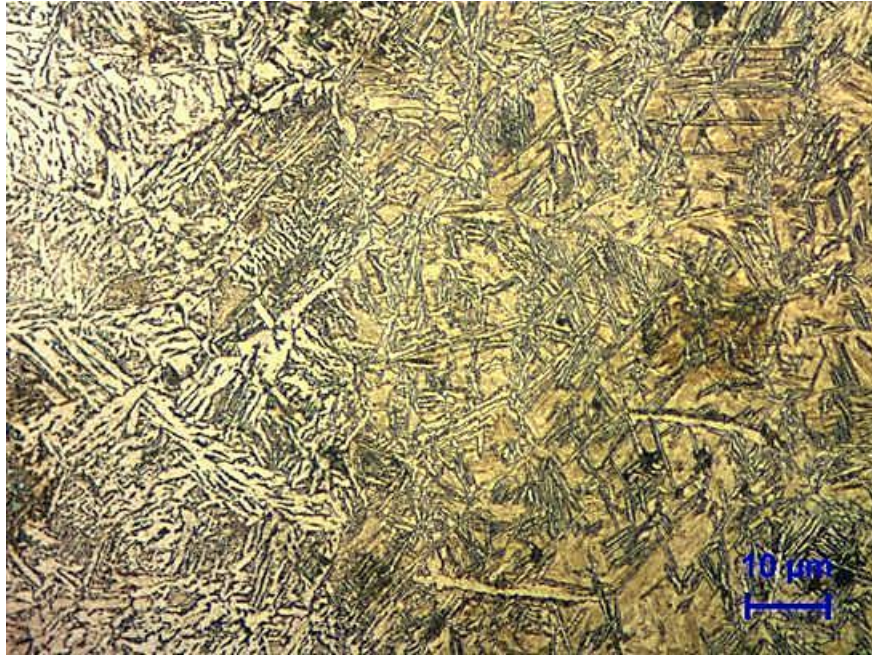


Figura 76. Interface Tubo-Garfo Amostra 1 (Nital 3%, 500x)

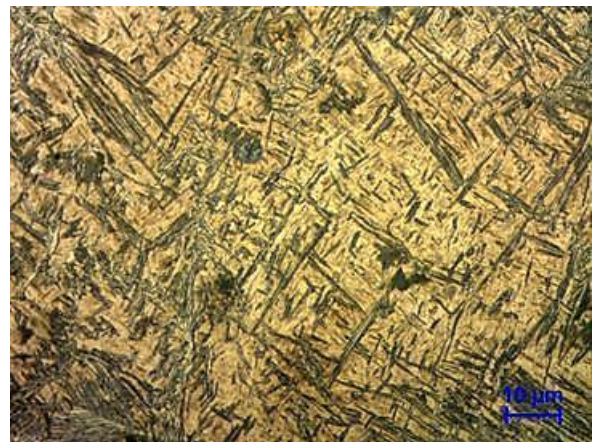


Figura 77. ZTA Tubo Amostra 1 (Nital 3%, 500x) **Figura 78.** ZTA Garfo Amostra 1 (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita poligonal e de segunda fase alinhada (LIENERT, 2003), enquanto na ZTA do Garfo encontramos somente martensita e bainita, o que justifica a dureza encontrada.

Amostra 1a

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
1a	5	15	400	442

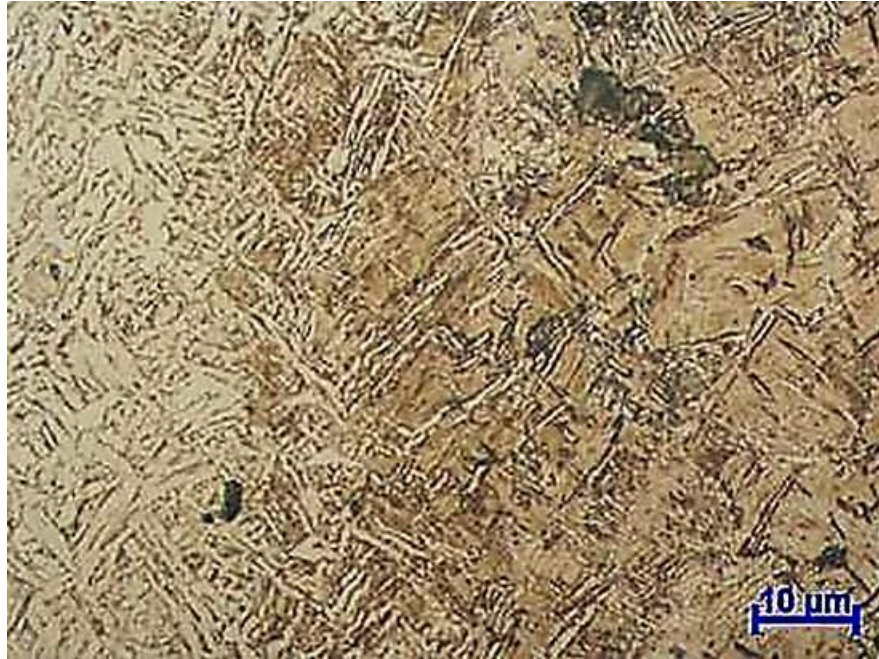


Figura 79. Interface Tubo-Garfo Amostra 1a (Nital 3%, 500x)

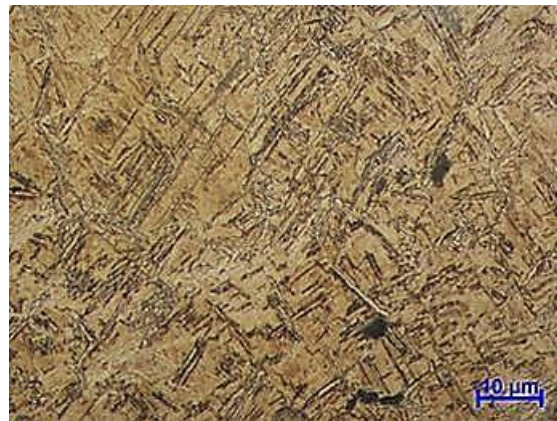


Figura 80. ZTA Tubo Amostra 1a (Nital 3%, 500x) **Figura 81.** ZTA Garfo Amostra 1a (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e ferrita poligonal, enquanto na ZTA do Garfo também encontramos somente martensita e agulhas de bainita (THEWLIS, 2004).

Amostra 1b

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
1b	5	15	600	397

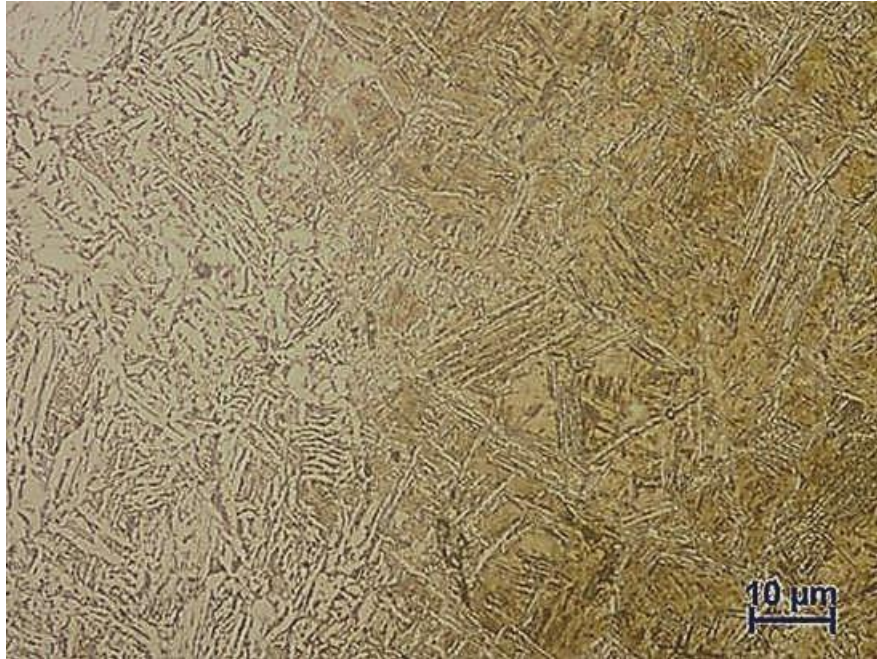


Figura 82. Interface Tubo-Garfo Amostra 1b (Nital 3%, 500x)

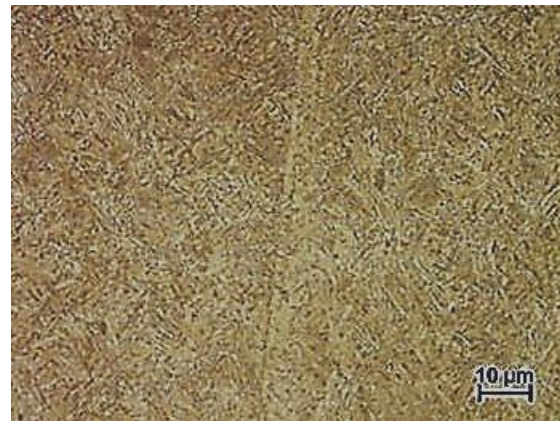
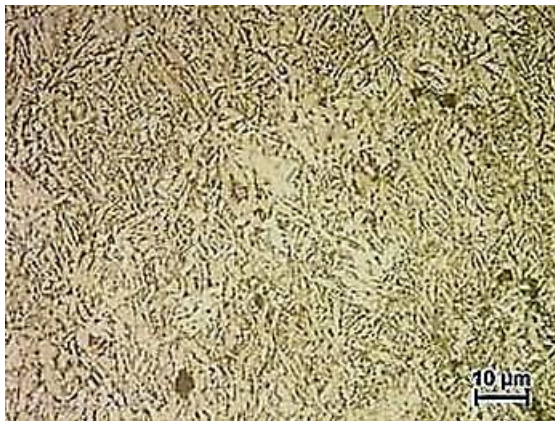


Figura 83. ZTA Tubo Amostra 1b (Nital 3%, 500x) **Figura 84.** ZTA Garfo Amostra 1b (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e poligonal, enquanto na ZTA do Garfo encontramos martensita e ferrita, o que justifica a dureza mais baixa encontrada nesta amostra quando comparada as demais.

Amostra 1c

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
1c	5	15	750	395



Figura 85. Interface Tubo-Garfo Amostra 1c (Nital 3%, 500x)



Figura 86. ZTA Tubo Amostra 1c (Nital 3%, 500x) **Figura 87.** ZTA Garfo Amostra 1c (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e poligonal, enquanto na ZTA do Garfo também encontramos martensita e ferrita, justificando a dureza mais baixa encontrada nesta amostra.

Amostra 2

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
2	4	8	600	410

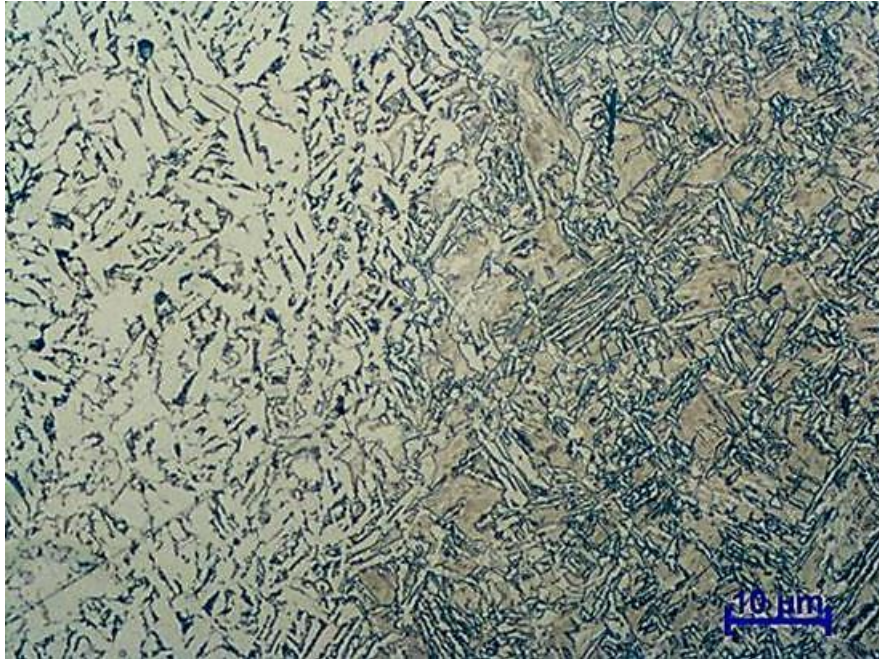


Figura 88. Interface Tubo-Garfo Amostra 2 (Nital 3%, 500x)

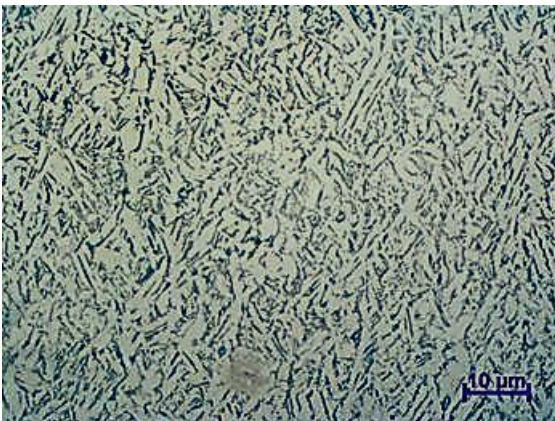


Figura 89. ZTA Tubo Amostra 2 (Nital 3%, 500x) **Figura 90.** ZTA Garfo Amostra 2 (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e poligonal, enquanto na ZTA do Garfo encontramos martensita, bainita e ferrita, o que nos propicia uma dureza intermediária neste grupo de amostras.

Amostra 2a

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
2a	6	8	600	395

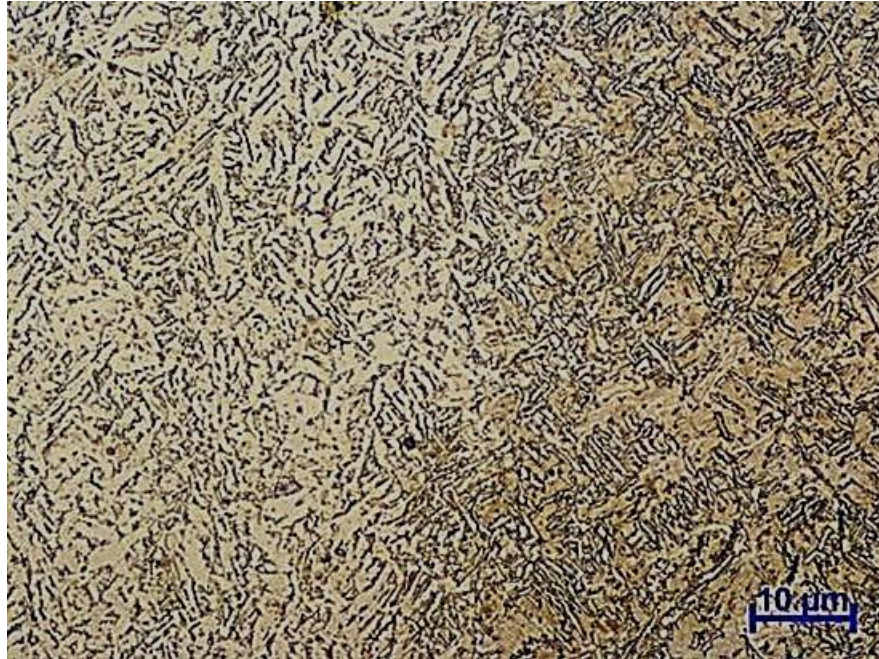


Figura 91. Interface Tubo-Garfo Amostra 2a (Nital 3%, 500x)

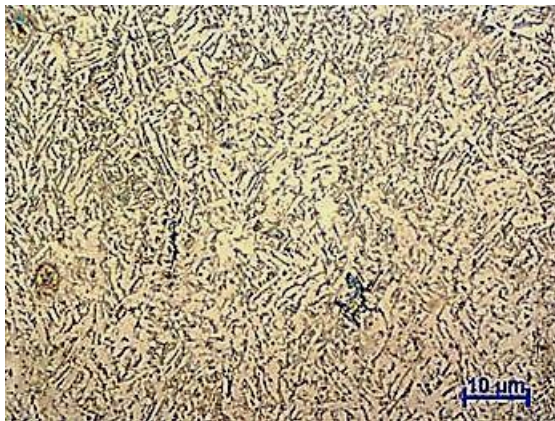


Figura 92. ZTA Tubo Amostra 2a (Nital 3%, 500x) **Figura 93.** ZTA Garfo Amostra 2a (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e poligonal, enquanto na ZTA do Garfo encontramos martensita, bainita e ferrita, o que justifica a dureza mais baixa encontrada nesta amostra neste grupo.

Amostra 2b

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
2b	8	8	600	470



Figura 94. Interface Tubo-Garfo Amostra 2b (Nital 3%, 500x)

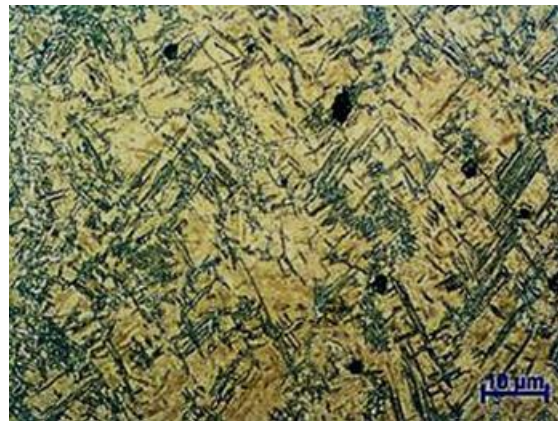
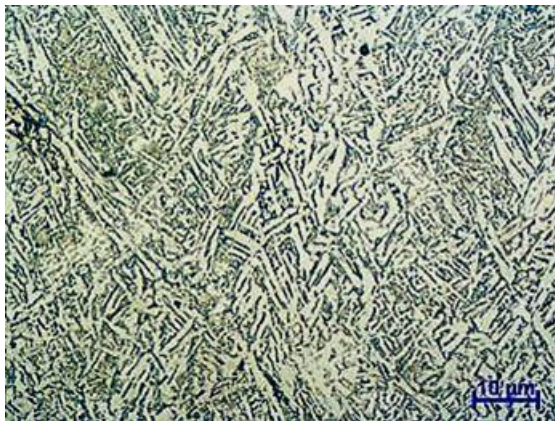


Figura 95. ZTA Tubo Amostra 2b (Nital 3%, 500x) **Figura 96.** ZTA Garfo Amostra 2b (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada, enquanto na ZTA do Garfo encontramos somente martensita e bainita, o que nos dá uma dureza mais alta que as demais deste grupo.

Amostra 2c

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
2c	10	8	600	527



Figura 97. Interface Tubo-Garfo Amostra 2c (Nital 3%, 500x)

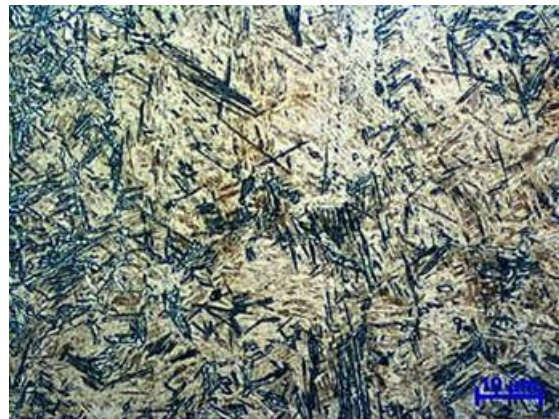
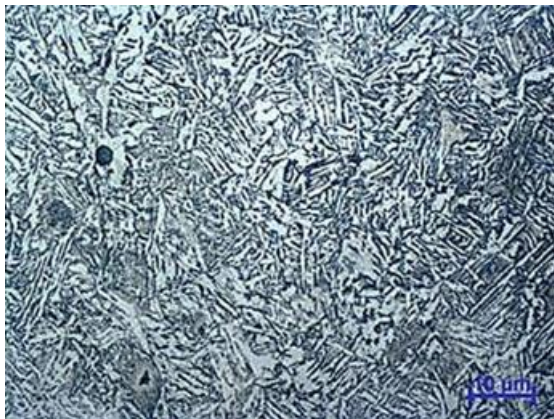


Figura 98. ZTA Tubo Amostra 2c (Nital 3%, 500x) **Figura 99.** ZTA Garfo Amostra 2c (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e ferrita poligonal, enquanto na ZTA do Garfo encontramos martensita e alguma bainita, o que justifica a dureza mais alta dentro deste grupo.

Amostra 3

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
3	7	15	300	459

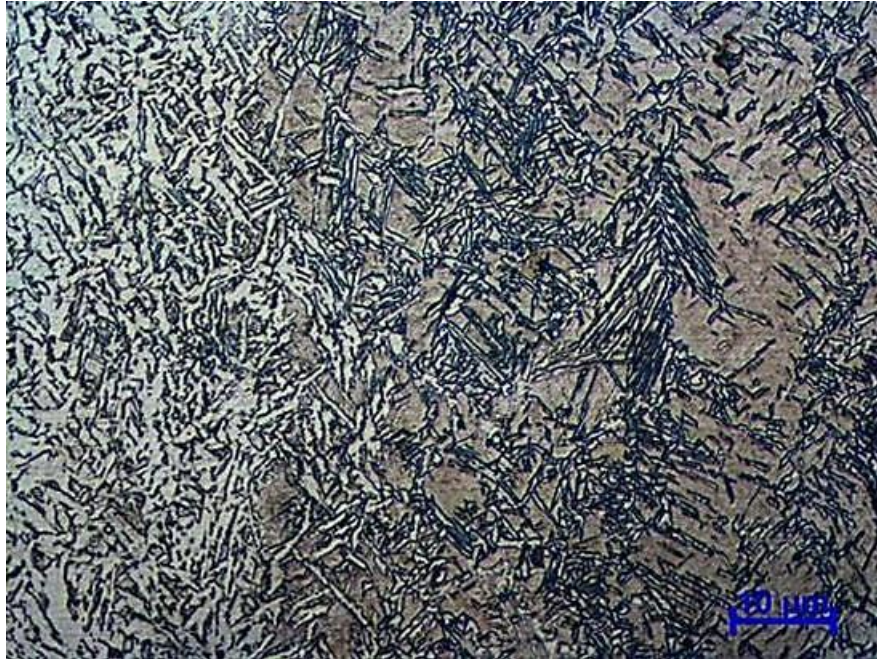


Figura 100. Interface Tubo-Garfo Amostra 3 (Nital 3%, 500x)

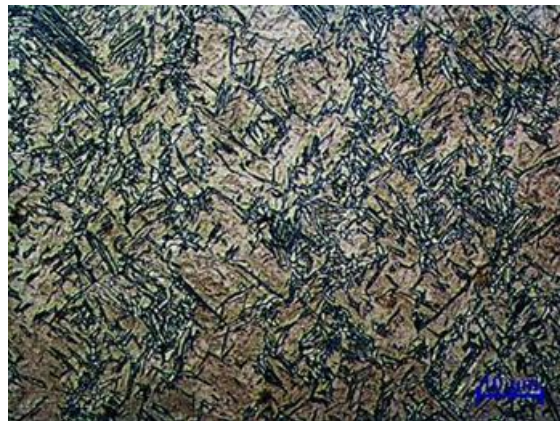


Figura 101. ZTA Tubo Amostra 3 (Nital 3%, 500x) **Figura 102.** ZTA Garfo Amostra 3 (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e poligonal, enquanto na ZTA do Garfo encontramos somente martensita e bainita, sendo esta a amostra com maior dureza deste grupo.

Amostra 3a

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
3a	7	15	600	433



Figura 103. Interface Tubo-Garfo Amostra 3a (Nital 3%, 500x)

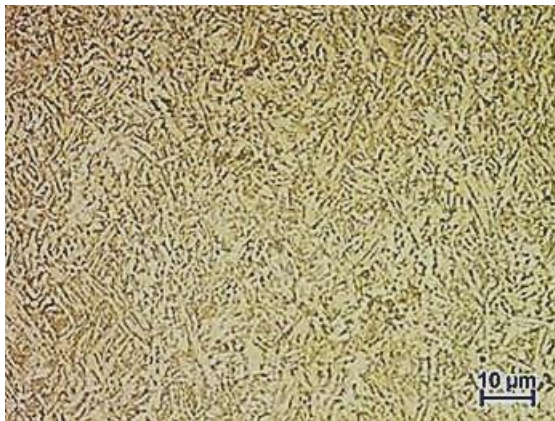


Figura 104. ZTA Tubo Amostra 3a (Nital 3%, 500x)

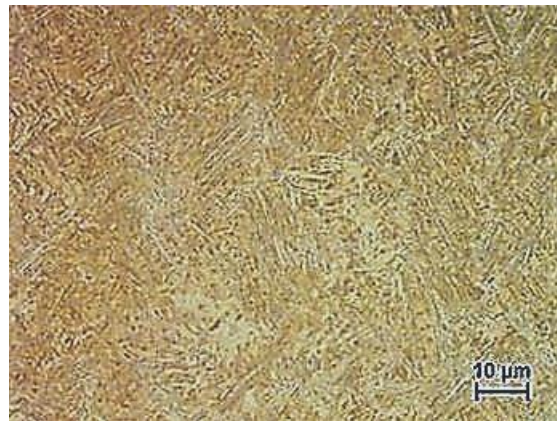


Figura 105. ZTA Garfo Amostra 3a (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e poligonal, enquanto na ZTA do Garfo encontramos martensita e ferrita, apresentando, por isto, a dureza mais baixa deste grupo.

Amostra 3b

Amostra	Força de fricção (ton)	Tempo de forja (s)	Rotação (RPM)	Dureza máxima (HV)
3b	7	15	750	445

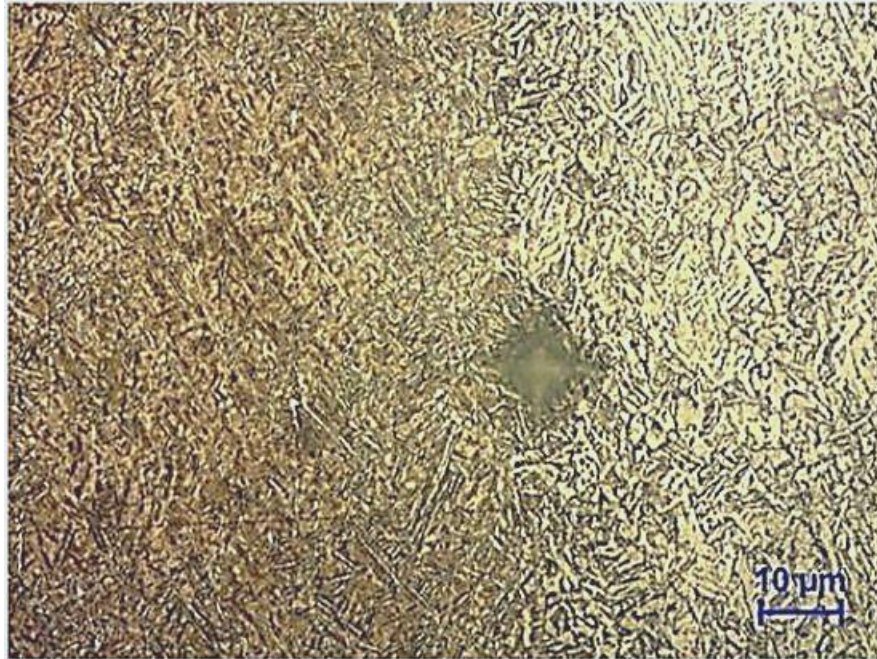


Figura 106. Interface Garfo-Tubo Amostra 3b (Nital 3%, 500x)

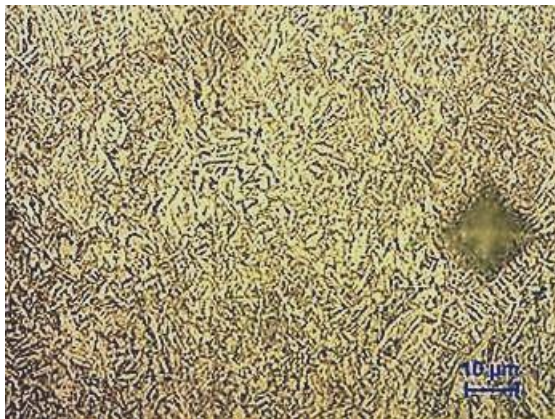


Figura 107. ZTA Tubo Amostra 3b (Nital 3%, 500x) **Figura 108.** ZTA Garfo Amostra 3b (Nital 3%, 500x)

A ZTA do Tubo apresenta microestrutura com ferrita de segunda fase alinhada e ferrita de contorno de grão, enquanto na ZTA do Garfo encontramos martensita e bainita, justificando termos encontrado uma dureza intermediária para esta amostra neste grupo.

6 CONCLUSÕES

Após este estudo, verificou-se ser possível aperfeiçoar os parâmetros de soldagem e obter durezas abaixo de 400 HV, mesmo com um material com média temperabilidade como o material do Garfo.

Foi verificado que quanto maior a rotação mais estreita é a ZTA, mesmo efeito observado com a força de fricção: a ZTA é mais estreita com uma maior força de fricção. Isto ocorre devido às maiores taxas de aquecimento e resfriamento ocasionadas por maiores rotação e força.

Também se constatou que, para rotação constante, o tempo de soldagem diminui com o aumento da força de fricção.

Da análise do formato das rebarbas, verificou-se que uma maior força de soldagem causa uma maior expulsão de material, ou seja, uma rebarba maior e mais enrolada, enquanto com forças menores a rebarba fica mais reta com lados internos mais quadrados.

Da análise das microestruturas podemos inferir que ocorrem diferentes gradientes de resfriamento, pois as frações de ferrita, perlita, bainita e martensita de cada amostra diferem bastante entre si, influenciando diretamente na dureza de cada amostra.

Forças de fricção maiores contribuem para obtenção de uma microestrutura mais refinada, evitam a formação heterogênea de fases (tais como Widmanstätten, bainita e agregados de carbonetos) e possibilitam a formação de microestruturas predominantemente martensíticas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES. E.P., Junções De Materiais Dissimilares Utilizando O Processo De Soldagem Por Fricção Rotativa. Dissertação de Mestrado, INPE São José dos Campos, 2010.

ANSI/AWS C6.1-89, Recommended Practices for Friction Welding, Flórida, 1989.

ARAUJO, M.R.V., Caracterização Microestrutural do Metal de Solda Depositado por Arco Submerso em Chapas de Aço Carbono Estrutural, Dissertação de Mestrado – UNESP/SP, Ilha Solteira, 2006.

BRACARENSE, A. Q., FARIA, P. E. Soldagem Por Fricção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

BRACARENSE, A. Q., Processo de Soldagem por Fricção – FW, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

BRAZ, M.H.P., Propriedades de Fadiga de Soldas de Alta Resistência e Baixa Liga com Diferentes Composições Microestruturais, Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DIN EN ISO 15620, Friction Welding of Metallic Materials, Bruxelas, 2000.

DIXON, R. Welding, brazing and soldering. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. United States: ASM International, 1994, v. 6, pág. 481, cap. Fundamentals of Welding, Brazing and Soldering.

ELMER, J.W.; KAUTZ, D. D. Fundamentals of friction welding. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. United States: ASM International, 1994, v. 6, págs. 505, 510, cap. Fundamentals of Solid-state Welding.

<http://www.revistaocarreteiro.com.br/modules/revista.php?recid=967>

<http://www.infosolda.com.br/download/61den.pdf>

<http://www.linearfrictionwelding.com/weld-process>

KOU, S. Welding Metallurgy, 2nd Edition, Wiley Interscience, New Jersey, 2003.

SVENSSON, L.E., Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds, CRC Press, págs. 87- 107, 151-159. Gothemburg – Sweden, 1994.

LIENERT, T.J. et al, Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Research, Sup. Welding Journal, January, 2003.

LOPEZ, S. F., Montagem e avaliação de uma máquina de solda por fricção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Manual da máquina Friction Welder ETA Technology 40T.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. Introdução aos Processos de Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PACHECO, M.R., Modelagem da Distribuição de Temperatura no Processo de Soldagem por Atrito FSW Utilizando o Método dos Elementos Finitos, Dissertação de Mestrado – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2011.

PARIS, L.F.G., CARVALHO, M.F., DELFORGE, D.Y.M., Obtenção de Ferrita Acicular em Cordões de Solda, por Diferentes Rotas de Resfriamento, Instituto Politécnico Nova Friburgo – UERJ, XI CREEM, 2004.

SAHOO, R., SAMANTARAY, P., Study of Friction Welding, Bachelor Thesis, National Institute of Technology Rourkela, India, 2007.

SATHIYA, P., ARAVINDAN, S., et al. Optimization of Friction Welding Parameters Using Simulated Annealing, Indian Journal of Materials and Engineering Sciences, Vol.13, págs.37-44, February, 2006.

SPINDLER, D.E., What Industry Needs to Know About Friction Welding, Welding Journal, Vol. 73:3, págs. 37-42, Miami - EUA, Março 1994.

SOUZA, R. J., Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

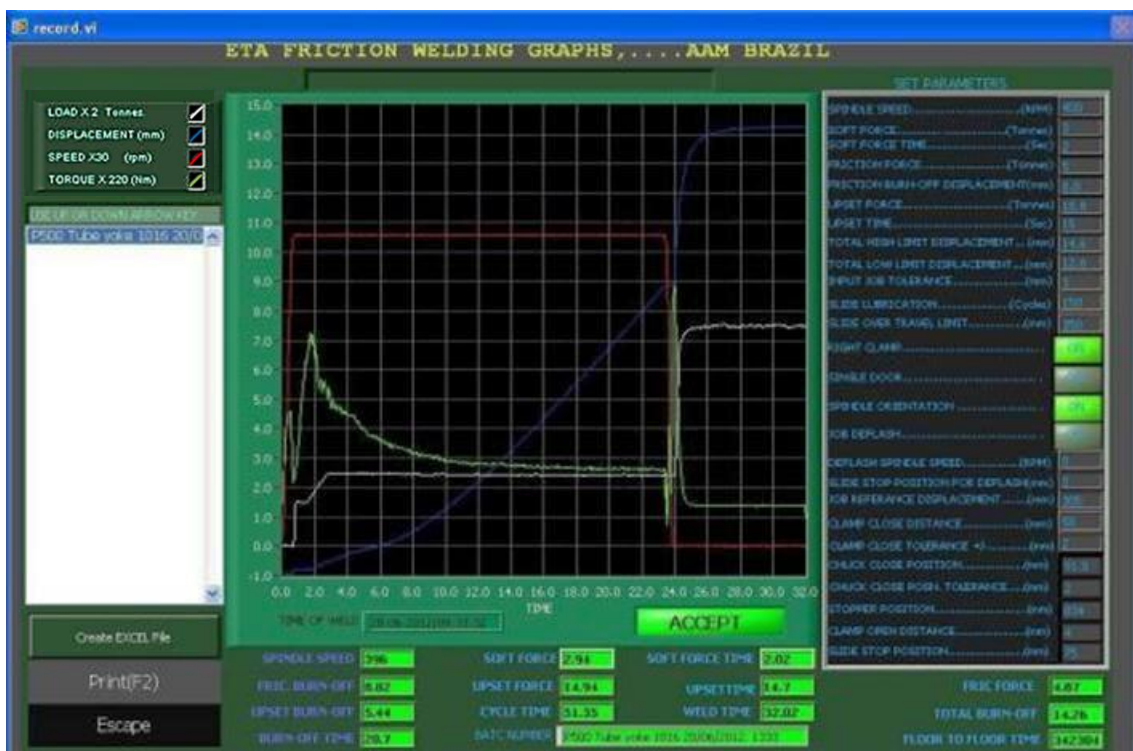
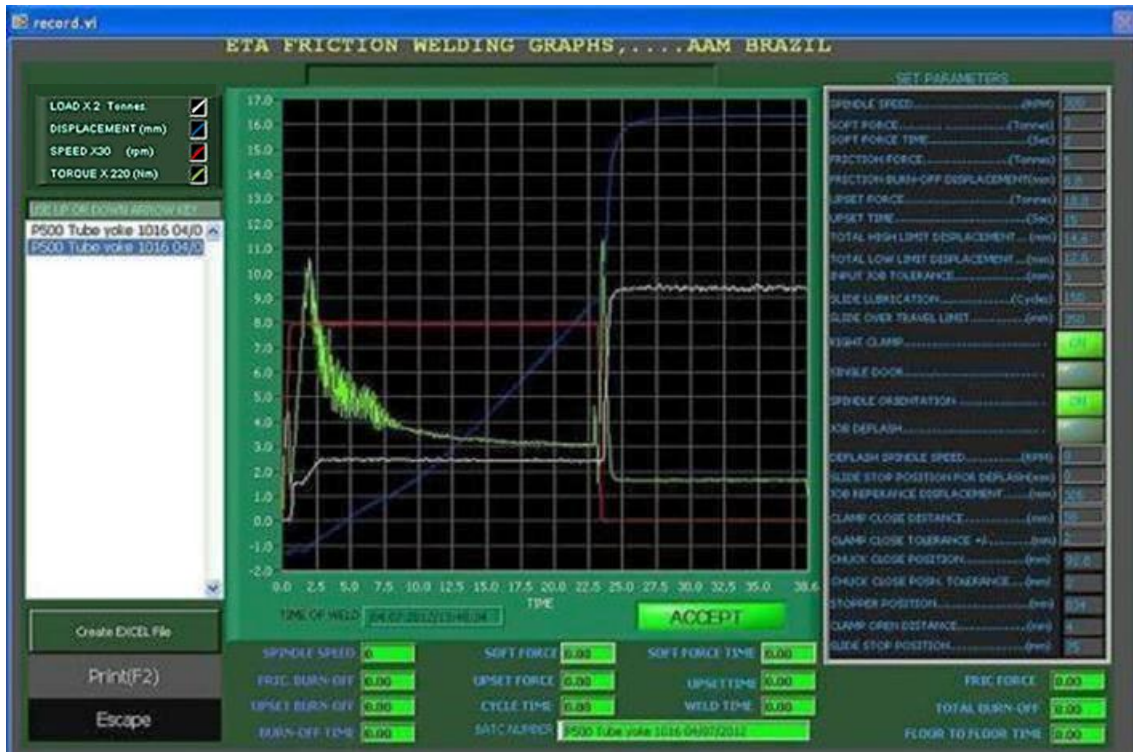
STOTLER, T., Procedure Development and Practice Considerations for Inertia and Direct-Drive Friction Welding. ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering. United States: ASM International, 1994, v. 6, págs. 2188-2196.

THEWLIS, G., Classification and Quantification of Microstructures in Steels, Materials Science and Technology, Vol. 20, págs. 143-160, February, 2004.

8 ANEXOS

O acompanhamento dos parâmetros das soldagens foi feito utilizando-se os gráficos a seguir:

ANEXO I: GRÁFICOS DE SOLDAGEM DAS AMOSTRAS DO GRUPO 1



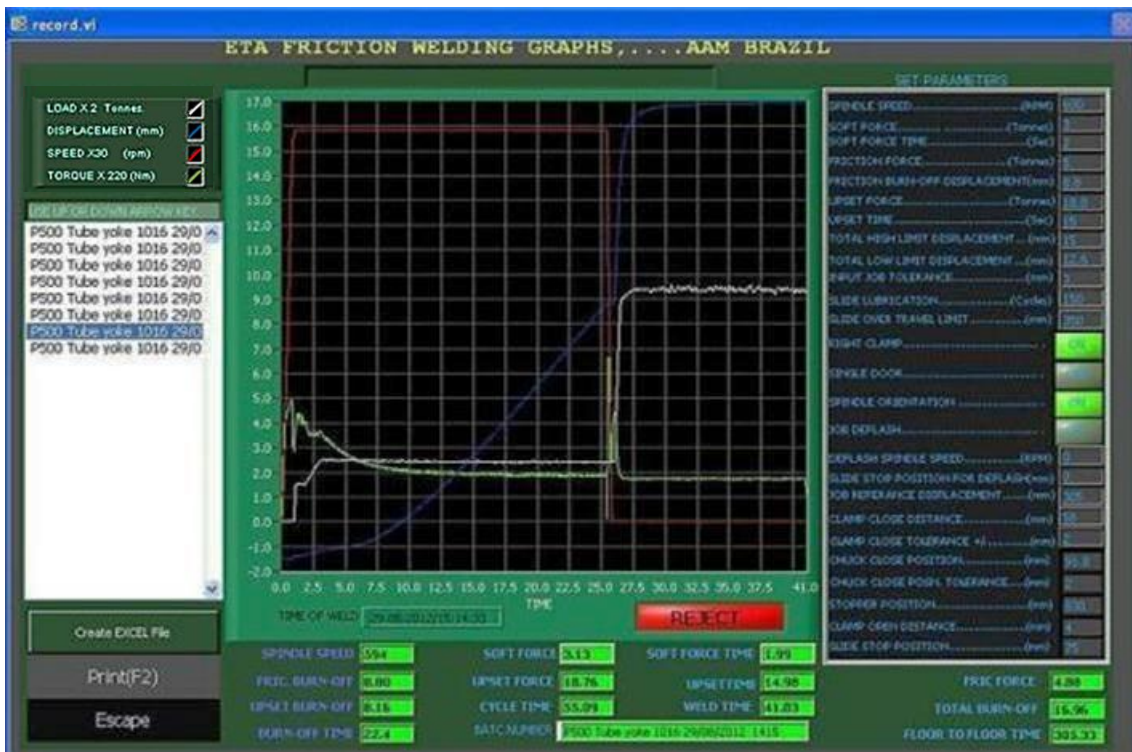


Gráfico da soldagem para amostra 1b

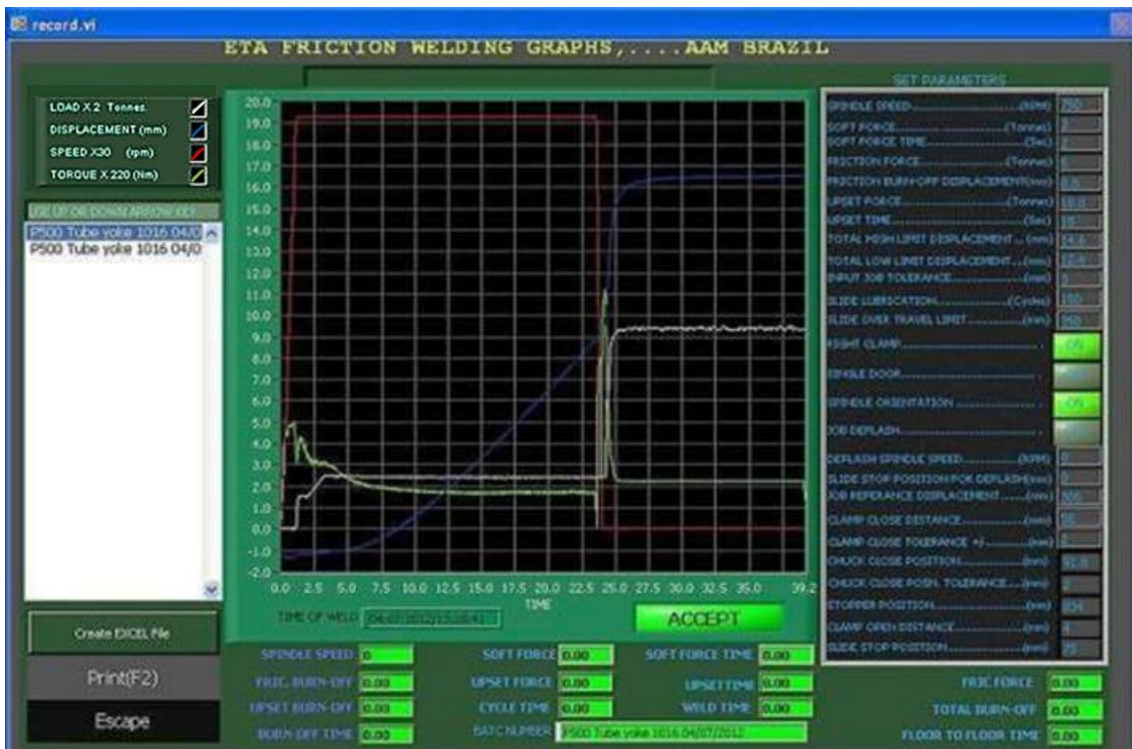


Gráfico da soldagem para amostra 1c

ANEXO II: GRÁFICOS DE SOLDAGEM DAS AMOSTRAS DO GRUPO 2



Gráfico da soldagem para amostra 2

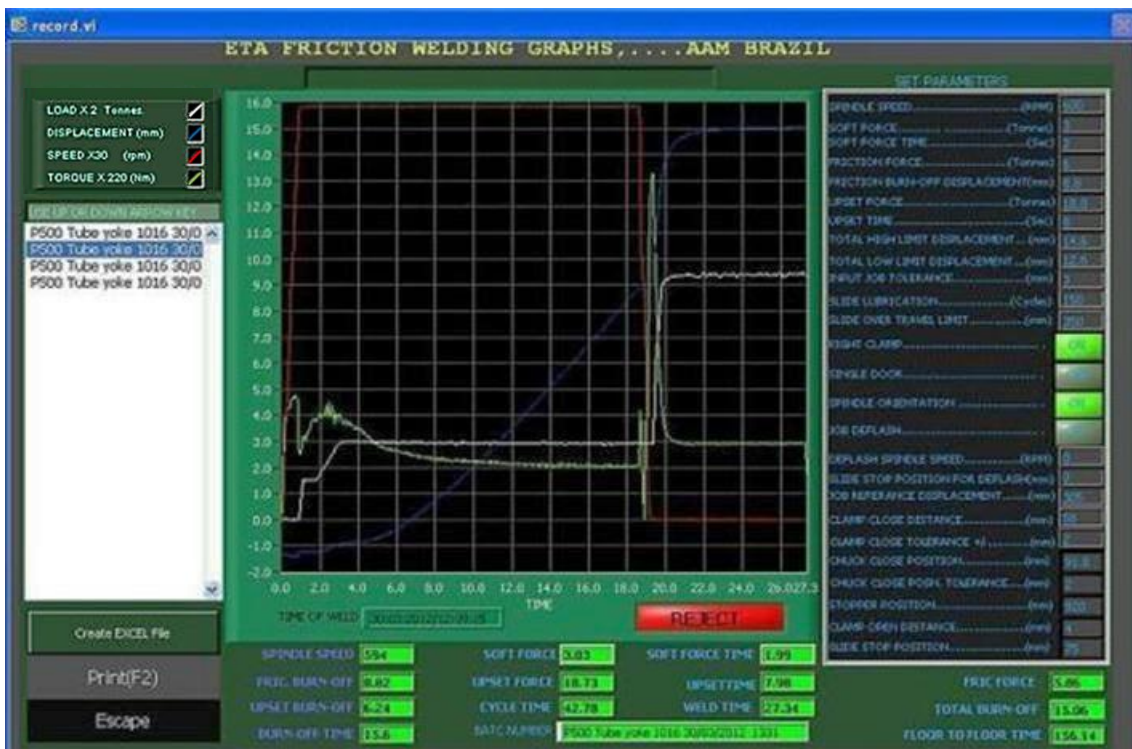


Gráfico da soldagem para amostra 2a



Gráfico da soldagem para amostra 2b

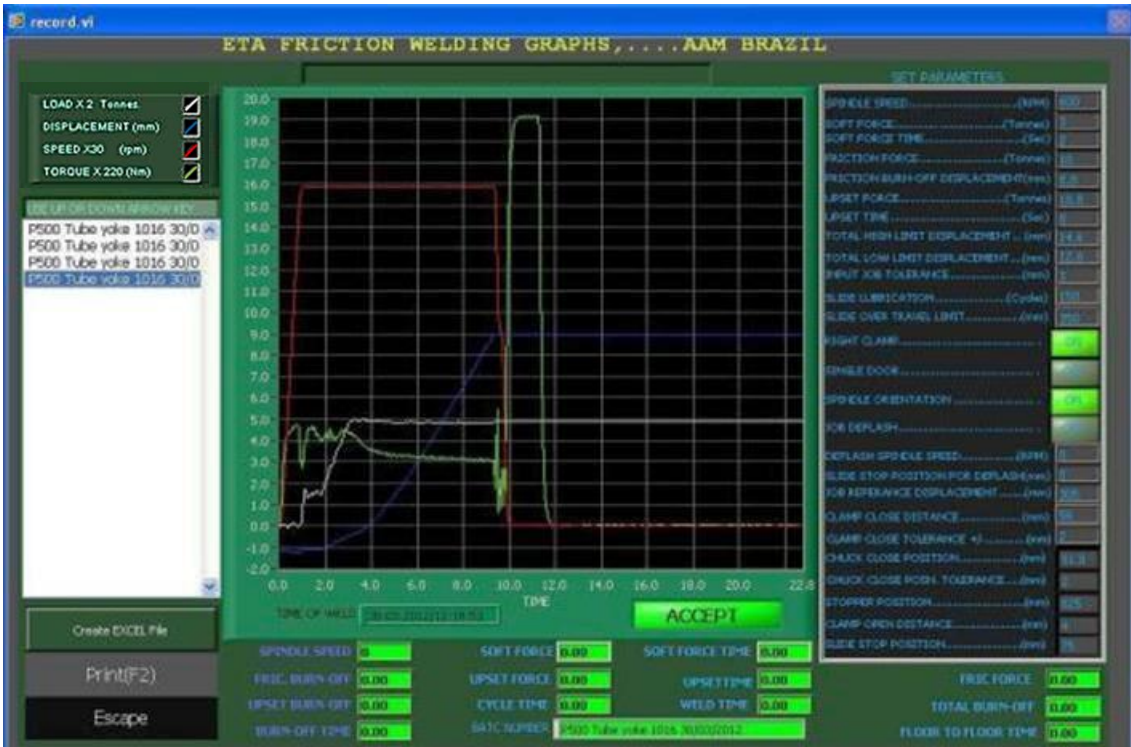


Gráfico da soldagem para amostra 2c

ANEXO III: GRÁFICOS DE SOLDAGEM DAS AMOSTRAS DO GRUPO 3

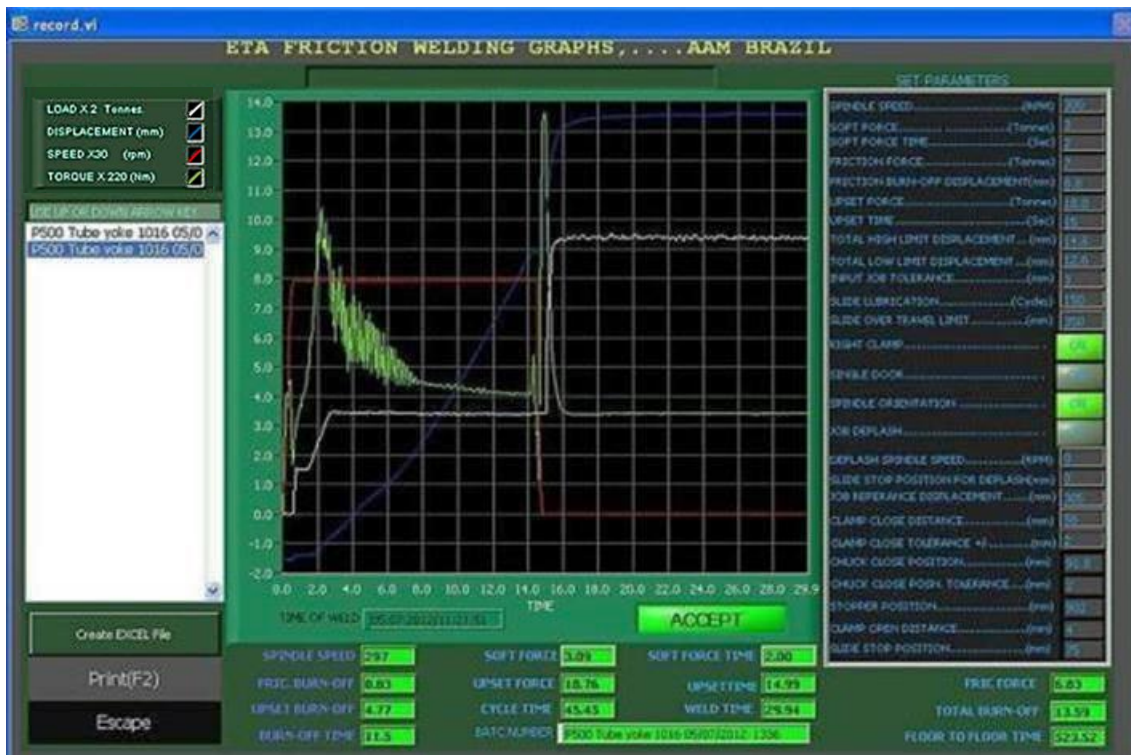


Gráfico da soldagem para amostra 3

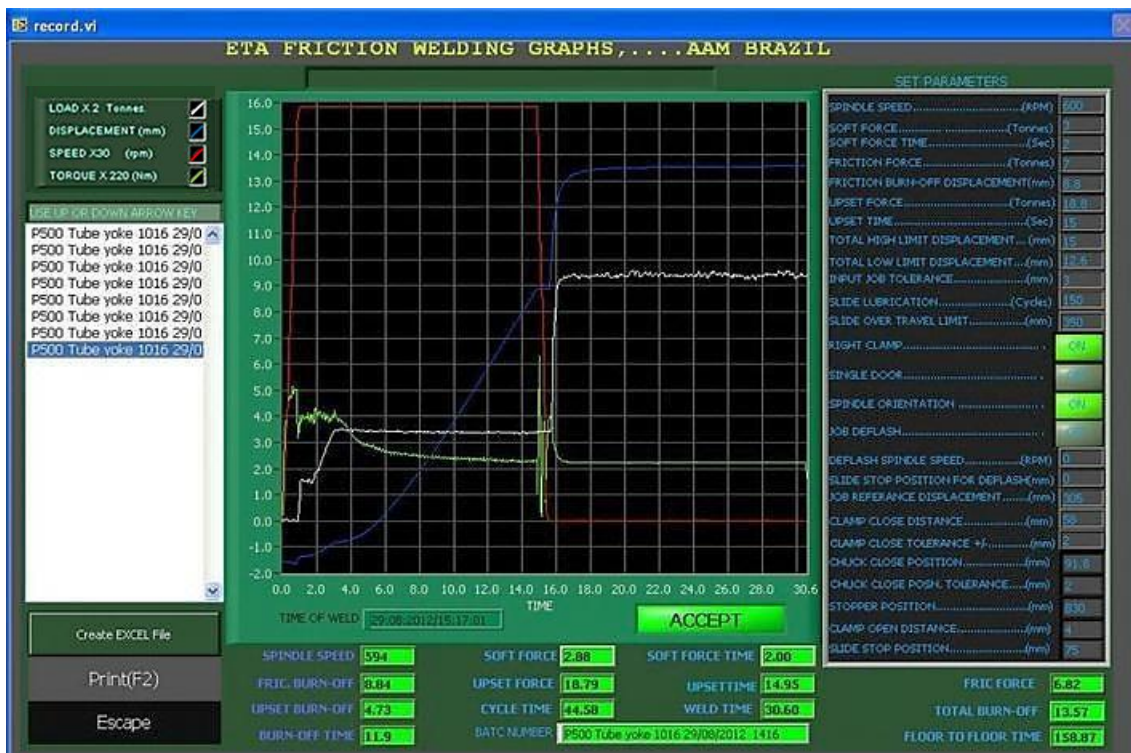


Gráfico da soldagem para amostra 3a



Gráfico da soldagem para amostra 3b