

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**COMPARAÇÃO DE ESTRUTURA RESULTANTE ENTRE SOLDAGEM FRW E
GTAW PARA AÇO ABNT 1020**

VILMAR JOÃOZINHO GRAHL

Orientador: Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

Monografia apresentada a faculdade de Engenharia Mecânica da UniRV- Universidade de Rio Verde, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

RIO VERDE – GOIÁS

2014

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**COMPARAÇÃO DE ESTRUTURA RESULTANTE ENTRE SOLDAGEM FRW E
GTAW PARA AÇO ABNT 1020**

VILMAR JOÃOZINHO GRAHL

Orientador: Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

Monografia apresentada a faculdade de Engenharia Mecânica da UniRV- Universidade de Rio Verde, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

RIO VERDE – GOIÁS

2014

Grahl, Vilmar Joaozinho.

Comparação de estrutura resultante entre soldagem FRW e GTAW para aço ABNT 1020. / Vilmar Joãozinho Grahl. – Rio Verde – GO: UniRV, 2014.

45p.:il

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) UniRV - Universidade de Rio Verde, 2014.

Orientador Prof. Dr. Warley Augusto Pereira

Soldagem FRW, aço ABNT 1020, soldagem GTAW.



UNIVERSIDADE DE RIO VERDE

CRENCIADA PELO DECRETO Nº 5.971 DE 02 DE JULHO DE 2004

Fazenda Fontes do Saber
Campus Universitário
Rio Verde - Goiás

Cx. Postal 104 - CEP 75901-970
CNPJ 01.815.216/0001-78
I. E. 10.210.819-6 / I.M. 021.407

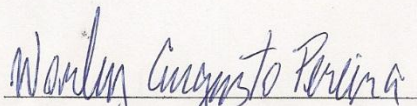
Fone (64) 3620-2200
e-mail fesurv@fesurv.br
www.fesurv.br

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

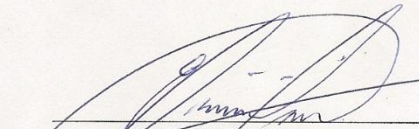
**COMPARAÇÃO DE ESTRUTURA RESULTANTE ENTRE SOLDAGEM FRW E
GTAW PARA AÇO ABNT 1020**

VILMAR JOAOZINHO GRAHL

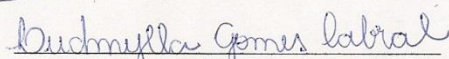
Esta monografia foi julgada adequada para a obtenção do grau de **BACHAREL EM
ENGENHARIA MECÂNICA** e aprovada em sua forma final.



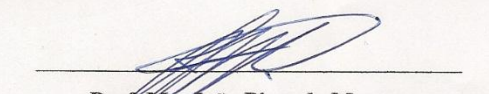
Prof. Dr. Warley Augusto Pereira
Orientador



Prof. Edson Roberto da Silva
Examinador



Prof. Ludmylla Gomes Cabral
Examinador



Prof. Msc. João Pires de Moraes
Diretor da Faculdade de Engenharia Mecânica

Rio Verde - GO
2014

O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

ALBERT EINSTEIN.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Vilmar Grahl e Neiva Luvison Grahl, que sempre me apoiaram e incentivaram durante minha formação. Dedico também a todos os meus amigos que estiveram presentes em minha formação, seja na faculdade ou não.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor doutor Warley Augusto Pereira, não só pela orientação em minha monografia, mas por todo o conhecimento adquirido durante minha formação.

Agradeço ao professor Edson Roberto da Silva, que atuou como um segundo orientador, pela ajuda prestada no procedimento e empenho para o sucesso do trabalho.

Aos meus pais, Vilmar Grahl e Neiva Luvison Grahl; e minha namorada, Nathalie Sena Ferreira, pelo apoio e incentivo durante a confecção desta monografia.

Aos meus amigos, Ricardo Berta, Braz Neto, Régis Ribeiro e Samuel Martins pelos bons momentos na vida universitária e particular.

Aos meus amigos que não moram mais aqui, César Araújo, Ayer Santana, Luis Filipe Vieira, pelos bons tempos de faculdade e SENAI.

Aos meus companheiros de Centro Acadêmico, Erick, Ariel, Luis Carlos e Marco, pela luta que desempenhamos em busca de um curso melhor.

Agradeço também a todos os professores e colegas de sala, que estiveram presentes durante esses cinco anos de faculdade, contribuindo com conhecimento e experiências.

RESUMO

GRAHL, V. J. COMPARAÇÃO DE ESTRUTURA RESULTANTE ENTRE SOLDAGEM FRW E GTAW PARA AÇO ABNT 1020. 2014. 45F. Monografia¹ (Graduação em Engenharia Mecânica) – UniRV – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2014.

A soldagem FRW é um processo relativamente novo, onde a soldagem ocorre no estado sólido, de forma autógena e sem a ocorrência da fusão dos materiais envolvidos. Com aplicações diversas, como indústria automotiva e aeronáutica. O processo de soldagem FRW apresenta inúmeras vantagens, dentre elas pode-se citar a ausência de gás de proteção (na maioria dos processos), ausência de geração de gases no processo, porosidades e zona termicamente afetada relativamente pequena. Este trabalho teve por finalidade avaliar a qualidade e vantagens da solda FRW convencional em barras de aço ABNT 1020 de ½” em comparação com a solda GTAW. Ensaios de dureza e metalográficos também foram feitos para determinar as condições finais do material. Dos testes foi possível concluir que a soldagem FRW realmente apresenta uma ZTA bastante menor que a da solda GTAW, ocorrendo menos incidência de falhas internas como porosidade. Os ensaios de dureza reafirmaram as dimensões da ZTA nas soldas, onde o corpo de prova FRW não apresentou sinais de mudança na extremidade enquanto o GTAW apresentou.

PALAVRAS-CHAVE

Soldagem FRW, soldagem GTAW, ensaio de dureza, ensaio metalográfico.

¹ Orientador: Prof. Dr. Warley Augusto Pereira. Banca: Prof Edson Roberto da Silva; Prof Ludmylla Gomes Cabral.

ABSTRACT

GRAHL, V. J. COMPARISON OF RESULTANT ESTRUCTURE OF FRW AN GTAW WELDING ON STEEL ABNT 1020. 2014. 32P. Monograph² (Graduation in Mechanical Engeneering) – UniRV – University of Rio Verde, Rio Verde, 2014.

The FRW welding is a relatively new process, where the welding occurs in solid state, by autogenous form and without occurrence of melting of the involved materials. The FRW welding process presents many advantages, such as absence of protection gas, absence of generation of gas due to the process, porosity and relatively short thermal affected zone. This work had by purpose validate the quality and advantages of the FRW conventional welding process at ABNT 1020 steel bars when in comparison with the GTAW welding process. Hardness and metallographic test were performed to determine the final conditions of the material. From the results was possible conclude that the FRW welding really presents a shorter heat affected zone than the GTAW one, occuring less incidents of internal imperfections such as porosity, the hardness test reaffirm the size of the heat affected zone, where the proof body hadn't show any signs of change in its ends while the GTAW one had.

KEY WORDS

FRW welding, GTAW welding, hardness test, metallographic test.

² Advisor: Prof. Dr. Warley Augusto Pereira. Examiners: Prof Edson Roberto da Silva; Prof Ludmylla Gomes Cabral.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ETAPAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ATRITO CONVENCIONAL.....	15
FIGURA 2 – EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA CONVENCIONAL.....	17
FIGURA 3 – INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE SOLDAGEM NO TEMPO DE AQUECIMENTO, MANTIDA A VELOCIDADE CONSTANTE.....	24
FIGURA 4 –..... INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM NO TEMPO DE AQUECIMENTO, MANTIDA A PRESSÃO CONSTANTE.....	28
FIGURA 5 – GRÃOS DE FERRITA E PEQUENAS INCLUSÕES EM AÇO EXTRA-DOCE.....	30
FIGURA 6 – DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO DAS LIGAS FERRO CARBONO SIMPLIFICADO.....	31
FIGURA 7 – CORPOS DE PROVA CORTADOS PARA REALIZAR O PROCESSO.....	34
FIGURA 8 – CORPOS DE PROVA SOLDADOS PELO PROCESSO FRW.....	35
FIGURA 9 – TORNO UTILIZADO PARA SOLDAGEM FRW.....	35
FIGURA 10 – SERRA POLICORTE.....	36
FIGURA 11 – MÁQUINA POLITRIZ.....	37
FIGURA 12 – MÁQUINA PARA ENSAIO DE DUREZA ROCKEWELL.....	38
FIGURA 13 – MACROGRAFIA DO CORPO DE PROVA DE SOLDA FRW.....	39
FIGURA 14 – MACROGRAIFA DO CORPO DE PROVA GTAW.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C – Carbono

Fe – Ferro

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

FRW – Friction Rotation Welding

FSW – Friction Stir Welding

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ZTA – Zonta Térmicamente Afetada

RPM – Rotações por minuto

P1 – Pressão de aquecimento

P2 – Pressão de recalque

T1 – Tempo de aquecimento

T2 – Tempo de recalque

HR – Hardness Rockwell

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1	Valores de força e velocidade crítica de soldagem	27
QUADRO 2	Valores de algumas variáveis do processo, características da soldagem por fricção rotativa convencional	29
TABELA 1	Resultados do ensaio de dureza	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	SOLDAGEM	14
2.2	SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA CONVENCIONAL (FRW)	14
2.2.1	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO (FW)	15
2.3	PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL	18
2.3.1	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO	18
2.3.1.1	VANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO	18
2.3.1.2	LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO:	19
2.3.2	MECANISMOS DE LIGAÇÃO	20
2.3.2.1	TEORIA DA LIGAÇÃO POR DIFUSÃO	21
2.3.3	INFLUÊNCIA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NAS JUNÇÕES OBTIDAS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL.	21
2.3.3.1	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (RPM)	22
2.3.3.2	PRESSÃO DE AQUECIMENTO P1	22
2.3.3.3	TEMPO DE AQUECIMENTO T1	24
2.3.3.4	PRESSÃO DE FORJAMENTO P2	25
2.3.3.5	TEMPO DE FORJAMENTO T2	26

2.3.3.6 VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DO PISTÃO	26
2.3.3.7 INTERAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS	28
2.4 AÇO ABNT 1020	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	32
3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA USADO PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES DE SOLDAGEM	32
3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW	33
3.4 PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS	34
3.4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	34
3.5 MACROGRAFIA	35
3.6 ENSAIO DE DUREZA	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 MACROGRAFIA	37
4.2 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL	38
5 CONCLUSÕES	40
6 REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A soldagem por fricção, apesar de há um bom tempo em utilização, é considerada um método relativamente novo, existindo diversas subdivisões, como a soldagem por fricção rotativa convencional (FRW - Friction rotation welding), soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW – Friction stir welding), dentre outros.

Dentre suas vantagens pode-se citar a ausência de fusão no processo, caracterizando-o como “solda fria”. O método também apresenta zona termicamente afetada relativamente menor que os outros métodos.

Este trabalho visa avaliar a zona termicamente afetada de duas barras de aço ABNT 1020 soldadas através do método FRW, quando em comparação com a obtida em solda GTAW. Ensaio de dureza e micrografia também foram feitos a fim de se averiguar as condições resultantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem

No desenvolvimento de produtos manufaturados os processos de soldagem e união de materiais são essenciais. A forma de se juntar dois materiais depende da aplicação para qual será destinada, como por exemplo, as ligas de alumínio amplamente utilizadas na indústria aeronáutica. Estes processos são responsáveis por uma parcela de custo do produto (ASM v6, 1995).

Os métodos de união de materiais podem ser divididos em duas categorias, sendo os baseados em ação de forças macroscópicas, como parafusos, ou baseados em forças microscópicas (interatômicas e intermoleculares), como a soldagem (MARQUES et al., 2005).

Dentro do processo de soldagem, tem-se uma subdivisão em dois grandes grupos, baseado na maneira de superar os obstáculos referentes à união dos materiais. Os dois grupos são: soldagem por fusão e soldagem por pressão ou deformação. Nos processos por fusão, tem-se a fusão localizada das peças na região de união e do metal de adição, quando utilizado, produzindo a ligação através da solidificação do metal fundido. No processo por pressão ou deformação, tem-se a aplicação de pressão elevada para deformar a superfície de modo que a distância entre as superfícies a serem unidas seja reduzida à ordem atômica, propiciando o estabelecimento de ligações metálicas em quantidade suficiente para caracterizar uma união metalúrgica. No primeiro grupo o calor é utilizado para promover a fusão do material, já no segundo é utilizado para facilitar a deformação dos materiais envolvidos (MARQUES et al., 2005).

A amplitude desta área de fabricação pode ser observada pela quantidade de processos de soldagem já desenvolvidos. Essa amplitude é exigida pela necessidade de união de materiais que a indústria desenvolve em função dos desafios de projeto impostos pela tecnologia, os requisitos de resistência mecânica da união e qualidade do processo também se fazem necessários (EAGAR, 1990).

2.2 Soldagem por fricção rotativa convencional (FRW)

A soldagem por fricção, também conhecida como soldagem por atrito, utiliza algo muito comum, o atrito, presente em todas as situações. Há muito tempo sabe-se que o atrito gera calor, mas o registro sobre sua utilização para unir metais é conhecido a partir de 1891, quando a primeira patente deste método de união foi autorizada nos Estados Unidos da América. Em 1929 foi registrada a primeira patente alemã; de 1941 a 1944 a Inglaterra desenvolveu e registrou uma série de patentes sobre este processo e em 1956 a outrora União Soviética também registrou seu desenvolvimento.

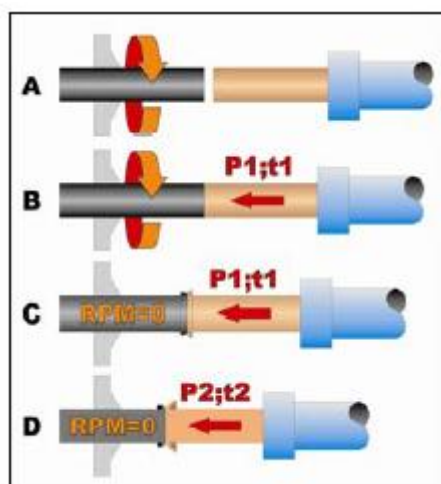
A partir disto, outros países desenvolvidos industrialmente estiveram estudando e aprimorando o processo de soldagem por fricção a fim de ampliar e melhorar sua aplicação.

2.2.1 Características do processo de soldagem por fricção (FW)

O processo de soldagem por fricção é classificado pela American Welding Society (AWS) como um processo de união no estado sólido cuja ligação é produzida em temperaturas menores do que a temperatura de fusão dos materiais bases (ZEPEDA, 2001).

O aquecimento responsável pela união é gerado mecanicamente por atrito entre as peças a serem soldadas. Esse aquecimento ocorre devido a uma das peças (que está fixa) ser pressionada sobre a outra peça que se encontra em alta rotação (WAINER et al., 2002).

O atrito entre as superfícies faz com que a temperatura aumente rapidamente até atingir a temperatura de forjamento a quente da liga, fazendo com que a massa se deforme plasticamente e flua em função da aplicação de pressão e da força centrífuga, gerando uma rebarba (flash). A Figura 1 mostra as etapas do processo.



Fonte: ALVES (2010).

FIGURA 1 – Etapas do processo de soldagem por atrito convencional. A) Período de aproximação; B) Aplicação de P1, t1; C) Término de aplicação de P1, t1, e frenagem da máquina (RPM =0); D) Aplicação de P2, t2 e término da soldagem.

Esse processo de soldagem é realizado em poucos segundos e as propriedades mecânicas das junções são iguais ou superiores às dos materiais envolvidos. A ZTA é extremamente pequena, não necessita de pré-aquecimento ou pós-aquecimento como ocorre nos processos de soldagem por fusão de determinados materiais, os equipamentos de soldagem modernos são automáticos, uma vez a máquina ajustada de acordo com os parâmetros de soldagem estabelecidos, podem ser produzidas milhares de peças com a mesma qualidade (ALVES, 2010).

Para a maioria dos materiais o acabamento das superfícies que serão unidas por esse processo não necessita ser polido, como acontece na soldagem por difusão, onde o controle da rugosidade superficial representa um dos parâmetros mais importantes. As superfícies podem ser forjadas, cortadas com tesoura, discos abrasivos, pois as junções serão de topo e haverá fricção entre elas (WAINER et al., 2002).

Entretanto, na soldagem de materiais altamente dissimilares como alumínio e aço inoxidável, é fundamental que se realize antes da soldagem uma usinagem das superfícies e uma boa limpeza das interfaces a fim de evitar que elementos contaminantes, como água e hidrocarbonetos formem camadas superficiais extremamente tenazes durante a soldagem, capazes de reduzir a integridade estrutural da solda (ASM, 1993).

As camadas de óxidos das superfícies e inclusões que podem interferir na qualidade da solda são removidas quando toda a superfície da área da seção transversal das peças está em contato e inicia-se a deformação plástica (NIKOLAEV e OLSHANSKY, 1977).

Neste exato instante, o torque da máquina se eleva e a temperatura atinge a faixa de temperatura de forjamento a quente da liga. Devido ao rápido aquecimento e resfriamento localizado do metal dentro de um volume limitado sob aplicação de elevada pressão, o processo de soldagem por fricção produz junções com estrutura metalúrgica composta por grãos finos e equiaxiais. Isso faz com que as junções tenham altas propriedades mecânicas de tração, dobramento e impacto (NIKOLAEV e OLSHANSKY, 1977).

A variação de dureza ao longo da zona termicamente afetada é muito pequena e a resistência à fadiga é pouco afetada principalmente quando o material soldado é submetido a tratamento de têmpera e revenimento após a soldagem (ALVES, 2012).

Após o término do ciclo de soldagem, a ZTA é resfriada rapidamente porque o calor é gerado em uma parte localizada da interface e dissipa-se para a parte mais fria do material (ASM, 1993).

O tratamento térmico antes da soldagem nas peças que serão unidas normalmente tem pouco efeito sobre a soldagem por fricção de determinados materiais, mas pode afetar as propriedades mecânicas da ZTA caso não seja considerado na elaboração dos procedimentos de soldagem (AWS, 1997).

Dependendo dos materiais soldados e das propriedades desejadas no metal base, na interface, ou em ambos, realiza-se um tratamento térmico de recozimento após a soldagem para aliviar as tensões e melhorar a ductilidade e a tenacidade da junta soldada (AWS, 1997).

Todo o processo pode ser monitorado durante a realização da soldagem em máquinas de soldagem controladas por microprocessadores, o que possibilita um melhor controle do processo por meio da análise estatística dos dados (AWS, 1997).

Os métodos de inspeção e verificação da qualidade da junção diferem daqueles utilizados nos processos de soldagem por fusão. Geralmente é feita uma inspeção visual seguida por ensaios destrutivos de tração e dobramento. As discontinuidades mais comuns referem-se à difusão incompleta na interface devido à utilização de parâmetros inadequados, presença de inclusões devido à preparação inadequada das interfaces de contato, defeitos do metal base ou decorrentes da combinação deles.

O processo de soldagem por fricção permite soldar a maioria dos materiais e dissimilares como Cu-Ni, Al-Aço, Bronze-Aço, Ti-Al, Cerâmica-Al, Ni-Al, Ag-Cu, Ligas de Mg-Al, etc.

Com esse processo é possível unir barras cilíndricas com diâmetros dentro da faixa de 3,0 mm a 200 mm (barras de aço ao carbono, sólidas), utilizando um equipamento de soldagem por fricção fornecido comercialmente.

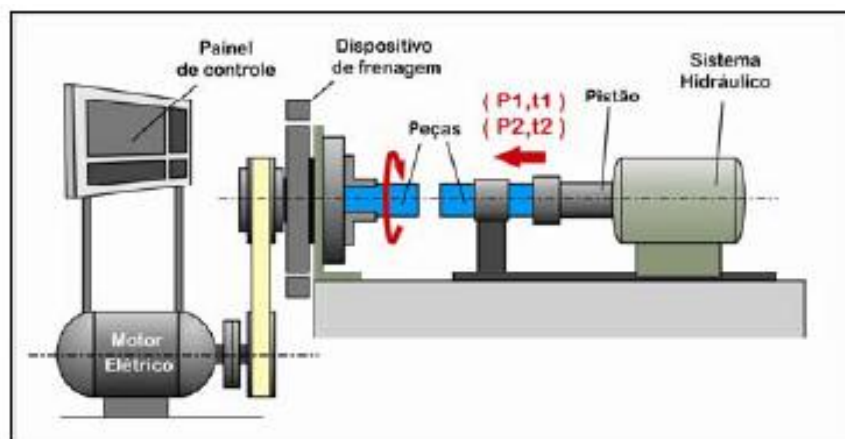
As condições de soldagem por fricção, como pressão, velocidade de rotação, tempo de fricção, devem ser determinadas de acordo com os materiais envolvidos, configuração da junta (por exemplo, barra sólida e chapa, tubo e barra sólida, tubo e tubo, barras de diâmetros diferentes etc.) e dimensões (ARITOSHI e OKITA, 2003).

Quando se deseja soldar dois materiais similares ou dissimilares por esse processo, eles devem atender a dois requisitos fundamentais (BRAU, 1996):

- O material deve apresentar boa capacidade de forjamento a quente.
- O material deve ter baixa capacidade de lubrificação.

2.3 Processo de soldagem por fricção convencional

No processo de soldagem por fricção convencional mostrado na Figura 2, uma peça é fixada e rotacionada por uma unidade motora a uma velocidade pré-determinada, e a outra peça é posicionada, alinhada e deslocada por meio de um pistão hidráulico até tocar a peça que está girando. A seguir é aplicada uma pressão P_1 por um determinado tempo t_1 ; a máquina é frenada até atingir a rotação zero, e novamente é aplicada uma pressão P_2 por um tempo t_2 , finalizando a soldagem. O resfriamento ocorre ao ar livre e os parâmetros de soldagem (RPM, Velocidade de deslocamento, P_1 , t_1 , P_2 , t_2) são definidos pelos procedimentos de soldagem estabelecidos para cada material. A Figura 2 mostra o esquema básico de um equipamento de soldagem por fricção convencional. Normalmente, a sua estrutura é bastante rígida a fim de proporcionar estabilidade ao equipamento que trabalha em altas rotações e sofre a ação de grandes pressões de recalque (ALVES, 2012).



Fonte: ALVES (2012).

FIGURA 2 – Equipamento de soldagem por fricção rotativa convencional.

2.3.1 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção

Todos os processos de soldagem, independentemente de serem por fusão ou no estado sólido, apresentam vantagens e limitações que expressam as diferenças entre eles e os definem para as mais variadas aplicações. O processo de soldagem por fricção é um processo especial, foi desenvolvido e aprimorado para aplicações específicas, e como tal apresenta vantagens e limitações.

2.3.1.1 Vantagens do processo de soldagem por fricção

- Como as ligações entre os materiais ocorrem através de difusão e não por fusão, a soldagem por fricção é capaz de soldar a maioria dos materiais, inclusive materiais altamente dissimilares que não são possíveis por meio dos processos por fusão até o momento (GARG, 2009);
- O equipamento de soldagem é automático, de simples operação e permite repetibilidade, o que é extremamente importante para empresas que trabalham com produção em série;
- As junções produzidas por esse processo possuem alta resistência mecânica das soldas, permitindo a sua utilização em aplicações estruturais;
- Não é utilizado metal de adição, fluxo ou gases de proteção, que conciliado ao baixo consumo de energia e rapidez na execução, representam baixo custo;
- O consumo de energia é mínimo se comparado com os processos por fusão, não gera fumos ou vapores tóxicos nocivos ao meio ambiente (CHALMERS, 2001);
- Como a soldagem ocorre no estado sólido em baixa temperatura, preserva a microestrutura da maioria dos materiais eliminando a necessidade de tratamento térmico após a soldagem;
- Como o calor gerado por esse processo é pequeno, a temperatura na interface de ligação fica abaixo do ponto de fusão, e não gera distorções na junta soldada (GARG, 2009).
- As junções obtidas por meio desse processo têm alta qualidade e são isentas de defeitos superficiais como mordeduras, falta de fusão, respingos, trincas, porosidades, etc., tão comuns aos processos de soldagem por fusão.

2.3.1.2 Limitações do processo de soldagem por fricção:

- O custo do equipamento é elevado, sendo normalmente produzido em países como Índia, Alemanha, Inglaterra e exportado para o Brasil;
- Os equipamentos são robustos, não permitem o transporte e manuseio em outros locais de trabalho;
- Apresenta determinadas limitações quanto à geometria e dimensões das peças, não podendo ser usado para a soldagem de componentes com seções transversais não circulares (MAALEKIAN, 2008);

- Não permite a soldagem de materiais com baixo coeficiente de atrito, como determinados ferros fundidos, bronzes, etc.;
- Limitado a certos tipos de juntas de topo, planas e angulares, devendo ser perpendiculares e concêntricas em relação ao eixo de rotação, qualquer desalinhamento das peças a serem unidas poderá comprometer a qualidade estrutural da junção.
- Superfícies de materiais que sofreram tratamentos superficiais de carbonetação, nitreção apresentam dificuldades para serem soldadas por fricção devido ao baixo coeficiente de fricção e apresentarem baixa forjabilidade (ASM, 1997).

2.3.2 Mecanismos de ligação

O mecanismo de ligação no processo de soldagem por fricção é a difusão que depende do tempo, da temperatura e da pressão que aumenta a taxa de difusão na interface de ligação, mesmo para temperaturas inferiores a 400 °C.

No processo de soldagem por fricção rotativa, o calor gerado na interface de ligação é consequência da transformação de energia mecânica em energia térmica e envolve fricção abrasiva, dissipação de calor, deformação plástica e interdifusão (ASM, 1993).

Fuji et al. (FUJI et al., 1997) refere-se ao mecanismo de difusão como responsável pela ligação na soldagem por fricção do titânio com a liga AA 5053. Para ele existe uma espessura de camada de difusão crítica observada na soldagem por fricção de 1 µm a 2 µm nas ligas Al-Cu, Al-aço carbono, Al-aço inoxidável.

Kimura et al. (KIMURA et al. 2003) descrevem que é possível obter junções com 100% de eficiência e boa ductilidade realizando somente a primeira fase do processo de soldagem, sem a fase de forjamento. Nessa fase do processo uma superfície é pressionada sobre a outra e ocorre grande elevação da temperatura na região da interface entre os dois materiais e formação da rebarba. Com a formação de uma superfície limpa isenta de óxidos, são criadas condições ideais de adesão e difusão (pressão e temperatura). A ligação entre os materiais ocorre do centro para a periferia devido à menor velocidade tangencial nessa região.

No “Welding Handbook” (AWS, 1997), também se encontra a definição de que a difusão é o principal mecanismo no processo de soldagem por fricção, e que a mistura mecânica contribui para a formação da junção. As propriedades da camada formada pela difusão e pela mistura mecânica desempenham um papel importante na resistência da junta formada entre dois materiais.

2.3.2.1 Teoria da ligação por difusão

Teoricamente, se dois materiais fossem colocados em contato perfeito e suas superfícies fossem idealmente planas (em escala atômica), livres de contaminantes e filmes óxidos, a união deveria ocorrer prontamente pela simples aproximação dos átomos e o complemento das suas ligações. Isso é chamado de adesão física, e desse modo a resistência da junção seria similar à dos materiais (MONTEIRO, 2006).

Entretanto, é impossível obter tais condições, pois superfícies reais apresentam rugosidades não removíveis por métodos convencionais e uma camada de átomos adsorvidos estabiliza as ligações atômicas insaturadas nas superfícies dos substratos (MONTEIRO, 2006).

A difusão é um processo metalúrgico básico que resulta do maior ou menor movimento individual dos átomos. Devido à energia térmica, os átomos em um cristal metálico estão em constante movimento em busca da sua posição de equilíbrio na rede. Ocasionalmente, como resultado desse movimento, um átomo saltará para uma vizinhança mais próxima. Na temperatura ambiente, a frequência com que um átomo se move para uma vizinhança é muito pequena. Entretanto, quando ocorre um aumento da temperatura, a frequência com que esse átomo salta para sua vizinhança aumenta, com uma alta taxa de migração atômica na rede e, eventualmente tornando-se alta o suficiente para fornecer efeitos observáveis, incluindo o transporte de átomos a distâncias consideráveis e variações apreciáveis na composição química (KHAN, 2008).

Na soldagem por fricção, tem-se outra variável de ordem de pressão, que quando aplicada ao sistema intensifica o contato entre as superfícies. Inicialmente é gerada uma superfície limpa e isenta de óxidos e agentes contaminantes com ótima capacidade de adesão. Com as superfícies de contato limpas, submetidas à pressão e elevada temperatura ocorre o processo de difusão. Segundo Zepeda (2008), a ligação ocorre da região central para a periferia devido à menor velocidade tangencial.

2.3.3 Influência dos principais parâmetros de soldagem nas junções obtidas pelo processo de soldagem por fricção convencional.

Na soldagem por fricção convencional há diversos parâmetros que são ajustados e controlados diretamente no equipamento de forma a garantir a qualidade das juntas soldadas.

Esses parâmetros são definidos em função das propriedades do metal ou metais que serão unidos e da geometria das peças (NIKOLAEV, 1977).

Os principais parâmetros utilizados no setup de uma máquina de soldagem por fricção convencional são:

- Velocidade de rotação – RPM
- Pressão de aquecimento P1;
- Tempo de aquecimento t1;
- Pressão de recalque P2;
- Tempo de recalque t2;
- Velocidade de deslocamento do pistão.

2.3.3.1 Velocidade de rotação (RPM)

A velocidade de rotação tem como função principal, produzir uma velocidade relativa nas superfícies em contato (AWS, 1997). É a variável de menor influência na qualidade da solda, podendo variar bastante, como é o caso da liga de alumínio comercialmente puro (1800 RPM) e da liga de cobre comercialmente puro (8000 RPM) (MACHADO, 1996), ou pouco, se os parâmetros de pressão P1, P2 e tempo t1, t2 forem ajustados adequadamente de acordo com o material e o diâmetro da peça a ser soldada. O tamanho da ZTA e o tempo de soldagem variam diretamente com a velocidade relativa. Normalmente os equipamentos encontrados no Brasil possuem velocidades de rotações fixas e são empregados na produção de válvulas e eixos utilizados nas indústrias automobilísticas (ALVES, 2012).

Para a soldagem de materiais com alta condutividade térmica, como ligas de alumínio, ligas de cobre, e também para a soldagem de aços com alta resistência mecânica endurecidos por meio de tratamento térmico, podem-se utilizar altas velocidades de rotação associadas com baixo aporte térmico para obtenção de junções com boa qualidade (AWS, 1997).

A velocidade de rotação, embora não seja um parâmetro tão importante se considerado isoladamente, exerce um papel fundamental na obtenção de uma junção com qualidade estrutural quando combinada com a velocidade de deslocamento, pressão P1 e tempo t1. Na Figura 3 é mostrada a influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento t1, mantida a velocidade constante (WAINER et al., 2002).

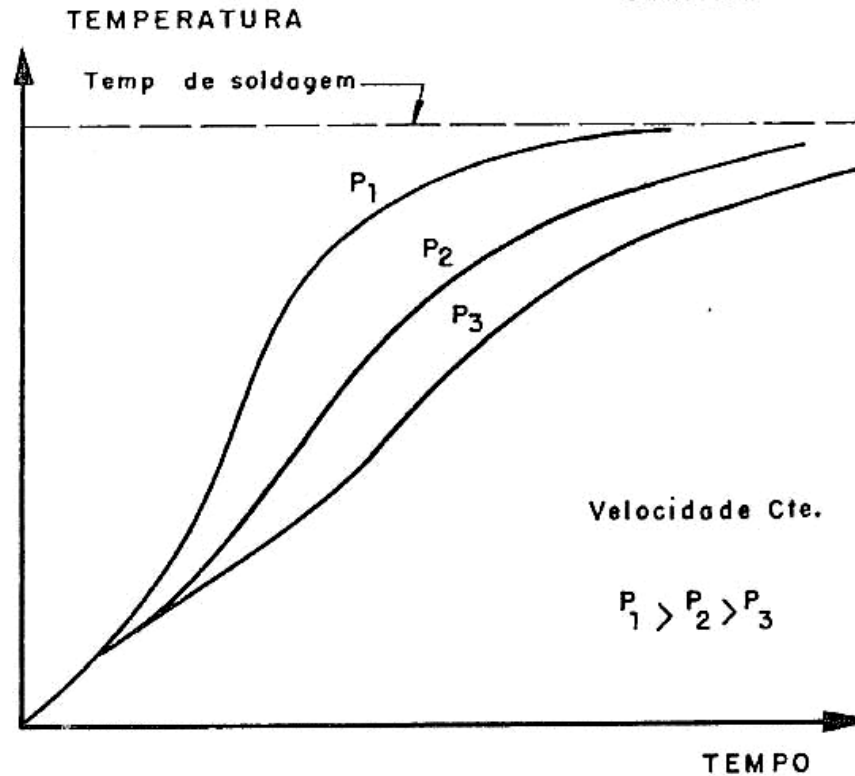
2.3.3.2 Pressão de aquecimento P1

A pressão de aquecimento P_1 é a pressão axial efetiva aplicada no material por meio de um pistão hidráulico, responsável pela fase mais importante do processo de soldagem por fricção, a fase de aquecimento. Existe uma grande faixa de pressões que podem se aplicadas para aços, ligas de alumínio e materiais dissimilares que podem ser utilizadas para obter soldas com boa qualidade. Ela controla a gradiente de temperatura na interface da solda e deve ser ajustada de acordo com o material ou materiais envolvidos juntamente com o tempo t_1 para que a temperatura gerada na interface seja suficiente para que ocorra a difusão. Se a pressão for muito baixa, o aquecimento na interface será insuficiente podendo gerar juntas soldadas incompletas ou com falhas. Caso a pressão seja muito elevada, o aquecimento poderá ser excessivo o que poderá causar fragilização da ZTA e, conseqüentemente, produzir juntas soldadas incompletas ou com falhas (ALVES, 2012).

Durante a realização da soldagem a pressão P_1 é mantida constante até o término do tempo t_1 . Podem-se modificar os valores de pressão durante a realização do processo, entretanto, essa prática não é recomendada, mesmo que os equipamentos permitam que o operador realize essa operação. Nas indústrias que utilizam o processo de soldagem por fricção rotativa convencional, têm-se adotado medidas de segurança que limitam valores de pressão dentro de determinadas faixas de operação com objetivo de se evitar rudes perdas na produção na ocorrência de uma falha no sistema hidráulico com quedas de pressão que não possam ser observadas de forma imediata pelo operador (ALVES, 2012).

No início da soldagem, quando os materiais entram em contato e ocorre a elevação da temperatura pelo atrito gerado entre as interfaces dos dois materiais, a pressão P_1 combinada com o tempo t_1 , a velocidade de deslocamento do pistão e a velocidade de rotação constante fazem com que a temperatura se eleve rapidamente na interface de ligação. Após uma determinada temperatura os materiais começam a se deformar plasticamente gerando a rebarba, eliminando possíveis camadas de óxidos e impurezas existentes nas interfaces dos dois materiais (ALVES, 2012).

O valor da pressão P_1 ideal para um processo produtivo é o maior possível que permita altas taxas de produção, menor ZTA, menor redução do comprimento dos materiais envolvidos e que apresente como resultado final as propriedades mecânicas especificadas pelo projeto de forma que a qualidade do produto atenda as necessidades do cliente. A Figura 3 mostra a influência da pressão P_1 no tempo de aquecimento t_1 , mantida a velocidade de rotação constante (ALVES, 2012).



Fonte: WAINER et al. (2002).

FIGURA 3 – Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a velocidade constante.

2.3.3.3 Tempo de aquecimento t_1

O tempo de aquecimento t_1 é de fundamental importância na primeira fase de soldagem, que se inicia com o contato entre os materiais e termina com a frenagem da máquina, momento em que o movimento de rotação e aplicação da pressão P_1 são interrompidos bruscamente iniciando a aplicação da pressão de recalque P_2 e do tempo de forjamento t_2 . Quando tempo de fricção é muito curto, o efeito do aquecimento pode se tornar irregular resultando no surgimento de regiões não soldadas. Caso o tempo de fricção seja longo demais, haverá uma redução da produção e consumo excessivo de material (SATHIYA et al., 2006).

Para que ocorra a soldagem no estado sólido é necessário que todos os óxido e impurezas existentes nas superfícies de contato entre os dois materiais sejam removidos através da rebarba. A principal função do tempo t_1 é de fazer com que isso aconteça de forma efetiva logo no início da fase de aquecimento para que as novas superfícies de contato possam interagir e iniciar o processo de ligação. Como parâmetro de soldagem atua juntamente com a velocidade de rotação, pressão P_1 e velocidade de soldagem. Essa combinação de parâmetros é determinante na formação de uma boa microestrutura na ZTA e obtenção de junções com boas

propriedades mecânicas. A definição do tempo t_1 depende de uma série de fatores como tipo de material, processamento pelo qual passou o material, diâmetro, tipo de equipamento a ser utilizado, e principalmente da definição dos outros parâmetros envolvidos nessa etapa do processo de soldagem por fricção. Existem determinadas situações onde a utilização de um tempo t_1 mais longo torna-se necessário no sentido de se ter uma taxa de resfriamento mais lenta, quando realizada à pressão atmosférica normal e na temperatura ambiente, como é o caso de algumas ligas de Al. Entretanto, para a soldagem de determinados aços estruturais com alta resistência, um tempo menor, conciliado aos outros parâmetros do processo, pode formar uma ZTA menor, com menos tensões na junta soldada após o término da soldagem e resfriamento à pressão atmosférica normal na temperatura ambiente. Nesse caso, normalmente realiza-se um tratamento térmico de alívio de tensões para melhorar a tenacidade da junta soldada e as suas propriedades mecânicas (ALVES, 2012).

2.3.3.4 Pressão de forjamento P2

O início da segunda fase de soldagem, também conhecida como fase de forjamento, começa logo após a aplicação da pressão P_1 no tempo t_1 . A aplicação da pressão P_2 no tempo t_2 caracteriza essa etapa do processo e é responsável pelo término da soldagem. Quando os valores da pressão P_2 são definidos de forma adequada relacionada ao tempo t_2 , possibilita a obtenção de junções com boas propriedades mecânicas, pouca redução do comprimento das barras dos materiais envolvidos no processo e pouca formação de rebarba. A utilização de uma baixa pressão de recalque P_2 , no intervalo de tempo t_2 , mesmo que todos os parâmetros anteriores tenham sido definidos corretamente, pode gerar junções com propriedades mecânicas inferiores às dos materiais envolvidos fazendo com que a ruptura da solda ocorra na interface de ligação entre os dois materiais (ALVES, 2012).

Quando é utilizado um alto valor de pressão de forjamento P_2 , no intervalo de tempo t_2 , considerando que todos os parâmetros anteriores tenham sido definidos de forma correta, também são obtidas junções com baixas propriedades mecânicas e ruptura na interface de ligação. Isso também pode levar a uma grande redução do comprimento das barras dos materiais envolvidos com formação exagerada de rebarba, o que não é interessante economicamente para os setores produtivos. Da mesma forma que acontece na fase de aquecimento, os valores dos parâmetros na fase de recalque devem ser definidos considerando a combinação dos parâmetros de pressão P_2 , do tempo t_1 e a velocidade de soldagem (ALVES, 2012).

2.3.3.5 Tempo de forjamento t2

O tempo t2 juntamente com a velocidade de soldagem, é responsável pela aplicação efetiva da pressão de recalque P2. Quando se encerra o período de tempo t2 é completado o ciclo de soldagem. Tanto o tempo de aquecimento t1 quanto o tempo de forjamento (recalque) t2, são controlados por meio de um dispositivo temporizador (timer) (AWS, 1997), que é ajustado diretamente no painel de controle do equipamento de soldagem por fricção. Quando a pressão de forjamento P2 aumenta, o tempo de recalque t2 é diminuído e vice-versa.

Se o tempo de forjamento t2 for excessivo ou abaixo dos valores ditos ideais, combinado com o valor da pressão de forjamento P2 e com a velocidade de soldagem, são obtidos junções com baixas propriedades mecânicas (ALVES, 2012).

2.3.3.6 Velocidade de deslocamento do pistão

A velocidade de deslocamento do pistão ou velocidade de soldagem é outro parâmetro bastante importante que deve ser definido de acordo com os materiais a serem soldados. O tamanho da ZTA e o tempo de soldagem variam diretamente com a velocidade de soldagem (WAINER et al., 2002).

Para cada material existe uma força e uma velocidade crítica mínima, cujos valores são mostrados no Quadro 1.

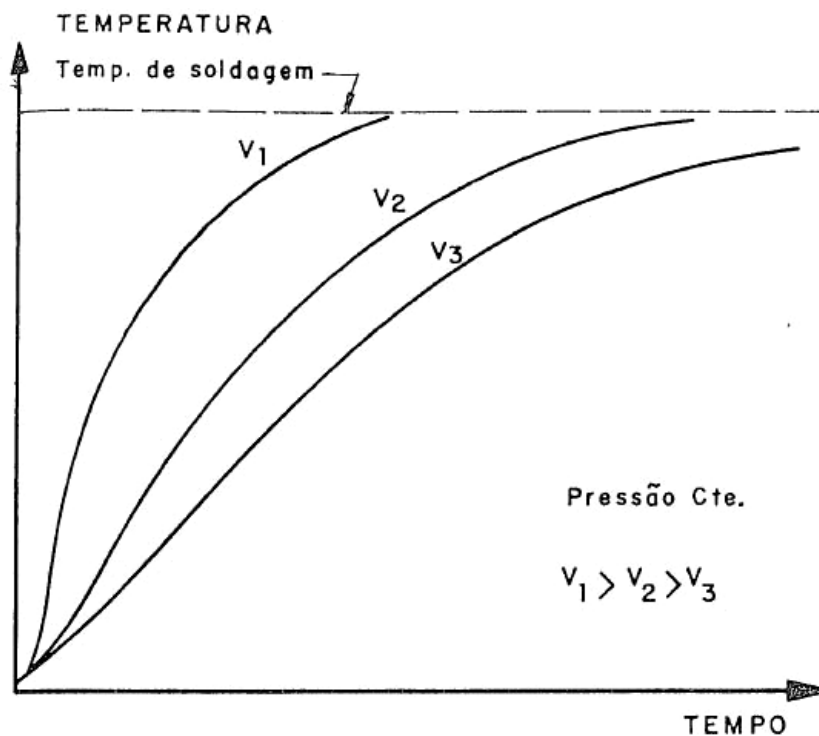
QUADRO 1 – Valores de força e velocidade crítica de soldagem.

Material	Força (10 ⁴ N)	Velocidade crítica mínima (m/s)
Chumbo	50	0,25
Aço inoxidável	260	1,00
Alumínio	380	1,25
Aço-ferramenta	430	1,40
Aço de baixo carbono	470	1,75
Níquel	650	3,25
Titânio	800	3,75
Cobre	950	9,00
Molibdênio	1250	10,00
Tungstênio	1750	12,50

Fonte: WAINER et al. (2002).

A velocidade de soldagem influencia diretamente na temperatura da interface de ligação, que está relacionada com o tamanho da ZTA e com as propriedades mecânicas da junta soldada (WAINER et al., 2002).

Para a soldagem de materiais similares e dissimilares, a definição desse parâmetro deve ser feita analisando-se os valores dos outros parâmetros e das características da ZTA desejada. Normalmente os valores calculados são referenciais; na prática, sempre existe a necessidade de se realizar testes experimentais com diferentes velocidades e ajustá-las corretamente para obtenção dos melhores resultados. Na soldagem de materiais dissimilares como o Al (1,25 m/s) e o aço inoxidável (1,0 m/s), a definição desse parâmetro depende de testes experimentais, onde são realizados ensaios mecânicos, análise do formato da rebarba, verificação da redução do comprimento dos materiais que foram soldados, etc. Entretanto, quando a soldagem se refere a dois materiais com velocidades críticas mínimas bem distintas, como é o caso da soldagem do aço inoxidável (1,0 m/s) com o cobre (9,0 m/s), pode haver a necessidade da realização de um número maior de testes experimentais e de ajustes dos outros parâmetros relacionados ao processo. Na Figura 4 é mostrada a influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a pressão constante (ALVES, 2012).



Fonte: WAINER et al. (2002).

FIGURA 4 – Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a pressão constante.

2.3.3.7 Interação entre os parâmetros

Embora tenham sido descritas anteriormente a função e a importância de cada parâmetro individualmente ou relacionado a outros parâmetros em cada fase da soldagem por fricção rotativa convencional, a interação entre todos os parâmetros e fases subsequentes é que resulta na formação de uma junção com boa qualidade e propriedades mecânicas ideais para a sua aplicação. Na fase de aquecimento a interação dos parâmetros tem como objetivo a remoção da camada de óxidos e impurezas das interfaces dos materiais que serão unidos e fazer com que o atrito entre elas eleve a temperatura até um determinado valor para que, com a aplicação da pressão de forjamento P2 no intervalo de tempo t2, a solda seja finalizada com sucesso. Se essa interação não ocorrer de forma satisfatória na fase de aquecimento, e entre ela e a fase de forjamento que finaliza o ciclo de soldagem, camadas de óxidos e impurezas não forem removidas totalmente das superfícies, a temperatura necessária para que ocorra o forjamento não será suficiente para que ocorra a ligação em toda a superfície de contato, resultando em uma junção com propriedades mecânicas inferiores a dos metais base envolvidos. O Quadro 2 apresenta valores de variáveis típicas do processo de soldagem por fricção rotativa convencional (ALVES, 2012).

QUADRO 2 – Valores de algumas variáveis do processo, características da soldagem por fricção rotativa convencional.

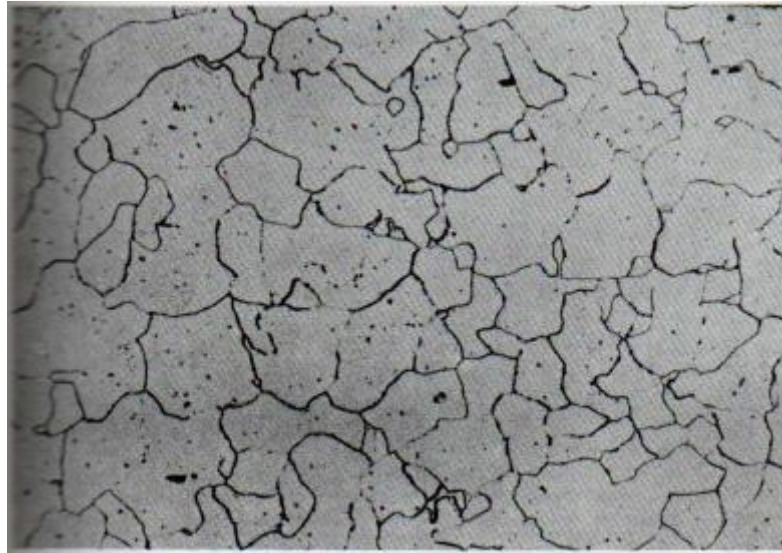
Material	Diâmetro (mm)	Rotação (RPM)	Pressão (kg/mm ²)		Tempo total (s)
			Fase de aquecimento	Fase de forjamento	
Aço - carbono	12,5	3000	34,5	34,5	7
	25,0	1500	52,0	52,0	15
Aço inox 300	25,0	3000	83,0	110,5	7
Cobre	25,0	6000	34,5	69,0	18
Alumínio puro	18,7	3800	27,5	45,0	6
Aços Ligas	9,4	5000	172,5	276,0	10

Fonte: WAINER et al. (2002).

2.4 Aço ABNT 1020

O aço é um metal composto de agregados cristalinos, cujos cristais são perfeitamente justapostos e unidos, com composição química distinta. Estes cristais são denominados grãos,

devido a sua conformação, como pode se observar na figura 5. Os grãos também podem apresentar formas ou aspectos particulares, a partir de então poderão ser denominados de diferentes maneiras, como nódulos, veios, agulhas e glóbulos (COLPAERT, 2008).

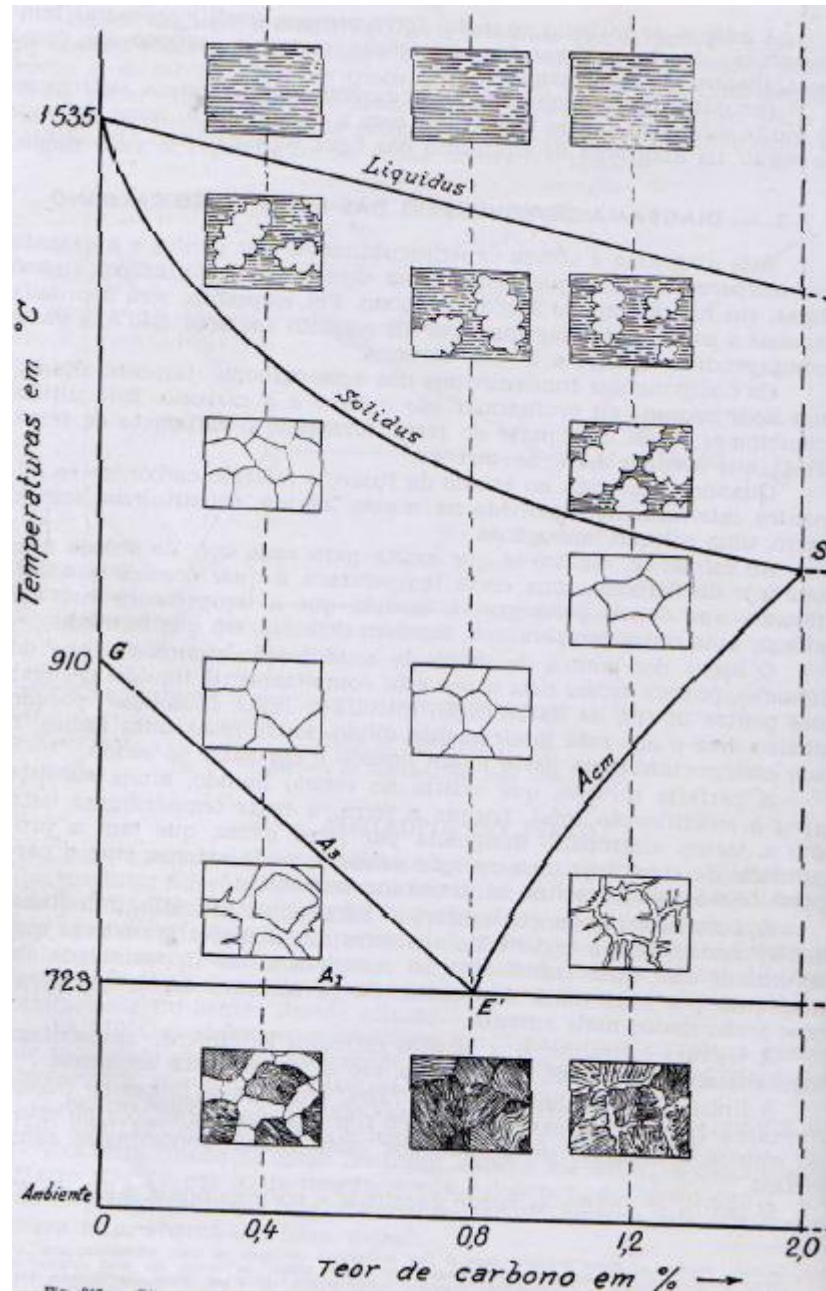


Fonte: Colpaert (2008).

FIGURA 5 – Grãos de ferrita e pequenas inclusões em aço extra-doce.

Visualizar a textura microscópica do material é possível a partir de técnica apropriada, possibilitando a observação dos diversos grãos que compõem o material. Através da análise química é possível revelar a composição do metal, a partir de exames macro e micrográficos é possível obter informações sobre como o metal adquiriu as propriedades apresentadas. Tais informações são de vital importância para fabricantes, por exemplo, que buscam melhor controle da qualidade de seus próprios produtos (COLPAERT, 2008).

Na Figura 6 pode-se observar com detalhes o diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono.



FONTE: COLPAERT (2008).

FIGURA 6 – Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono simplificado.

Os componentes principais dos aços carbonos são o ferro e o carbono. O carbono se junta com parte do ferro, formando Fe_3C (carboneto de ferro), conhecido como cementita. O carbono, quando em estado de fusão, se encontrará dissolvido em meio a massa líquida, formando uma mistura homogênea juntamente com o ferro (COLPAERT, 2008).

Verifica-se no resfriamento que para cada percentual de carbono presente no aço obtém-se uma temperatura específica a qual acontecerá a solidificação e também uma temperatura específica para o término da mesma (COLPAERT, 2008).

Denomina-se linha liquidus a linha onde se dá o início da solidificação, acima da linha liquidus o aço se encontrará totalmente líquido. A linha solidus é determinada o fim da

solidificação, pois abaixo da mesma o aço se encontrará em estado sólido. Logo, entre a linha liquidus e a linha solidus tem-se uma zona de transição onde há presença de aço líquido e sólido ao mesmo tempo. A essas temperaturas o ferro está sob a forma alotrópica, designada ferro gama, que tem a propriedade de constituir uma solução sólida mais extensa com o carbono. Esta solução sólida se denomina austenita (COLPAERT, 2008).

A austenita permanece estável e homogênea até atingir a linha GE'S, abaixo dela a textura do aço sofrera modificações gradativas que terminam com uma transformação total a 723 °C, assinaladas no diagrama por uma linha horizontal. A textura cristalina, que os aços resfriados lentamente apresentam logo abaixo desta linha, se conserva até a temperatura ambiente (COLPAERT, 2008).

São denominadas linha de transformação as linhas GE'S e a horizontal de 723 °C, a zona delimitada por elas é denominada zona crítica. Essas linhas recebem esta denominação, pois marcam o início e o fim das transformações no estado sólido (COLPAERT, 2008).

O ponto eutetóide está no ponto R', o mesmo corresponde a 0,8% de C. A solubilidade do carbono no ferro gama está diretamente relacionado com a temperatura, de forma que se torna limitada. Obtém-se solubilidade máxima na temperatura de 1130 °C, onde a concentração de carbono é de 2%, conforme a temperatura decresce a solubilidade também decresce, conforme a curva SE', obtendo-se 0,8 a 723 °C (ponto E') (COLPAERT, 2008).

Acima da linha SE' ocorrerá, para aços com teores de carbono entre 0,8 e 2%, a precipitação do carbono em forma de Fe₃C uma vez que excederá o máximo que o ferro gama pode manter em solução sólida. A precipitação ocorre nos contornos dos grãos de austenita para onde o carbono em excesso se dirige por difusão (COLPAERT, 2008).

O carboneto de ferro, Fe₃C, também é conhecido como cementita. Durante o resfriamento até a temperatura de 723 °C o teor de carbono cai até chegar em 0,8%. Após essa temperatura o ferro gama existente na austenita muda de forma, tornando-se ferro alfa. Porém, como a solubilidade do carbono no ferro alfa é muito pequena, ocorre a separação sob a forma de carboneto, os dois passarão a se organizar sob a forma de lamelas ou camadas muito finas e alternadas. Cada grão de solução sólida austenita, transforma-se assim, ao passar pela linha de 723 °C, em grãos lamelares, que tomam o nome de perlita (COLPAERT, 2008).

Os aços com 0,8% de carbono são chamados aços eutetóides, os com menos de 0,8% de hipoeutetóides e os com mais de 0,8% hipereutetóides.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material usado neste trabalho foi uma barra de aço ABNT 1020 de ½” e 2 m de comprimento.

3.1 Confeção dos corpos de prova

A barra foi cortada em pedaços menores de 50 mm cada um (Figura 7). Nos pedaços destinados a soldagem GTAW foi feito um bisel de 45° de modo que a penetração da solda fosse facilitada.



Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 7 – Corpos de prova cortados para realizar o processo.

3.2 Processo de soldagem por fricção rotativa usado para a realização dos testes de soldagem

Na falta de um equipamento específico para realizar a soldagem, utilizou-se um torno mecânico do modelo NARDINI MS 205, cedido cordialmente pelo SENAI - Rio Verde. Foi utilizada uma velocidade fixa de 2000 RPM, a pressão não pode ser controlada ou medida, pois o torno não conta com aparelhagem para tal. As pressões P1 e P2, portanto, foram a pressão exercida pela mão do operador, que buscou manter o mais constante possível. O tempo de contato t1 foi de 10 segundos, o tempo de contato t2 foi de 3 segundos. A Figura 8 mostra os corpos de prova após a soldagem por fricção e a Figura 9 mostra o torno usado para a soldagem.



Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 8 – Corpos de prova soldados pelo processo FRW.



Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 9 – Torno utilizado para soldagem FRW.

3.3 Processo de soldagem GTAW

O processo de soldagem GTAW, assim como o processo de soldagem por fricção rotativa, foi cordialmente cedido pelo SENAI – Rio Verde, onde foi utilizada uma máquina de soldagem MATRIX 250 AC/DC.

3.4 Procedimentos para ensaios

3.4.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados radialmente, para facilitar o manuseio, e longitudinalmente, para realizar os ensaios, em uma máquina policorte (Figura 10).



Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 10 – Serra policorte.

Os corpos resultantes então foram lixados em uma lixa politriz modelo PLR-II (Figura 11), na seguinte ordem de lixas: 120, 200, 300, 400, 600e 1200. Para o polimento utilizou-se um pano embebido com abrasivo na politriz.

Após o término do lixamento e polimento, foi realizado o ataque químico com ácido nítrico 5% (Nital 5%).



Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 11 – Máquina politriz.

3.5 Macrografia

A macrografia foi realizada a olho nu, sendo registradas as fotografias com o auxílio da câmera de um aparelho celular.

3.6 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado em um durômetro modelo 200 HR-150 (Figura 12), na escala Rockwell B. As durezas foram medidas na parte interna, oriunda do corte transversal. A dureza foi medida em dois pontos, na região central, a fim de se medir na região do cordão de solda, e na extremidade, buscando uma área menos afetada pelo processo de soldagem.



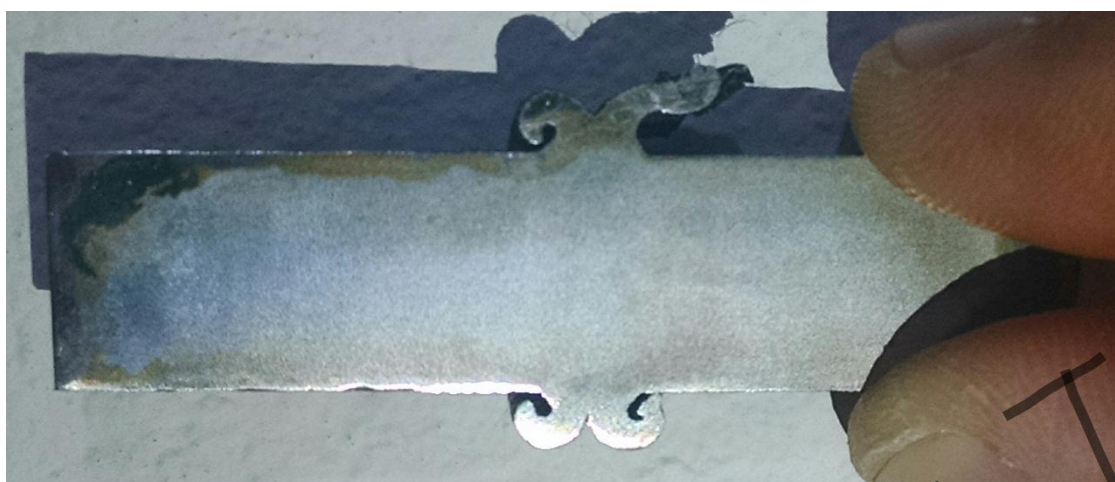
Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 12 – Máquina para ensaio de dureza Rockwell.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Macrografia

Da macrografia do corpo de prova soldado através do método FRW, pode-se notar um cordão de solda bastante pequeno, com uma ZTA bastante pequena também. Isso já era esperado uma vez que o processo não possui fusão dos elementos de liga e o calor é gerado somente pelo atrito entre as peças. A ZTA do corpo de prova soldado através do método FRW pode ser observada em detalhes na Figura 13.



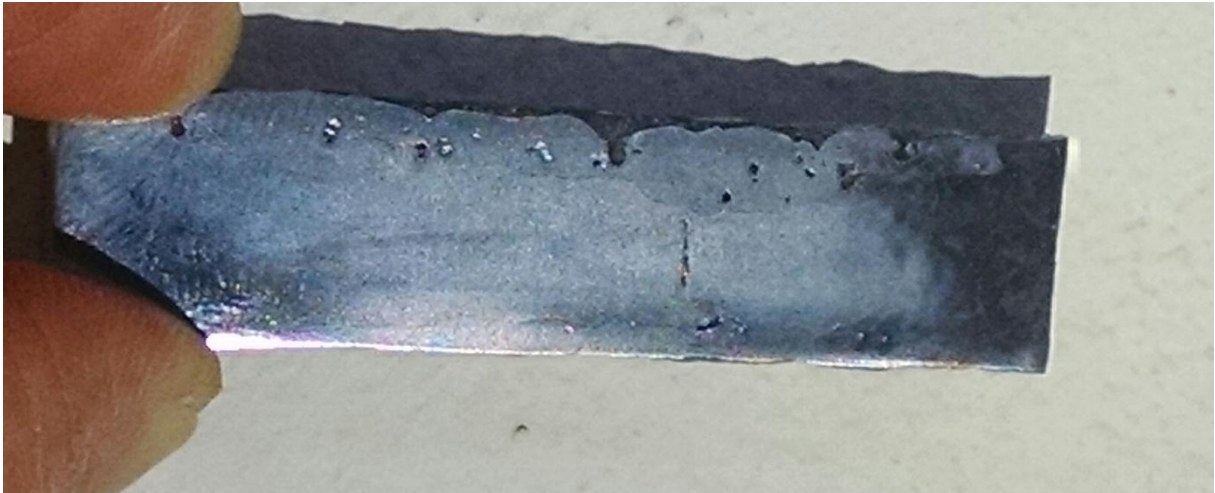
Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 13 – Macrografia do corpo de solda FRW.

O ataque não contribuiu de maneira muito eficaz para a identificação da ZTA, porém pode-se observar ao lado direito, próxima a parte onde os dois corpos de prova foram fundidos uma região mais escura, ali é delimitada a ZTA.

Da macrografia do corpo de prova soldado através do processo GTAW, pode-se notar uma ZTA maior, em virtude do aporte de calor ser maior e haver a necessidade de fusão da peça, o qual é o mecanismo de união. Visualmente pode se observar alterações ao longo da parte externa da peça, deixando a marca do alto aporte térmico impregnado no processo, também é possível notar que não houve penetração completa mesmo com a confecção do bisel,

pois nota-se uma região sem solda, no formato de uma pequena fenda. A macrografia do corpo de solda soldado através do método GTAW pode ser observada na figura 14.



Fonte: Próprio autor (2014).

FIGURA 14 – Macrografia do corpo de solda GTAW.

Outra grande vantagem que pode ser observada na solda FRW é a ausência de falhas internas, com porosidade e trincas, levando em consideração que o processo foi realizado sem a possibilidade de controle de uma gama muito grande de variáveis, a qualidade interna da soldagem foi excelente. O corpo de prova GTAW em contrapartida apresentou irregularidades internas, como uma região sem solda no cordão, resultado de uma má penetração da solda, mesmo com o bisel conferido para atenuar tal situação. Outra grande vantagem, quando se analisa o quesito habilidade do soldador no resultado final, está no fato da soldagem FRW não exigir muita habilidade do soldador, uma vez que o equipamento faz essa parte do trabalho, na soldagem GTAW fica claro que a experiência e habilidade do soldador contam e muito para o resultado final.

4.2 Ensaio de dureza Rockwell

Foi medida a dureza em duas regiões, ao centro junto ao cordão de solda e na extremidade (aproximadamente 40 mm do cordão), buscando avaliar até onde a solda afetou. As medidas foram tiradas de três corpos de prova, um corpo de prova de controle (sem solda), outro soldado pelo método FRW e outro pelo método GTAW, todos na parte interna do corte transversal.

Os resultados das medidas podem ser observados na Tabela 1.

TABELA 1 – Resultados do ensaio de dureza.

Corpo de prova	Dureza HRB no cordão de solda	Dureza HRB na extremidade
Controle	-	71.25
FRW	50	72
GTAW	58	56.5

Fonte: Próprio autor (2014).

Não há distinção de regiões no corpo de prova controle, logo foi realizada média das medidas tiradas ao longo do mesmo, que apresentou dureza de 71,25 HRB. Na região do cordão de solda FRW foi obtida dureza de 50 HRB contra 58 HRB no corpo de prova GTAW. Na extremidade do corpo de prova FRW foi obtida dureza de 72, onde já se nota que não houve ação da ZTA, pois a dureza está praticamente igual ao do corpo de prova controle. o corpo de prova GTAW em contrapartida foi obtida dureza de 56,5 HRB, comprovando o efeito da ZTA por todo o corpo de prova.

5 CONCLUSÕES

Através das macrografias realizadas foi possível confirmar que o processo FRW realmente apresenta uma ZTA menor, limitando-se a região próxima de onde as peças foram unidas. A soldagem GTAW em contrapartida, apresentou uma ZTA maior, que ficou marcado inclusive externamente no corpo de prova, apresentando irregularidades marcadas pelo aporte de calor. Aporte de calor este que também se faz bastante diferente, na soldagem FRW. Segundo Lienert et al. (1996), a temperatura atingida no processo fica entre 1100 °C e 1200 °C, enquanto que a GTAW ultrapassa 1500 °C, uma vez que se faz necessária a fusão do material para que ocorra a união dos materiais.

Através do ensaio de dureza, estabelecendo-se uma comparação entre o material virgem (CP de controle) e os soldados, o método FRW apresentou dureza de 50 HRB na região do cordão de solda, enquanto cordão resultante do método GTAW apresentou dureza de 58 HRB. Essa diferença de dureza pode ser atribuída ao fato do método GTAW fornecer material do arame de soldagem à solda, originando uma liga que possui dureza superior. No método FRW não há metal de adição (pode ser colocado se a intenção for adicionar, mas não se faz necessário como no método GTAW).

Ainda através do ensaio de dureza, observou-se que a dureza da extremidade do corpo de prova soldado através do método FRW apresentou pouca diferença com relação ao corpo de prova virgem, 72 HRB contra 71,25 HRB. Assim, pode-se concluir que a ZTA não atingiu a extremidade do corpo de prova, apenas a região do cordão, o que reafirma o quão menor é a ZTA do método FRW. Já no corpo de prova soldado através do método GTAW a dureza obtida foi de 56,4 HRB, concluindo assim que o aporte térmico atuou numa região maior, resultando numa ZTA maior, visto que a área fundida ocupou uma parte maior do corpo de prova do que no método FRW, como pode ser visto na macrografia. Também se observa uma dureza um pouco menor que a do cordão, reforçando o que foi dito anteriormente de que o metal de adição do processo contribui para a formação de uma liga e conseqüentemente aumento na dureza.

6 REFERÊNCIAS

ALVES, E. P. **Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa**. INPE – São José dos Campos. 2010.

ARITOSHI, M; OKITA, K. **Friction welding of dissimilar metals**. Journal of the Japan Welding Society, p. 20-24, 2002. Translated by Welding International, p. 271-275, 2003.

ASM. **Metals handbook: welding, brazing and soldering**. v.6, Metals Park, Ohio, USA: Fundamentals of Friction Welding, 1993.

ASM Metals Handbook. **Welding, brazing and soldering**. United States of America: ASM International, 1995. v. 6. 2873 p.

BRAU, P. J. **Friction science and technology**. Friction Welding. Marcel Dekker, Inc., U.S.A, p. 321-330, 1996.

CHALMERS, R. E. **The friction welding advantage**, p. 64-70, May, 2001.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderurgicos comuns**. Editora Edgard Blucher 2008.

EAGAR, T. W. **Challenges in joining emerging materials**. Proceedings of international conference on advance in joining newer structural materials. Montreal – Canadá. Pergamon Press, 1990.

FUJI, A.; KIMURA, M.; NORTH; T. H.; AMEYAMA, K.; and AKI, M. **Mechanical properties of titanium - 5083 aluminum alloy friction joints**. Materials Science and Technology, v.13, p. 673, Aug. 1997.

GARG. S. F. - **Comprehensive Workshop technology (manufacturing process)**. Solid State Welding – Friction Welding, p. 387, Laxmi Publication (P) LTD, 2009.

KHAN, M. A. Z. K. **Bonding of stainless steel to aluminum base alloy**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Department of Metallurgy and Materials Engineering, Mehran University of Engineering and Technology , Jamshoro, Pakistan, 2008.

KIMURA, M.; SEO, K.; KUSAKA, M.; FUJI, A. **Observation of Joining Phenomena in Friction Stage and Improving Friction Welding Method**. JSME International Journal – Series A, v.46, n. 3, 2003.

LIENERT, T. J.; et al. **Friction Stir Welding Studies on Mild Steel**. Welding Research Supplement, Supplement to the Welding Journal, Welding Journal. January 2001.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas – processos** – Porto Alegre: ABS, 1996.

MAALEKIAN, M; KOZESCHNIK, E; BRANTNER, H.P.; CERJAK, H. **Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars**. Kopernikusgasse, Austria: Institute for Materials Science, Welding and Forming, Graz University of Technology, 2008.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005, 363 p.

MONTEIRO, W. R. **Junção de materiais dissimilares – aço inoxidável AISI 304 – ligas de alumínio para aplicações espaciais**. 2006. 124 f.

NIKOLAEV, G; OLSHANSKY, N. **Advanced welding process**. Moscow: MIR, 1977.

SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S.; HAQ, A. N. **Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel**. London: Springer-Verlag, 2006.

ZEPEDA, C. M. **The effect of interlayers on dissimilar friction weld properties**. 2001. Thesis (Doctor in Applied Science). Graduate Department of Metallurgy & Materials Science, University of Toronto, Canada.

WAINER et al. **Soldagem, processos e metalurgia**. 3. ed. Edgar Blucher, 2002.