



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.15.19.09-TDI

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTUDO DO PERFIL TÉRMICO NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA DE MATERIAIS DISSIMILARES

Eder Paduan Alves

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Chen Ying An, Rafael Cardoso Toledo, e Francisco Piorino Neto, aprovada em 18 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LBKP3B>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.15.19.09-TDI

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTUDO DO PERFIL TÉRMICO NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA DE MATERIAIS DISSIMILARES

Eder Paduan Alves

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Chen Ying An, Rafael Cardoso Toledo, e Francisco Piorino Neto, aprovada em 18 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LBKP3B>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Alves, Eder Paduan.

A187c Caracterização mecânica e estudo do perfil térmico na soldagem por fricção rotativa de materiais dissimilares / Eder Paduan Alves. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xxvi + 182 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.15.19.09-TDI)

Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Chen Ying An, Rafael Cardoso Toledo, e Francisco Piorino Neto.

1. Soldagem por fricção. 2. Análise térmica. 3. Materiais dissimilares. 4. Propriedades mecânicas. 5. Análise microestrutural. I.Título.

CDU 621.791:620.181.4



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

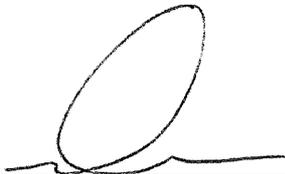
Aluno (a): *Eder Paduan Alves*

Título: "CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTUDO DO PERFIL TÉRMICO NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA DE MATERIAIS DISSIMILARES".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Doutor(a)* em

ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores

Dr. Chen Ying An



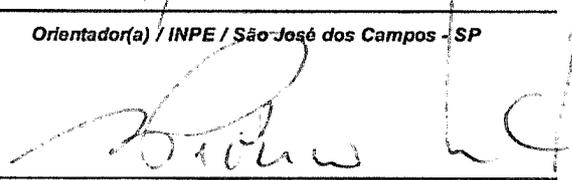
Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Rafael Cardoso Toledo



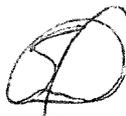
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Francisco Piorino Neto



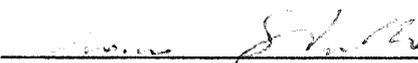
Orientador(a) / AMR/IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dr. Sérgio Luiz Mineiro



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Jerônimo dos Santos Travelho



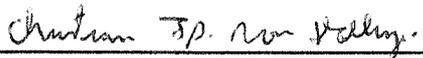
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Eduardo Ferro dos Santos



Convidado(a) / USP/Lorena / Lorena - SP

Dr. Christian Frederico de Ávila Von Dollinger



Convidado(a) / AMR-CTA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

“O homem erudito é um criador de fatos que já existem; mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir”.

(Albert Einstein)

A TODAS AS PESSOAS QUE ME AJUDARAM AO LONGO DA MINHA VIDA.

AGRADECIMENTOS

A minha querida esposa, que sempre teve paciência em me dividir com os estudos, pelo seu envolvimento e pelo seu carinho.

A meu filho Thales pelo apoio e compreensão das minhas ausências em função da dedicação às pesquisas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE-DCTA), por permitir o meu ingresso no plano de doutorado do INPE, apoio nas realizações das pesquisas, possibilitar a utilização de meios internos para análises, e a sua conclusão.

Em especial ao Dr. Chen Ying Na, ao Dr. Francisco Piorino Neto e ao Dr. Rafael Cardoso Toledo pela orientação, colaboração e apoio que conduziram à construção de conhecimentos indispensáveis à realização deste trabalho. Pela disponibilidade e aceitação demonstrada desde a apresentação da ideia inicial, pelos recursos oferecidos em diferentes momentos da pesquisa e por propiciarem situações de aprendizagem que permitiram a transposição necessária da análise pautada no senso comum, para o pensar científico, característica indispensável para a conclusão desta Tese de Doutorado.

À Dra. Maria do Carmo, ao Dr. Baldan, ao Dr. Paulo Henrique de Oliveira Rappl, ao Dr. Luis Eduardo Vergueiro Loures, e ao Professor Waldyr Veg (Fatec-sp) pelo incentivo, apoio e cooperação no sentido de realização deste trabalho.

RESUMO

Na busca de processos alternativos utilizados para união de materiais dissimilares, destaca-se o processo de soldagem por fricção rotativa (Rotary Friction Welding), utilizado em tecnologia de ponta na indústria aeroespacial, aeronáutica, nuclear, bélica e automotiva. O processo de soldagem por fricção rotativa (SFR) acontece no estado sólido sem ocorrência de fusão entre as partes, e apresenta como principais mecanismos a difusão e mistura mecânica. Este trabalho tem como objetivo a caracterização mecânica, microestrutural, e estudo do perfil térmico de junções dissimilares envolvendo a liga de alumínio AA 6351-T6 e o aço inoxidável AISI 304L produzidos comercialmente no Brasil, para aplicações no setor aeroespacial. Junções dissimilares foram obtidas utilizando diferentes geometrias e caracterizadas por meio de ensaios de tração, microdureza Vickers (HV), microscopia óptica e eletrônica (MEV, EDX), espectroscopia de fotoelétrons por RX (XPS), e tiveram o seu perfil térmico estudados a partir de trabalhos experimentais de monitoramento da temperatura em tempo real com auxílio de termocâmara, sistemas de termopares, e modelamento analítico 1D. Resultados dos ensaios mecânicos mostraram a grande eficiência do processo na fabricação de junções dissimilares estruturais para aplicações na engenharia. Junções produzidas a partir de pinos com geometria cônica apresentaram maior resistência mecânica em todos os testes realizados. Nas análises microestruturais e por XPS ficou caracterizada a interdifusão entre os principais elementos presentes nos materiais envolvidos no processo. Amostras de junções que tiveram a ruptura na interface de ligação foram analisadas e verificou-se que porcentagens elevadas de Fe combinadas a baixas porcentagens de Ni, melhoram a resistência mecânica da junção. O uso de termocâmara e sistema de termopares no monitoramento da temperatura durante o processo possibilitou a visualização em tempo real dos diferentes gradientes de temperatura na interface de ligação tanto no sentido radial quanto longitudinal. Nas amostra onde se utilizou pinos com geometria cônica ocorreu melhor distribuição da temperatura na interface de ligação, com maior elevação na região central da amostra nos três segundos iniciais do processo. Valores numéricos obtidos a partir do modelamento matemático em 1D apresentaram grande aproximação quando comparados com os dados obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: Soldagem por fricção. Análise térmica. Materiais dissimilares. Propriedades mecânicas. Análise microestrutural.

MECHANICAL CHARACTERIZATION AND STUDY OF THE THERMAL PROFILE DURING ROTARY FRICTION WELDING OF DISSIMILAR MATERIALS

ABSTRACT

In search of alternative processes utilized for joining dissimilar materials, one of the most relevant process is rotary friction welding, which is being used in high-technology applications in aerospace industry, aeronautics, nuclear, military and automotive. The rotary friction welding process (RFW) happens in the solid state without occurrence of fusion between the parties, and presents as the main binding mechanisms the diffusion and mechanical mixture. This work has like objective the mechanical and microstructural characterization, and study of the thermal profile of dissimilar joints involving aluminium alloy AA 6351-T6 and stainless steel AISI 304L commercially produced in Brazil, for applications in the aerospace sector. Dissimilar joints were obtained using different geometries and characterized by means of traction mechanical essays, Vickers microhardness (HV), optical and electronic microscopy (SEM, EDX), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and had its thermal profile studied from experimental works of real time temperature monitoring with the aid of termocâmera, thermocouples, and 1D analytical modeling. Results of mechanical tests showed the great efficiency of the manufacturing process of dissimilar joints for structural engineering applications. Joints produced from pin with conical geometry presented a higher mechanical strength in all tests. In the micro-structural analysis and XPS was characterized the interdiffusion between the main components of the materials involved in the process. Samples of joints that had the rupture in the bonding interface was analyzed and it was found that high percentages of Fe combined at low percentages of Ni, improve the mechanical resistance of the junction. The use of termocâmera and system of thermocouples in temperature monitoring during the process enabled the real-time visualization of different temperature gradients in the bonding interface both in radial and longitudinal direction. In samples where used pins with conical geometry occurred better temperature distribution on the interface, with the highest elevation in the central region of the sample within three seconds of the process. Numeric values obtained from the mathematical modeling in 1D presented great approach when compared with the data obtained experimentally.

Key words: Friction welding. Thermal analysis. Dissimilar materials. Mechanical properties. Microstructural analysis.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Vista geral do Veículo Lançador de Satélites – VLS-1	3
Figura 2.1 - Classificação dos processos de junção de materiais.	8
Figura 2.2 – Soldagem por fusão.	10
Figura 2.3 – Soldagem no estado sólido ou por pressão.	11
Figura 2.4 – Classificação dos processos de soldagem.....	13
Figura 2.5 – Junções de materiais dissimilares.....	14
Figura 2.6 – Proporção relativa de diversos processos de junções abordados em artigos científicos dedicados à junção de materiais dissimilares.	16
Figura 2.7 – Etapas da soldagem por difusão.....	17
Figura 2.8 – Soldagem por explosão.....	18
Figura 2.9 – Geometria típica da peça antes e após a soldagem por pulso magnético.....	20
Figura 2.10 – Espessura da camada intermetálica medida na interface de ligação entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304. Aumento de 20.000x.	22
Figura 2.11 – Passividade dos aços cromo, expostos durante 10 anos a atmosfera industrial.	25
Figura 2.12 – Classificação dos aços inoxidáveis austeníticos.	27
Figura 2.13 – Classificação das ligas de alumínio e respectivos tratamentos mecânicos e térmicos.....	31
Figura 3.1 - Etapas do processo de soldagem por atrito convencional.	37
Figura 3.2 - Equipamento de soldagem por fricção convencional.	40
Figura 3.3 – Etapas da soldagem por fricção inercial.....	41
Figura 3.4 – Equipamento de soldagem por fricção inercial.....	42
Figura 3.5 – Distribuição de temperatura calculada para as variantes do processo. Solda topo-a-topo com barras de aço SAE 1045 com 25 mm de diâmetro.	44
Figura 3.6 – Linhas de fluxo de escoamento plástico nas duas variantes do processo.....	45
Figura 3.7 – Princípio do processo <i>Friction Stir Welding</i>	46
Figura 3.8 – Representação esquemática do princípio geral de funcionamento do processo FSW. (1) Aproximação da ferramenta; (2) Abertura furo; (3) Encosto do ombro da ferramenta gerando fricção; (4) Deslocamento, soldagem e término do processo.	47
Figura 3.9 – Aplicações do processo FSW na indústria.	48
Figura 3.10 – Soldagem por atrito de pinos consumíveis.....	49
Figura 3.11 – Esquema da costura por fricção em um passe.	50
Figura 3.12 - Costura por fricção com mais de um passe.	50
Figura 3.13 – Interior da Baía de Controle – VLS. Vista do reservatório esférico de hidrazina e junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação da liga AA 1050.	51

Figura 3.14 – Vista ampliada da junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação de alumínio AA 1050 soldada por fricção – Baia de Controle VLS1 – DCTA-IAE.	52
Figura 3.15 – Junta de Transição para Reator Nuclear (Liga de alumínio e Aço).	52
Figura 3.16 - Junções bimetálicas Al - Aço inoxidável.	53
Figura 3.17 – Conector Cu – Al.	53
Figura 3.18 – Aplicações do processo de soldagem por fricção.	53
Fig. 3.19 – Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a pressão constante.	59
Figura 3.20 – Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a velocidade constante.	63
Figura 3.21 – Diferentes geometrias de superfícies soldadas por fricção.	73
Figura 3.22 – Curva típica do coeficiente de atrito versus tempo ou coeficiente de atrito versus distância em metais.	81
Figura 4.1 - Diferentes formatos e aparências de rebarbas obtidos com o uso de diferentes parâmetros de pressão e velocidade, na soldagem da liga AA 1050 com o aço inoxidável AISI 304L.	87
Figura 4.2 - Distribuição da temperatura na interface de ligação em diferentes tempos: TA – Temperatura Ambiente; T _c - Temperatura crítica.....	91
Figura 4.3 - Ilustração da geração de calor na interface de ligação mostrando que o aumento da temperatura ocorre radialmente, à medida que se distancia do centro.	92
Figura 4.4 - Interface de ligação apresentando a região denominada de Raio Médio.	94
Figura 5.1 – Pinos cilíndricos fabricados de alumínio com geometria regular (a), geometria cônica (b), e aço inoxidável (c).	98
Figura 5.2 – Detalhe da geometria dos pinos de alumínio: (a) regular e (b) cônica.	99
Figura 5.3 – Pinos de aço com diferentes furações para fixação de termopares.	99
Figura 5.4 – Máquina de soldagem por fricção rotativa convencional GATWICK.	101
Figura 5.5 – Perfilômetro óptico a laser do LAS/INPE.....	103
Figura 5.6 – Corpos-de-prova fabricados (dimensões em milímetros).	104
Figura 5.7 – Máquina de ensaios de tração da AQI/DCTA.	104
Figura 5.8 – Amostras utilizadas para ensaios de microdureza.	105
Figura 5.9 – Microdurômetro Vickers digital.	105
Figura 5.10 – Amostra 1 e 2 utilizadas para realização de ensaios metalográficos. (a) antes do embutimento e polimento; e (b) após embutimento e polimento.	106
Figura 5.11 – Microscópio óptico do AMR/DCTA.	107
Figura 5.12 – Fotografia do microscópio eletrônico de varredura.	107
Figura 5.13 – Fotografia do equipamento de análises por XPS, alocado no Lab. Associado de Sensores e Materiais – LAS/INPE.	108
Figura 5.14 – Termocâmara usada nos ensaios.	109

Figura 5.15 – Sistema MGC-PLUS – HBM utilizado para medições e monitoramento das temperaturas.....	110
Figura 5.16 – Posicionamento dos termopares na interface de ligação para monitoramento do deslocamento do fluxo de calor no sentido radial durante a soldagem (pino de aço inoxidável).	111
Figura 5.17 – Posicionamento dos termopares em diferentes distâncias da interface de ligação no sentido do comprimento do pino de aço Inoxidável. Profundidades dos furos relativas a linha de centro da peça.	112
Figura 5.18 – Posicionamento dos termopares em diferentes distâncias em relação a linha de união das peças no sentido do comprimento do pino de aço inoxidável. Profundidades médias a partir da linha de centro da peça.....	113
Figura 6.1 - Rugosidade superficial do aço inoxidável AISI 304L e da liga AA 6351-T6 antes e após a aplicação de decapagem química.	116
Figura 6.2 – Análise estatística da rugosidade superficial dos pinos de aço inoxidável AISI 304 L, alumínio AA 6351-T6 e alumínio AA 1050.....	117
Figura 6.3 – Formato do “flash” das junções soldadas. (a) amostra 1; (b) amostra 2; e (c) comparação entre as amostras.	119
Figura 6.4 – Foto do corpo de prova nº 2, antes e após a realização de ensaios de tração mostrando a fratura no lado da liga de alumínio com 327 MPa.	125
Figura 6.5 – Esquema da análise de microdureza Vickers.	126
Figura 6.6 – Gráfico representativo dos valores de microdureza HV na direção horizontal no alumínio, Amostra 1.	126
Figura 6.7 – Gráfico representativo dos valores de microdureza HV na direção horizontal no alumínio, Amostra 2.	127
Fonte: Produção do autor.....	127
Figura 6.8 – Gráfico representativo dos valores de microdureza HV na direção vertical, Amostra 2.....	128
Figura 6.9 – Fotomicrografia da interface de soldagem com aumento de 100 x.	129
Figura 6.10 – Fotomacrografia da interface de ligação, lado do alumínio onde pode ser vista uma região próxima da junção que sofreu grande deformação plástica.	130
Figura 6.11 – Fotomacrografia da interface de ligação, lado do alumínio onde podem ser vistas linhas no sentido vertical geradas pela grande deformação plástica do material durante o processo.....	130
Figura 6.12 – Imagem obtida por MEV da junção alumínio-aço inox por SFR.	131
Figura 6.13 – (a) esquema da análise por EDX por <i>line scan</i> ; (b) imagem MEV representativa das análises.....	132
Figura 6.14 – Análise semiquantitativa por <i>line scan</i> /EDX da Amostra 1. (a) centro da IL; e (b) borda da IL.	133
Figura 6.15 – Análise semiquantitativa por <i>line scan</i> /EDX da Amostra 2. (a) centro da IL; e (b) borda da IL.	133
Figura 6.16 – Superfícies dos pinos fraturados analisadas por EDX.	135
Figura 6.17 – Imagem MEV da superfície analisada por EDX.	135
Figura 6.18 – Imagem MEV da superfície do aço inox após ruptura.....	138

Figura 6.19 – Imagem MEV da superfície do alumínio após ruptura.....	139
Figura 6.20 – Esquema ilustrativo do mapeamento da amostra para análises.	140
Figura 6.21 – Imagens obtidas por XPS mostrando grande número de átomos de Al no material alumínio, e grande número de átomos de Fe e Cr no material aço inoxidável.....	140
Figura 6.22 – Difusão dos átomos de Al para o aço inoxidável.....	141
Figura 6.23 – Difusão dos átomos de Fe presentes no aço inoxidável para o alumínio.....	142
Figura 6.24 – Difusão dos átomos de Cr presentes no aço inoxidável para o alumínio.....	142
Figura 6.25 – Imagem da termocâmara pré-ensaio. (1) motor; (2) pinça de fixação; (3) pinos que serão soldados; (4) pistão hidráulico; (5) operador; e (6) meio ambiente.....	144
Figura 6.26 – Quadros ilustrativos do processo de soldagem obtidos pela termocâmara.	146
Figura 6.27 – Sistema MGC utilizado nos ensaios; e ao lado corpos de prova soldados que foram monitorados durante o processo.....	147
Figura 6.28 – (a) termopares fixos no pino de aço inoxidável após término do ensaio; (b) equipamento de soldagem momentos antes da realização do ensaio.....	148
Figura 6.29 – Configuração dos termopares para perfil radial de temperatura.	148
Figura 6.30 – Perfil radial de temperatura, Amostra 1.....	149
Figura 6.31 – Perfil radial de temperatura, Amostra 2.....	149
Figura 6.32 – Configuração dos termopares para perfil longitudinal de temperatura. (a) 7,4 mm de profundidade; e (b) 4,3 mm de profundidade.	151
Figura 6.33 – Perfil longitudinal de temperatura a 7,4 mm, Amostra 1.....	152
Figura 6.34 – Perfil longitudinal de temperatura a 7,4 mm, Amostra 2.....	152
Figura 6.35 – Perfil longitudinal de temperatura a 4,3 mm, Amostra 1.....	153
Figura 6.36 – Perfil longitudinal de temperatura a 4,3 mm, Amostra 2.....	153
Figura 6.37 – Esquema do modelo de perfil térmico proposto	155
Figura 6.38 - Perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de x	159
Figura 6.39 – Perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de C	160
Figura 6.40 - Perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de Nu	161
Figura 6.41 – Perfil de temperatura em função do tempo	162
Figura 6.42 – Perfil de temperatura em função do tempo.	163

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Propriedades dos aços inoxidáveis AISI 304L.	29
Tabela 2.2 – Propriedades da liga AA 6351-T6.....	33
Tabela 3.1 – Comparações entre as duas variações do processo.....	43
Tabela 3.2 – Valores de força e velocidade crítica mínima de soldagem.....	69
Tabela 5.1 – Composições químicas nominais dos materiais (% peso).....	95
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas nominais dos materiais.....	96
Tabela 5.3 – Composições químicas nominais dos materiais (% peso).....	97
Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas nominais dos materiais.....	97
Tabela 5.5 – Amostras do processo SFR.....	102
Tabela 5.6 – Posicionamento dos termopares em relação ao centro da peça na interface de ligação.	111
Tabela 5.7 – Posicionamento dos termopares em relação a interface de ligação no sentido longitudinal (pino de aço inoxidável).	113
Tabela 5.8 – Posicionamento dos termopares em relação a interface de ligação no sentido longitudinal (pino de aço inoxidável).	114
Tabela 6.1 – Amostras do processo SFR.....	115
Tabela 6.2 – Rugosidade superficial (Ra) dos pinos.	116
Tabela 6.3 – Resultado de estudos de parâmetros do processo SFR fixando-se os valores de P1, t1, t2 e RPM, e variando-se os valores de P2, Etapa 1.	122
Tabela 6.4 – Resultado de estudos de parâmetros do processo SFR fixando-se os valores de P1, P2 e RPM, e variando-se os valores de t1 e t2, Etapa 2. ..	123
Tabela 6.5 – Resultados dos ensaios mecânicos realizados utilizando-se pinos de alumínio com geometria regular e cônica, Etapa 3.	124
Tabela 6.6 – Análise estatística dos resultados do EDX das Amostras 1.	137
Tabela 6.7 – Análise estatística dos resultados do EDX das Amostras 2.	137
Tabela 6.8 – Propriedades físicas dos materiais.....	162

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	<i>Aluminum Association</i>
AIE	Divisão de Ensaios do IAE
AISI	<i>The American Iron and Steel Institute</i>
AME	Divisão de Mecânica do IAE
AME-F	Subdivisão de Fabricação
AMR	Divisão de Materiais
AQI	Divisão de Química do IAE
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CCC	Sistema Cúbico de Corpo Centrado
CFC	Sistema Cúbico de Face Centrada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DCTA	Departamento de Ciência e Espaço
EDX	Espectroscopia Dispersiva de Raios X
FHPP	<i>Friction Hydro Pilar Processing</i>
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
FW	<i>Friction Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HB	Dureza Brinell
HC	Sistema Hexagonal Compacto
HV	Microdureza Vickers
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IL	Interface de Ligação
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAS	Laboratório Associado de Sensores e Materiais - INPE
LC	Linha de Centro
MAG	<i>Metal Active Gas</i>

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
Ra	Rugosidade Superficial
RC	Redução do Comprimento
RPM	Rotação por Minuto
SAE	Society of Automotive Engineers EUA
SCR	Sistema de Controle de Rolamento
SFR	Soldagem por Fricção Rotativa
TDL	Sistema Termopar / Data Logger
Tf	Temperatura de Fusão
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TWI	<i>The Welding Institute</i>
VLS	Veículo Lançador de Satélites
XPS	<i>X-Ray Photoelectron Spectroscopy</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	-	constante
C	-	constante
C_p	-	calor específico
D	-	dimensão; diâmetro
g	-	aceleração da gravidade ($g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$)
h	-	coeficiente de transferência de calor
k	-	condutividade térmica
m	-	massa
Nu	-	número adimensional de Nusselt
P	-	Pressão
Pr	-	número adimensional de Prandtl
q	-	calor
Q	-	Quantidade de calor
R	-	raio
t	-	tempo
T	-	Temperatura
v	-	velocidade
x	-	eixo cartesiano; comprimento

Letras Gregas

α	-	difusividade térmica
δ	-	variação
θ	-	temperatura adimensional
μ	-	viscosidade dinâmica; coeficiente de atrito
ξ	-	comprimento adimensional
π	-	constante matemática ($\pi = 3,14159265\dots$)
ρ	-	massa específica
τ	-	tempo dimensional
u	-	viscosidade cinemática
σ_R	-	Tensão máxima de resistência do material

Sub Índices

0	-	inicial
amb	-	Ambiente
c	-	crítica
eq	-	equilíbrio
f	-	fusão
s	-	superfície

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 Junções de materiais	7
2.1.1 Soldagem.....	9
2.1.2 Junções de materiais dissimilares.....	14
2.1.3 Processos de soldagem no estado sólido.....	16
2.1.4 Mecanismos de ligação no estado sólido.....	20
2.2 Materiais para Fabricação de Junções no Estado Sólido	23
2.2.1 Aços inoxidáveis.....	24
2.2.1.1 Classificação dos aços inoxidáveis	25
2.2.1.2 Aços inoxidáveis austeníticos	26
2.2.1.3 Propriedades dos aços inoxidáveis AISI 304L	28
2.2.2 Alumínio	29
2.2.2.1 Classificação das ligas de alumínio	30
2.2.2.2 Ligas de alumínio da série 6XXX	31
2.2.2.3 Propriedades da liga AA 6351-T6	32
3 PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO (FW).....	35
3.1 Histórico.....	35
3.2 Características do Processo	36
3.3 Processo de soldagem por fricção convencional (FW)	39
3.4 Processo de soldagem por fricção inercial (FW - INERTIAL)	40
3.5 Diferenças entre os dois métodos de soldagem por fricção.....	42
3.6 Variações recentes de soldagem por fricção	45
3.7 Aplicações do processo de soldagem por fricção	51
3.8 Vantagens e limitações da soldagem por fricção convencional	54
3.9 Variáveis no processo de soldagem por fricção convencional.....	57
3.9.1 Variáveis de processo pertencentes à máquina e sua influência na soldagem por fricção convencional.	57
3.9.2 Variáveis do processo que não pertencem a máquina e sua influência na soldagem por fricção convencional.	70
3.9.3 Material e sua influência no processo.....	70
3.9.4 Geometrias das superfícies em contato e sua influência no processo..	72
3.9.5 Diâmetro da peça e sua influência no processo.....	73
3.10 Mecanismo de soldagem por fricção.....	74
3.10.1 Mecanismo de ligação	76
3.10.2 Coeficientes de fricção.....	78
4 A TEMPERATURA NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL	85
4.1 Aspectos térmicos relacionados a soldagem por fricção.....	85
4.1.1 Efeito da temperatura na interface de ligação	87
4.1.2 Distribuição da temperatura na interface de ligação	89
4.1.3 Análise Térmica	93
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	95

5.1	Materiais	95
5.1.1	Composições químicas	95
5.1.2	Propriedades mecânicas	95
5.2	Métodos	96
5.2.1	Preparação dos pinos para solda por fricção	96
5.2.2	Obtenção das amostras soldadas	100
5.2.3	Análise da rugosidade das superfícies	102
5.2.4	Análise Macrográfica	103
5.2.5	Análises mecânicas	103
5.2.6	Análise Microestrutural e XPS	106
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
6.1	Análise da rugosidade das superfícies	115
6.2	Análise Macrográfica	117
6.3	Ensaio mecânicos	119
6.3.1	Ensaio de tração	120
6.3.2	Ensaio de microdureza Vickers	125
6.4	Análise microestrutural e XPS	128
6.4.1	Análise por microscopia óptica	128
6.4.2	Análise por microscopia eletrônica e XPS	131
6.4.3	Análise térmica	143
6.5	Análise teórica	154
7	CONCLUSÕES	165
8	TRABALHOS FUTUROS	169
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para o setor aeroespacial torna necessário a busca de processos alternativos de união de materiais dissimilares. Dentre os diversos processos existentes no mundo utilizados para obtenção de junções estruturais envolvendo tecnologia de ponta, destaca-se a soldagem por fricção rotativa (SFR).

Também conhecido como "*Friction Welding*" (*FW*) é um processo especial que ocorre no estado sólido. Ele fornece alta produtividade, excelente repetibilidade, baixo custo e encontra a sua maior aplicação na produção de junções entre materiais dissimilares usados nos setores aeroespacial, nuclear, naval e automotivo.

Todo o processo de SFR ocorre em temperaturas inferiores ao ponto de fusão dos materiais envolvidos, produzindo juntas de excelente qualidade com propriedades mecânicas iguais ou superiores à dos materiais que foram unidos (Zepeda, 2001).

A união de materiais dissimilares como o aço e o alumínio por processos de soldagem por fusão tem sido um grande desafio para a engenharia, visto as suas grandes diferenças de propriedades físicas e químicas, pois muitos desses materiais se fundem a diferentes temperaturas. Quando eles são submetidos a um processo de soldagem, é muito difícil evitar que ocorram variações em sua composição química no momento em que ocorre a fusão. Essa nova composição química após a solidificação normalmente leva a formação de fases intermetálicas frágeis e à formação de uma ampla zona termicamente afetada (ZTA) (Alves, 2010).

Atualmente é utilizado em países como Estados Unidos, Rússia, Alemanha, Japão, França, Inglaterra, Índia, China, na fabricação de componentes para indústrias dos setores aeroespacial, aeronáutico, nuclear, bélico, automobilístico, mineração, petróleo, etc., com inúmeros trabalhos científicos

publicados. No Brasil este processo é utilizado apenas para fabricação de peças do setor automotivo, limitando-se a produção de válvulas para motores a combustão.

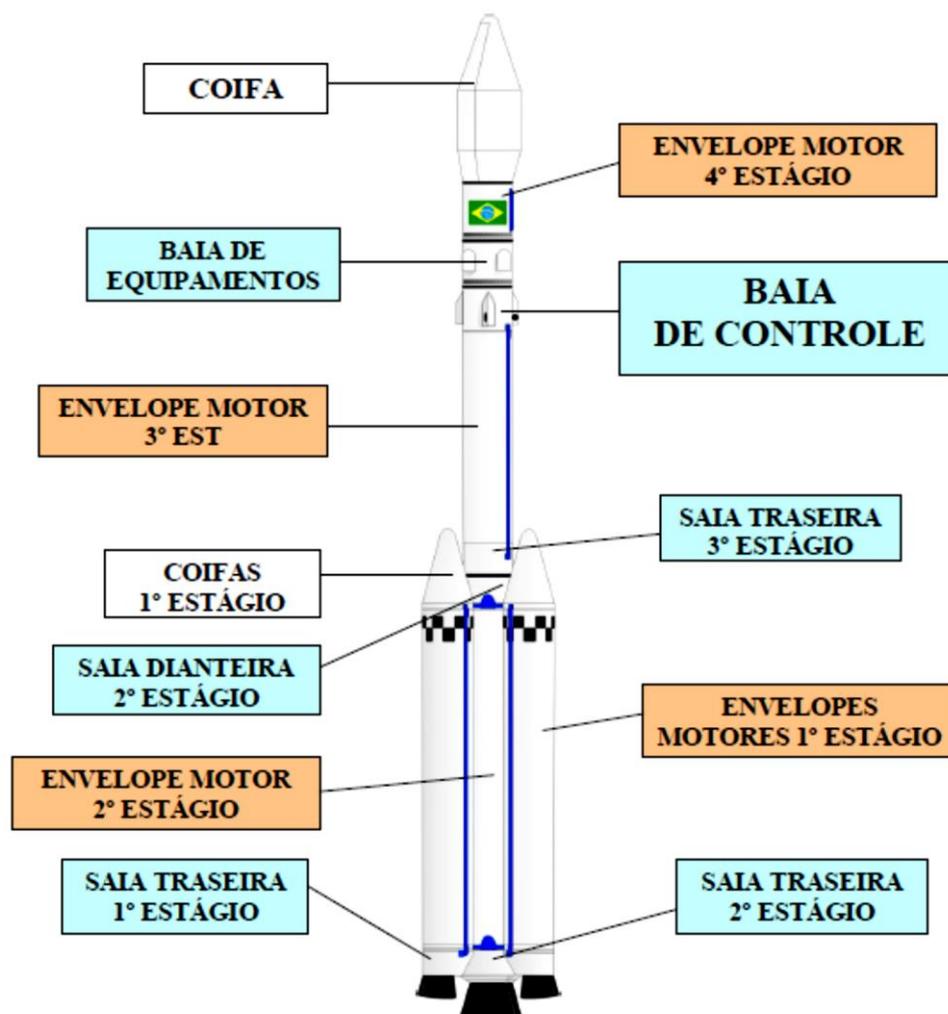
A crescente utilização de junções dissimilares para aplicações em componentes destinados a setores estratégicos em nosso país, faz com que o conhecimento do processo e das suas variáveis sejam de grande importância no sentido de se dominar esta técnica de união.

O presente trabalho de doutorado foi motivado pela necessidade de se desenvolver uma tecnologia nacional para obtenção de junções estruturais entre materiais dissimilares para aplicação no setor aeroespacial, envolvendo o desenvolvimento e fabricação de componentes para satélites e VLS-1 (Veículo Lançador de Satélites).

O Veículo Lançador de Satélites (VLS1) desenvolvido pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pertence ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA, possui no interior do Módulo Baia de Controle um sistema denominado Sistema de Controle de Rolamento (SCR). Este sistema é composto por um reservatório de oxidante tetróxido de nitrogênio (N_2O_4), e por diversas tubulações responsáveis pelo transporte destes compostos químicos. Atualmente, este sistema é fornecido pela SALYUT Design Bureau de Moscou, Rússia (Monteiro, 2006).

Na Figura 1 têm-se uma vista geral do VLS-1 e localização da Baia de Controle, módulo do foguete onde se encontram junções de tubulações de materiais dissimilares.

Figura 1.1 – Vista geral do Veículo Lançador de Satélites – VLS-1



Fonte: Alves (2010).

Para a perfeita compreensão de todo o processo que envolve a soldagem por fricção, é de fundamental importância analisar a função de cada parâmetro envolvido, desenvolver procedimentos de preparação das amostras, métodos de caracterização, e ter um perfil térmico da interface de ligação para podermos entender de que forma a temperatura, elemento resultante da combinação dos parâmetros de pressão (P), tempo (t), velocidade de rotação (RPM) e velocidade de deslocamento do pistão, influencia no processo de difusão, principal mecanismo de ligação responsável pela união dos materiais (Alves, 2010).

Como a temperatura na interface de ligação está diretamente relacionada com as características da ZTA e com a resistência mecânica das junções obtidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa, o seu monitoramento de forma experimental é de extrema importância para a compreensão das características desse processo, visto a grande dificuldade de se obter esses valores de forma precisa por métodos analíticos, até o momento, em função da sua complexidade e grande número de variáveis envolvidas.

Os conhecimentos adquiridos contribuirão tanto para o meio científico, no estudo de processos de união no estado sólido, quanto para o setor produtivo, que ainda desconhece a importância da temperatura como parâmetro fundamental na obtenção de junções de materiais dissimilares com qualidade estrutural.

Esta tese tem como objetivos a caracterização mecânica, microestrutural, e estudo do perfil térmico durante a soldagem por fricção rotativa dos materiais dissimilares alumínio 6351-T6 e o aço inoxidável AISI 304L. A escolha dos materiais deve-se a necessidade de fabricação de junções estruturais que atendam a requisitos de projetos já existentes (VLS1), e ao fato de serem produzidos e encontrados com facilidade no país.

As técnicas de análise envolveram ensaios mecânicos de tração, microdureza Vickers (HV), perfilômetro óptico a Laser, microscopia óptica, microscopia eletrônica (MEV, EDX), espectroscopia de fotoelétrons por RX (XPS). Para o monitoramento da temperatura em tempo real serão utilizados termocâmera e termopares acoplados a um sistema de aquisição de dados para laboratório e ensaios padronizados.

O trabalho é apresentado com a seguinte estrutura:

Capítulo 1 - Introdução

Capítulo 2 - Levantamento bibliográfico acerca da pesquisa e desenvolvimento tecnológico em soldagem e dos materiais utilizados;

Capítulo 3 - Levantamento bibliográfico acerca do processo de soldagem por fricção;

Capítulo 4 - Levantamento bibliográfico e apanhado teórico acerca da temperatura na soldagem por fricção convencional;

Capítulo 5 - Apresentação dos materiais e métodos aplicados;

Capítulo 6 - Apresentação dos resultados experimentais abordados nos capítulos anteriores e análise teórica 1D.

Capítulo 7 – Conclusões

Capítulo 8 - Trabalhos futuros

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Junções de materiais

Junção é a ligação de duas ou mais peças com uma determinada forma geométrica ou até mesmo de peças com material sem forma definida, podendo ser permanente quando a composição química local é alterada e misturada como um todo, ou temporária quando se utilizam elementos de fixação que podem ser removidos.

A união de materiais é uma operação muito frequente na engenharia e é cada vez mais comum fabricar peças, estruturas, e produtos a partir da integração de vários componentes, utilizando diversas técnicas e procedimentos (PIGORETTI, 1999).

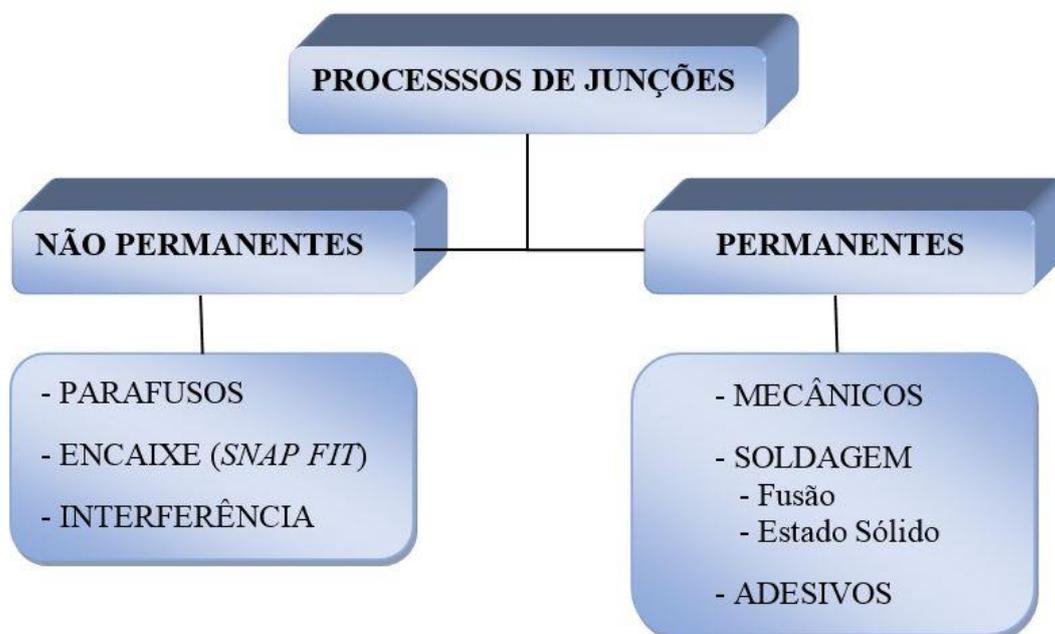
Podemos classificar os processos de junções entre materiais em duas categorias:

- a) Processos não permanentes: Fixação por parafusos, encaixe (*snap fit*) e interferência. As junções por parafusos e encaixe são as mais simples e podem ser aplicadas praticamente em quase todas as classes de materiais. A junção por encaixe é um método utilizado principalmente para unir polímeros, e se processa por variações dimensionais conseguidas com a flexão elástica de uma ou ambas as partes, as quais completam a junção por encaixe mecânico (PIGORETTI, 1999). O processo de união por interferência refere-se ao encaixe de peças com dimensões maiores que dimensões do furo onde é encaixada. Gera tensões de compressão e tração capazes de fornecer atrito resistente a torques. A montagem normalmente é feita por prensagem das peças forçadas umas contra as outras, ou por meio de aquecimento de uma das peças (parte com furo), posicionamento no eixo e posterior resfriamento.

b) Processos permanentes: mecânicos, soldagem e adesivos. Dos processos mecânicos pode-se citar a rebiteagem que é um método baseado na resistência ao cisalhamento do material do rebite. São introduzidos pinos com cabeça abaulada em furos passantes feitos nas chapas, depois as pontas dos pinos são conformadas a frio ou a quente por martelamento ou prensagem para a conformação da segunda cabeça. É um processo de difícil automação utilizado principalmente pela indústria aeronáutica na união de chapas finas.

A Figura 2.1 apresenta um quadro resumo dos processos de junção de materiais.

Figura 2.1 - Classificação dos processos de junção de materiais.



Fonte: Produção do autor.

Atualmente o processo de soldagem tem sido o mais utilizado nas junções de materiais por apresentar algumas vantagens em comparação com outros processos, como a redução de peso, economia de tempo e alta resistência mecânica. Este método de união, junto com a brasagem, apresentam a maior

diversidade de aplicações, atendendo desde as indústrias microeletrônica até as indústrias de caldeiraria pesada (MODENESI et al., 2005).

2.1.1 Soldagem

A definição de soldagem de acordo a *American Welding Society – AWS* (Associação Americana de Soldagem) é:

Processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzido por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (nossa tradução) (MODENESI et al., 2005).

No entanto, do ponto de vista microscópico, entende-se por soldagem de diferentes peças e/ou materiais como sendo a aproximação de átomos a uma distância de equilíbrio, na qual a energia potencial é minimizada, ou seja, ao tentarmos aproximar mais ou distanciar estes átomos, surgirão forças que tendem a reestabelecer a distância de equilíbrio (OKIMOTO, 2005).

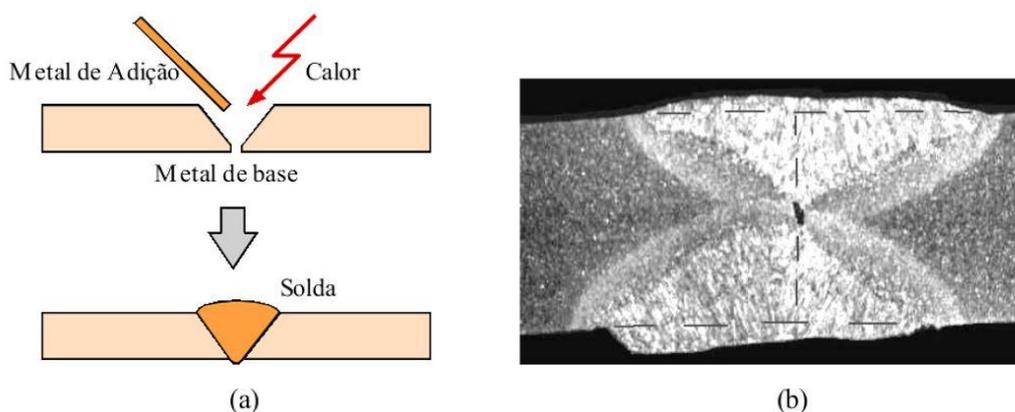
O processo de soldagem é garantido com a obtenção da distância de equilíbrio entre os átomos, e o mesmo pode ser realizado de inúmeras formas, que podem ou não requerer a fusão dos materiais envolvidos. Desta forma, podemos classificar o processo em: (a) soldagem por fusão e (b) soldagem no estado sólido ou soldagem por pressão; sendo que este processo ocorre a temperaturas inferiores ao ponto de fusão dos materiais envolvidos.

(a) Soldagem por fusão

O processo de soldagem por fusão se baseia na aplicação localizada de calor na região da junta até a fusão do metal de base e do metal de adição (quando este é utilizado). Como resultado desta fusão, as superfícies entre as peças são eliminadas e, com a solidificação do metal fundido, a solda é formada (Figura 2.2) (MODENESI et al., 2005).

A soldagem por fusão nos é intuitivamente compreensível e envolve a fusão e solidificação das partes a serem unidas. Durante a fusão a distância de equilíbrio é quebrada pelo fornecimento de energia (aquecimento), e as ligações se tornam mais flexíveis, permitindo chegar-se a chamada fase líquida. O subsequente resfriamento acarreta a solidificação, onde os átomos se aproximam e se ordenam formando as estruturas cristalinas na distância de equilíbrio. Encerrada a solidificação, a união está completa (OKIMOTO, 2005).

Figura 2.2 – Soldagem por fusão.



(a) Representação esquemática da soldagem por fusão. (b) Macrografia de uma junta de solda.

Fonte: adaptada de Modenesi et al. (2005).

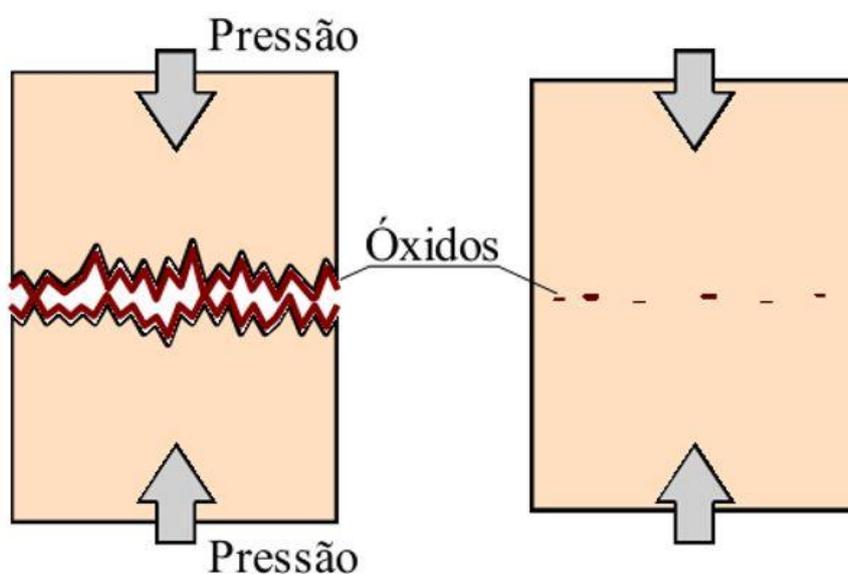
Dentre os diversos processos por fusão podemos destacar os processos de soldagem a arco elétrico como o eletrodo revestido, TIG, plasma, MIG/MAG, feixe de elétrons, laser, eletroescória, que são considerados os mais importantes na atualidade devido a sua grande aplicação industrial. Esses processos podem ser manuais, semiautomáticos e automatizados, utilizados com ou sem metal de adição (WAINER et al., 1992).

As variações desses processos e conseqüentes aplicações estão relacionadas à maior ou menor taxa de deposição, eficiência, equipamentos. Devido à reação do material fundido com os gases da atmosfera, a maioria deles utiliza algum meio de proteção para minimizar estas reações (MODENESI, 2008).

(b) Soldagem no estado sólido

A soldagem no estado sólido consiste em deformar as superfícies de contato, fazendo que com haja aproximação dos átomos a distâncias suficientes para ocorrência da união. Determinados processos procuram aquecer as regiões que serão unidas para facilitar a deformação das superfícies de contato. A Figura 2.3, mostra de forma esquemática como ocorre a união das junções.

Figura 2.3 – Soldagem no estado sólido ou por pressão.



Fonte: Adaptada de Modenesi et al. (2005).

Eles produzem junções metalúrgicas à temperatura abaixo do ponto de fusão dos materiais que estão sendo unidos (soldagem por ultrassom, explosão, difusão, fricção, etc.). Normalmente envolvem o uso de deformação ou difusão para produzir junções com alta qualidade entre materiais similares e dissimilares (DONACHIE; DONACHIE, 2002). Por envolverem pressão, normalmente não é requerida a formação de uma fase líquida (CALLISTER, 1999).

A *American Welding Society* (AWS) (2001) define a soldagem no estado sólido como união por processos macro e microscópicos nas superfícies de contato

de materiais ferrosos e não ferrosos pela coalescência destes materiais a altas temperaturas abaixo dos seus pontos de fusão (GIPIELA, 2007).

São uma ótima alternativa aos processos de soldagem por fusão, principalmente na união de materiais de difícil soldabilidade, como é o caso dos materiais dissimilares que apresentam propriedades físicas e químicas diferentes.

A união de materiais no estado sólido se processa de forma diferente da união por fusão, e sua principal aplicação refere-se a junções de materiais dissimilares como aço e alumínio, aço inoxidável e aço SAE 1020, alumínio e titânio, etc. Apresentam como vantagem aos métodos de união por fusão a ausência de metal fundido na junção, pouca influência na microestrutura e nas propriedades mecânicas dos metais base.

Esses processos possibilitam a obtenção de junções estruturais de materiais dissimilares não possíveis de se obter por processos convencionais de soldagem por fusão. O tempo de operação pode levar apenas alguns segundos, como é o caso das junções obtidas pelo processo de soldagem por fricção, muito utilizado na fabricação de peças automotivas ou levar horas como é o caso do processo de soldagem por difusão.

Os processos de soldagem também podem ser classificados de acordo com a fonte de energia e o tipo de gás de proteção (TANIGUSHI; OKUMURA, 1982). Entretanto, como o nosso trabalho está relacionado com união no estado sólido, adotamos a sua classificação a partir do método dominante para produzir a solda: (a) soldagem por fusão e (b) soldagem no estado sólido ou por pressão (onde a união entre os materiais é realizada por pressão ou deformação, sem ocorrer fusão entre os materiais). A Figura 2.4 apresenta esta classificação.

Figura 2.4 – Classificação dos processos de soldagem.



Fonte: Produção do autor.

Tendo como objetivo principal a obtenção de junções entre a liga de alumínio AA 6351-T6 e o aço inoxidável AISI 304L para aplicações estruturais e que possam ser utilizadas no setor aeroespacial, foram realizados diversos estudos bibliográficos e análises de processos de soldagem por fusão e no estado sólido que pudessem ser utilizados para esse fim. Desses estudos e análises, chegou-se à conclusão que aqueles que apresentaram os melhores resultados foram os processos de soldagem no estado sólido, e dentre eles, o processo de soldagem por fricção que, por conseguinte, será tratado no capítulo posterior.

2.1.2 Junções de materiais dissimilares

Materiais dissimilares são materiais que apresentam diferentes propriedades físicas e químicas como ponto de fusão, temperatura de vaporização, coeficiente de expansão térmica, difusibilidade térmica, composição química, propriedades mecânicas, etc.

Na literatura atual, a maioria dos procedimentos de soldagens descritos estão relacionados a junções de materiais similares (apresentam propriedades químicas e físicas semelhantes). No entanto, o desenvolvimento de novas tecnologias nos diversos setores industriais, em especial o aeroespacial, fez com que ocorresse o desenvolvimento de novos processos/procedimentos de soldagem que possibilitassem a junção de materiais dissimilares.

A junção dissimilar obtida pelo processo de soldagem por fricção apresenta propriedades mecânicas iguais ou superiores a do material com menor resistência mecânica que a constitui (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Junções de materiais dissimilares.



Fonte: Sahoo (2007).

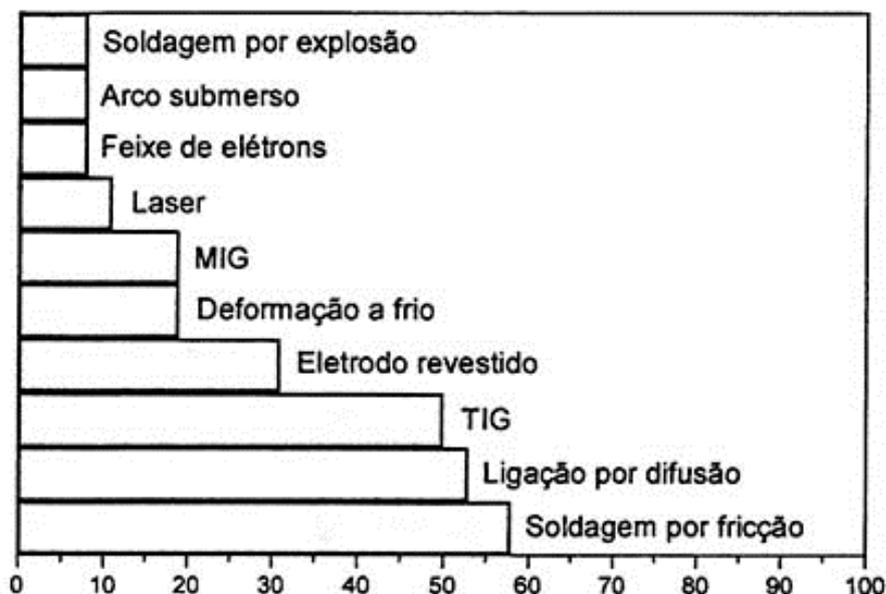
Em determinadas situações, se faz necessário a utilização de um terceiro material para se realizar a junção; este pode ser um material de transição entre os materiais envolvidos (por exemplo: o níquel na junção cobre com aço), ou pode se utilizar um inserto compósito (por exemplo: o processo de brasagem e o de soldagem por explosão).

As junções de materiais dissimilares podem ser classificadas em três categorias (PIGORETTI, 1999):

- a) Levemente dissimilares: essencialmente são os mesmos materiais, mas com composições químicas diferentes. Como exemplo podemos citar os diferentes tipos de aços e as diferentes ligas de alumínio;
- b) Dissimilares: mesmo tipo de material (metal/metal). Podendo terem o mesmo grau de solubilidade entre si (cobre/aço), ou com pouca/nenhuma solubilidade entre si (alumínio/aço);
- c) Altamente dissimilares: são as junções fabricadas com diferentes tipos de materiais (como metal/cerâmica, metal/compósito, metal/polímero, metal/plásticos, cerâmica/polímero, etc.).

O processo de soldagem de materiais dissimilares pode ser realizado de diferentes formas, porém, a literatura mostra que os processos de soldagem: por fricção, por difusão e *Tungsten Inert Gas* (TIG) são os mais utilizados (Figura 2.6) (PIGORETTI, 1999). Observa-se que, os processos de soldagem por estado sólido (fricção e difusão) são os mais empregados nas junções de materiais dissimilares. Os processos por fusão não são comumente empregados nestes tipos de uniões, uma vez que as junções formadas apresentam propriedades mecânicas inferiores à dos materiais base envolvidos, isto ocorre mesmo nos processos que possuem uma zona termicamente afetada (ZTA) bem reduzida (soldagem a laser e por feixe de elétrons) (ALVES, 2010)

Figura 2.6 – Proporção relativa de diversos processos de junções abordados em artigos científicos dedicados à junção de materiais dissimilares.



Fonte: Pigoretti (1999)

2.1.3 Processos de soldagem no estado sólido

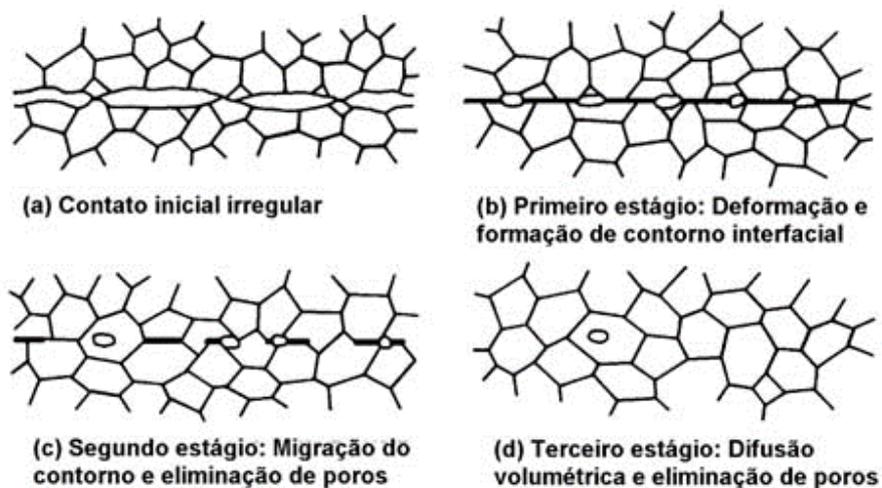
Os processos de soldagem no estado sólido são aqueles que produzem junções metalúrgicas a temperaturas abaixo do ponto de fusão dos materiais que estão sendo unidos. Eles envolvem o uso de deformação e/ou difusão, sendo a deformação limitada para produzir junções com alta qualidade entre materiais similares e dissimilares. Por envolverem pressão, normalmente não é requerida a formação de uma fase líquida (ALVES, 2010).

No estado sólido, temos os processos de soldagem por fricção, soldagem por difusão, soldagem por explosão, soldagem por pulso magnético, por ultrasom, entre outros. A escolha e utilização de um desses processos para união de materiais dissimilares estão relacionadas ao produto e condicionadas à geometria, materiais, quantidade a ser produzida, aplicações específicas.

A soldagem por difusão propriamente dita é um processo especial utilizado para uniões de materiais altamente dissimilares como por exemplo o Al_2O_3 com o aço inoxidável AISI 304 (metal/cerâmica), por meio de aplicação simultânea de pressão e calor. A deformação plástica decorrente da ação do calor faz com que os átomos que compõem a estrutura cristalina do metal vibrem e se movimentem em várias direções, ocupando lugares diferentes na rede cristalina (ZIEDAS; TATINI, 1997). A essa movimentação dá-se o nome de difusão. Normalmente todo o processo é realizado dentro de um forno onde as peças são submetidas a condições de temperatura, pressão e tempo que pode variar desde algumas horas ou até mesmo dias.

Este processo confere alta qualidade as junções, que podem apresentar propriedades mecânicas semelhantes aos do material de base, permitindo montagens complexas e de grandes superfícies próximas ao estágio final de fabricação; apresenta deformações muito pequenas quando comparado ao processo por fusão. Entretanto, o processo apresenta alto custo inicial, não é aplicável na produção em grande escala e as superfícies a serem unidas necessitam de acabamento polido (ZIEDAS; TATINI, 1997). Na Figura 2.7 são apresentadas as fases que ocorrem durante a soldagem por difusão.

Figura 2.7 – Etapas da soldagem por difusão.

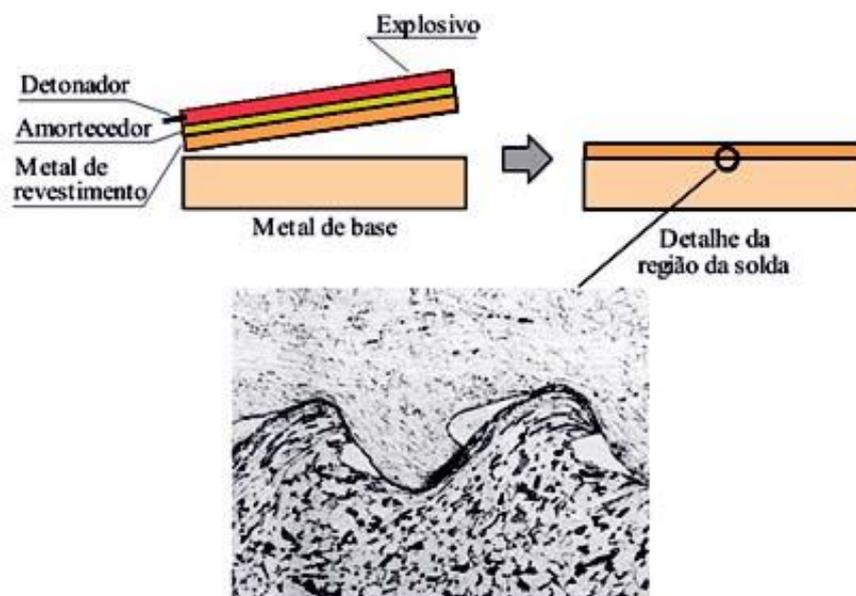


Fonte: Modenesi et al. (2012).

O processo de soldagem por explosão utiliza a energia de detonação de um explosivo para promover a união de peças metálicas. Uma das peças é lançada ao encontro da outra pela explosão e, durante a colisão, desenvolve-se uma intensa deformação plástica superficial capaz de remover as impurezas e camadas de óxidos da superfície e unir as peças. Em função do forte impacto sofrido pelas superfícies dos materiais, a região da solda apresenta características onduladas.

Pode ser aplicada praticamente a união da maioria dos metais e ligas, com exceção dos materiais com baixa ductilidade que podem se romper durante a explosão. É utilizada industrialmente para a fabricação de revestimentos, de chapas bi-metálicas e para união de metais incompatíveis não possíveis de obter pelos processos de soldagem por fusão. A soldagem é realizada em áreas isoladas ou no interior de minas por envolver cargas explosivas. A Figura 2.8 apresenta os aspectos e detalhes relacionados a soldagem por explosão.

Figura 2.8 – Soldagem por explosão.



Fonte: Modenesi et al. (2012).

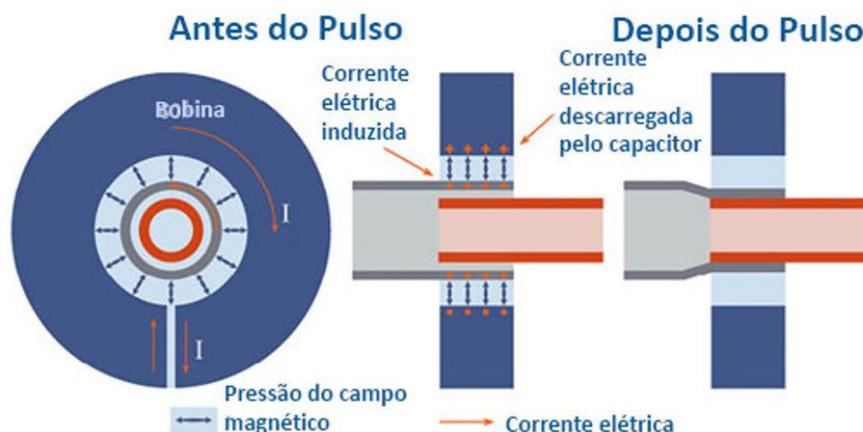
A soldagem por ultrassom produz uniões de peças pela aplicação localizada de energia vibracional de alta frequência (ultrassom), enquanto as peças são mantidas sob pressão. A união ocorre devido ao aquecimento e deformação plástica das superfícies em contato. Encontra a sua maior aplicação na soldagem de juntas sobrepostas de metais dúcteis, similares ou não, de pequena espessura e para a união de plásticos, por exemplo, na indústria automotiva, indústria eletrônica, e na fabricação de embalagens Modenesi et al. (2012).

O processo de soldagem por pulso magnético é análogo ao processo de soldagem por explosão no qual o impacto entre dois materiais a altíssimas velocidades e causa a sua união. É um processo no estado sólido que usa a força gerada por um elevado campo de energia magnética para criar uma ligação entre os materiais envolvidos (VERSTRAETE et al., 2011).

É utilizado para união de peças cilíndricas, canos e tubos tanto de materiais similares quanto dissimilares. O processo é muito rápido, produz uma ZTA muito pequena e não necessita de metal de adição e gases de proteção. Considerado um processo de soldagem no estado sólido, apresenta suas aplicações voltadas para a produção de junções dissimilares Al-Fe, Al-Cu, Al-Mg, etc. As peças tratadas termicamente sofrem pouca influência sobre o tratamento térmico.

A Figura 2.9 ilustra como é realizada a soldagem por pulso magnético de uma forma simplificada. Os campos magnéticos opostos um ao outro, criados pela corrente dentro da bobina faz com que o metal do tubo externo seja implodido a alta velocidade impactando o metal do tubo interno. Se o impacto criar as condições ideais de velocidade e ângulo de impacto um sob o outro, a soldagem é realizada com sucesso (SHRIBMAN, 2008).

Figura 2.9 – Geometria típica da peça antes e após a soldagem por pulso magnético.



Fonte: adaptado de Shribman (2008).

2.1.4 Mecanismos de ligação no estado sólido

A união de materiais dissimilares no estado sólido apresenta como principal mecanismo de ligação a difusão. Embora os processos de soldagem no estado sólido sejam realizados por meio de diferentes equipamentos e procedimentos, envolvem sempre parâmetros como temperatura, tempo e pressão de forma direta, como ocorre no processo de soldagem por difusão, onde a temperatura é obtida diretamente no forno, ou de forma indireta, como no processo de soldagem por fricção, onde a temperatura é obtida pelo atrito entre dois materiais, resultante da combinação de vários parâmetros, como o avanço do pistão hidráulico, rotação, tempo e pressão.

(a) Difusão em metais

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 vibração em busca da sua posição de equilíbrio na rede. Ocasionalmente, como resultado desse movimento, um átomo saltará para uma vacância mais próxima, alterando a sua posição na

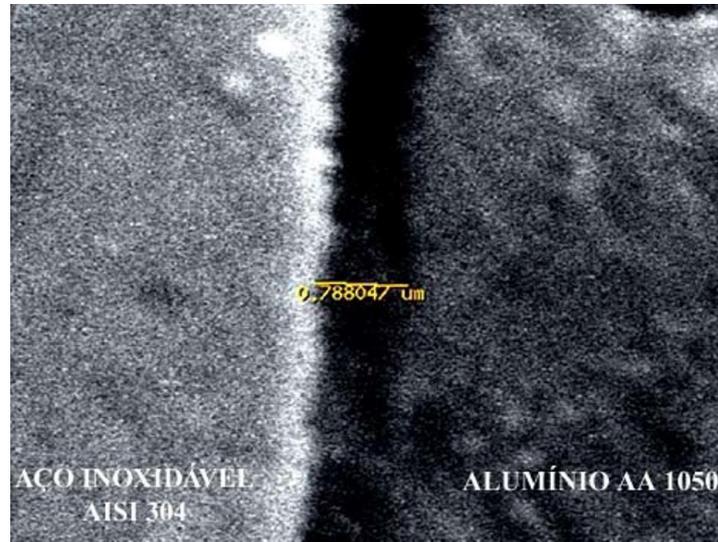
rede cristalina. Para ocorrer este salto, deve-se romper uma barreira energética devido a movimentação de átomos vizinhos na rede cristalina. A variação de energia necessária é fornecida pela temperatura.

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).

O processo de difusão pode ocorrer em fase líquida como acontece nos processos de soldagem por fusão, ou em fase sólida, sem que ocorra a fusão, característico dos processos de soldagem no estado sólido. Nos processos de soldagem por fusão os elementos difundidos durante a fase líquida se concentram na ZTA, que é bem definida e que pode ser observada por meio de microscopia óptica ou eletrônica. Essa região apresenta dimensões que podem ser mesuradas sem dificuldade. Já no caso da soldagem no estado sólido, os elementos decorrentes da interdifusão se concentram em regiões próximas da interface de ligação, a ZTA é extremamente pequena e de difícil visualização mesmo com uso de microscopia eletrônica.

No processo de soldagem por fricção, que possui uma ZTA muito pequena esses elementos acabam formando uma película extremamente fina de compostos intermetálicos, com valores de espessuras medidas em micra, visíveis somente por meio de microscopia eletrônica. Como exemplo, na Figura 2.10 pode ser vista a espessura da camada intermetálica medida na região central da amostra.

Figura 2.10 – Espessura da camada intermetálica medida na interface de ligação entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304. Aumento de 20.000x.



Fonte: Alves (2010).

(b) Ligação por difusão no estado sólido

Teoricamente, se colocássemos em contato dois materiais, cujas superfícies fossem idealmente planas (em escala atômica) e livres de contaminantes, a ligação entre estes deveria ocorrer prontamente pela simples aproximação dos átomos e o complemento das suas ligações. Porém, a obtenção de tais condições é impossível na prática, pois as superfícies apresentam uma rugosidade não removível por métodos convencionais de polimento e contém uma camada de átomos adsorvidos que estabiliza as ligações atômicas insaturadas da superfície (TRAVESSA, 1998).

A ligação por difusão é basicamente a junção de duas superfícies preparadas, levadas ao contato sob pressão e calor por um determinado tempo com ou sem atmosfera protetora. O processo se dá em várias etapas. Inicialmente consiste na deformação plástica de micro asperezas o que contribui para o aumento da área de contato. Simultaneamente ocorre a quebra da camada de óxidos superficiais que permitem a formação de ligações superficiais, que

conjuntamente com a remoção de vazios por mecanismos de transporte de massa completam o ciclo de ligação.

Existem várias hipóteses para explicar como ocorre uma ligação no estado sólido, *Kazakov* (1985). A “Hipótese do filme” enfatiza o efeito das características do filme superficial sobre o processo de união. Conforme esta hipótese, as diferenças de soldabilidade da maioria dos metais são atribuídas às diferentes propriedades dos metais e aos filmes presentes nas suas superfícies admitindo que a ligação foi realizada através das superfícies limpas dos materiais mantidas em contato dentro da faixa das forças Interatômicas. A “Hipótese da Recristalização” sugere que durante a deformação plástica os átomos se movam de um lado para o outro na interface de ligação a alta temperatura. Posteriormente, novos grãos irão se formar na interface e a ligação é estabelecida. A “Hipótese do Elétron” é baseada na formação de uma configuração eletrônica estável como resultado da ligação metálica. Na “Hipótese da Discordância”, a exposição das discordâncias para uma superfície livre, como resultado da deformação plástica, remove a camada de óxido e produz pontos em escala atômica que melhoram a ligação das peças que estão em contato. Finalmente a “Hipótese da Difusão, que é a hipótese mais comumente aceita, considera a contribuição da difusão interatômica durante a formação da ligação. A diferença no nível de energia dos átomos da superfície e das camadas internas do material é a base dessa hipótese (*SHIZARDI*, 1997).

2.2 Materiais para Fabricação de Junções no Estado Sólido

A crescente utilização dos processos de união no estado sólido tem sido de grande importância para a engenharia, principalmente em função de desenvolvimento de novos materiais voltados para os setores aeroespacial e aeronáutico. Os métodos convencionais de soldagem por fusão encontram suas limitações na fabricação de junções estruturais entre diferentes materiais como cerâmicas e metais, compósitos e metais, metais ferrosos e não ferrosos,

e também entre determinadas ligas não ferrosas, como é o caso das ligas de alumínio aeronáutico AA 2024 T6 e AA 7075 T6.

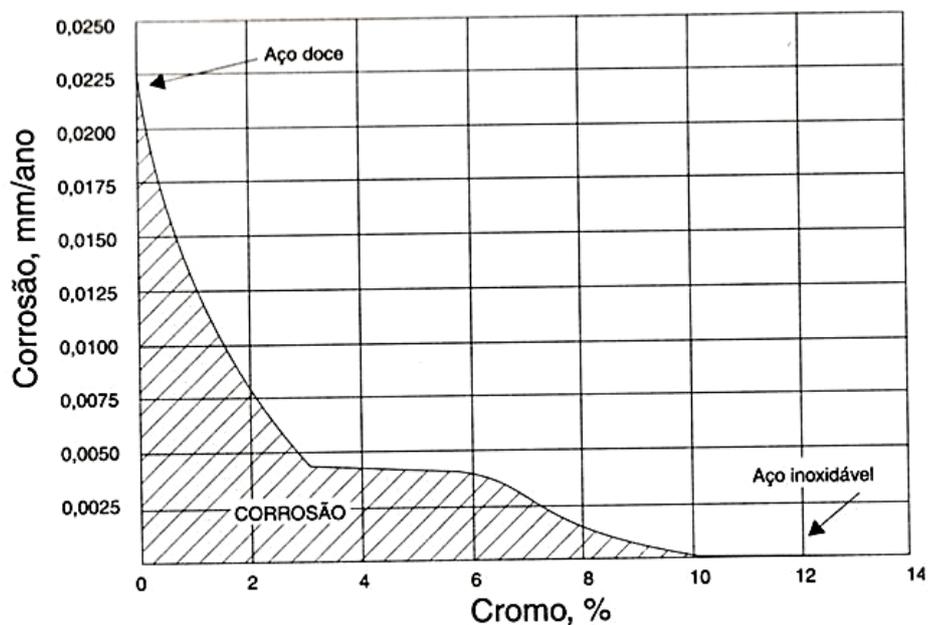
Em função da necessidade de desenvolvimento de junções estruturais para união de tubulações existentes no módulo Baia de Controle, Sistema de Controle de Rolamento – VLS1, fabricadas com os materiais aço inoxidável AISI 304L e a liga de alumínio AA 6351-T6, nossa pesquisa baseou-se no estudo destas ligas metálicas em particular.

2.2.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que apresentam como principal elemento de liga o cromo (Cr) numa porcentagem mínima de 10,5%, com ou sem adição de outros elementos de liga. O teor mínimo de 10,5% Cr é aquele no qual ele começa a apresentar uma resistência efetiva à corrosão em diferentes meios. Esse teor é resultado de estudos realizados com ligas de Fe-Cr submetidos à corrosão atmosférica industrial por dez anos. O estado passivo deve-se a formação de um filme de óxido de cromo com uma espessura da ordem de 3 a 5nm na superfície dos aços inoxidáveis, conhecido como camada de passivação (PARDINI, 2008).

A auto passivação ocorre naturalmente sempre que uma superfície limpa for exposta a um ambiente que possa fornecer oxigênio suficiente para formar a camada de superfície de óxido rica em cromo. Isto ocorre automaticamente e instantaneamente se houver fornecimento de oxigênio suficiente e disponível na superfície do aço (MORELLATO, 2015). A Figura 2.11 mostra o resultado desses estudos com a concentração necessária de Cr para a proteção da liga contra ataques corrosivos.

Figura 2.11 – Passividade dos aços cromo, expostos durante 10 anos a atmosfera industrial.



Fonte: Pardini (2008).

2.2.1.1 Classificação dos aços inoxidáveis

Inicialmente, os aços inoxidáveis eram denominados de acordo com os teores de cromo e níquel presentes na liga. Os primeiros tipos desenvolvidos, que continham 18% de Cr e 8% de Ni, eram denominados de aços inoxidáveis 18-8. À medida que novas ligas de aços inoxidáveis foram desenvolvidas, essa nomenclatura tornou-se inviável. Isso levou a AISI (*The American Iron and Steel Institute*) a estabelecer um sistema de classificação para os aços inoxidáveis (SABO, 1973).

Segundo a AISI, de acordo com a composição química, microestrutura, estrutura cristalina das fases presentes, ou tratamento térmico utilizado, os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco categorias:

- a) Aços inoxidáveis da série 200, com cromo, níquel e manganês;

- b) Aços inoxidáveis da série 300, com cromo e níquel;
- c) Aços inoxidáveis da série 400, com cromo ou cromo carbono;
- d) Aços inoxidáveis da série 500, com cromo molibdênio;
- e) Aços inoxidáveis duplex, com cromo, níquel, titânio ou molibdênio.

Os aços das séries 200 e 300 são austeníticos; da série 400 podem ser ferríticos (% de Cr acima de 18% com máximo de 0,35% C) ou martensíticos (% de Cr variando de 11 a 18% e de 0,15 a 1,2 % de C); os da série 500 são martensíticos (4 a 9% de Cr; 2 a 4% de Mo; e máximo de 0,25% de C), e os aços inoxidáveis duplex são ferríticos-austeníticos (23-30%Cr; 2,5 – 7% Ni, com adições de Ti ou Mo) (ALVES, 2010).

2.2.1.2 Aços inoxidáveis austeníticos

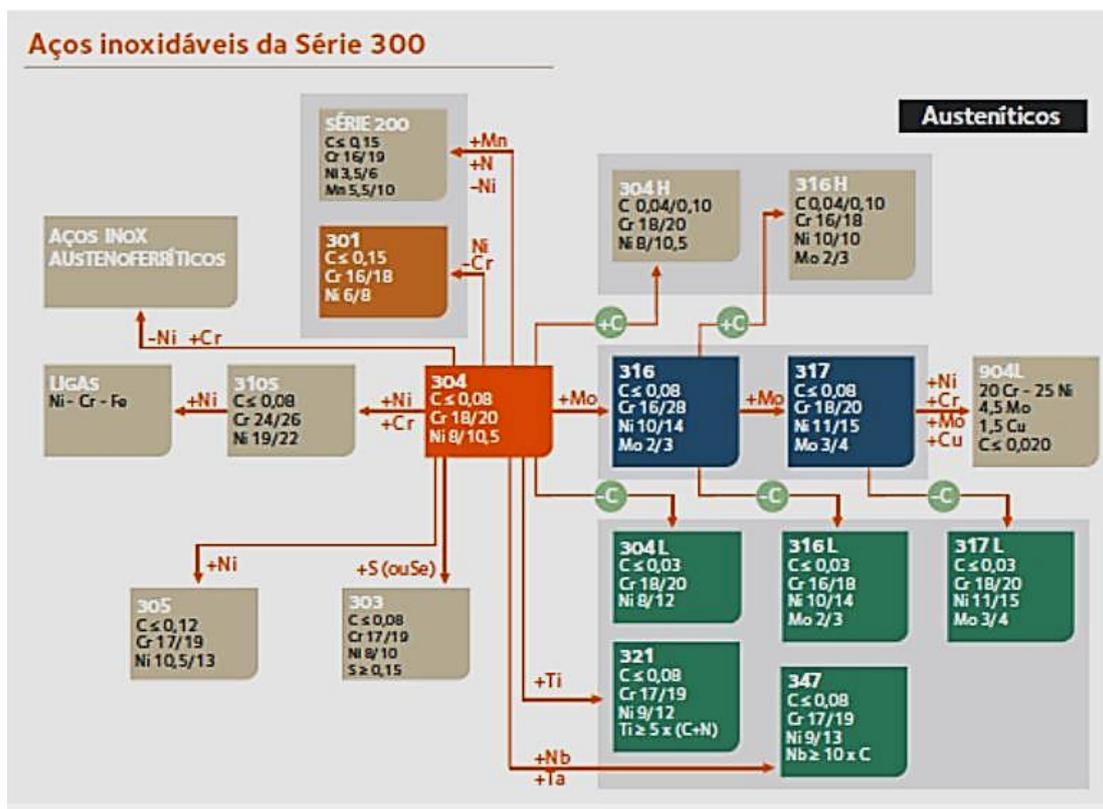
Os aços inoxidáveis austeníticos, também chamados comumente aços inoxidáveis da série 300 cromo e níquel, são considerados os mais importantes dentre os aços inoxidáveis devido a sua grande aplicação na indústria (ALVES, 2010).

Apresentam como elementos principais o Cr (16 A 25%) e o Ni (6 a 22%). Não magnéticos, não temperáveis, são endurecidos somente por trabalho a frio. Também possuem uma ótima resistência em altas temperaturas e excelente resistência em baixas temperaturas.

Os aços inoxidáveis austeníticos têm excelente resistência a corrosão, podem ser utilizados em temperatura ambiente, em condições criogênicas e em altas temperaturas (até 1150 °C), uma série de propriedades que dificilmente são conseguidas com outros materiais. Dentre eles, a liga AISI 304 que possui 18%Cr e 8%Ni é a mais popular, apresenta excelente ductilidade e excelente soldabilidade (ARCELOR MITTAL, 2008). Na Figura 2.12 são mostradas as

variações de aços inoxidáveis austeníticos em função da adição de outros elementos de liga como o Mo, Ti, Nb.

Figura 2.12 – Classificação dos aços inoxidáveis austeníticos.



Fonte: Arcelor Mittal (2008).

A adição de Mo (cerca de 2%) transforma o aço inoxidável AISI 304 em 316, um material muito mais resistente à corrosão por pites e por frestas. Quando expostos à ambientes em que a quantidade de cloretos é muito elevada, ou mesmo sendo mais baixa, a temperatura é mais alta ou se o meio é mais ácido, são adicionadas maiores quantidades de molibdênio, como é o caso do aço inoxidável AISI 307 (ARCELOR MITTAL, 2008).

Quando os aços inoxidáveis AISI 304, 316 e 317 que possuem cerca de 0,085 de C são submetidos a temperaturas entre 425 a 580 °C, o carbono e o cromo se combinam e se precipitam nos contornos de grãos como carboneto de cromo (Cr_{23}C_6), isto provoca um empobrecimento de cromo nas regiões

adjacentes dos mesmos. O fenômeno denominado sensitização faz com que o material fique com quantidades muito pequenas de cromo nestas regiões, e quando em contato com meios agressivos como ácidos, sofram corrosão conhecida intergranular.

Para evitar a ocorrência deste tipo de corrosão, foi reduzida a quantidade de C para um máximo de 0,03%. Os aços inoxidáveis com esta porcentagem de C têm acrescido a letra L (*Low Carbon*) ao final da classificação: aço inoxidável AISI 304L, 316L, 317L. Estes materiais são utilizados na fabricação de peças, tubulações e equipamentos que trabalham com meios capazes de provocar corrosão em materiais sensitizados (ARCELOR MITTAL, 2008).

A adição de elementos estabilizadores como o titânio e o nióbio, que tem mais afinidade química com o C do que com o Cr, formam carbonetos desses materiais e evitam a sensitização, originando os aços inoxidáveis AISI 321, 347 e 316Ti.

2.2.1.3 Propriedades dos aços inoxidáveis AISI 304L

O aço inoxidável AISI 304L é um material muito utilizado para a fabricação de componentes mecânicos, tubulações e diversos produtos com aplicações em diferentes áreas. A baixa porcentagem do elemento carbono na liga possibilita a este material ser unido por processos de soldagem por fusão sem que ocorra a formação de carboneto de cromo nos contornos de grãos, evitando o aparecimento de corrosão intergranular, comum nos aços inoxidáveis austeníticos quando submetidos a temperaturas superiores a 450°C por um determinado tempo.

Nas áreas aeroespacial, aeronáutica e nuclear, este material também apresenta grandes aplicações, principalmente devido as suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas dessas propriedades.

Tabela 2.1 – Propriedades dos aços inoxidáveis AISI 304L.

Propriedades	Valor	Unidade
Estrutura cristalina	FCC	
Densidade	8,0	g.cm ⁻³
Dureza Vickers*	200	HV
Limite de resistência a tração*	643,79	MPa
Limite de escoamento*	354,69	MPa
Módulo de elasticidade*	177,10	GPa
Coeficiente de expansão térmica linear	17,2 (100°C)	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹
Coeficiente de expansão térmica linear	17,8 (315°C)	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹
Calor específico	500	J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹
Condutividade térmica	16,2 (100°C)	W.m ⁻² .K ⁻¹
Condutividade térmica	21,5 (500°C)	W.m ⁻² .K ⁻¹

* Valores obtidos através de ensaios do material usado para estudos.

Fonte: ASM Metals Handbook (2005).

2.2.2 Alumínio

O alumínio e suas ligas representam uma das classes de materiais mais versáteis, econômicos e atrativos que são usados para um grande número de aplicações que vão desde a produção de embalagens para produtos alimentícios até a fabricação de componentes utilizados na indústria aeronáutica e aeroespacial. Juntamente com o ferro e o aço é material de maior consumo. A sua ampla variedade de aplicações deve-se, principalmente, a multiplicidade de propriedades do material e a possibilidade de combinar estas propriedades de forma dirigida (MONTEIRO, 2006).

As ligas de alumínio possuem excelentes propriedades físico-químicas, destacando-se a baixa massa específica, alta resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica, elétrica e pode ser reciclado. A relação densidade / resistência à tração o tornam um dos materiais mais utilizados nos setores aeroespacial e aeronáutico.

O alumínio é um metal quimicamente muito ativo, mas desenvolve rapidamente um filme natural isolante de alumina (Al₂O₃) sobre sua superfície quando

exposto ao oxigênio. Conseqüentemente, este filme é capaz de proteger o metal contra a corrosão em ambientes neutros porque a camada de óxido não permite que os elétrons produzidos por reações de oxidação atinjam a interface entre o óxido e o meio, evitando que reações catódicas ocorram (MILAN et al., 2014).

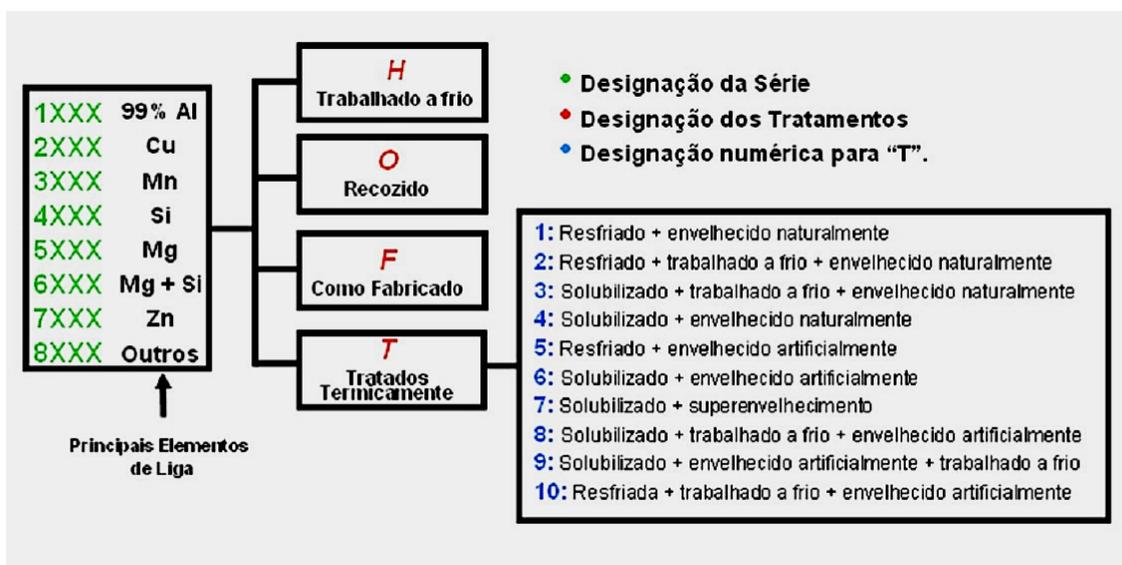
Como o alumínio puro apresenta baixa resistência mecânica, foram adicionados elementos de liga como o Cu, Mn, Si, Mg, Zn, Sn, Li, Fe, etc., para aumentar a sua resistência sem prejudicar as outras propriedades. Isso possibilitou o desenvolvimento de novas ligas estruturais combinando as propriedades adequadas as suas aplicações específicas.

2.2.2.1 Classificação das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são classificadas de acordo com os seus principais elementos de liga presente e pelo processamento final utilizado (ALCAN, 2015). O sistema de classificação atualmente mais aceito no mundo é o sistema adotado pela *Aluminum Association Inc.* (AA) em 1971. No Brasil, é representado pela NBR 6834, onde as ligas são classificadas em ligas trabalháveis (que são aquelas que têm as suas propriedades mecânicas obtidas por meio de trabalho mecânico de laminação, extrusão, forjamento, etc.), e ligas fundidas (cujas propriedades mecânicas são obtidas por meio de fundição) (ALVES, 2010). No âmbito deste trabalho serão citadas apenas as ligas trabalhadas mecanicamente.

Para a identificação das ligas de alumínio trabalháveis é utilizado um sistema de numeração com quatro dígitos, onde o primeiro número caracteriza o elemento da liga, e os outros as diversas composições da liga. Na Figura 2.13 é apresentado um diagrama esquemático com a nomenclatura das ligas de alumínio e os respectivos tratamentos mecânicos e térmicos.

Figura 2.13 – Classificação das ligas de alumínio e respectivos tratamentos mecânicos e térmicos.



Fonte: Marconato (2009).

A condição de tratamento térmico baseia-se na sequência de tratamentos mecânicos e térmicos usados para alterar a condição inicial da liga (MARCONATO, 2009). As ligas de alumínio tratadas termicamente recebem a letra "T" após a sequência numérica, citando como exemplo a liga AA 6351-T6, muito utilizada nas indústrias para a produção dos mais variados produtos.

Comercialmente podemos encontrar as ligas de alumínio tratáveis termicamente das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX nas condições O (recozido), T3 (solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente), T4 (solubilizado e envelhecido naturalmente), e T6 (solubilizado e envelhecido artificialmente).

2.2.2.2 Ligas de alumínio da série 6XXX

As ligas de alumínio da série 6XXX apresentam duas características muito importantes para a engenharia que justificam o seu uso com mais frequência quando comparadas com as demais ligas de alumínio: a capacidade de melhorar as suas propriedades mecânicas por meio de tratamento térmico e a sua grande ductilidade, que permite o seu uso em operações que acarretam

elevados graus de deformação, como a extrusão (RICKS et al., 1992; KUHLMAN, 2005).

São utilizadas em uma ampla variedade de aplicações, que vão desde perfis de arquitetura até as chamadas ligas de aplicação estrutural com maiores teores de elementos de liga e maior dureza, como a liga AA 6351-T6.

A liga AA 6351-T6 é uma liga Al-Mg-Si, possui alta resistência mecânica, elevada resistência à corrosão, ótima usinabilidade, boa soldabilidade e conformabilidade. Por ser uma liga comercial, produzida no Brasil, e com características estruturais, substituem em determinadas situações as ligas da série 2XXX e 7XXX que são produzidas em outros países e importadas para uso nas indústrias nacionais.

2.2.2.3 Propriedades da liga AA 6351-T6

As propriedades das ligas de alumínio dependem da composição química, do tipo de processamento (laminação, extrusão, fundição, etc.), e também dos tratamentos térmicos realizados em determinadas ligas após a sua fabricação. A liga AA 6351-T6 trabalhada e tratada termicamente é muito utilizada pelas indústrias de uma forma geral, pode ser encontrada comercialmente com facilidade por ser produzida no Brasil. A indústria aeronáutica e aeroespacial utilizam esta liga em forma de tarugos, barras cilíndricas, chapas, tubos e anéis para a fabricação de componentes estruturais. O VLS (Veículo Lançador de Satélites) projetado e desenvolvido pelo DCTA-IAE possui diversos módulos, também denominados de baias, saias dianteiras e traseiras, fabricadas na liga AA 6351-T6. Na Tabela 2.2 podem ser vistas suas principais propriedades.

Tabela 2.2 – Propriedades da liga AA 6351-T6.

Propriedades	Valor	Unidade
Estrutura cristalina	CFC	
Densidade	2,7	g.cm ⁻³
Dureza Vickers*	107	HV
Limite de resistência a tração*	323,68	MPa
Limite de escoamento*	297,25	MPa
Módulo de elasticidade*	69,76	GPa
Coeficiente de expansão térmica linear	23,4 (100°C)	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹
Coeficiente de expansão térmica linear	25,0 (300°C)	μm.m ⁻¹ .°C ⁻¹
Calor específico	0,89	J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹
Condutividade térmica	176	W.m ² .K ⁻¹
Ponto de fusão	554-649	°C

* Valores obtidos através de ensaios do material usado para estudos

Fonte: ASM Metals Handbook (2005).

3 PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO (FW)

O processo de soldagem por fricção é definido 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 base (WAINER et al., 1992).

A soldagem por fricção ou soldagem por atrito é um processo de soldagem no estado sólido, que visa unir partes metálicas através de aquecimento, obtido pelo calor gerado, através do atrito provocado por movimento das superfícies em contato, e aplicação de pressão. Devido ao atrito entre as partes, a energia cinética é convertida em calor, sendo absorvido pela região imediatamente próxima às superfícies em contato, coalescendo as superfícies, uma pressão é aplicada e a ação da força centrífuga faz fluir o metal para fora dos limites da peça na forma de rebarba, arrastando os óxidos superficiais existentes (MACHADO, 1996).

3.1 Histórico

O processo de soldagem por fricção tem o seu desenvolvimento reivindicado por diversos países. A Alemanha foi a primeira a registrar a patente em 1929, em sequência no período entre 1939 e 1944 a Inglaterra fez o registro de uma série de patentes e posteriormente em 1956 teve-se a primeira patente russa. Em 1966 os Estados Unidos da América modificam o processo europeu (russo) e o patenteiam como processo de soldagem por atrito inercial.

Dessa forma, passam a coexistir duas variantes no processo, cujas diferenças estão no modo de geração de energia: a soldagem por atrito convencional (russo) e a soldagem por atrito inercial (americana). No primeiro processo, a energia é obtida por meio de um mandril que gira indefinidamente e é mantido por um tempo determinado. No segundo, a energia é obtida por intermédio de um volante em rotação (ALVES, 2010).

No Brasil utiliza-se o processo de soldagem por atrito convencional, a exemplo de países como Alemanha, Canadá, Japão, Índia e China, e é aplicado principalmente na indústria automobilística.

3.2 Características do Processo

Para que dois materiais possam ser unidos por fricção e gerar junções com boa qualidade estrutural é necessário, primeiramente, que eles possuam boa forjabilidade a quente, e segundo, sejam capazes de gerar fricção na interface de ligação (LOPEZ, 2010).

O aquecimento responsável pela união é gerado mecanicamente por atrito entre as peças a serem soldadas, a energia cinética é convertida em calor. Esse aquecimento ocorre devido a uma das peças (que está fixa) ser pressionada sobre a outra peça que se encontra em alta rotação (NIKOLAEV; OLSHANSKY, 1977).

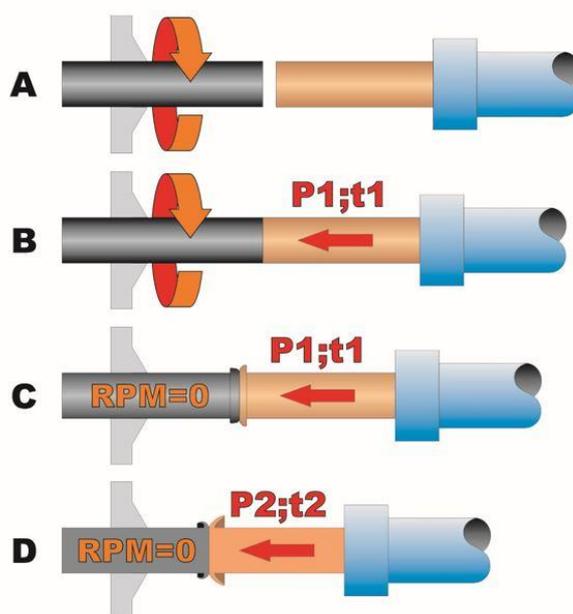
Durante o início da fricção o contato entre as superfícies a serem soldadas ocorre em pequenas áreas. Com o aumento da força aplicada, amplia-se a área de contato devido a deformação plástica, ocorrendo a solda nos pontos de contato. Essa força é aumentada até que haja o contato total entre as duas áreas e se atinja a temperatura de forjamento a quente da liga de menor temperatura de fusão. Devido à energia cinética envolvida no processo, ocorre o aquecimento nas áreas próximas às superfícies de contato; estas se tornam plásticas e fluem, gerando uma rebarba (*flash*). Esse fato é muito importante, pois a ligação final dá-se por caldeamento, evitando-se a formação de fases líquidas e conseqüentemente os inconvenientes de uma estrutura bruta de fusão (WAINER et al., 1992). A Figura 3.1 mostra as etapas do processo (ALVES, 2010).

Esse processo de soldagem é realizado em poucos segundos e as propriedades mecânicas das junções são iguais ou superiores às dos materiais envolvidos. A zona termicamente afetada (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).

O processo de soldagem por atrito convencional envolve a aplicação de pressão “P1” em um intervalo de tempo “t1”, seguido de frenagem da velocidade de rotação (RPM), e aplicação de pressão “P2” no intervalo de tempo “t2”.

Figura 3.1 - Etapas do processo de soldagem por atrito convencional.



A) Período de aproximação; B) Aplicação da P1, t1; C) Término de aplicação de P1, t1, e frenagem da máquina (RPM =0); D) Aplicação de P2, t2 e término da soldagem.

Fonte: Alves (2010).

A rebarba resultante do processo de soldagem normalmente é removida por usinagem, cisalhamento ou esmerilhamento logo após o término da soldagem (NIKOLAEV; OLSHANSKY, 1977). Nos equipamentos modernos que

apresentam sistema CNC, a remoção da rebarba é uma operação automática e realizada na própria máquina por meio de um dispositivo de usinagem acoplado ao equipamento.

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; 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 após a recristalização. Isso faz com que as junções tenham altas propriedades mecânicas de tração, dobramento e impacto (WAINER et al., 1992). A variação de dureza ao longo da ZTA 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 (FARIA P. E.; BRACARENSE, 2003). 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 (OLSON et al., 1992).

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. Dependendo dos materiais soldados e das propriedades desejadas nos metais 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, 1991).

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, 1991).

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 descontinuidades 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 dos metais base ou decorrentes da combinação deles (ALVES, 2010).

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; OKITA, 2002).

A maioria dos materiais pode ser unido por fricção, sendo uma exceção o ferro fundido, cujo grafite age como lubrificante, e outros tipos de liga que possuem baixo coeficiente de atrito, como bronzes e latões com mais de 0,3% de chumbo (WAINER et al., 1992).

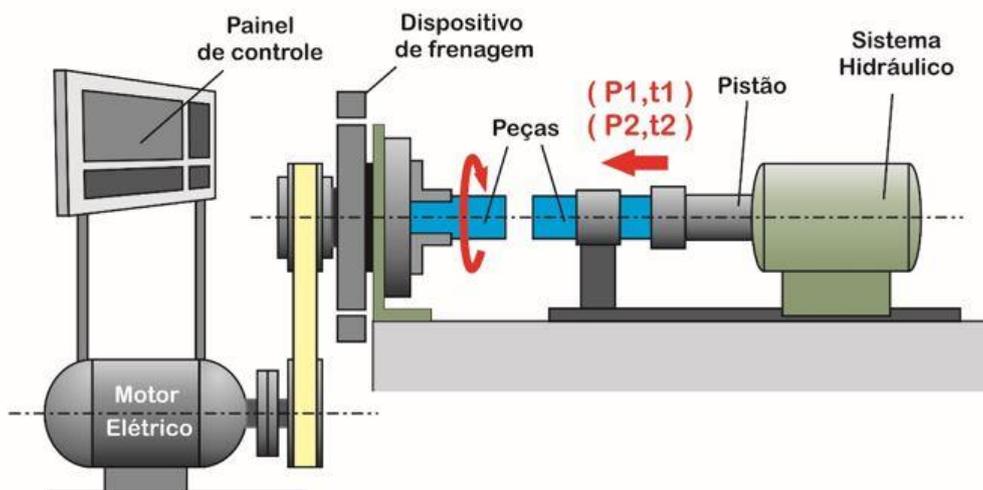
3.3 Processo de soldagem por fricção convencional (FW)

No processo de soldagem por fricção convencional mostrado na Figura 3.1, 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 (velocidade de rotação (RPM), Velocidade de deslocamento, P_1 , t_1 , P_2 , t_2) são definidos pelos procedimentos de soldagem estabelecidos para cada material (ALVES, 2010).

A Figura 3.2 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, 2010).

Figura 3.2 - Equipamento de soldagem por fricção convencional.



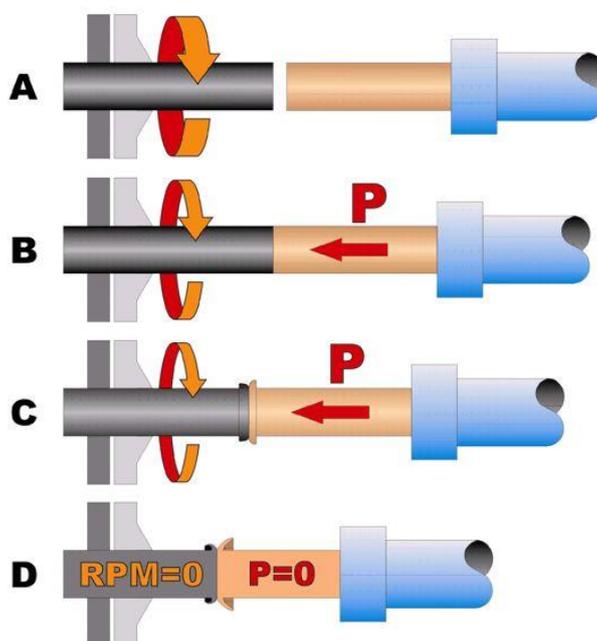
Fonte: Alves (2012).

3.4 Processo de soldagem por fricção inercial (FW - INERTIAL)

No processo de soldagem por fricção inercial, uma peça é fixada ao volante com grande momento de inércia e a outra peça é posicionada e alinhada com essa peça por meio de um pistão hidráulico. O volante é colocado em rotação por meio de uma unidade motora até atingir a velocidade de soldagem. Assim

que essa velocidade é atingida, a unidade motora é desacoplada e a peça que está parada é deslocada até entrar em contato com a peça em rotação, momento em que é aplicada uma pressão P_1 constante até a peça parar (FARIA P. E.; BRACARENSE, 2003). O atrito entre as peças faz com que o material atinja a temperatura de forjamento do material e possibilite a junção dos materiais. A Figura 3.3 descreve as principais etapas do processo.

Figura 3.3 – Etapas da soldagem por fricção inercial.

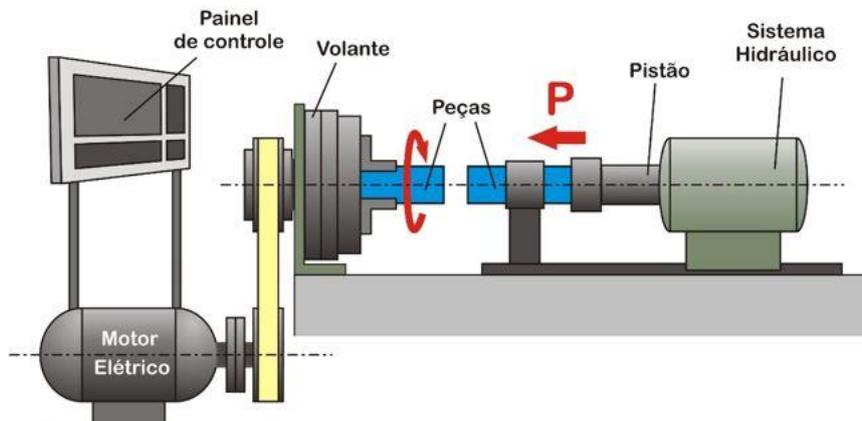


A) Período de aproximação; B) Desligamento da unidade motora e aplicação da pressão “P”; C) Redução da velocidade de rotação (RPM) através aplicação da pressão “P”; D) Término da soldagem (RPM=0, P=0).

Fonte: Alves (2010).

A Figura 3.4 apresenta esquema básico de um equipamento de soldagem inercial.

Figura 3.4 – Equipamento de soldagem por fricção inercial.



Fonte: Alves (2010).

3.5 Diferenças entre os dois métodos de soldagem por fricção

Os dois métodos para soldagem por fricção baseiam-se no mesmo princípio, transformar a energia mecânica cinética 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 necessário a utilização de diferentes parâmetros (ALVES, 2010).

O equipamento de soldagem inercial é semelhante ao equipamento de soldagem por atrito convencional, diferenciando-se pela substituição do sistema de frenagem por um volante onde são dispostas diferentes massas cuja finalidade é gerar diferentes momentos de inércia conforme definições dos procedimentos de soldagem pré-definidos.

O número de parâmetros ajustados durante o setup de uma máquina de soldagem por fricção convencional (velocidade de rotação, velocidade de deslocamento, P_1 , t_1 , P_2 , t_2) é superior ao número de parâmetros que devem ser ajustados em uma máquina de soldagem inercial (velocidade de rotação, P ,

inércia do volante) quando comparados os dois processos. Na Tabela 3.1 são feitas algumas comparações entre os dois processos.

Conseqüentemente, o ajuste dos parâmetros de soldagem e otimização do processo de soldagem por fricção convencional torna-se mais difícil, em função do maior número de parâmetros a serem ajustados, pois a alteração do valor de um parâmetro influencia diretamente na qualidade da junção obtida por este processo, visto que as propriedades mecânicas da interface de ligação são decorrentes da interação que ocorre entre eles durante a fase de aquecimento.

Tabela 3.1 – Comparações entre as duas variações do processo.

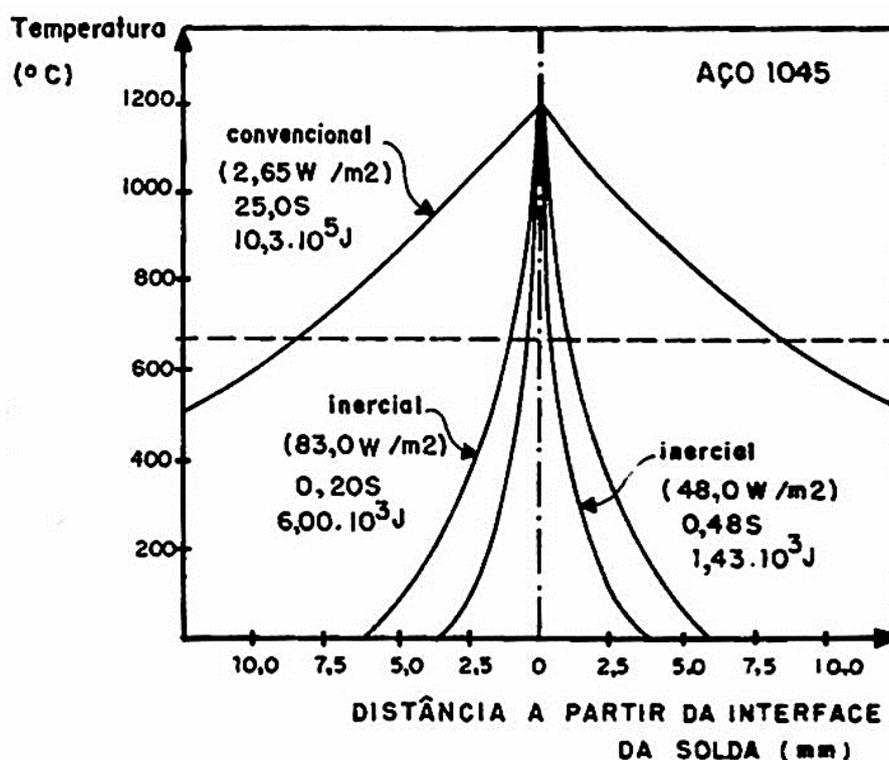
Característica	Inercial	Convencional
Variáveis do processo	Velocidade relativa Pressão Inércia do volante	Velocidade Relativa Pressão (aquecimento) Tempo de aquecimento Pressão (forjamento) Tempo de forjamento
Tempo de soldagem	Menor (10% do tempo do processo convencional).	Maior
Energia de soldagem	Maior (23-174 W/mm ²)	Menor (12-47 W/mm ²)
Torque	Maior	Menor
Tamanho da ZTA	Menor	Maior
Resistência da solda	Maior (Linhas de fluxo espiraladas)	Menor (Linhas de fluxo radiais)
Fixação das peças	Garras do mandril com alta eficiência para resistir a torques elevados e evitar a rotação da peça.	Garras do mandril normais
Equipamento	Robusto para resistir a elevadas cargas axiais.	Pode ser projetado para operações portáteis.

Fonte: Wainer et al. (1992).

As temperaturas nas interfaces de ligação durante a soldagem por ambos os processos atingem valores muito próximos, mesmo utilizando diferentes relações de parâmetros, entretanto, a ZTA na soldagem inercial apresenta-se

de forma reduzida em decorrência do menor tempo a que foi submetido este material a essa temperatura (WAINER et al., 1992). Na Figura 3.5 pode ser vista essa distribuição calculada para as variantes do processo para uma liga de aço SAE 1045 com 25 mm de diâmetro.

Figura 3.5 – Distribuição de temperatura calculada para as variantes do processo. Solda topo-a-topo com barras de aço SAE 1045 com 25 mm de diâmetro.



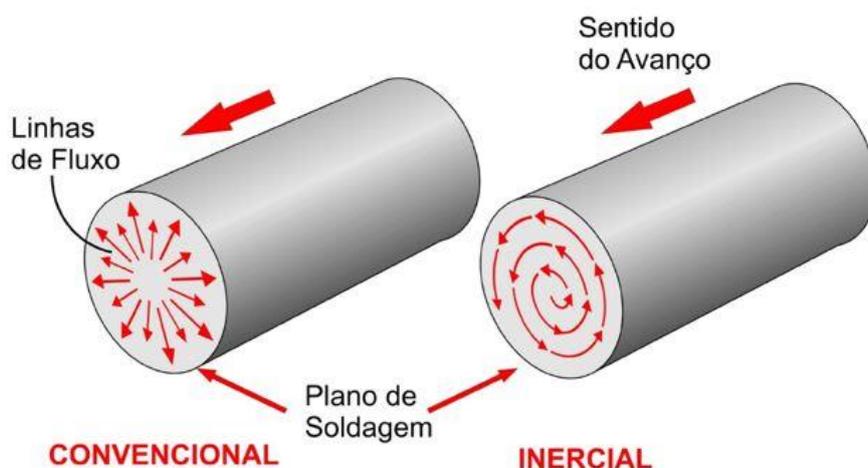
Fonte: Wainer et al. (1992).

Devido às variações de equipamento e sequenciamento dos processos as linhas de fluxo formadas com o escoamento dinâmico do metal da superfície referente à interface de ligação também se apresentam de forma diferente. No processo convencional elas são radiais, enquanto que no processo inercial são espiraladas. Conforme pode ser visto na Figura 3.6, ocorre um maior entrelaçamento das linhas de fluxo no processo de soldagem inercial

resultando em maior resistência da junção quando comparado ao processo convencional segundo a literatura (WAINER et al., 1992).

Na prática observa-se que se pode obter a mesma resistência mecânica da junção utilizando o processo de soldagem por atrito convencional, desde que sejam ajustados e definidos os parâmetros de soldagem corretamente.

Figura 3.6 – Linhas de fluxo de escoamento plástico nas duas variantes do processo.



Fonte: Adaptado de Wainer et al (1992).

Embora o processo de soldagem inercial apresente algumas vantagens como: menor tempo de soldagem, maior resistência mecânica e menor ZTA, a soldagem por fricção convencional tem sido o processo mais utilizado no mundo, principalmente pela menor robustez de equipamento, menor energia de soldagem, simplicidade do sistema de garras responsável pela fixação das peças a serem unidas, e também pelo grande número de fabricantes desse equipamento no mundo.

3.6 Variações recentes de soldagem por fricção

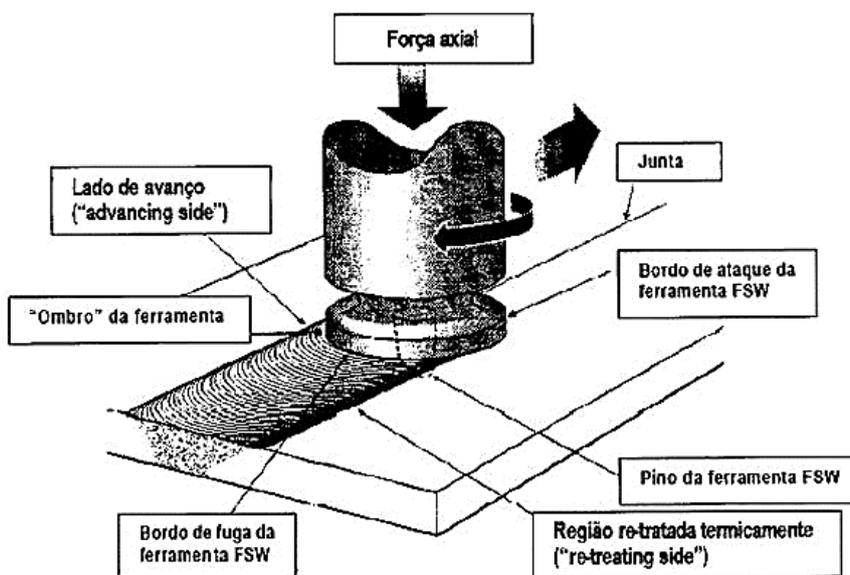
Desde o seu surgimento, outros métodos de soldagem por fricção foram desenvolvidos utilizando-se o mesmo princípio, ou seja, a geração de calor por meio do atrito entre dois materiais, ou entre dois materiais e um terceiro

material definido como ferramenta. Recentemente foram desenvolvidos os processo *Friction Stir Welding* (FSW), *Friction Hydro Pilar Processing* (FHPP), e *Friction Stitch Welding*.

(a) *Friction Stir Welding*

Neste processo, uma ferramenta não consumível gira rapidamente entre duas chapas posicionadas topo a topo fazendo com que o material de ambas as chapas seja misturado, destruindo a interface de separação entre elas e consolidando a união (MODENESI et al., 2005), como mostra a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Princípio do processo *Friction Stir Welding*.

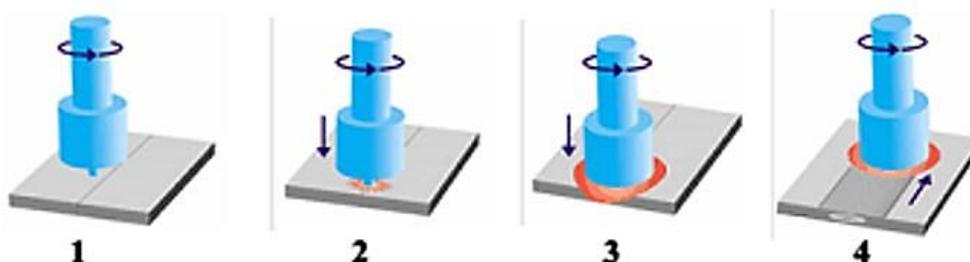


Fonte: Genicolo (2007).

É um processo de soldagem adequado ao uso em materiais metálicos, que atua através da deformação plástica dos materiais, sem que ocorra o ponto de fusão. Ocorre sem a deposição de um terceiro material diferente dos materiais a serem unidos, como é comum em outros processos de soldagem (GENICOLO, 2007). A representação esquemática do processo pode ser vista na Figura 3.8.

Este processo foi criado por um instituto britânico chamado *The Welding Institute* (TWI) e patenteado em 1991, sendo particularmente adequado à união de ligas de alumínio estruturais para uso na indústria aeronáutica (GENICOLO, 2007). Todo o processo de união ocorre no estado sólido, abaixo da temperatura *solidus* das ligas a serem unidas, não ocorrendo fusão dos materiais envolvidos.

Figura 3.8 – Representação esquemática do princípio geral de funcionamento do processo FSW. (1) Aproximação da ferramenta; (2) Abertura furo; (3) Encosto do ombro da ferramenta gerando fricção; (4) Deslocamento, soldagem e término do processo.



Fonte: Rodrigues et al. (2014).

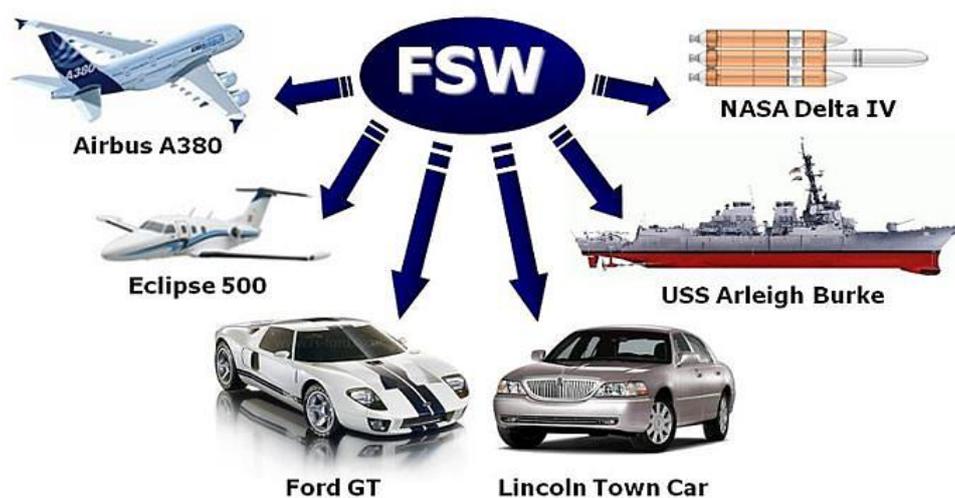
Uma ferramenta especialmente projetada similar a um pino tem a função de aquecer por meio de atrito e misturar as bordas de duas peças que se deseja unir. Parte da ferramenta denominada ombro que não penetra no material a ser soldado, gira sobre ele, gera atrito e, conseqüentemente energia térmica para deformar plasticamente o material a ser unido (CRUZ; NETO, 2009).

Por meio deste processo é possível unir ligas metálicas de difícil soldabilidade por fusão, como as ligas de alumínio das séries 2xxxx e 7xxxx utilizadas em estruturas de aviões. A resistência da solda é de 30 a 50% maior do que aquela obtida pelos processos de soldagem a arco elétrico, e a vida em fadiga é comparável àquela de peças rebitadas (CRUZ; NETO, 2009).

Atualmente o processo FSW é utilizado na soldagem de aviões da *Eclipse Aviation Corporation* e na fabricação de componentes não estruturais do A380 da Airbus, na indústria aeroespacial, em especial pela NASA na soldagem de tanques de combustíveis externos de foguetes espaciais (MARCONATO, 2009), e do anteparo e nariz cônico da nave espacial Orion (WIKIPEDIA, 2015). Na Figura 3.9 são mostradas algumas áreas dessas aplicações.

No Brasil este processo vem sendo desenvolvido com aplicações em diversos setores. A empresa aeronáutica Embraer em conjunto com o TWI tem aplicado este processo no desenvolvimento e melhoria dos processos de fabricação de estruturas aeronáuticas.

Figura 3.9 – Aplicações do processo FSW na indústria.



Fonte: Marconato (2009).

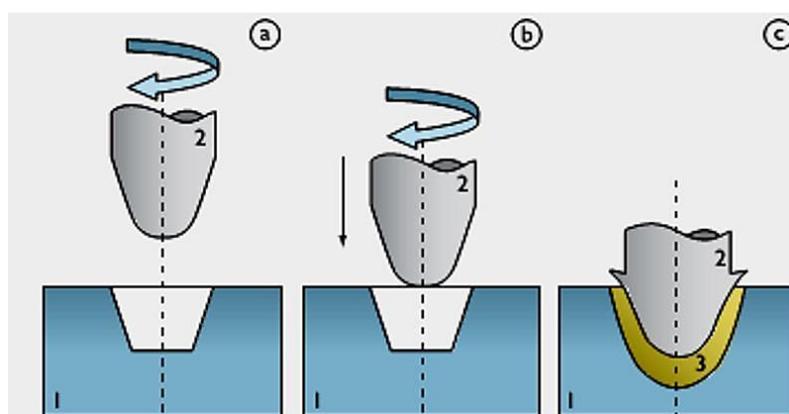
(b) *Friction Hydro Pilar Processing*

O processo FHPP tem como aplicação principal a demanda de reparos de estruturas como plataformas e navios utilizados na indústria de óleo e gás. Nos reparos, esse processo torna-se vantajoso devido ao baixo nível de calor gerado, ausência de fumos e gases residuais excessivos além da exposição da junção em ambientes agressivos onde não pode ser aplicada a devida proteção

gasosa. Esse processo, por ser realizado no estado sólido, permite obter juntas soldadas com a ausência de problemas associados ao desenvolvimento de trincas por ação do hidrogênio e ao processo de solidificação. Pode ser facilmente automatizado, garantindo reprodutibilidade e qualidade controlada da junta soldada. Estudos recentes também mostram a sua utilização na indústria automotiva na soldagem de ligas Mg – Al (LESSA et al., 2011).

Este processo consiste de duas etapas: uma primeira de furação e uma segunda de enchimento. Nesta última, o consumível ou material de enchimento, equivalente ao material a ser reparado, é posto inicialmente em rotação e em seguida introduzido axialmente dentro da cavidade previamente preparada. Devido ao contato do consumível com o fundo da cavidade, o calor será gerado por fricção, promovendo assim o escoamento do material plastificado ao longo do plano de cisalhamento na base do consumível. Devido a fricção e deformações a que o material é submetido, a solda acontece entre as paredes da cavidade e o consumível. A Figura 3.10 mostra um desenho esquemático das etapas do processo (UNFRIED et al., 2009).

Figura 3.10 – Soldagem por atrito de pinos consumíveis.



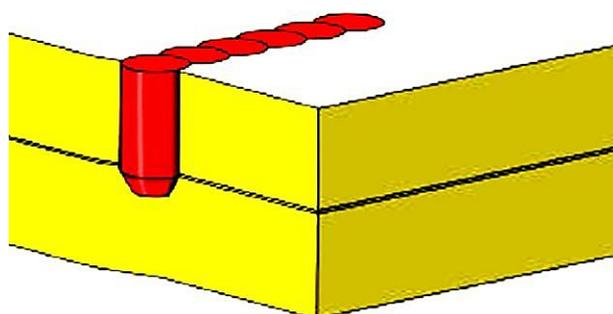
(1) chapa base; (2) Pino; e (3) junção. Sequência de processamento: (a) início com aplicação de velocidade rotacional ao pino; (b) força axial no pino girando e aproximação dele à chapa base; e (c) formação da união permanente e geração da ZTA e pela deformação.

Fonte: Unfried et al. (2009).

(c) *Friction Stitch Welding*

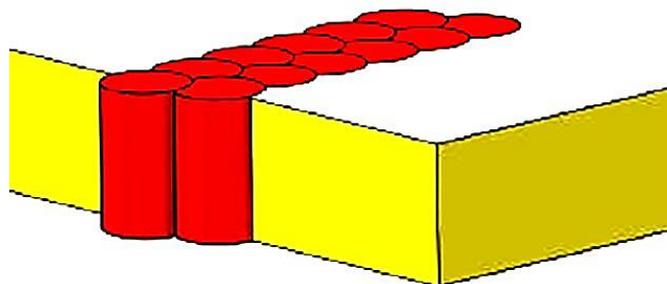
A *friction stitch welding* utiliza o método FHPP apresentado anteriormente, para o reparo de trincas. O processo se caracteriza por produzir uma série de soldas sobrepostas, em um ou mais passes até que a trinca seja completamente restaurada. Este processo é descrito esquematicamente nas Figuras 3.11 e 3.12 (MODENESI et al., 2005).

Figura 3.11 – Esquema da costura por fricção em um passe.



Fonte: Modenesi et al. (2005).

Figura 3.12 - Costura por fricção com mais de um passe.



Fonte: Modenesi et al. (2005).

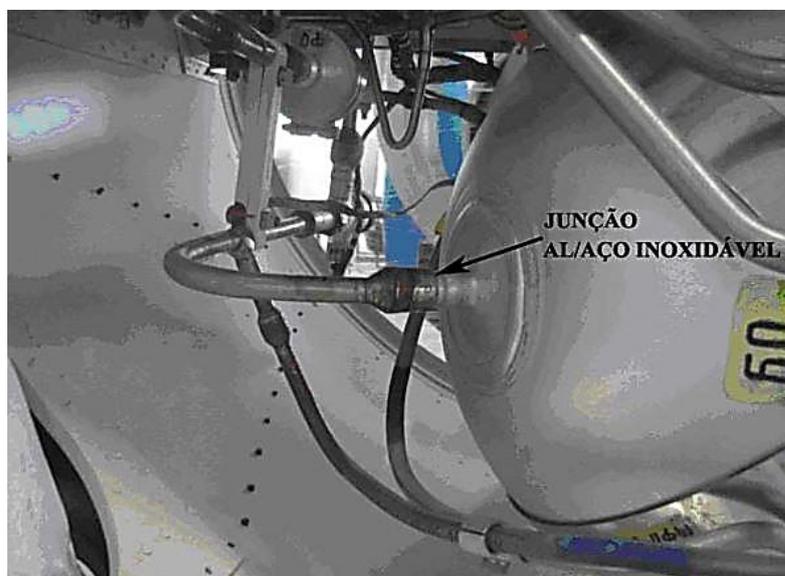
Este processo é aplicado não só em trincas que ocorrem por fadiga em oleodutos e estruturas offshore, na manutenção de cascos e estruturas de navios, e consertos de tanques em usinas nucleares, já que, de acordo com a literatura é possível obter ótima qualidade das junções em aços inoxidáveis,

sem a necessidade de realização de tratamento térmico após a soldagem (BRACARENSE, 2000).

3.7 Aplicações do processo de soldagem por fricção

A soldagem por fricção é um processo versátil, capaz de produzir uma grande variedade de componentes tanto para as áreas aeronáutica, aeroespacial, nuclear, naval, automotiva, elétrica, química, quanto para a indústria civil. Estes componentes incluem junções de materiais dissimilares para tubulações, sensores de temperatura, conectores elétricos, pistões hidráulicos, eixos, barras de direção, válvulas, brocas, rotores para aviação, peças para turbinas, entre outras, as Figuras 3.13, 3.14 e 3.15 mostram a aplicação do processo de soldagem por fricção no setor aeroespacial e nuclear.

Figura 3.13 – Interior da Baia de Controle – VLS. Vista do reservatório esférico de hidrazina e junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação da liga AA 1050.



Fonte: Alves (2010).

Figura 3.14 – Vista ampliada da junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação de alumínio AA 1050 soldada por fricção – Baia de Controle VLS1 – DCTA-IAE.



Fonte: Alves (2010).

Figura 3.15 – Junta de Transição para Reator Nuclear (Liga de alumínio e Aço).



Fonte: Khan (2011).

A maioria dos materiais pode ser soldada por este processo, incluindo as ligas de níquel, aços de baixo e médio carbono, aços micro ligados, endurecidos por tratamento térmico, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, ligas de cobre e ligas de titânio (ANANTHAPADMANABAN, 2011). As Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 mostram exemplos de aplicações de junções bimetálicas Al – Aço inoxidável, Cu – Al, e outras combinações, respectivamente.

Figura 3.16 - Junções bimetálicas Al - Aço inoxidável.



Fonte: Khan (2011).

Figura 3.17 – Conector Cu – Al.



Fonte: Khan (2011).

Figura 3.18 – Aplicações do processo de soldagem por fricção.



Fonte: Ananthapadmanaban (2011).

3.8 Vantagens e limitações da soldagem por fricção convencional

Vantagens:

- a) 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 (BRACARENSE, 2000);
- b) 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;
- c) A utilização de equipamentos de soldagem por fricção rotativa automáticos de alta tecnologia reduz a necessidade de mão-de-obra experiente e altamente qualificada (HOWES; THREADGILL);
- d) As junções produzidas por esse processo possuem alta resistência mecânica das soldas, permitindo a sua utilização em aplicações estruturais;
- e) 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;
- f) 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);
- g) 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;

- h) 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);
- i) 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;
- j) A ação de autolimpeza decorrente do processo reduz ou elimina a necessidade de preparação da superfície, refletindo diretamente na redução de tempo e custos de processo;
- k) O equipamento de soldagem por fricção apresenta baixo custo de manutenção;
- l) A soldagem das peças é feita em poucos segundos, possibilitando alta produtividade;
- m) Pode ser utilizado para união de materiais tratados termicamente como ligas de alumínio da série 2XXX, 6XXX e 7XXX, ou ligas de aço SAE 4140, 4340, 1045, sem que haja perda considerável das propriedades mecânicas, ou necessidade de realização de novos tratamentos térmicos pós-soldagem;
- n) Este processo reduz consideravelmente os custos de produção quando utilizado para a fabricação de junções de materiais dissimilares quando comparado a processos como fundição, forjamento;
- o) O equipamento automático possibilita grande segurança ao operador evitando a ocorrência de acidentes ou lesões, visto que grande parte do processo ocorre de forma automática, sem contato direto do operador com a máquina;

- p) As junções soldadas por este processo podem resistir as grandes variações de temperatura (KHAN, 2011);
- q) A ZTA formada na interface de ligação é muito pequena;
- r) A soldagem pode ser realizada em todas as posições;
- s) Apresenta maior eficiência no consumo de energia do que qualquer outro processo de soldagem (SAHOO, 2007);
- t) Não é requerido qualificação do soldador (SAHOO, 2007);
- u) O processo de soldagem por fricção automatizado praticamente elimina erros humanos durante a operação e independe da habilidade do operador (SAHOO, 2007).

Limitações:

- a) Os equipamentos são robustos, não permitem o transporte e manuseio em outros locais de trabalho;
- b) O custo do equipamento é elevado, sendo normalmente produzido em países como Índia, Alemanha, Inglaterra e exportado para o Brasil;
- c) 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 et al., 2008);
- d) Não permite a soldagem de materiais com baixo coeficiente de atrito, como determinados ferros fundidos, bronzes, etc.;
- e) Superfícies de materiais que sofreram tratamentos superficiais de carbonetação, nitretação apresentam dificuldades para serem soldadas por fricção devido ao baixo coeficiente de fricção e apresentarem baixa forjabilidade (OLSON et al., 1992);

3.9 Variáveis no processo de soldagem por fricção convencional

As variáveis na soldagem por fricção podem ser divididas em dois grupos (KHAN, 2011): (a) Máquina; e (b) Não pertencentes a máquina.

As variáveis da máquina incluem (KHAN, 2011):

- a) Velocidade de rotação (RPM);
- b) Pressão de fricção;
- c) Tempo de fricção;
- d) Pressão de forjamento;
- e) Tempo de forjamento;
- f) Velocidade de avanço do pistão;

As variáveis que não pertencem a máquina incluem (KHAN, 2011):

- a) Tipos de materiais a serem soldados;
- b) Geometria da peça;
- c) Diâmetro da peça;

A definição dos parâmetros de soldagem depende do equipamento utilizado e está diretamente relacionada às características, propriedades físicas e químicas dos materiais a serem unidos.

3.9.1 Variáveis de processo pertencentes à máquina e sua influência na soldagem por fricção convencional.

- (a) Velocidade de rotação (RPM)

A velocidade de rotação tem como função principal, produzir uma velocidade relativa nas superfícies em contato (AWS, 1991). Depende dos materiais a

serem unidos e são as mesmas tanto para barras sólidas quanto tubulares. 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) (ALVES, 2010), 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, 2010).

Altas velocidades de rotação podem ser úteis para a soldagem, mas o tempo de aquecimento e a pressão devem ser cuidadosamente controlados para evitar superaquecimento da ZTA, principalmente para a soldagem de aços temperados, onde uma taxa de resfriamento elevada pode possibilitar a formação de trincas próximas à interface de ligação.

Tem sido observado que o aumento no tamanho do grão quando utilizada alta rotação também reflete na microestrutura formada na periferia das barras. Altas pressões e baixas velocidades de rotação resultam, em geral, na formação de uma ZTA mais estreita (KHAN, 2011).

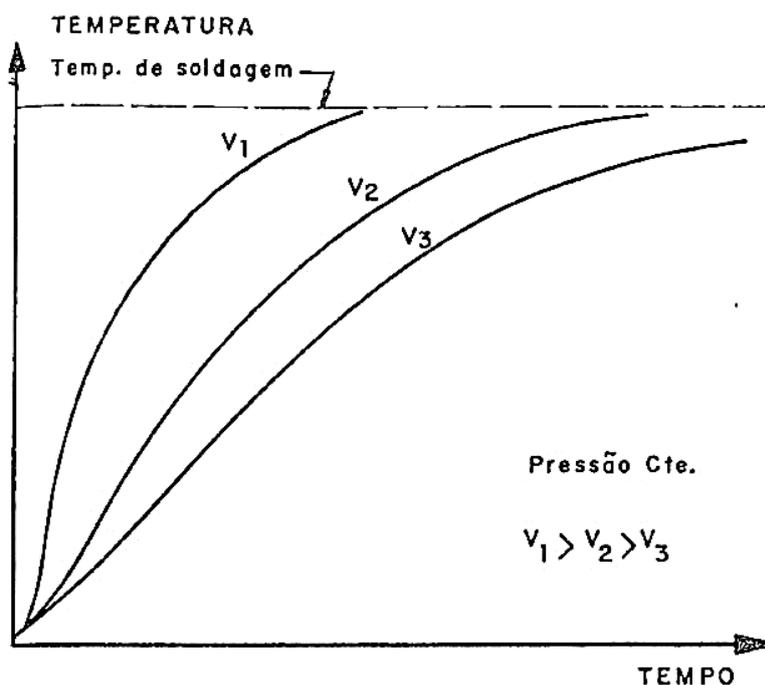
Para a soldagem de materiais com alta condutividade térmica, como ligas de alumínio, ligas de cobre, e também para a soldagem de aços com alta resistência mecânica endurecidos por meio de tratamento térmico, podem-se utilizar altas velocidades de rotação associadas com baixos *heat input* para obtenção de junções com boa qualidade (AWS, 1991). Longos tempos de aquecimento controlam as taxas de resfriamento e evitam o aparecimento de trincas a quente.

Na soldagem de materiais dissimilares, dependendo da combinação, uma baixa velocidade de rotação pode minimizar a formação de compostos intermetálicos indesejáveis que fragilizam a junta soldada. Em termos práticos,

normalmente fixa-se a velocidade de rotação e se ajustam os demais parâmetros de pressão e tempo de forma a melhorar as propriedades mecânicas da junta soldada e os aspectos gerais de acabamento, e evitar a redução excessiva de comprimento e perda de material (ALVES, 2010).

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 P_1 e tempo t_1 . Na Figura 3.19 é mostrada a influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento t_1 , mantida a velocidade constante (WAINER et al., 1992).

Fig. 3.19 – Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a pressão constante.



Fonte: Wainer et al. (1992).

Dunkerton pesquisou os efeitos da velocidade de rotação, pressão de fricção e pressão de forjamento em todos os métodos de soldagem por fricção para soldagem de barras de aço (SAHOO, 2007).

Yilmaz realizou diversos estudos sobre as variações de dureza e microestruturas na interface de ligação de materiais dissimilares soldados por este processo (SAHOO, 2007).

Sathian (1990) desenvolveu estudos onde relatou que a velocidade rotacional é determinada pelo equipamento de soldagem usado durante a fabricação e que o torque aumenta com a redução da velocidade rotacional. Seu trabalho teve como objeto de estudo a análise dos efeitos da variação da velocidade rotacional na primeira fase do processo de soldagem por fricção, também conhecida como fase de aquecimento.

Por outro lado, a velocidade rotacional está relacionada com o material a e com o diâmetro do material a ser soldado. Diferentes velocidades produzem junções com diferentes propriedades mecânicas nas junções unidas por este processo de soldagem. Uma maior velocidade rotacional produz mais calor na interface de ligação durante o atrito entre os materiais, conseqüentemente tem-se maior deslocamento de fluxo de calor, uma grande extensão de recristalização, ou até mesmo aumento da formação de compostos intermetálicos.

A velocidade rotacional elevada também pode limitar a produção em função do consumo excessivo de material desperdiçado pela rebarba, e por peças que foram rejeitadas por apresentarem não conformidades dimensionais.

Özdemir (2005) desenvolveu trabalhos de pesquisas relacionando a velocidade rotacional com as propriedades mecânicas em juntas soldadas de aço AISI 4340. De acordo com seus estudos, as microestruturas formadas na interface de ligação durante a soldagem por fricção consistem de três regiões definidas: uma região totalmente deformada plasticamente ao redor da linha de soldagem, uma região parcialmente deformada, e uma região não afetada pela

deformação plástica. A largura e a geometria destas regiões variaram em função da velocidade rotacional. O uso de altas velocidades rotacionais e pequenos tempos de fricção aumenta a resistência à tração dos aços soldados por fricção (BASHER, 2013).

(b) Pressão de fricção ou aquecimento (P1)

A pressão de aquecimento (P1) 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.

Responsável pelo controle da energia requerida pela máquina de soldagem por fricção, é determinante na maior ou menor redução do comprimento das peças a serem soldadas, e no gradiente de temperatura na interface de ligação. Ela depende da configuração da junta, dos materiais a serem unidos e da geometria da junta. Também pode ser usada para compensar a perda de calor decorrente de grandes diferenças de massas, como no caso da soldagem entre uma barra cilíndrica e uma chapa (BASHER, 2013).

A pressão aplicada deve ser alta o suficiente durante a fase de aquecimento de forma a manter as superfícies em contato total, evitando a oxidação pelo ar atmosférico. As propriedades da junta podem ser melhoradas se for aplicada uma pressão mais elevada na fase final do processo, também conhecida como fase de forjamento (KHAN, 2011).

Existe uma grande faixa de pressões que podem ser aplicadas para aços, ligas de alumínio e materiais dissimilares que podem ser utilizadas para obter soldas com boa qualidade. Ela controla o gradiente de temperatura na interface de ligação 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, 2010).

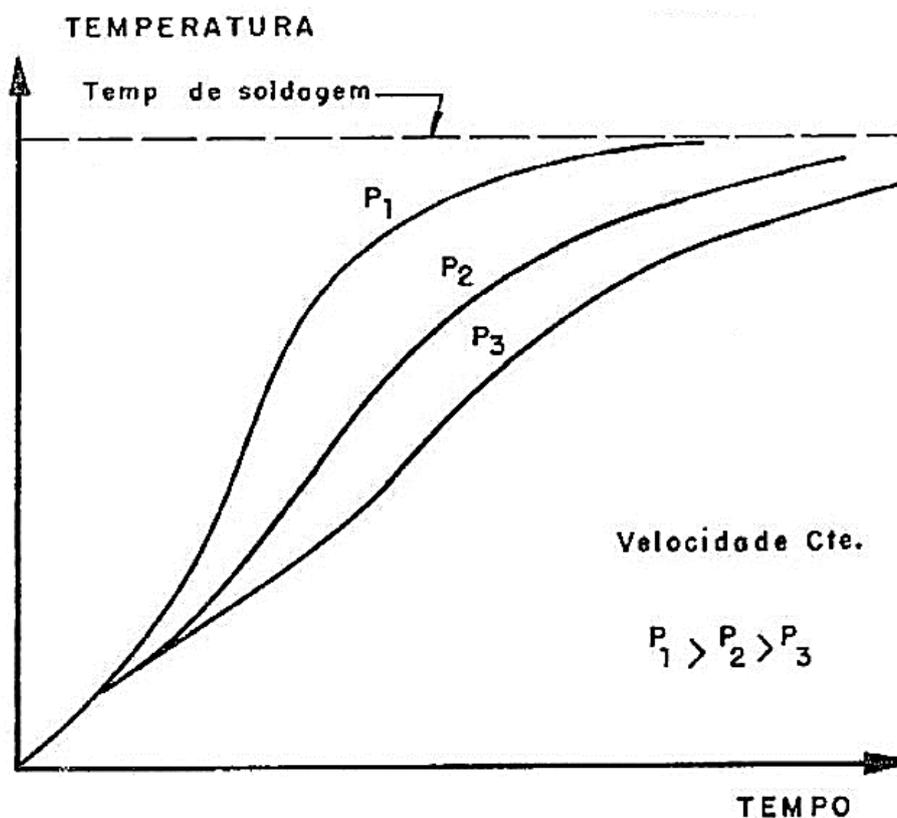
Para obtenção de soldas com qualidade nos aços de baixo carbono, as pressões de aquecimento e forjamento utilizadas durante o processo são, respectivamente, de 30 a 60 N/mm² e 75 a 150 N/mm². Entretanto, pressões maiores são requeridas para a soldagem de ligas resistentes a altas temperaturas, como é o caso das ligas a base de Ni e aços inoxidáveis. Se for necessário pré-aquecimento, normalmente é aplicada uma pressão inicial de 20 N/mm² por um curto período de tempo até que seja aplicada a pressão normal de trabalho (KHAN, 2011).

Durante a realização da soldagem a pressão P1 é mantida constante até o término do tempo t1. Valores de pressão podem ser alterados 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 grandes 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, 2010).

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 P1 combinada com o tempo t1, 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 superfícies de contato dos dois materiais (ALVES, 2010).

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 às necessidades do cliente. A Figura 3.20 mostra a influência da pressão P_1 no tempo de aquecimento t_1 , mantida a velocidade de rotação constante (ALVES, 2010).

Figura 3.20 – Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a velocidade constante.



Fonte: Wainer et al. (1992).

Nentwig realizou pesquisas sobre os efeitos das diferentes seções transversais relacionando o parâmetro de pressão em diversos componentes fabricados por soldagem por fricção (SAHOO, 2007).

Ates et al. (2007), estudaram os efeitos da pressão sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas em aços baseados em super ligas. À medida que ocorre um aumento da pressão P1 sob diferentes condições de rotação, a ZTA torna-se mais estreita e ocorre uma diminuição das diferenças de valores de dureza entre a interface de ligação e os materiais que foram unidos (ELLIS, 1972).

(c) Tempo de fricção ou 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 P1 são interrompidos bruscamente iniciando a aplicação da pressão de recalque P2 e do tempo de forjamento t_2 (ALVES, 2010).

Está diretamente relacionado com as propriedades dos materiais. O tempo de fricção ideal é aquele que permite a ocorrência da deformação plástica e remoção de possíveis resíduos ou partículas presentes na interface. Para a produção de junções com alta qualidade o tempo de fricção mínimo não deve ser excedido (BASHER, 2013).

A combinação de pequenos tempos de soldagem e a dissipação de calor na interface de ligação estão diretamente relacionados e resultam em uma ZTA extremamente reduzida, não sendo necessário a realização de tratamento térmico para alívio de tensões após a soldagem, e também reduzem de forma considerável a dinâmica dos processos corrosivos que ocorrem nas junções soldadas.

Quando o 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).

Sua definição é extremamente importante e por esta razão devem ser considerados os limites especificados para a soldagem de acordo com os materiais a serem soldados e diâmetro das barras, de forma que permita ao sistema, aplicação de pressão dentro dos limites especificados. Muitas vezes torna-se necessária realização de testes para definição do tempo correto que permita a obtenção e junções com qualidades estruturais.

A duração da soldagem na fase de aquecimento para uma barra de aço de 25 mm de diâmetro deve ser de 5 a 7 segundos considerando uma velocidade rotacional de 1000 RPM (KHAN, 2011).

Para que ocorra a soldagem no estado sólido é necessário que todos os óxidos 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.

O 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 (ALVES, 2010).

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, 2010).

Sathiya et al. (2008), realizou alguns trabalhos de pesquisa sobre soldagem por fricção de aços inoxidáveis. O seu estudo enfatizou as junções de aços inoxidáveis austeníticos AISI 304, e aços inoxidáveis ferríticos AISI 430. Utilizou uma máquina de soldagem por fricção convencional e pinos cilíndricos de mesma composição e forma para a realização dos testes. Os resultados dos testes de tração, impacto e ensaios de dureza foram importantes e mostraram que junções de aço inoxidável austenítico AISI 304 apresentaram valores de resistência mecânica comparáveis com o metal base e que a resistência mecânica diminuiu com o aumento do tempo de fricção.

(d) Pressão de forjamento (P2)

A pressão de forjamento é uma variável importante responsável pelo controle da deformação plástica dos materiais envolvidos no processo, faz com que o deslocamento do fluxo ocorra tanto na interface de ligação quanto nas regiões adjacentes da ZTA (KHAN, 2011).

O início da segunda fase de soldagem, também conhecida como fase de forjamento, começa logo após a aplicação da pressão P1 no tempo t1. A aplicação da pressão P2 no tempo t2 caracteriza essa etapa do processo e é responsável pelo término da soldagem. Quando os valores da pressão P2 são definidos de forma adequada relacionada ao tempo t2, 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 (ALVES, 2010).

Segundo Khan (2011), a pressão de forjamento é benéfica porque ela ajuda a dispersar e refinar o metal aquecido na interface de ligação e regiões adjacentes à ZTA, além de evitar a presença de inclusões não metálicas quando os metais aquecidos são forçados um contra o outro radialmente.

A utilização de uma baixa pressão de recalque P2, no intervalo de tempo t2, 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, 2010).

Quando é utilizado um alto valor de pressão de forjamento P2, no intervalo de tempo t2, 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 P2, do tempo t1 e a velocidade de soldagem.

Takegami e Shinoda (2004) realizaram pesquisas sobre a influência da pressão na soldagem por fricção dos materiais Cr-Zr com ligas de cobre. Os resultados mostraram que na fase de aquecimento, somente o centro da área de contato na interface de ligação está em contato total, e que as extremidades das barras cilíndricas em contato não foram unidas corretamente, apresentando falhas de ligação.

Hiroshi et al. (1996), realizaram diversos estudos sobre os efeitos da pressão de forjamento relacionadas a soldagem por fricção dos materiais ferro fundido e

ação de baixo teor de carbono, onde analisaram os resultados das pesquisas e concluíram que a definição correta de seus valores é muito importante no sentido de finalização do processo e obtenção de junções com qualidade estrutural.

(e) Tempo de forjamento (t_2)

O tempo de forjamento t_2 deve ser aplicado por um pequeno período, o suficiente para permitir ao processo a perfeita interação entre os materiais em contato (KHAN, 2011). Juntamente com a velocidade de soldagem, é responsável pela aplicação efetiva da pressão de recalque P2. Quando se encerra o período de tempo t_2 é completado o ciclo de soldagem (ALVES, 2010).

Tanto o tempo de aquecimento t_1 quanto o tempo de forjamento (recalque) t_2 , são controlados por meio de um dispositivo temporizador (timer) (AWS, 1991), 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 t_2 é diminuído e vice-versa.

Se o tempo de forjamento t_2 for excessivo ou abaixo dos valores ditos ideais, combinado com o valor da pressão de forjamento P2 e com a velocidade de soldagem, são obtidas junções com baixas propriedades mecânicas (ALVES, 2010).

(f) Velocidade de avanço do pistão

A velocidade de avanço 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., 1992). Para cada material existe uma força e uma velocidade de deslocamento mínima, cujos valores são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de força e velocidade crítica mínima de soldagem.

Material	Força (10^4 N)	Velocidade critica 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. (1992).

A velocidade de deslocamento do pistão durante a 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., 1992). 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 (ALVES, 2010).

Eder et al (2010), realizou trabalhos experimentais de soldagem por fricção variando a velocidade de deslocamento do pistão. Foram observados que esta velocidade altera de forma considerável o aspecto da rebarba, também conhecida como flash. Isto caracteriza diferentes níveis de aquecimento na interface de ligação em função da influência da velocidade de deslocamento do pistão. Tendo em vista que a temperatura é o fator de maior relevância durante o processo, torna-se necessário o controle sistemático dessa velocidade em conjunto com os outros parâmetros para que se possa obter junções estruturais que atendam requisitos de projeto definidos de acordo com as suas aplicações.

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.

Os equipamentos de soldagem por fricção utilizados em empresas no Brasil possuem válvulas digitais ou analógicas que possibilitam o controle dessa velocidade. Para obtenção de uma velocidade maior, abre-se a válvula e para uma velocidade menor fecha-se a válvula. Em termos práticos, é fixado um determinado valor em função do tempo, e alterados outros parâmetros para facilitar a otimização do processo durante o setup do equipamento.

3.9.2 Variáveis do processo que não pertencem a máquina e sua influência na soldagem por fricção convencional.

As variáveis externas ao sistema como material, geometria e diâmetro das peças a serem unidas são de fundamental importância para análise e definições iniciais dos parâmetros que serão utilizados para o setup do equipamento de soldagem por fricção.

Estas variáveis independem da marca, modelo, ou fabricante do equipamento, mas influenciam diretamente nas definições dos parâmetros usados nestes equipamentos para a soldagem dos materiais.

3.9.3 Material e sua influência no processo

A SFR possibilita a união da maioria dos materiais utilizados na engenharia, entretanto, cada liga ou combinações diferentes de materiais necessitam ser

analisados previamente antes da definição do setup inicial para a fabricação de junções soldadas. Os parâmetros definidos de pressão, tempo, e velocidade de deslocamento para a realização de uma operação de soldagem envolvendo dois materiais similares ou dissimilares são diferentes, visto as próprias diferenças de propriedades mecânicas e composição química presentes nos materiais.

Na soldagem de materiais similares temos interfaces de ligação com mesmo coeficiente de atrito, composição química, dureza, e propriedades mecânicas. Entretanto, quando unimos materiais dissimilares como aço e ligas de alumínio encontramos uma interface de ligação com duas superfícies distintas em termos de rugosidade, coeficiente de atrito, composição química, propriedades mecânicas, e presença de diferentes camadas de óxidos. Com o início do processo, parâmetros de pressão, tempo e temperatura fazem com que esses elementos interajam entre si formando diversos compostos que influenciam diretamente na resistência mecânica da junção.

As forças de fricção entre duas superfícies em movimento relativo estão diretamente relacionadas à área real de contato na interface de ligação. As interações da área verdadeira que determina a força de fricção são divididas entre a superfície e as propriedades volumétricas dos materiais envolvidos, que incluem a tensão de escoamento, dureza, módulo de Young, módulo de cisalhamento, resistência à fratura e propriedades térmicas (JACOBY, 1991). As propriedades da superfície incluem a reatividade química, energia da superfície, energia interfacial e de absorção. Estas propriedades mais a combinação dos materiais a serem unidos determinam a soldabilidade da junta para a definição do setup inicial (RABINOWICZ, 1964).

A energia da superfície, ou o trabalho necessário para criar uma superfície isenta de camadas de óxidos aumenta significativamente, pois a energia da superfície é proporcional a raiz cúbica da dureza e se torna importante quando

o raio da interface da junta é menor que a energia da superfície dividida pela tensão de escoamento do material (JACOBY, 1991).

3.9.4 Geometrias das superfícies em contato e sua influência no processo

No início da soldagem quando ocorre o contato entre os materiais e geração de calor na interface de ligação, a geometria da peça referente a superfície de contato é de fundamental importância para obtenção de microestruturas desejadas na ZTA e melhorias na resistência mecânica da junção.

Segundo Weiss e Sassani (1998), Lin et al. (1999) e Noh et al. (2008), a geometria da superfície de contato desempenha um papel crítico no processo, pois é responsável pelo fluxo de material que governa a velocidade transversal com que a soldagem por fricção é conduzida.

Weiss e Sassani (1998) desenvolveram diversos estudos sobre a soldagem de cerâmica com metal utilizando o método de elementos finitos e análise estatística da mecânica da fratura. Eles perceberam que independentemente da combinação de materiais, a geometria da interface de ligação influencia a resistência mecânica da junção. Essa grande influência da geometria encontrou embasamento em modelos teóricos que foram confirmados.

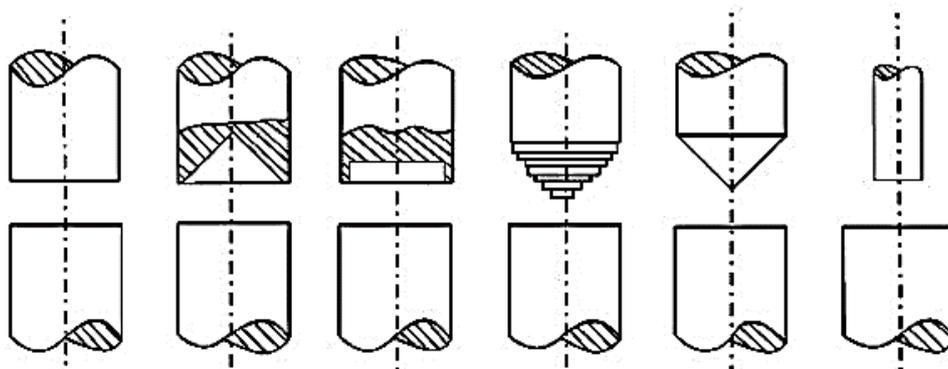
Khan (2011) realizou pesquisas com objetivos de analisar diferentes geometrias de pinos fabricados com a liga de alumínio 6061-T6 que foram soldados em pinos de aço inoxidáveis AISI 304. Comparou os resultados obtidos nos ensaios de tração e constatou um aumento da resistência mecânica da junção quando utilizado pino de alumínio liga AA 6061 com geometria cônica, comparativamente com o pino de geometria regular.

Basher (2013) desenvolveu trabalhos de pesquisa de doutorado utilizando o processo de soldagem por fricção convencional na soldagem dos materiais dissimilares liga AA 6061 com YSC-Alumina e também obteve resultados que

confirmaram a melhora considerável das propriedades mecânicas da junção quando utilizado pino cilíndrico com geometria de ponta cônica.

Ambroziak (2003), realizou diversos estudos relacionados a soldagem por fricção com diferentes tipos de aços e ligas de alumínio. Em uma das suas pesquisas analisou a interface de ligação utilizando pinos com diferentes geometrias e comparou com os resultados obtidos nos ensaios de tração e constatou que a geometria do pino influencia na resistência mecânica da junção. A figura 3.21 mostra estas geometrias.

Figura 3.21 – Diferentes geometrias de superfícies soldadas por fricção.



Fonte: Ambroziak (2003).

3.9.5 Diâmetro da peça e sua influência no processo

O diâmetro do material ou peça cilíndrica que será unida por SFR é uma variável que deve ser levada em consideração na análise inicial para predefinição dos parâmetros do equipamento. Maiores diâmetros resultam em aplicações de maiores pressões e tempos para que possa ocorrer a elevação da temperatura em toda a superfície representada pela interface de ligação.

As estruturas metalúrgicas produzidas na interface são geralmente resultado da elevada temperatura de deformação. Para que ocorra difusão em toda a superfície de ligação proporcionando a formação de uma junção com ótimas qualidades estruturais, torna-se necessário realizar testes utilizando diferentes

parâmetros de pressão, tempo, velocidade de deslocamento, considerando alteração do diâmetro. Caso o diâmetro não seja considerado no momento da definição dos parâmetros, pode-se utilizar um tempo curto demais, ou longo demais durante a soldagem.

Testes experimentais durante este trabalho de doutorado demonstraram que essa variável quando alterada para mais ou para menos, precisa ter ajustados novamente os valores de tempo e pressão. Diâmetros excessivos com valores de pressão e tempos reduzidos podem fazer com que não ocorra completa difusão na interface de ligação. Por outro lado, diâmetros muito pequenos com valores de pressão e tempo exagerados podem levar a formação de compostos intermetálicos na interface, fragilizando a junção.

3.10 Mecanismo de soldagem por fricção

O processo de soldagem por fricção envolve duas fases distintas, dependentes uma da outra, responsáveis pela formação da interface de ligação, propriedades mecânicas, dureza e qualidade da junção: (a) a fase de aquecimento e (b) a fase de forjamento.

(a) Fase de aquecimento

É a fase mais importante do processo, responsável pela transformação de energia mecânica em energia térmica. Quando as peças são colocadas em contato, ocorre atrito entre as superfícies e fortes adesões em vários pontos de forma constante. A pressão elevada faz com que o torque atinja seu valor mais alto. As adesões fortes entre as asperezas formam junções que podem ser mais resistentes que os substratos. O movimento tangencial entre as superfícies quebra essas junções, resultando em transferência de massa e geração de calor.

O tamanho dos fragmentos aumenta até se tornar uma camada contínua plastificada. Neste momento poderá ocorrer a formação de fase líquida.

Durante este período o pico do torque diminui até atingir valores mínimos que permanecem razoavelmente constantes enquanto o material é aquecido e forçado contra a superfície do outro material (BASHER, 2013).

Ao encerrar a aplicação de pressão P_1 durante o tempo t_1 , ocorre o pico mais alto da temperatura, que começa a diminuir a partir da frenagem da rotação.

(b) Fase de forjamento

Esta fase ocorre imediatamente ao encerramento da fase de aquecimento do material, quando é frenada a rotação e aplicada pressão P_2 durante um tempo t_2 . A pressão é aumentada substancialmente para que ocorra a união dos materiais por pressão. No momento da aplicação da pressão de forjamento, a temperatura encontra-se no seu valor máximo, próxima da temperatura de forjamento a quente da liga, isto possibilita a obtenção de uma junção estrutural com melhores qualidades e propriedades mecânicas (NEELAN, 1984).

Estudos relacionados a soldagem por difusão tem mostrado que a utilização de pressões mais elevadas tem influenciado de forma positiva na qualidade das junções obtidas por este processo. A resistência a quente do material estabelece um limite acima da pressão de forjamento do material (NEELAN, 1984).

Pressões muito baixas não expõem impurezas e não consolida a soldagem. Por outro lado, pressões muito elevadas resultam em rebarbas exageradas e desperdício de material desnecessariamente (NEELAN, 1984). Ao considerarmos alta produtividade do processo, produção de milhares de peças por dia, torna-se necessário sempre que possível a otimização do processo com utilização correta de parâmetros, principalmente referente a pressão de forjamento.

Rich e Roberts (1971), descreveram teoricamente o movimento do material durante a fase de forjamento no processo de soldagem por fricção. Eles

observaram que a forma com que o material se deforma e se dispersa na interface de ligação prova não ser decorrente apenas da pressão axial aplicada, mas também é função do raio no início da deformação plástica quando aplicada essa pressão. Portanto, dentro de um consenso geral, a pressão aplicada não é suficiente para controlar a remoção de óxidos, e evitar a contaminação da interface de ligação.

3.10.1 Mecanismo de ligação

O mecanismo de ligação na soldagem de materiais dissimilares por fricção é muito complexo, pois envolve uma série de fatores que incluem propriedades físicas, mecânicas, energia da superfície, estrutura cristalina, solubilidade mútua, e compostos intermetálicos que influenciam no mecanismo de ligação (FUKUMOTO et al., 2010). É provável que algumas ligações ocorram em regiões estreitas da interface como resultado da mistura mecânica e difusão atômica. As propriedades desta camada pode ter um efeito significativo nas propriedades da junção solda por fricção. A mistura mecânica e o entrelaçamento entre os materiais também contribuem para a ligação. A complexidade que envolve todos os elementos responsáveis pela ligação faz com que seja muito difícil prever a soldabilidade entre dois materiais. A soldabilidade para uma determinada combinação de materiais deve ser estabelecida após a realização de uma série de testes definidos para este objetivo (KIMURA et al., 2003).

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 (OLSON et al., 1992).

Diversos autores descrevem em seus trabalhos que a difusão é o principal mecanismo de ligação entre os materiais no processo de soldagem por fricção pelas características e variáveis aplicadas ao processo, como tempo, pressão e

temperatura, que faz com que aumente a taxa de difusão na interface de ligação, mesmo para temperaturas inferiores a 400°C.

Segundo Fukumoto et al (1997, 1999), o mecanismo de ligação é a difusão. Na soldagem do alumínio com o aço inoxidável, os filmes de óxidos são eliminados dentro de poucos segundos através da rebarba, criando uma superfície de contato nova com alto grau de adesão, seguida da ligação por difusão.

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. (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.

Ylbas et al. (1994) refere-se à difusão como mecanismo de ligação quando relata que a espessura da camada intermetálica formada pela difusão na soldagem do alumínio com o aço, não deve exceder a faixa de 0,2µm a 1,0µm. Acima desse intervalo, serão produzidas soldas com baixa resistência mecânica. Também enfatiza o mecanismo de difusão quando afirma que a formação de camadas de óxidos gera uma barreira e dificulta a difusão.

Monteiro (2006) desenvolveu seu trabalho de soldagem por fricção rotativa convencional envolvendo as ligas AA 5052 E AA 6351 T6 com o aço inoxidável AISI 304. O mecanismo de ligação entre os materiais dissimilares considerados após a obtenção dos seus resultados, foi o mecanismo de difusão.

Zepeda (2001) também define a difusão como o principal mecanismo de ligação entre o alumínio 6351 T6 e o aço inoxidável 304. Segundo ele, a interdifusão não é o único mecanismo envolvido na formação da camada intermetálica na soldagem por fricção, existem outros mecanismos como a mistura mecânica, mas que ainda precisam ser estudados e totalmente compreendidos quanto as influencias que exercem sobre a resistência mecânica da junção.

No *Welding Handbook* (AWS, 1991), 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.

3.10.2 Coeficientes de fricção

Embora os coeficientes de fricção sejam tabelados para materiais a certas temperaturas, estes coeficientes são descritos mais completamente pelo movimento dos materiais e sua interação com a superfície oposta. Os coeficientes de fricção têm sido descritos como estáticos ou dinâmicos. Na verdade o tipo de movimento é muito importante para o coeficiente de fricção que dominará o desenvolvimento da força de fricção (JACOBY, 1991).

O coeficiente de fricção estático descreve qual é força necessária para superar a inercia e colocar o corpo em movimento.

Atualmente sabemos que o coeficiente de fricção é devido em parte ao coeficiente de adesão, onde este coeficiente é uma função da dureza de penetração, da área real de contato e das forças de compressão na superfície de ligação (JACOBY, 1991).

Dessa forma, o coeficiente de fricção cinético é um composto das interações que ocorrem na interface, incluindo a adesão e deformação das asperezas (JACOBY, 1991).

De acordo com Kragel'skiy e Vinogradova (1955), existe uma série de fatores que influenciam o coeficiente de fricção:

- a) A natureza do material e a presença de filmes nas superfícies de fricção (óxidos, lubrificantes, contaminantes);
- b) Rugosidade e acabamento das superfícies;
- c) A área de contato da superfície, coeficiente de sobreposição;
- d) A magnitude da força de pressão normal;
- e) As temperaturas das superfícies em contato;
- f) A rigidez e a elasticidade das superfícies de fricção;
- g) A velocidade relativa das superfícies em contato;
- h) A velocidade de aplicação da carga;
- i) A duração do contato sem movimento;

Dentre esses fatores, a natureza dos materiais, a pressão dos filmes na superfície, a rigidez e a elasticidade são de extrema importância (KHAN, 2011).

Diversas pesquisas têm provado que o coeficiente de escorregamento não permanece constante durante o processo. Ele varia não só em função da pressão de fricção, mas também devido a outros fatores (KRAGEL'SKIY; VINOGRADOVA, 1956).

Segundo Duffin et al (BHUSHAN et al,1991), no caso do coeficiente de fricção de deslizamento entre a fricção de aço sobre aço, o coeficiente de fricção pode

variar de 0,1 a 1 e maior, dependendo das condições existentes durante a realização da soldagem. Tendo em vista que a fricção é um fenômeno físico complexo, e depende de muitos fatores combinados, não é possível descrever a fricção como um parâmetro constante para uma dada combinação de materiais.

Segundo Bhushan et al. (1991), no deslizamento entre corpos em contato, sabe-se que o coeficiente de atrito depende de vários fatores, tais como: interação Coulombiana entre as superfícies, propriedades dos materiais em contato, natureza das superfícies, condições de medição, velocidade de deslizamento, carga aplicada, ação de lubrificantes, sendo por este motivo, difícil de obter resultados exatos sobre o coeficiente de atrito para uma dada combinação de materiais.

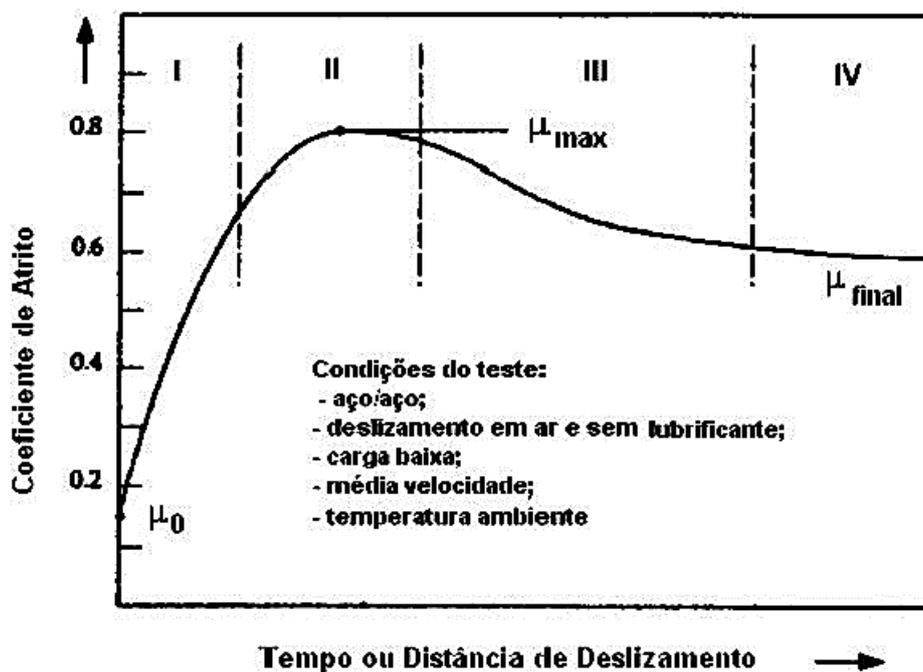
Larsen-Basse (1992), em seu trabalho intitulado *Introduction to friction*, afirma que as partículas desgastadas interferem no valor do coeficiente de fricção. Segundo o autor, as aglomerações de pequenas partículas provenientes do desgaste atuam como um terceiro corpo na fricção, pois elas podem rolar ou agir como indentadores na interface de contato, deformando plasticamente as superfícies dos materiais em contato (SCZANCOSKI, 2005).

Para Larsen-Basse (1992) e Decker, E. R. F. et al (CZICHOS, 1992), a presença de camadas de óxidos naturais na superfície dos materiais, cujas espessuras dependem das reatividades dos materiais com o ambiente também interferem de forma significativa no coeficiente de fricção. A camada de óxido, em algumas situações pode reduzir as forças de adesão na interface de contato entre os materiais. Se a dureza da camada de óxido possuir um valor menor que a do metal, ele atuará como um filme lubrificante, reduzindo o atrito e o desgaste.

Segundo Czichos (1992), “os diferentes estágios cronológicos do deslizamento cronológicos friccionais” podem influenciar o comportamento do atrito. A Figura 3.22 mostra uma curva típica de fricção versus tempo ou fricção versus

distância no deslizamento metal/metal, sem ação de lubrificantes, na qual são observados quatro estágios onde temos diferentes coeficientes de atrito μ .

Figura 3.22 – Curva típica do coeficiente de atrito versus tempo ou coeficiente de atrito versus distância em metais.



Fonte: Czichos (1992).

Estágio I. Neste estágio o valor do coeficiente de atrito (fricção) é baixo ($\approx 0,1$). Este estágio depende da ação de baixas cargas aplicadas e da resistência de cisalhamento dos contaminantes na superfície e independe das combinações de materiais. Ocorre a remoção da camada superficial e um aumento da adesão em função de uma maior limpeza superficial. Ocorre também um aumento considerável nas interações entre as asperezas e as partículas desgastadas, podendo elevar o valor do coeficiente de atrito (SCZANCOSKI, 2005).

- Estágio II. Neste estágio é produzido um valor máximo para o coeficiente de fricção ($\approx 0,3$ a 1) para a maioria dos pares de metais em contato, o qual está relacionado com a máxima adesão, deformação das asperezas e um crescimento no número de partículas residuais que elevam a taxa de desgaste das superfícies em deslizamento (SCZANCOSKI, 2005).
- Estágio III. Ocorre uma diminuição do coeficiente de fricção, provavelmente devido à formação de uma camada superficial protetora triboquímica ou por um decréscimo nos processos de sulcamento e deformação das asperezas (SCZANCOSKI, 2005).
- Estágio IV. É caracterizado pelo estado estacionário interfacial das condições tribológicas, conduzindo a valores quase constantes do coeficiente de fricção, à medida que a superfície torna-se polida (SCZANCOSKI, 2005).

Ambroziak *et al* [2012], realizou pesquisas relacionadas ao coeficiente de fricção em elementos tubulares soldados por fricção. Em seu trabalho ele concluiu que o coeficiente de fricção é dependente em grande parte da força de pressão e da temperatura, e que os valores máximos do coeficiente de atrito foram obtidos no período inicial do processo, quando a temperatura na interface de ligação não excedeu a 250°C . Neste período, o coeficiente de atrito variou de $0,57$ a $0,83$ dependendo dos parâmetros utilizados.

Sluzalec (1990) usou em seu modelamento matemático a temperatura como sendo dependente do coeficiente de fricção para determinar distribuições de temperatura e deformações na soldagem por fricção do aço de baixo carbono.

Moal e Massoni (1995), Zhang *et al.* (2006) e Vairis (1997), apresentaram diversos trabalhos de modelamentos analíticos com diferentes materiais utilizando o processo de soldagem por fricção. Em seus estudos perceberam a

importância e influência do coeficiente de fricção no processo, descrevendo-o como dependente da rotação, pressão aplicada e temperatura.

Li et al. (2012) em seu trabalho que analisou a geração de calor por fricção e o comportamento da difusão atômica durante a soldagem por fricção, verificou a existência de dois estágios referentes ao coeficiente de fricção. O primeiro estágio relaciona o coeficiente de fricção com a existência de materiais abrasivos existentes nas superfícies dos materiais. O segundo estágio relaciona o coeficiente de fricção com a deformação plástica total sofrida pelos materiais em contato, demonstrando a influência na geração de calor na interface de ligação e a geração de novas superfícies isentas de impurezas e óxidos.

Trabalhos semelhantes também foram produzidos por outros autores aqui não relacionados que descrevem a importância do coeficiente de fricção, sua interação com outras variáveis do processo (pressão, tempo, velocidade de rotação), influência na elevação de temperatura na interface de ligação, e nos fenômenos que ocorrem na interface de ligação que são responsáveis pela resistência mecânica da junção.

4 A TEMPERATURA NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL

A temperatura é o parâmetro mais importante nos processos de soldagem no estado sólido termicamente ativado, pois a difusão varia exponencialmente com a temperatura. A sua distribuição na interface de ligação e os seus valores influenciam diretamente nas propriedades mecânicas e qualidade das junções estruturais, pois a deformação plástica e a fluência dependem fortemente dessa variável (ALVES, 2010).

4.1 Aspectos térmicos relacionados a soldagem por fricção

Modelos teóricos e métodos de medição da temperatura durante o processo de soldagem por fricção têm sido estudados e desenvolvidos para melhor compreensão da sua influência nas propriedades mecânicas resultantes do processo e, conseqüentemente, melhorar a qualidade das junções de materiais similares e dissimilares.

Lee (2003), Banker e Nobili (2002), Kuscu et al. (2009), Chmielewski et al. (2015), Misirli et al. (2012), Rich e Roberts (1971), Ruma et al. (2013), Khany et al. (2012), Yilbas e Sahin (2014), Fu et al. (2003), Seli et al. (2010b), D'Alvise et al. (2002), Lee et al. (2001), Kimura et al. (2010), Mackwood e Crafer (2005), Alves et al. (2012), Hosking et al. (1999), Seli et al. (2010a), Kuchuk-Yatsenko; Zyakhov (2002), e Kannan (2014), conduziram diversos estudos envolvendo a união de materiais dissimilares e escreveram artigos sobre as propriedades mecânicas, metalúrgicas, e efeitos térmicos nas peças soldadas por fricção.

Segundo Basher (2013), encontramos poucos trabalhos na literatura que foram elaborados tomando-se como base, dados experimentais de temperatura na interface de ligação das junções soldadas por fricção. A maioria deles assumem resoluções meramente analíticas do problema sem considerar os efeitos práticos. Entretanto, nos últimos anos foram desenvolvidos diversos modelos numéricos levando em consideração tanto os dados experimentais quanto numéricos.

A qualidade da solda e a resistência a tração da solda obtida por SFR de duas barras cilíndricas depende da distribuição da temperatura na interface de ligação. Na direção axial, a distribuição da temperatura em materiais similares é simétrica devido à similaridade dos valores de condutividade térmica das barras cilíndricas soldadas. Já no caso de combinações de materiais dissimilares, o deslocamento de calor será maior no material que apresentar maior condutividade térmica gerando aumento da temperatura e melhor distribuição do calor na ZTA (AHAMAD, 1996). Durante o movimento relativo das superfícies, uma quantidade significativa de calor é dissipada causando aumento da temperatura mesmo com valores pequenos de cargas e velocidades de deslizamentos (BURAKOWISKI; WIERZCHON, 1998).

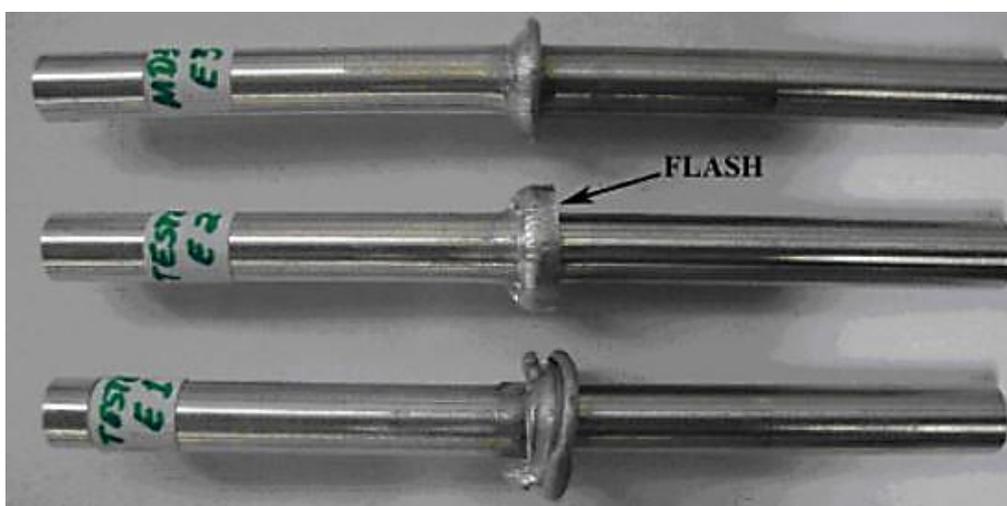
No processo de soldagem por fricção rotativa, o calor gerado na interface de ligação é obtido de forma indireta como consequência da transformação de energia mecânica em energia térmica e envolve fricção abrasiva, dissipação de calor, deformação plástica e interdifusão (OLSON et al., 1992). A temperatura é resultante da interação entre os parâmetros do processo (pressão, velocidade de deslocamento do pistão hidráulico, velocidade tangencial, velocidade de rotação, tempo), fica compreendida entre 0,6 e 0,8 T_f (ALVES, 2010).

Grong (1994), em seu trabalho intitulado *“Metallurgical Modelling of Welding”*, descreve a geração de calor na interface de ligação de juntas soldadas por fricção como dependente do coeficiente de fricção entre as superfícies de contato dos substratos, da pressão de fricção, da velocidade de rotação, e também do diâmetro da barra cilíndrica que está sendo soldada.

Durante a soldagem os materiais submetidos ao processo de fricção também trocam calor com componentes da máquina que estão em contato direto, como pinças de fixação e suportes. Embora sejam perdas pequenas, ocorrem com frequência em todos os equipamentos de soldagem por fricção, tanto durante a fase de aquecimento quanto na fase de resfriamento que tem início logo após o término de aplicação de P2 no tempo t_2 .

A distribuição da temperatura durante a soldagem por fricção é determinada por diversos fatores como a quantidade de calor na interface de ligação ou *heat input*, as propriedades físicas dos materiais que serão unidos e também pela formação da rebarba ou *flash* (Figura 4.1). O maior problema durante o modelamento do processo de soldagem por fricção está na obtenção da descrição precisa do calor gerado na interface de ligação (ZEPEDA, 2001).

Figura 4.1 - Diferentes formatos e aparências de rebarbas obtidos com o uso de diferentes parâmetros de pressão e velocidade, na soldagem da liga AA 1050 com o aço inoxidável AISI 304L.



Fonte: Produção do autor.

4.1.1 Efeito da temperatura na interface de ligação

Segundo Rombault (2011), a geração de calor na interface de ligação não é uniforme devido à variação da velocidade tangencial (máxima nas extremidades e mínima no centro), e a uma série de outros fatores como pressão, geometria de interface, rugosidade superficial, etc.

Ele relata em seus trabalhos que a distribuição da temperatura de forma irregular na interface de ligação faz com que a ZTA se torne mais espessa do centro para a periferia. Também relata que a temperatura na região central de

uma junção soldada por fricção, envolvendo duas barras sólidas, não atinge a temperatura máxima ou até mesmo valores médios obtidos em outras regiões.

Uma junção dissimilar com essas características após a realização da soldagem pode apresentar uma série de defeitos, principalmente falta de união dos materiais nas regiões mais centrais.

Alves et al. (2012), em seu artigo intitulado “*Experimental Determination of Temperature During Rotary Friction Welding of Dissimilar Materials*” afirma que quando dois materiais dissimilares são unidos por SFR, como a liga de alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, o calor gerado pela fricção entre os dois materiais se difunde diferentemente em cada material. A condutividade do alumínio é três vezes mais elevada do que a do aço inoxidável AISI 304, o que influencia diretamente nas taxas de aquecimento e resfriamento que ocorrem durante o processo. As rugosidades das superfícies também podem gerar variações das taxas de aquecimento nos estágios iniciais da operação de soldagem e influenciar o mecanismo de difusão, que ocorre principalmente na fase de aquecimento.

Khan (2011) realizou diversas comparações de dados experimentais com dados obtidos por análises de elementos finitos em seus estudos relacionados a soldagem da liga AA 6061 e o aço inoxidável AISI 304. Os resultados obtidos por ele demonstraram que ocorre elevação de temperatura quando o tempo de fricção aumenta. Valores de temperatura calculados coincidiram com os valores obtidos experimentalmente.

Para ele a temperatura na interface de ligação é de extrema importância para o entendimento do processo de soldagem por fricção, visto que interfere diretamente nos valores de resistência mecânica da junção obtida. A formação de compostos metálicos aumenta quando a temperatura excede determinado valor.

Alves (2010) realizou estudos de caracterização mecânica e microestrutural de junções dissimilares entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 L. Analisando os resultados dos testes de tração e comparando-os com os valores de pressão, também verificou que a temperatura influencia diretamente nas propriedades mecânicas finais de junções obtidas por SFR. Fixados parâmetros de P1, t2, velocidade de rotação, e variando os valores de t1, concluiu que existe um tempo t1 (fase de aquecimento) ideal para a perfeita união dos materiais soldados por este processo.

Este tempo, interagindo com os outros parâmetros fixados, resulta na temperatura ideal para ocorrência da perfeita união dos materiais. Uma temperatura com valores inferiores impossibilita a formação perfeita da junção em função da difusão e mistura mecânica. Por outro lado, uma temperatura acima deste valor, possibilita a formação imediata e excessiva de compostos metálicos na interface de ligação causando a sua fragilização.

Para Alves (2010), as maiores taxas de aquecimento ocorrem nos primeiros cinco segundos da primeira fase de soldagem (fase de aquecimento). O conhecimento das curvas de temperatura para determinadas combinações de materiais pode ser utilizado para otimização e qualificação de parâmetros, reduzindo tempo de paradas para setup quando ocorre a necessidade de utilizar equipamentos com diferentes características, fornecidos por diferentes fabricantes.

4.1.2 Distribuição da temperatura na interface de ligação

O entendimento de todo o processo de soldagem por fricção, inclusive dos principais mecanismos responsáveis pela perfeita ligação entre dois materiais similares ou dissimilares, depende do conhecimento de como ocorre a distribuição da temperatura na interface de ligação.

De uma forma geral, quando falamos de soldagem por fricção rotativa convencional, consideramos a união de duas superfícies cilíndricas em contato

com o mesmo diâmetro, sejam materiais similares ou dissimilares. A geração de calor pelo atrito inicia-se nas rugosidades das superfícies em contato e depois se dissipa para outras regiões da superfície no sentido radial e também no sentido longitudinal.

Segundo Kuchuk-Yatsenko e Zyakhov (2002) a principal característica da soldagem por fricção de metais dissimilares e ligas é a assimetria da temperatura com a deformação plástica. A adesão das superfícies que estão sendo unidas depende da temperatura presente nestas superfícies e do seu deslocamento por meio da fricção. O aumento da temperatura na interface de ligação e o impacto da deformação aumentam consideravelmente as taxas de difusão atômica.

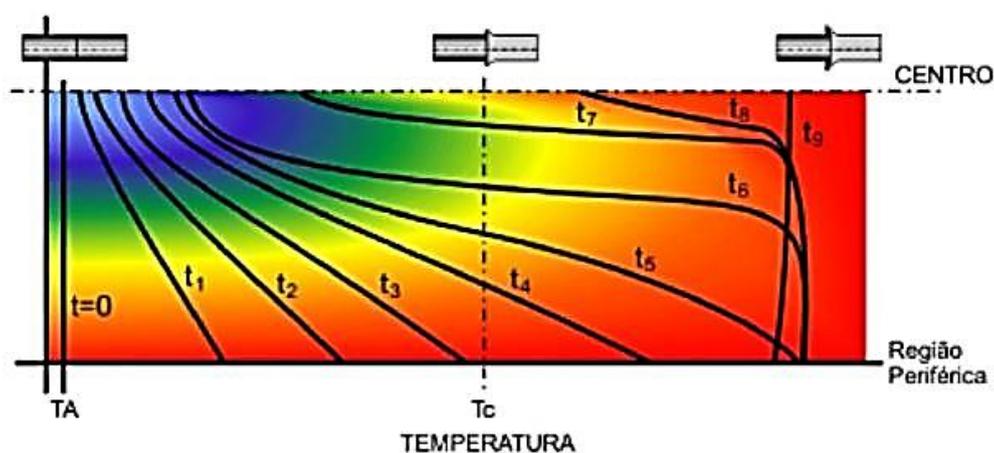
Para Basher (2013), a energia utilizada para vencer as forças de fricção durante o processo de soldagem por fricção, primeiro é transformada em calor nas superfícies de contato das peças e nos pontos de contato. As temperaturas nestes pontos caem rapidamente em função da dissipação de calor ao redor do material.

Basher (2013) também afirma que as propriedades mecânicas dos materiais são dependentes da temperatura e dos gradientes de temperatura que ocorrem durante o processo. A maior elevação de temperatura ocorre durante a 1ª fase de soldagem, a fase de aquecimento.

Yilbas e Sahin (2014), em seu trabalho intitulado "Thermal and Metallurgical Characteristics", analisou a energia térmica gerada durante a soldagem por fricção de duas barras metálicas sólidas e formulou uma série de equações baseadas na condução de calor de Fourier. As soluções analíticas apresentadas por ele buscam justificar a importância da elaboração de modelos matemáticos representativos dos fenômenos térmicos que ocorrem na interface de ligação, e que influenciam diretamente na qualidade das soldas obtidas pelo processo de soldagem por fricção.

Fukumoto et al (2010) realizou diversos estudos sobre o deslocamento de calor nas interfaces de ligação soldadas por fricção. Em seu modelo, afirma que a temperatura inicial é maior na periferia devido à grande velocidade tangencial, e depois se estende para a região central da interface de ligação à medida que aumenta o tempo de aquecimento ($t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9$). Após determinado tempo, a diferença entre as temperaturas passa a ser muito pequena, principalmente no lado do alumínio que possui alta difusividade térmica (NIKOLAEV; OLSHANSKY, 1977). Na Figura 4.2 pode ser visto o modelo atribuído a Fukumoto.

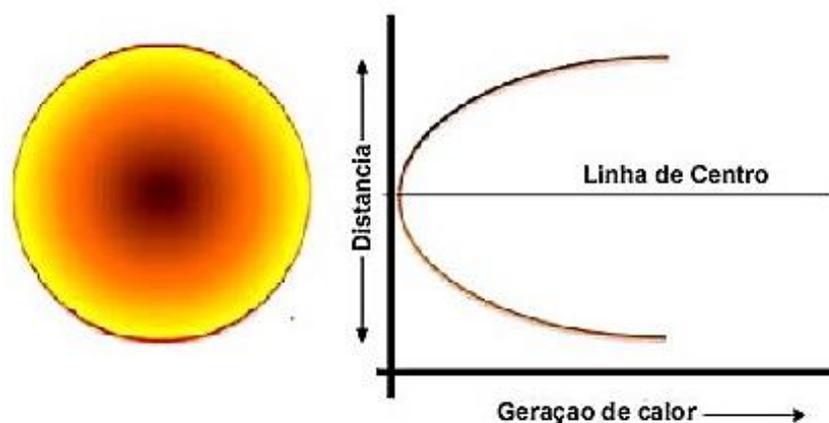
Figura 4.2 - Distribuição da temperatura na interface de ligação em diferentes tempos:
 TA – Temperatura Ambiente; Tc - Temperatura crítica.



Fonte: Adaptado de Fukumoto et al (1997).

Khan (2011) relata em seu trabalho que a geração de calor é menor no centro da solda e aumenta radialmente à medida que ocorre aumento dessa distância, como ilustrado na Figura 4.3. Segundo o autor, essa variação da geração de calor ocorre devido à diferença na velocidade relativa, que aumenta radialmente do centro da solda para a periferia na interface de ligação.

Figura 4.3 - Ilustração da geração de calor na interface de ligação mostrando que o aumento da temperatura ocorre radialmente, à medida que se distancia do centro.



Fonte: Adaptado de Khan (2011).

Ele também realizou uma análise da variância da temperatura na interface de ligação e verificou que tanto o crescimento quanto a formação de camadas de compostos intermetálicos dependem de forma com que é distribuída a temperatura na interface de ligação durante a soldagem por fricção. A geração de calor excessiva na interface leva a formação de compostos intermetálicos que são responsáveis pela fragilização das junções. Em seu trabalho relata que o tempo de fricção é a variável com maior impacto sobre a temperatura na interface de ligação, contribuindo com 74%.

Para Zepeda (2001), a distribuição da temperatura durante a soldagem por fricção é determinada por diversos fatores como a entrada de energia, propriedades termo físicas dos materiais base que estão sendo unidos e também pela formação da rebarba. O problema chave durante o modelamento do processo de soldagem por fricção está em obter uma descrição precisa do calor gerado na interface de ligação.

De uma forma geral, quando são realizados testes de soldagem com objetivo de desenvolver ou otimizar parâmetros do processo e obtém-se resultados satisfatórios, com a junção rompendo no lado do alumínio, longe da interface

de ligação, sabe-se que os valores atribuídos a cada variável do processo estão corretos e que a interação entre eles permitiu que ocorresse a perfeita distribuição da temperatura na interface de ligação.

4.1.3 Análise Térmica

Durante a soldagem por fricção, a temperatura na interface de ligação aumenta rapidamente devido a extrema fricção e deformação plástica dos materiais em contato. Para calcular o perfil da temperatura são considerados a geração de calor por fricção na interface de ligação, a transferência de calor, a geração de calor por deformação plástica e a perda de calor para o meio ambiente (SELI et al., 2010).

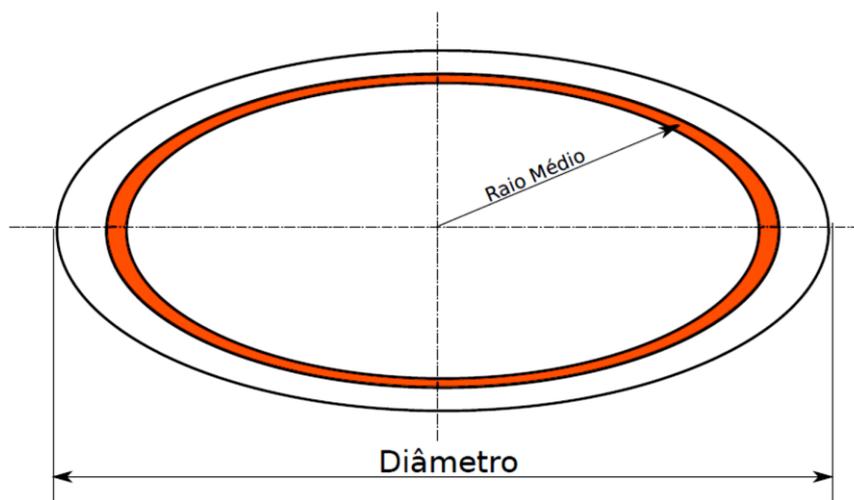
Os modelos analíticos são de grande complexidade e, embora se aproximem dos valores reais, ainda apresentam dispersões de valores decorrentes de fatores que ainda são desconhecidos e não foram bem esclarecidos, como é o caso dos mecanismos de ligação envolvendo os processos de soldagem no estado sólido, no qual está inserido o processo de soldagem por fricção.

Cálculos realizados tem sido de grande importância para a compreensão do processo de uma forma geral. Mesmo que os valores obtidos não coincidam na sua totalidade com os resultados experimentais, tem demonstrado que algumas teorias referentes à dissipação de calor na interface de ligação estão corretas.

Cálculos realizados demonstram que a maior elevação da temperatura na interface de ligação no início do processo de soldagem por fricção não ocorre na região central, ou mesmo nas extremidades, mas sim em um raio médio próximo das extremidades, o que coincide com os resultados experimentais obtidos por diversos pesquisadores.

Na Figura 4.4 é mostrado um modelo caracterizando estas diferentes regiões, inclusive o raio médio, onde ocorre a maior elevação de temperatura durante a 1ª fase de soldagem, também conhecida de fase de aquecimento.

Figura 4.4 - Interface de ligação apresentando a região denominada de Raio Médio.



Fonte: Produção do autor.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

A escolha do aço inoxidável AISI 304L e do alumínio AA 6351-T6 se deu devido ao seu grande número de aplicações no setor aeroespacial, aeronáutico e nuclear, além de que, são materiais comerciais e produzidos no mercado nacional, sem a necessidade de importação, o que reduz de forma considerável os custos de produção.

Os materiais foram utilizados neste trabalho na forma de barras cilíndricas com 15,8 mm de diâmetro e 6000 mm de comprimento, fornecidas pela COPPERMETAL Com. de Aços e Metais Ltda., e cujas características básicas estão descritas no capítulo 2 desse trabalho.

5.1.1 Composições químicas

As composições químicas nominais fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Composições químicas nominais dos materiais (% peso).

Material	Elementos (% peso)							
Alumínio	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	1,30	0,50	0,10	0,80	0,08	-	-	0,22
Aço	Si	S	P	Mn	C	Cr	Ni	Cu
	0,48	0,01	01,03	1,90	0,02	18,05	8,59	0,41

Fonte: Coppermetal Com. de Aços e Metais Ltda. (2008).

5.1.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais nominais dos fabricantes estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas nominais dos materiais.

Material	Tensão (MPa)		Deformação (%)
	Escoamento	Ruptura	Máxima
Alumínio	255,0	290,0	10,0
Aço	351,0	786,0	33,5

Fonte: Coppermetal Com. de Aços e Metais Ltda. (2008).

5.2 Métodos

5.2.1 Preparação dos pinos para solda por fricção

(a) Conformidade química e mecânica dos materiais

O material adquirido na indústria local foi verificado quanto à composição química e propriedades mecânicas antes do início dos testes de soldagem por fricção.

A liga AA 6351-T6 foi analisada pelas técnicas: combustão direta (C, S), fotometria (P), volumetria (Cr), gravimetria (Ni, Si) e espectrometria de absorção atômica (demais elementos), para se obter sua composição química. Enquanto que, o aço inoxidável AISI 304L foi analisado pelas técnicas: combustão direta (C e S), gravimetria (Si e Ni), fotometria (P), volumetria (Cr) e espectroscopia de absorção atômica (Mn e Mo), para obtenção da sua composição química.

As análises das composições químicas dos materiais foram realizadas no Laboratório Químico de Caracterização de Metais da Divisão de Materiais (AMR), pertencente ao IAE-DCTA. Os teores dos elementos analisados para a amostra de alumínio encontram-se de acordo com o especificado para a liga AA 6351-T6 pela *Aluminum Association*, e os teores dos elementos analisados na amostra de aço encontram-se de acordo com o especificado para o aço inoxidável austenítico Cr - Ni AISI 304L conforme *ASM International*. Na Tabela 5.3 são mostrados os resultados dessas análises.

Tabela 5.3 – Composições químicas nominais dos materiais (% peso).

Material	Elementos (% peso)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni
Alumínio	0,96	0,22	0,02	0,46	0,58	0,005	0,006	0,02	<0,010
Aço	Si	S	P	Mn	C	Cr	Ni	Mo	Ti
	0,47	0,006	0,035	1,87	0,016	18,0	8,7	0,21	-

Fonte: Relatório Nº 4010-AMR-LQCM/2008.

Os ensaios mecânicos de tração dos materiais foram realizados no Laboratório de Propriedades Mecânicas – AQI, do IAE – DCTA, após terem sido usinados de acordo com a Norma ASTM – E 8M (ASTM, 2004). Na Tabela 5.4 são mostrados os resultados dos ensaios mecânicos de tração.

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas nominais dos materiais.

Material	Tensão (MPa)		Deformação (%)		Módulo de Elasticidade (GPa)
	Escoamento	Ruptura	Máxima	Ruptura	
Alumínio	297,25	323,68	8,0	14,0	69,76
Aço	354,69	643,79	48,0	63,0	177,10

Fonte: Relatório Nº DI10-07-PPM/2007

Os resultados dos ensaios de tração diferem um pouco dos valores tido como “nominais do fabricante”, mas atendem as especificações tanto da liga AA 6351-T6 quanto do aço inoxidável AISI 304L, de acordo com a *Aluminum Association* e o *Metals Handbook*, 10th Ed., vol. 1, ASM, 1990 AWS, respectivamente.

(b) Fabricação dos pinos

A fabricação dos pinos cilíndricos para soldagem ocorreu de acordo com a necessidade dos trabalhos desenvolvidos, porém tomou-se o cuidado de se utilizar sempre a mesma matéria prima e equipamento de usinagem.

Os pinos cilíndricos foram usinados em torno mecânico convencional e tiveram as suas dimensões verificadas e acabamentos superficiais na interface de ligação controlados. Isto é necessário para se evitar principalmente grandes variações de diâmetro e rugosidades superficiais na interface de ligação,

mantendo-se a regularidade das amostras, para que estas não interfiram nos resultados finais dos ensaios a serem realizados.

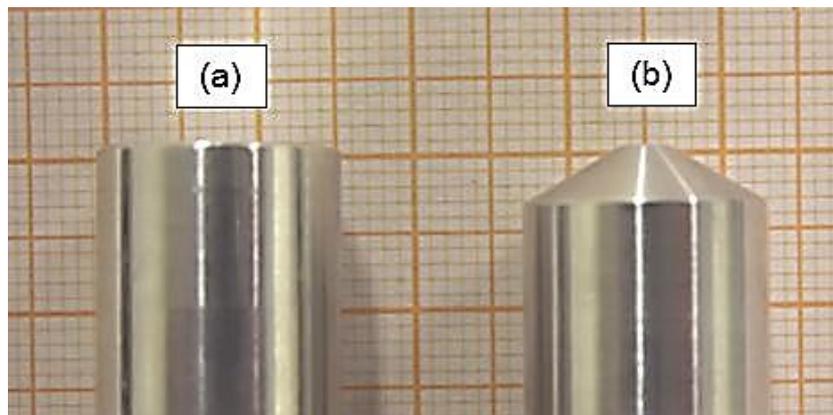
Os pinos cilíndricos de ambos dos materiais foram usinados no diâmetro de 14,8 mm e comprimento de 100 mm (aço inoxidável AISI 304L) e 110 mm (liga AA 6351-T6), com acabamento superficial $3,2 \mu\text{m}$, valor de rugosidade superficial obtido com o uso de ferramentas comuns durante o processo de usinagem em máquinas operatrizes como tornos mecânicos e fresadoras. A diferença do comprimento dos pinos de aço e alumínio (10 mm) se deve a compensação da redução do comprimento dos pinos de alumínio durante o processo de soldagem. Os pinos de alumínio foram fabricados ainda, com duas geometrias distintas em uma de suas extremidades, geometria regular e geometria cônica. Na Figura 5.1 e 5.2, são apresentados os pinos de aço e alumínio fabricados.

Figura 5.1 – Pinos cilíndricos fabricados de alumínio com geometria regular (a), geometria cônica (b), e aço inoxidável (c).



Fonte: Produção do autor.

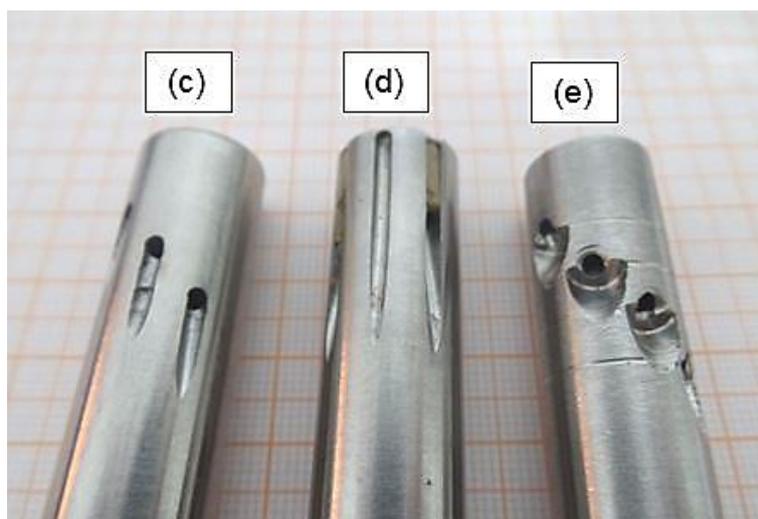
Figura 5.2 – Detalhe da geometria dos pinos de alumínio: (a) regular e (b) cônica.



Fonte: Produção do autor.

Para realização dos ensaios térmicos houve a necessidade de se fabricar pinos de aço com furações especiais para fixação de termopares do tipo J próximos a interface de ligação e ao longo do comprimento e estas furações foram realizadas em tornos CNC. A Figura 5.3 mostra alguns desses pinos, onde o pino (d) foi utilizado para medições em diferentes pontos na interface de ligação, a partir da região central até a extremidade do pino, os pinos (c) e (e) foram usados para medições no sentido longitudinal dos pinos.

Figura 5.3 – Pinos de aço com diferentes furações para fixação de termopares.



Fonte: Produção do autor.

(c) Limpeza e preparação das superfícies

No processo de soldagem por fricção, é de fundamental importância a realização da limpeza e preparação das superfícies dos materiais que serão unidos, principalmente quando se tratar de materiais dissimilares.

Após a operação de usinagem, realizou-se a limpeza das superfícies dos pinos com acetona PA e secagem com pano de algodão, esse procedimento visa eliminar possíveis elementos contaminantes como óleos, graxas, fluidos decorrentes da usinagem. Posteriormente, os pinos foram armazenados em dessecadoras.

Momentos antes da soldagem, os pinos passaram por uma limpeza química com uma substância denominada *deoxidizer*, onde os mesmos foram imersos nessa substância química por alguns segundos e, posteriormente, lavados em água limpa e secados termicamente. Esse processo teve como objetivo a remoção de óxidos superficiais antes do processo de soldagem e reduzir a variação dos valores de rugosidade superficial (Ra) em diferentes regiões da interface de ligação em função das diferentes velocidades tangenciais atingidas durante a usinagem em torno mecânico convencional.

A manipulação dos pinos durante os procedimentos de limpeza e preparação dos ensaios de soldagem foi realizada com luvas de silicone para evitar nova contaminação.

5.2.2 Obtenção das amostras soldadas

As amostras de soldagem por fricção rotativa convencional foram obtidas utilizando-se uma máquina de soldagem por fricção rotativa convencional, marca GATWICK, com velocidade de rotação (RPM) fixa de 3200 RPM, parâmetros de pressão (P1, P2), tempo (t1, t2), e velocidade de deslocamento do pistão variáveis. Na Figura 5.4 pode ser visto um equipamento semelhante ao utilizado para a realização deste trabalho.

Figura 5.4 – Máquina de soldagem por fricção rotativa convencional GATWICK.



Fonte: Gatwick (2015).

Para a definição prévia dos parâmetros de soldagem foram realizadas séries de testes variando os valores das pressões P_1 , P_2 , e dos tempos t_1 , t_2 . Após a operação de soldagem os corpos de prova dissimilares foram usinados em máquina CNC para realização de ensaios de tração. Os resultados obtidos foram analisados e possibilitaram alterações de parâmetros para melhoria da resistência mecânica da junção. Esta operação foi repetida diversas vezes até a obtenção dos parâmetros ditos ideais, onde a junção apresentou resistência mecânica superior a do material com menor resistência mecânica, a liga AA 6351 – T6.

A otimização dos parâmetros possibilitou a qualificação do processo e dos procedimentos de soldagem realizados para obtenção da junção dissimilar liga AA 6351-T6 e o aço inoxidável AISI 304L com propriedades estruturais.

Os procedimentos de soldagem e parâmetros qualificados foram utilizados para soldagem de pinos de alumínio com extremidades retas e cônicas em pinos de aços inoxidáveis AISI 304L com extremidades retas. A Tabela 5.5 apresenta um quadro resumo das denominações que será adotada para as amostras do processo SFR.

Tabela 5.5 – Amostras do processo SFR.

Denominação	Pino de Alumínio	Pino de Aço
Amostra 01	geometria regular	geometria regular
Amostra 02	geometria cônica	geometria regular

Fonte: Produção do autor.

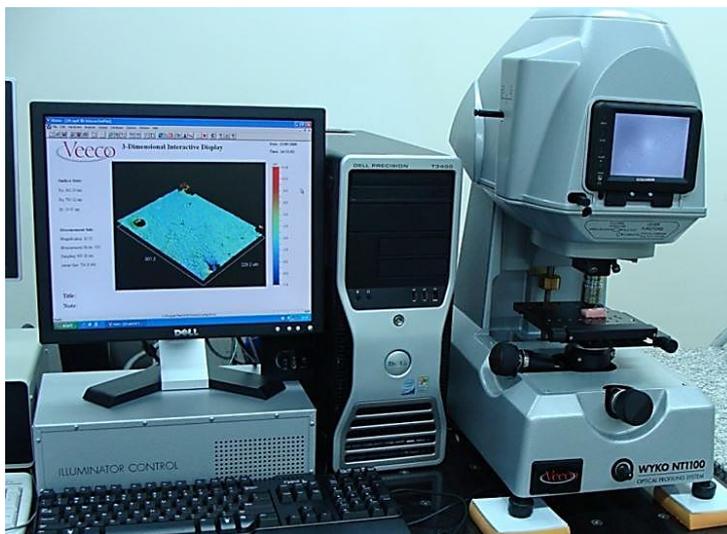
5.2.3 Análise da rugosidade das superfícies

Para a maioria dos materiais unidos por este processo não é necessária preparação prévia da superfície ou polimento como acontece no processo de soldagem por difusão, onde o controle da rugosidade superficial representa um dos parâmetros mais importantes. As superfícies podem ser forjadas, cortadas por meio de tesoura ou por meio de discos abrasivos de corte, visto que as junções serão de topo e haverá fricção entre elas (WAINER et al., 1992). Entretanto, quando se trata de junções de materiais dissimilares como o alumínio e o aço inoxidável, é fundamental a realização de uma boa preparação e limpeza das superfícies serem unidas a fim de se evitar que elementos contaminantes como água e hidrocarbonetos formem camadas superficiais extremamente tenazes durante a operação de soldagem capazes de reduzir a resistência estrutural da junção (OLSON et al., 1992).

Desta forma, foi realizado uma análise da rugosidade das superfícies dos pinos dos materiais que foram submetidos ao processo de soldagem por fricção e que formaram a interface de ligação. Utilizou-se para tal, o perfilômetro óptico a laser da VEECO, modelo Wyko NT 1100, localizado no Laboratório Associado de Sensores e Materiais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/INPE), Figura 5.5.

A análise das superfícies tanto do pino de alumínio quanto do pino de aço objetivou obter dados das superfícies antes e após a aplicação de decapagem química.

Figura 5.5 – Perfilômetro óptico a laser do LAS/INPE.



Fonte: Produção do autor.

5.2.4 Análise Macrográfica

Esta análise em particular, se desenvolveu durante toda a parte experimental deste trabalho, através de observações dos aspectos e das diferentes geometrias do “flash” em função dos parâmetros utilizados, ajustes do equipamento de soldagem por fricção, e uso de diferentes procedimentos para preparação dos pinos cilíndricos antes da operação de soldagem.

O desenvolvimento dos estudos com uso de pinos cilíndricos de alumínio com diferentes geometrias (regular e cônica), possibilitou uma análise quantitativa e qualitativa das junções dissimilares formadas pela união da liga AA 6351-T6 e aço inoxidável AISI 304L, onde verificou-se o consumo destes pinos cilíndricos de forma comparativa.

5.2.5 Análises mecânicas

(a) Ensaios de Tração

Os corpos-de-prova soldados foram usinados de acordo com a Norma ASTM – E 8M (ASTM, 2004), e submetidos a ensaios de tração em uma máquina da marca ZWICK 1474, localizado na Divisão de Química do Instituto de

Aeronáutica e Espaço (DCTA), utilizou-se uma célula de carga de 100 kN, a temperatura ambiente de 25°C, e com uma velocidade de ensaio de 3 mm/min. As Figuras 5.6 e 5.7, mostram respectivamente, as dimensões dos corpos de prova e a máquina de ensaios.

Figura 5.6 – Corpos-de-prova fabricados (dimensões em milímetros).



Fonte: ASTM E8M (2004).

Figura 5.7 – Máquina de ensaios de tração da AQI/DCTA.



Fonte: Alves (2010).

(b) Ensaios de microdureza Vickers

As junções soldadas foram cortadas no sentido transversal, embutidas numa matriz de baquelite, polidas e examinadas na região da interface (Figura 5.8).

Figura 5.8 – Amostras utilizadas para ensaios de microdureza.



Fonte: Produção do autor.

Para analisar as diferentes durezas na interface de ligação tanto do lado do alumínio quanto do lado do aço inoxidável e regiões próximas, foi utilizado um microdurômetro Vickers digital - Future -Tech Corporation (Japão), pertencente ao AMR/DCTA (Figura 5.9), com uma carga 300 gf (aço inoxidável) e 100 gf (alumínio) por um tempo de 10 segundos.

Figura 5.9 – Microdurômetro Vickers digital.

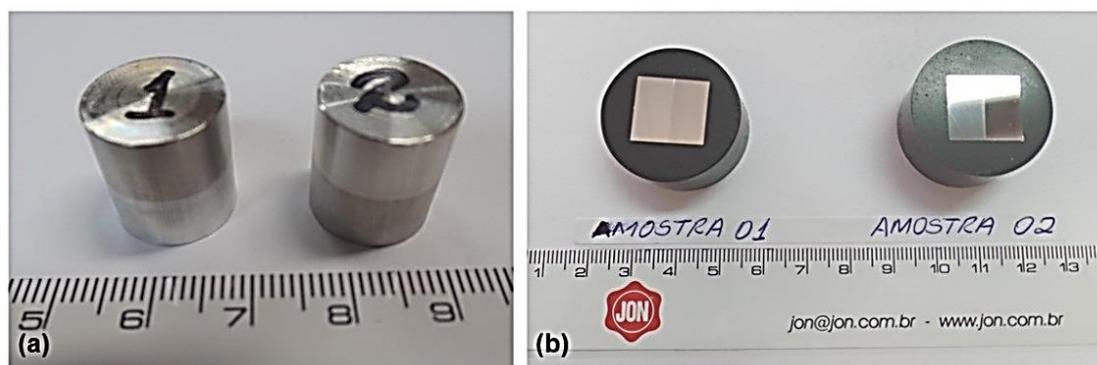


Fonte: FUTURE-TECH CORP (2015).

5.2.6 Análise Microestrutural e XPS

As amostras das junções soldadas foram cortadas no sentido longitudinal, embutidas a quente em resina de baquelite, lixadas, polidas e examinadas na região da interface, no lado do alumínio e no lado aço inoxidável AISI 304L de acordo com a norma ASTM-E3 (Figura 5.10). Primeiro o alumínio foi atacado com reagente Keller e analisado, depois o aço inoxidável foi atacado com reagente eletrolítico ácido oxalíco a 10% e analisado.

Figura 5.10 – Amostra 1 e 2 utilizadas para realização de ensaios metalográficos. (a) antes do embutimento e polimento; e (b) após embutimento e polimento.



Fonte: Produção do autor.

(a) Análise por microscopia óptica

Nesta análise procurou-se verificar a interface de ligação, a ZTA, e regiões próximas da interface, caracterizando a geometria resultante da junção, deformações plásticas na interface, lado do alumínio, que sofreu a maior deformação durante o processo, e possíveis alterações na microestrutura do aço inoxidável. Para tal utilizou-se o microscópio óptico da marca ZEISS, modelo AXIO Imager A2M, localizado na Divisão de Materiais do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (AMR/DCTA). Na Figura 5.11 é mostrado o equipamento utilizado para as análises micrográficas.

Figura 5.11 – Microscópio óptico do AMR/DCTA.



Fonte: Produção do autor.

(b) Análise por microscopia eletrônica

– Análise por MEV e EDX

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX), neste trabalho, foram feitas com o microscópio da marca JEOL, modelo JSM 5310, localizado no LAS/INPE (Figura 5.12). As imagens da interface da solda, região central e extremidades foram obtidas para verificar-se o mecanismo de ligação por fricção (difusão), e a espessura da camada intermetálica formada por difusão entre os materiais envolvidos no processo. Também foram analisadas as superfícies dos materiais fraturadas na interface de ligação durante os ensaios de tração.

Figura 5.12 – Fotografia do microscópio eletrônico de varredura.

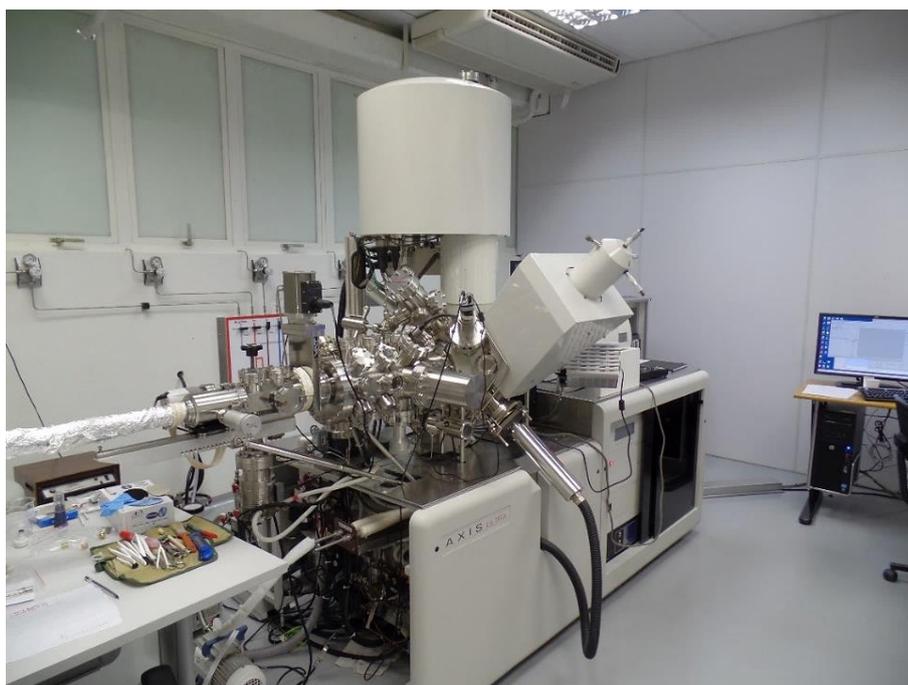


Fonte: Alves (2010).

(c) **Análise por XPS (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*)**

As análises por espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS), neste trabalho, foram feitas como equipamento marca KRATOS ANALYTICAL, modelo AXIS Ultra, localizado no LAS/INPE (Figura 5.13.). Este equipamento fornece quantitativamente todos os elementos químicos presentes na amostra, em profundidades da ordem de dezenas de nanômetros e com incerteza de fração centesimal da camada atômica. Seu objetivo foi de identificar os elementos Fe, Al e Cr na interface de ligação da junção.

Figura 5.13 – Fotografia do equipamento de análises por XPS, alocado no Lab. Associado de Sensores e Materiais – LAS/INPE.



Fonte: Produção do autor.

5.2.7 Análise térmica

O monitoramento da temperatura em tempo real durante a soldagem por fricção com as diferentes geometrias de pinos (pino de alumínio) foi realizado utilizando-se dois métodos diferentes: medição por termocâmara; e medição termopares.

(a) Medição por termocâmara

As medições por termocâmara, neste trabalho, foram feitas com o equipamento marca FLIR, modelo S60, pertencente a AIE/DCTA (Figura 5.14). Este equipamento possibilitou a filmagem e coleta de dados referentes ao deslocamento do fluxo de calor da linha de união para o lado do alumínio e da linha de união para o lado do aço inoxidável.

Figura 5.14 – Termocâmara usada nos ensaios.



Fonte: ThomasNet (2015).

Todos os dados coletados foram enviados a um notebook que forneceu em tempo real o gráfico da variação da temperatura durante o processo. Análise complementar foi realizada por um programa que processou os dados e possibilitou a medição de temperatura em pontos determinados na interface de ligação, e ao longo do comprimento dos pinos partindo-se da linha de união.

(b) Medição por termopares

As medições por termopares, neste trabalho, foram feitas com o sistema MGC PLUS - HBM, modelo TG 001 D, utilizou duas placas para medições de temperaturas (ML801B e AP-809), pertencente a AIE/DCTA (Figura 5.15).

O equipamento realizou medições e monitoramentos antes do início da operação de soldagem, durante e também após a soldagem para registrar

informações sobre a forma e velocidade com que ocorre o aquecimento e resfriamento na interface de ligação.

Figura 5.15 – Sistema MGC-PLUS – HBM utilizado para medições e monitoramento das temperaturas.

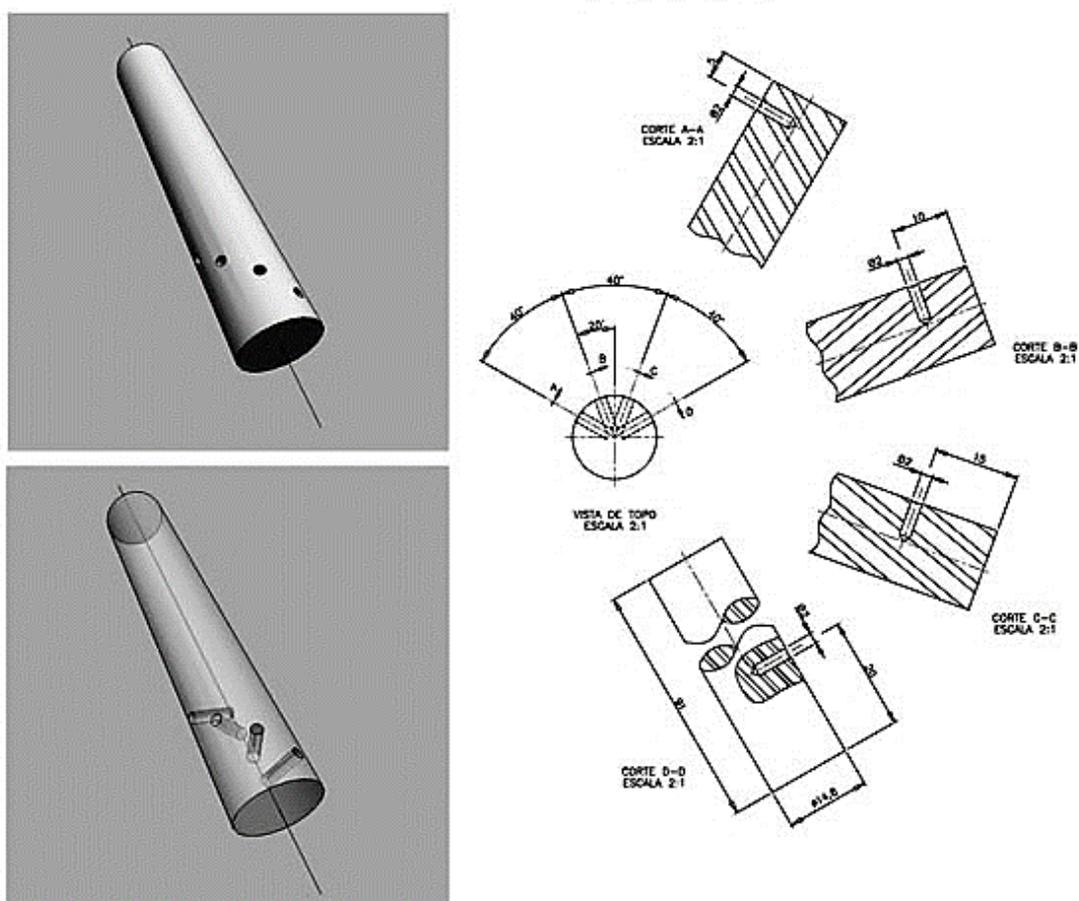


Fonte: HBM (2015).

Para a medição e monitoramento da temperatura durante a soldagem por fricção, foram utilizados termopares tipo J posicionados e fixados no pino de aço inoxidável AISI 304L em diferentes raios localizados a uma distância de 0,5 mm da interface de ligação, conforme pode ser visto na Figura 5.16 e Tabela 5.6.

Também, foram posicionados termopares em diferentes distâncias e profundidades para se analisar o deslocamento de calor no sentido do comprimento do pino de aço inoxidável, a partir da interface de ligação conforme mostra a Figura 5.17, Tabela 5.7, e Figura 5.18, Tabela 5.8, podem ser vistos os posicionamentos destes termopares.

Figura 5.17 – Posicionamento dos termopares em diferentes distâncias da interface de ligação no sentido do comprimento do pino de aço Inoxidável. Profundidades dos furos relativos a linha de centro da peça.



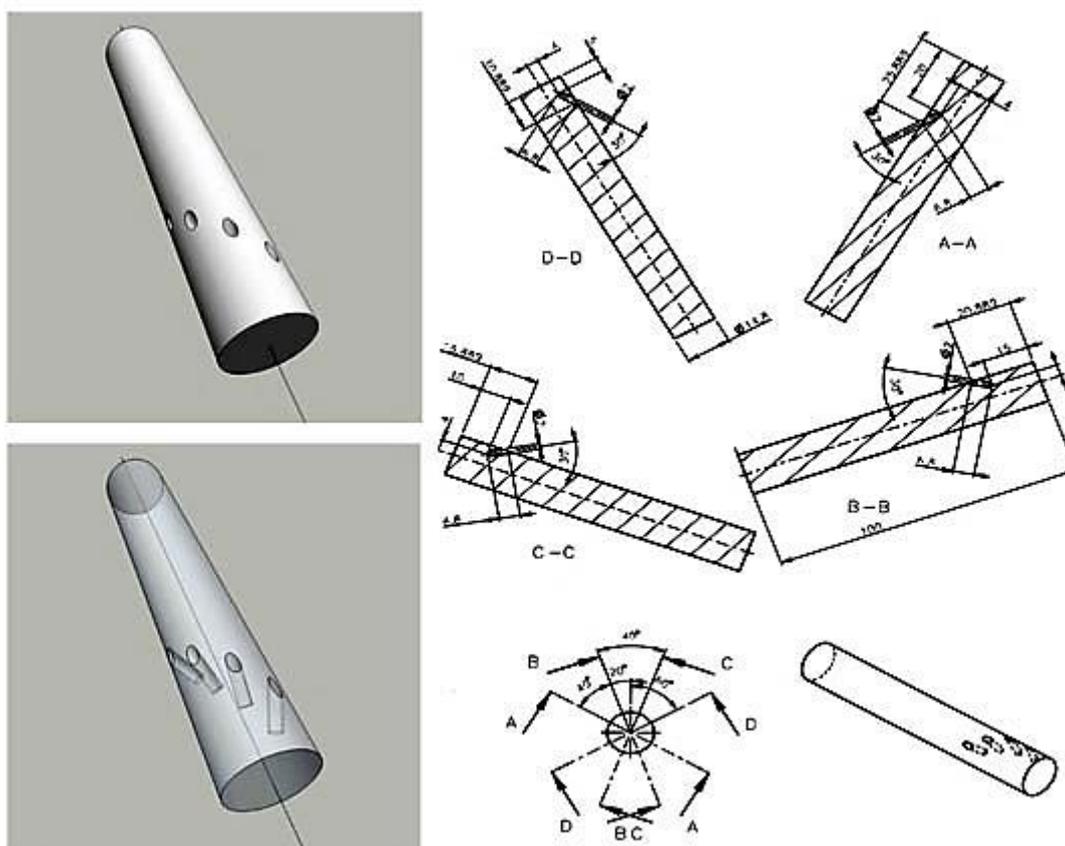
Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.7 – Posicionamento dos termopares em relação à interface de ligação no sentido longitudinal (pino de aço inoxidável).

TERMOPAR	Profundidade (mm)	LOCALIZAÇÃO (mm) *distância da interface
T1	7,4	5,0
T3	7,4	10,0
T4	7,4	15,0
T2	7,4	20,0

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.18 – Posicionamento dos termopares em diferentes distâncias em relação a linha de união das peças no sentido do comprimento do pino de aço inoxidável. Profundidades médias a partir da linha de centro da peça.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.8 – Posicionamento dos termopares em relação a interface de ligação no sentido longitudinal (pino de aço inoxidável).

TERMOPAR	Profundidade (mm)	LOCALIZAÇÃO (mm) *distância da interface
T1	4,0	5,0
T3	4,0	10,0
T4	4,0	15,0
T2	4,0	20,0

Fonte: Produção do autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Reiterando, a denominação adotada para as amostras do processo SFR segue a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Amostras do processo SFR.

Denominação	Quant.	Pino de Alumínio	Pino de Aço
Amostra 01	02	Geometria regular	Geometria regular
Amostra 02	02	Geometria cônica	Geometria regular

Fonte: Produção do autor.

6.1 Análise da rugosidade das superfícies

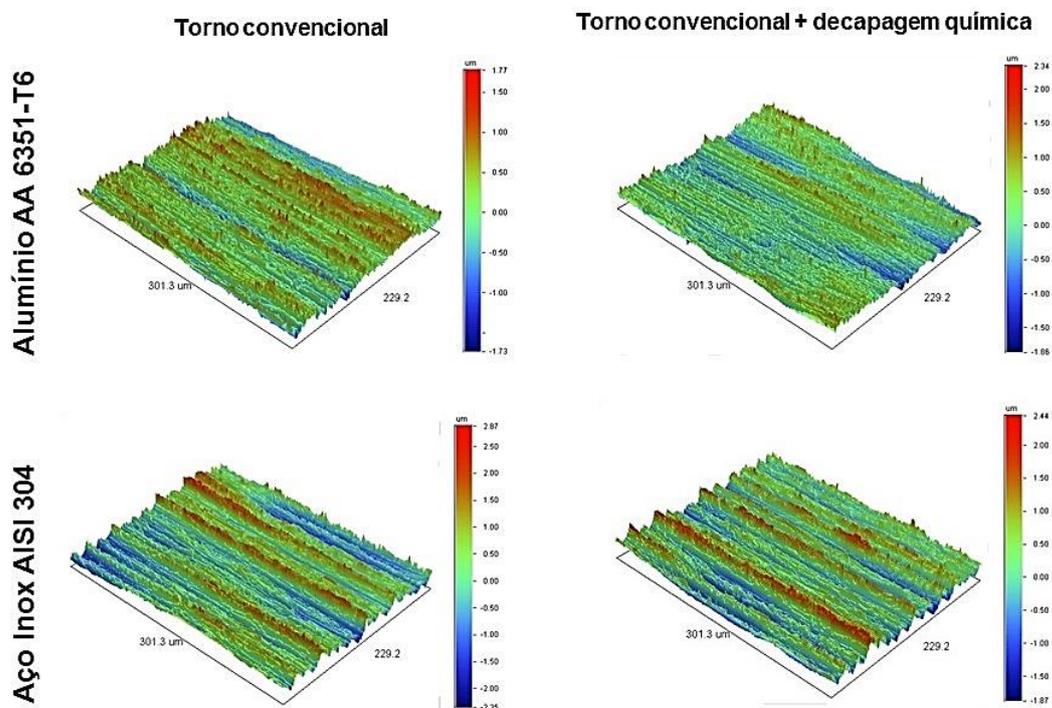
As análises realizadas com perfilômetro óptico a laser permitiu obter imagens em três dimensões de diversos pontos da superfície que representam a interface de ligação, tanto da liga de alumínio quanto do aço inoxidável.

Importante ressaltar que em todas as etapas deste trabalho, foram utilizados os mesmos procedimentos para usinagem em torno convencional e preparação dos pinos cilíndricos, incluindo equipamentos e materiais envolvidos no processo a fim de gerar pinos com as mesmas características químicas, físicas, microestruturais e valores de rugosidades superficiais semelhantes.

Na Figura 6.1 podem ser observadas as superfícies dos pinos da liga de alumínio e de aço inoxidável utilizados nesse trabalho, antes e após a aplicação da decapagem química.

Realizou-se também, um trabalho estatístico para determinar a rugosidade superficial (R_a) dos pinos antes e após a decapagem química. A título de comparação com o alumínio AA 6351-T6 utilizado neste trabalho, e verificação da eficiência destes procedimentos, foram realizadas análises nas superfícies de pinos cilíndricos fabricados na liga de alumínio AA 1050. A Tabela 6.2 e a Figura 6.2 apresentam esses resultados.

Figura 6.1 - Rugosidade superficial do aço inoxidável AISI 304L e da liga AA 6351-T6 antes e após a aplicação de decapagem química.



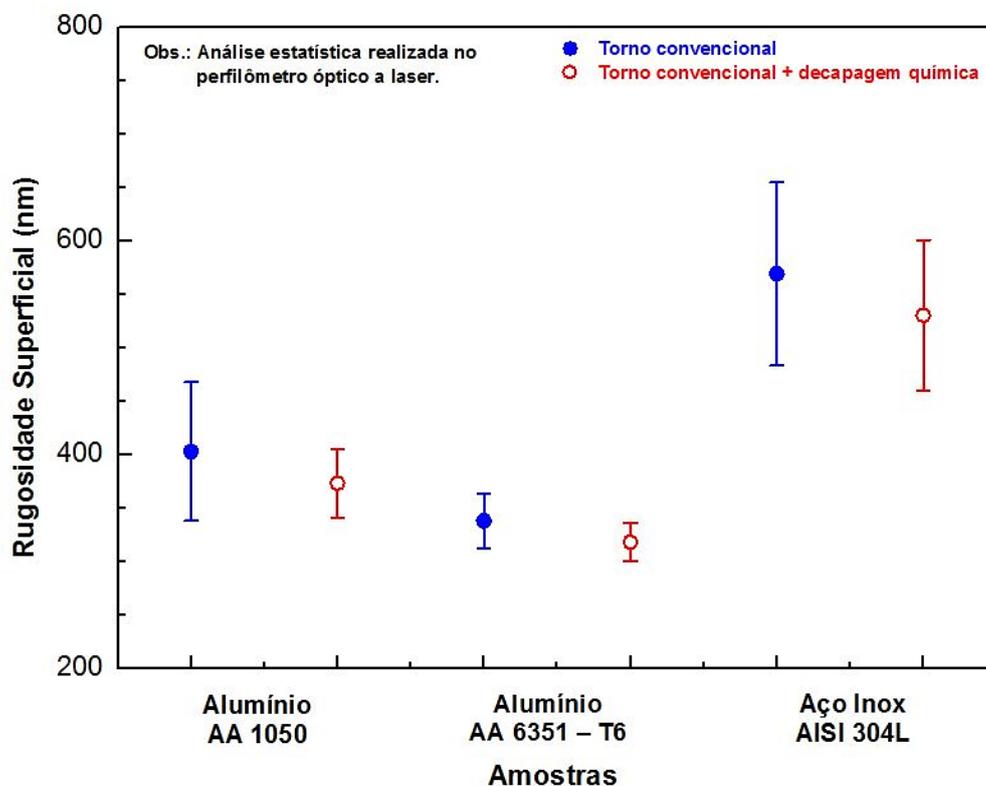
Fonte: Produção do autor.

Tabela 6.2 – Rugosidade superficial (Ra) dos pinos.

Pino	Ra (antes da decapagem)	Ra (após a decapagem)
Aço inoxidável AISI 304L	569,66 ± 85,58	530,97 ± 70,59
Alumínio AA 6351-T6	338,44 ± 25,61	318,48 ± 18,00
Alumínio AA 1050	403,33 ± 64,86	373,63 ± 32,22

Fonte: Produção do autor.

Figura 6.2 – Análise estatística da rugosidade superficial dos pinos de aço inoxidável AISI 304 L, alumínio AA 6351-T6 e alumínio AA 1050.



Fonte: Produção do autor.

Pode se observar que a decapagem química, além de eliminar as impurezas e óxidos superficiais, reduziu a rugosidade superficial dos pinos, tornando-os mais uniformes.

6.2 Análise Macrográfica

A análise macrográfica das junções soldadas nos forneceu informações importantes do processo SFR. A aparência do “flash” e a observação da redução de comprimento do pino fabricado com a liga de alumínio após a realização da soldagem possibilitaram a compreensão e entendimento de todo o processo.

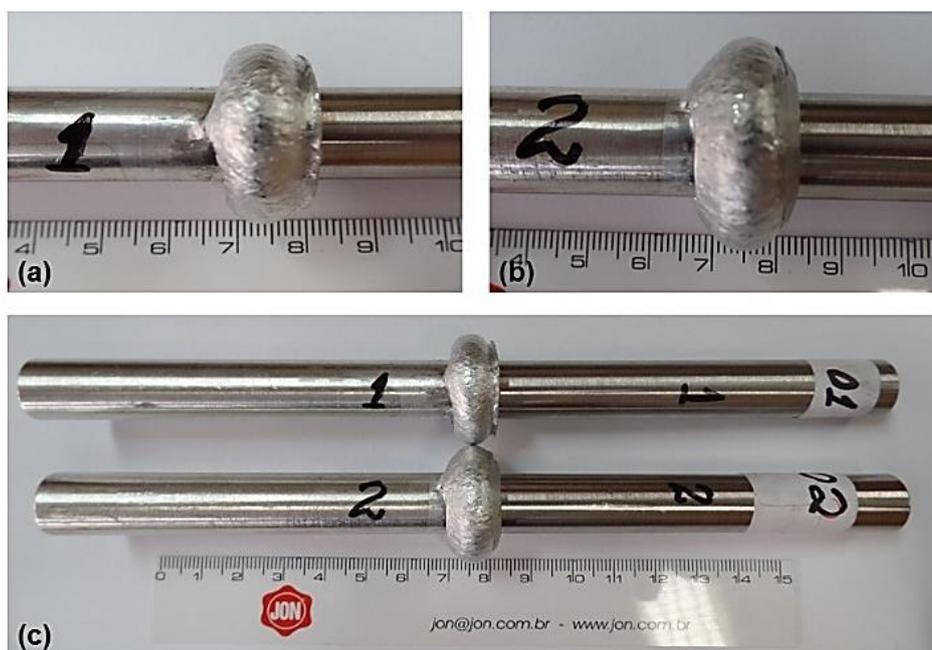
Na soldagem da liga de alumínio AA 6351-T6 com o aço inoxidável AISI 304L, foram realizados dezenas de ensaios utilizando diferentes parâmetros de P1, t1, P2, t2. As amostras com os melhores resultados dos ensaios mecânicos de tração, de uma forma geral, apresentaram geometria de “*flash*” semelhantes, formato anular, com aparência de deformação plástica uniforme em todo o seu contorno.

A aparência das junções dos pinos com geometria regular (amostra 1) e cônica (amostra 2) para a liga de alumínio – aço inoxidável são mostradas na Figura 6.3.

O “*flash*” formado utilizando-se o pino de alumínio com a geometria cônica apresentou formato uniforme ao redor de toda a circunferência da solda, semelhante ao obtido com a utilização do pino de alumínio com geometria regular, entretanto, a utilização deste pino fez com que ocorresse um maior consumo de material no sentido do seu comprimento, com redução de 24,5 mm, resultando em um “*flash*” com maior volume, conforme pode ser visto na Figura 6.3b e 6.3c. Enquanto que, no pino com geometria regular ocorreu uma redução de 17,5 mm no seu comprimento.

Durante as operações de soldagem observam-se diferentes formações de “*flashes*” quando utilizados diferentes parâmetros, entretanto, ficou evidenciado a grande repetitividade do processo quando utilizado os mesmos parâmetros na confecção de um número maior de peças durante a fase de otimização e qualificação, visto as mesmas aparências de “*flashes*” e resultados dos ensaios mecânicos de tração obtidos e analisados.

Figura 6.3 – Formato do “flash” das junções soldadas. (a) amostra 1; (b) amostra 2; e (c) comparação entre as amostras.



Fonte: Produção do autor.

Na soldagem por fricção rotativa do alumínio e suas ligas com o aço inoxidável AISI 304L, o aço inoxidável praticamente não sofre deformações devido a sua resistência mecânica, alta dureza, condutividade térmica, capacidade térmica, e alto ponto de fusão comparados com o alumínio. Isto pode fazer com que não ocorra a perfeita eliminação das impurezas e óxidos presentes na superfície, prejudicando a resistência estrutural da junção.

6.3 Ensaios mecânicos

A caracterização das propriedades mecânicas das junções soldadas por fricção foi um dos pontos mais importantes deste trabalho, visto que os resultados obtidos possibilitaram o entendimento de todo o processo, das suas principais características, da sua grande capacidade de repetibilidade, da influência de cada parâmetro de forma isolada, da dissipação térmica na interface de ligação

como resultante da interação destes parâmetros, da eficiência do equipamento, e da sua enorme capacidade no sentido de se produzir junções estruturais entre materiais dissimilares como o aço inoxidável AISI 304L e a liga de alumínio AA 6351–T6.

6.3.1 Ensaio de tração

Para a definição dos parâmetros utilizados no equipamento de soldagem por fricção rotativa, otimização do processo e qualificação dos procedimentos adotados, foram realizados 173 ensaios mecânicos de tração, onde foram analisados e considerados os valores referentes a tensões máximas suportadas pelas junções dissimilares (σ_R). A realização dos trabalhos foi dividida em três etapas:

- a) Etapa 1 – Definição prévia de parâmetros (110 ensaios);
- b) Etapa 2 – Otimização do processo (40 ensaios);
- c) Etapa 3 – Qualificação do processo e procedimentos de soldagem (23 ensaios).

Nas etapas 01 e 02 foram produzidos e ensaiados 02 corpos de prova para cada parâmetro analisado, e considerados apenas os pinos de alumínio com geometrias regulares. Na etapa 3 foram produzidos e testados corpos de prova confeccionados com os pinos de alumínio tanto com geometria regular quanto cônica. Para a qualificação da junção foram ensaiados 02 corpos de prova para cada parâmetro utilizado e mais 03 ensaios para confirmação dos resultados.

A maior parte dos ensaios mecânicos de tração foram realizados nas Etapas 1 e 2, e que tiveram como objetivo principal a definição prévia dos parâmetros de P1, t1, P2 e t2 para cada combinação dos materiais dissimilares liga de alumínio e aço inoxidável, com pino de alumínio de geometria regular, unidos pelo processo SFR. Importante ressaltar que os valores desses parâmetros não são fornecidos pela literatura devido às grandes variações de materiais,

ligas, diâmetros, e estar relacionado com as características do equipamento de soldagem fornecido por diversos fabricantes.

A alteração de uma ou mais variáveis envolvidas no processo implica de forma direta nas propriedades mecânicas da interface de ligação, gradiente de temperatura, e nos valores de RC (redução do comprimento do pino de alumínio). O acréscimo e/ou diminuição dos valores de P1, P2, t1, t2, ou mesmo, a velocidade de rotação, em equipamentos que permitam essa mudança, torna necessário à realização de novos estudos.

Após a definição prévia destes parâmetros, Etapa 1, novos ensaios de tração tornaram-se necessários para melhorar a resistência estrutural da junção, otimização do processo, qualificação dos procedimentos de soldagem e do processo, e também para análise e comparação de resultados de ensaios utilizando diferentes geometrias de pinos de alumínio que foram unidos aos pinos de aço inoxidável.

Importante ressaltar que esta etapa é muito importante, pois se refere à definição prévia de cada parâmetro em particular, relacionado ao equipamento que está sendo utilizado para a realização da soldagem. Embora, sejam encontradas referências de parâmetros em diversos trabalhos na literatura mundial envolvendo a união de materiais dissimilares, o pesquisador necessita identificar os parâmetros de acordo com o equipamento utilizado, visto as grandes diferenças de características e fabricantes.

Os resultados dos ensaios mecânicos de tração realizados durante a etapa de definição de parâmetros de soldagem (Etapa 1), mostraram a importância de cada parâmetro e sua influência na resistência mecânica da junção. Na Tabela 6.3 podem ser vistos alguns dos resultados obtidos no final da Etapa 1.

Tabela 6.3 – Resultado de estudos de parâmetros do processo SFR fixando-se os valores de P1, t1, t2 e RPM, e variando-se os valores de P2, Etapa 1.

Nº	P1 (MPa)	t1 (s)	P2 (MPa)	t2 (s)	RC (mm)	σ_R (MPa)
1	300	7	500	4	9,5	258
2	300	7	600	4	10	261
3	300	7	700	4	11	270
4	300	7	800	4	11	284
5	300	7	900	4	12	286
6	300	7	1000	4	12	276
7	300	7	1000	4	13	274
8	300	7	1100	4	13	282
9	300	7	1100	4	14	279
10	300	7	1200	4	14	298
11	300	7	1200	4	14	294
12	300	7	1300	4	14	291
13	300	7	1300	4	15	293
1	300	7	1400	4	15	284
10	300	7	1400	4	15	287
11	300	7	1500	4	16	242
12	300	7	1500	4	16	236

Fonte: Produção do autor.

Observou-se durante a realização da SFR e após as caracterizações macrográfica e mecânicas que o aumento da pressão (P1, P2) e/ou tempo (t1, t2), ocasiona alterações da resistência mecânica e na geometria do “flash” da junção. Na Etapa 1, fixou-se os valores de P1, t1, t2, velocidade de rotação (3200 RPM) e variou-se os valores de P2 de 500 a 1500 MPa em intervalos de 100 MPa, obteve-se o valor de P2 tido como ideal para esses parâmetros adotados, valor em que se atingiu a resistência mecânica máxima da junção (linha em destaque na Tabela 6.3).

A Etapa 2 teve como objetivo otimizar os parâmetros, de forma a melhorar (aumentar) a resistência estrutural da junção. Para tal, fixaram-se os valores de P1, P2 e velocidade de rotação (Corpo de prova nº 10 – Tabela 6.3), e variou-se os valores de t1 e t2. Na Tabela 6.4 podem ser vistos alguns dos resultados obtidos no final da Etapa 2.

Tabela 6.4 – Resultado de estudos de parâmetros do processo SFR fixando-se os valores de P1, P2 e RPM, e variando-se os valores de t1 e t2, Etapa 2.

Nº	P1 (MPa)	t1 (s)	P2 (MPa)	t2 (s)	RC (mm)	σ_R (MPa)
1	300	5	1200	2	12	304
2	300	5	1200	4	13	298
3	300	7	1200	2	13	296
4	300	7	1200	4	14	291
5	300	4	1200	2	12	295
6	300	7	1200	4	14	294
7	300	10	1200	4	14	276
8	300	10	1200	2	13	282
9	300	14	1200	2	14	214
10	300	14	1200	4	15	195

Fonte: Produção do autor.

O ajuste do tempo (t1 e t2) no processo resultou no aumento da resistência mecânica na junção, aproximando-a ao valor da liga de alumínio utilizada no processo (~324 MPa), linha em destaque na Tabela 6.4, dessa forma, tomou-se esses valores como ideais para os parâmetros de P1, t1, P2, t2 e velocidade de rotação.

A Etapa 3 consistiu na produção e ensaios mecânicos de novos corpos de prova tomando-se como referência o melhor resultado obtido na Fase 2 (Corpo de Prova Nº 1 - Tabela 6.4). Estes parâmetros foram utilizados para a confecção de novos corpos de prova, e desta vez, considerando o pino de alumínio com geometria regular e cônica. Em todos os ensaios realizados variou-se apenas o tempo t1 (tempo de aquecimento), mantiveram-se os demais parâmetros e melhoraram-se os procedimentos de preparação das superfícies dos pinos antes da soldagem.

Na Tabela 6.5 podem ser vistos os resultados obtidos no final da Etapa 3, onde observa-se que as junções fabricadas com pinos de geometria cônica apresentaram resistência mecânica superior as junções fabricadas com pinos de geometria regular.

Tabela 6.5 – Resultados dos ensaios mecânicos realizados utilizando-se pinos de alumínio com geometria regular e cônica, Etapa 3.

PINOS DE ALUMÍNIO COM GEOMETRIA REGULAR						
Nº	P1 (MPa)	t1 (s)	P2 (MPa)	t2 (s)	RC (mm)	σ_R (MPa)
1	300	5	1200	2	12	292
2	300	5	1200	2	13	297
3	300	5	1200	2	13	283
4	300	7	1200	2	14	278
5	300	7	1200	2	12	255

PINOS DE ALUMÍNIO COM GEOMETRIA CÔNICA						
Nº	P1 (MPa)	t1 (s)	P2 (MPa)	t2 (s)	RC (mm)	σ_R (MPa)
1	300	5	1200	2	14	315
2	300	5	1200	2	14	327
3	300	5	1200	2	13	318
4	300	7	1200	2	14	288
5	300	7	1200	2	15	285

Fonte: Produção do autor.

O corpo de prova n°2, produzido com pino de alumínio com geometria cônica (linha em destaque na Tabela 6.5), apresentou ruptura na liga de alumínio, distante da interface de ligação. Resultados de mais 03 ensaios mecânicos realizados seguindo os mesmos procedimentos de preparação e de soldagem confirmaram os resultados obtidos, o que demonstrou grande eficiência do processo SFR na união de materiais dissimilares, em particular nas junções cuja combinação envolve as ligas de alumínio e aços inoxidáveis.

A Figura 6.4 apresenta a foto da junção dissimilar envolvendo a liga de alumínio e o aço inoxidável, com a ocorrência de ruptura longe da interface de ligação (corpo de prova n°2).

Figura 6.4 – Foto do corpo de prova nº 2, antes e após a realização de ensaios de tração mostrando a fratura no lado da liga de alumínio com 327 MPa.



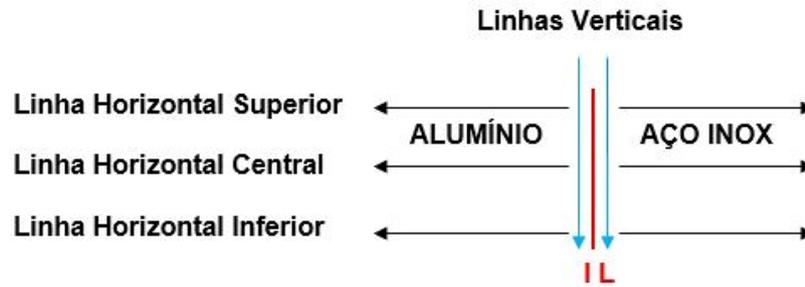
Fonte: Produção do autor.

6.3.2 Ensaios de microdureza Vickers

A realização dos ensaios de microdureza tomou como referência a interface de ligação (IL). As medições partiram desta referência no sentido horizontal (superior, central, inferior) e vertical próximo da interface de ligação, em ambos os lados da junção, conforme esquema apresentado na Figura 6.5.

Nos ensaios realizados no sentido horizontal, a medição de microdureza teve um espaçamento de 0,5 mm da interface de ligação (IL) para o primeiro ponto, e o espaçamento entre os demais pontos foi de 1,0 mm. Enquanto que, nos ensaios realizados no sentido vertical (periferia da solda), a medição da microdureza ocorreu a 0,5 mm da interface de ligação (IL).

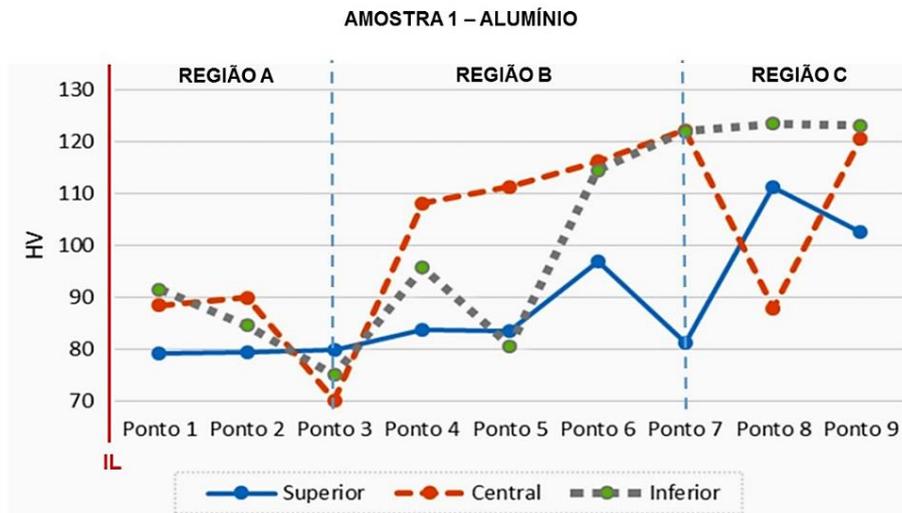
Figura 6.5 – Esquema da análise de microdureza Vickers.



Fonte: Produção do autor.

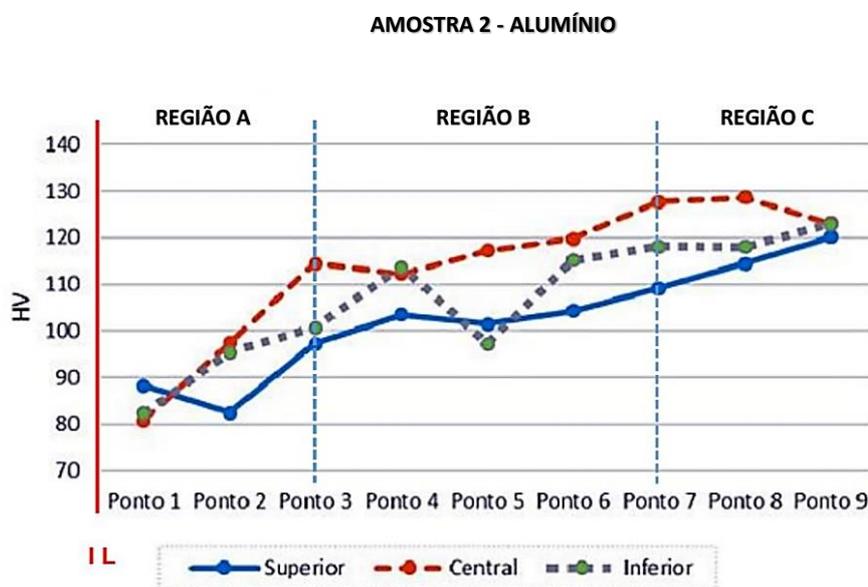
As Figuras 6.6 e 6.7 mostram os gráficos representativos dos resultados das medições de microdureza HV na direção horizontal para as amostras 1 e 2, no lado do alumínio, respectivamente.

Figura 6.6 – Gráfico representativo dos valores de microdureza HV na direção horizontal no alumínio, Amostra 1.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.7 – Gráfico representativo dos valores de microdureza HV na direção horizontal no alumínio, Amostra 2.



Fonte: Produção do autor.

Na direção horizontal lado do alumínio, em regiões próximas a interface de ligação (Região A), adotando como padrão o valor de 120HV, observou-se uma redução dos valores de microdureza tanto na amostra 1 quanto na amostra 2. A partir do ponto 3 (início da Região B), ocorreram aumentos crescentes nestes valores até o ponto 7 (término da Região B). A partir deste ponto verificou-se uma estabilização próxima do valor tido como padrão (Região C), que representa o material do lado analisado (alumínio) de acordo com as suas características e propriedades físicas e químicas. Tais variações devem-se a grande deformação plástica do material e dinâmica de escoamento ocorrida durante o processo de soldagem por fricção.

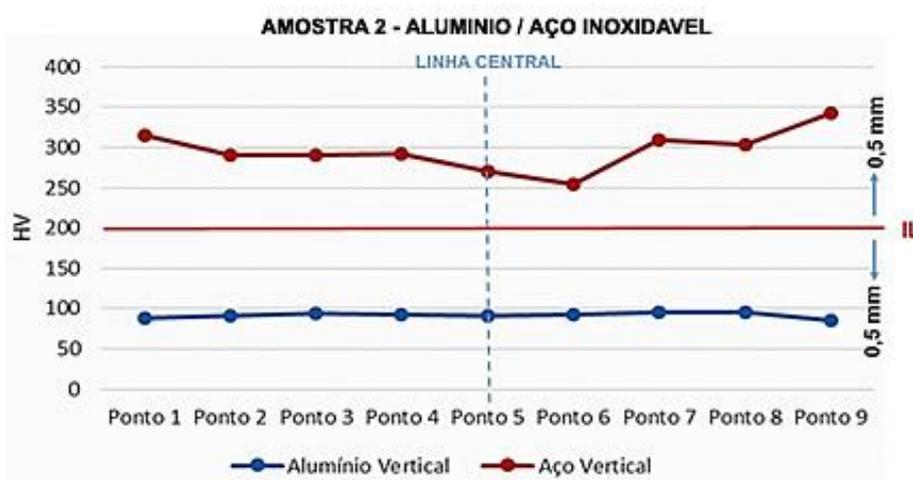
Na direção horizontal, lado do aço inoxidável, não foram observadas variações significativas de valores de microdureza em relação ao valor adotado como padrão de 330 HV, tanto em regiões próximas da interface, quanto nas regiões mais afastadas devido ao fato do mesmo não sofrer deformações plásticas e variações consideráveis de temperatura nestas regiões que pudessem alterar suas propriedades mecânicas.

Na direção vertical, a uma distância de 0,5 mm da interface de ligação, tanto nas extremidades quanto nas regiões centrais da amostra, o alumínio apresentou valores de microdureza uniformes (estáveis) em toda sua extensão.

Resultados análogos aos obtidos das Amostras do tipo 1 (pino de alumínio com geometria regular) foram obtidos nos ensaios com as Amostras do tipo 2 (pino de alumínio com geometria cônica).

A Figura 6.8 mostra o gráfico representativo dos resultados das medições de microdureza HV na direção vertical (periferia da solda), para as amostras do tipo 2 de ambos os lados da junção.

Figura 6.8 – Gráfico representativo dos valores de microdureza HV na direção vertical, Amostra 2.



Fonte: Produção do autor.

6.4 Análise microestrutural e XPS

6.4.1 Análise por microscopia óptica

A análise micrográfica com baixo aumento realizada com o microscópio óptico permitiu observar uma zona termicamente afetada (ZTA) muito pequena, quase imperceptível por esta técnica. A região da interface de ligação é caracterizada

por uma linha reta com imperfeições nas suas proximidades características do processo de soldagem por fricção (Figura 6.9 – Amostra 2). Em ambos os lados da junção não são verificadas mudanças microestruturais próximas da região de interface. Enquanto que a deformação plástica decorrente dos parâmetros do processo de SFR foi observada somente no lado do alumínio da junção, uma vez que esse possui menor resistência mecânica e temperatura de forjamento a quente.

Figura 6.9 – Fotomicrografia da interface de soldagem com aumento de 100 x.



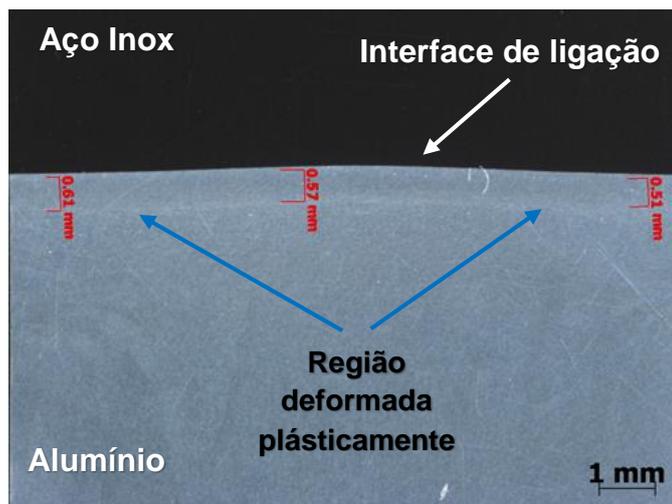
Fonte: Produção do autor.

Na fotomicrografia tirada com aumento de 10x no lado do alumínio da junção (Figura 6.10 – Amostra 2), podem-se observar regiões com aspectos diferentes nas proximidades da interface de ligação, o que caracteriza a grande deformação plástica sofrida pelo material durante o processo SFR. Na Figura 6.10, medimos os limites dessa região deformada plasticamente em aproximadamente 0,56 mm.

Na Figura 6.11 – Amostra 2, fotomicrografia com aumento de 12,5x, observa-se linhas contínuas representativas da deformação plástica sofrida pela liga de alumínio durante o processo de soldagem. Essas linhas se modificam de forma dinâmica e contínua com o aumento da deformação plástica e elevação da temperatura na interface de contato durante o processo SFR, levam a formação do “flash” com formato anular. Cada linha ou agrupamentos de linhas

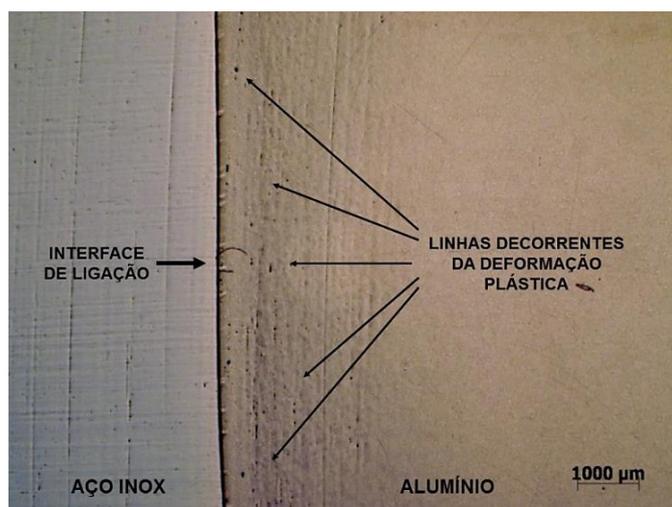
durante o escoamento dinâmico levam a formação constante de novas superfícies de contato com características físicas e químicas ideais para a ocorrência de difusão atômica entre os materiais e sua perfeita união.

Figura 6.10 – Fotomicrografia da interface de ligação, lado do alumínio onde pode ser vista uma região próxima da junção que sofreu grande deformação plástica.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.11 – Fotomicrografia da interface de ligação, lado do alumínio onde podem ser vistas linhas no sentido vertical geradas pela grande deformação plástica do material durante o processo.



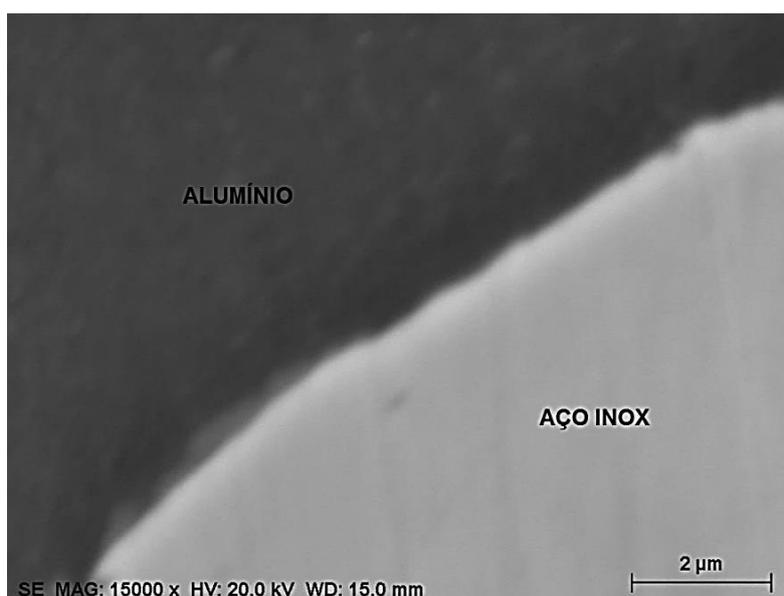
Fonte: Produção do autor.

6.4.2 Análise por microscopia eletrônica e XPS

(a) Análise por MEV e EDX

Foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da região definida como ZTA localizada na interface de ligação, tanto da Amostra 1 quanto da Amostra 2. Os aumentos das imagens variaram de 1000 a 15000x e todas elas apresentaram resultados semelhantes, uma linha visível na interface de ligação delimitando os diferentes materiais da junção, sem definição clara da ZTA, o que caracteriza esta região como sendo extremamente pequena. Na Figura 6.12 pode ser vista imagem com aumento de 15000x.

Figura 6.12 – Imagem obtida por MEV da junção alumínio-aço inox por SFR.



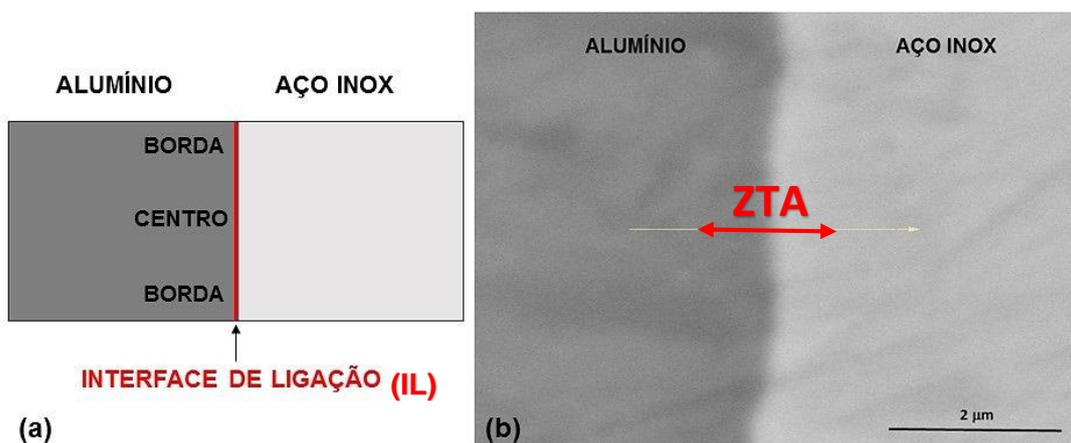
Fonte: Produção do autor.

A análise por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX) se deu em duas vertentes: análise da interface de ligação; e análise da superfície fraturada na interface de ligação.

– Análise da interface de ligação

A análise da interface de ligação foi realizada utilizando a técnica de varredura de *line scan* do EDX e proporcionou um entendimento semiquantitativo do processo. A análise foi realizada nas Amostras do tipo 1 e 2 nas regiões central e nas bordas da interface de ligação (Figura 6.13 a). As análises foram realizadas em imagens obtidas por MEV com aumento de 20000x em ambas as regiões, e o sentido do *line scan* foi do alumínio para o aço inox (Figura 6.13 b).

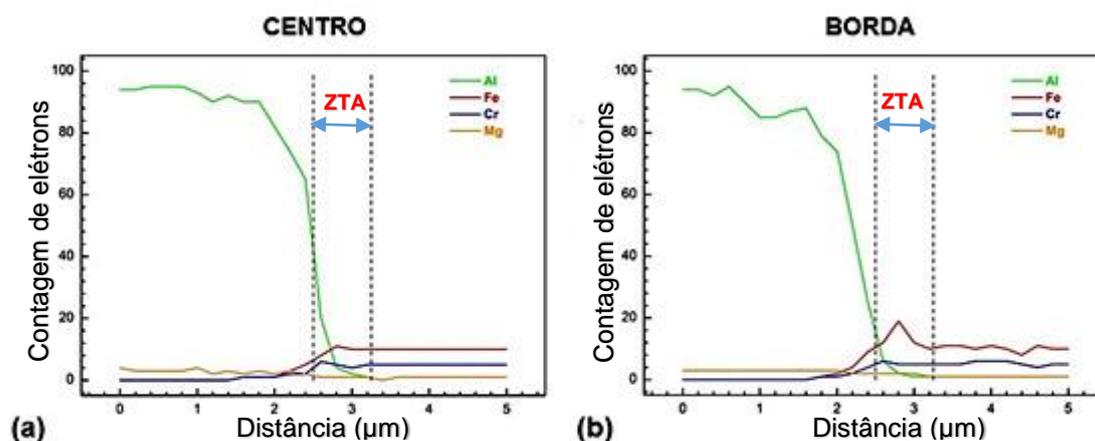
Figura 6.13 – (a) esquema da análise por EDX por *line scan*; (b) imagem MEV representativa das análises.



Fonte: Produção do autor.

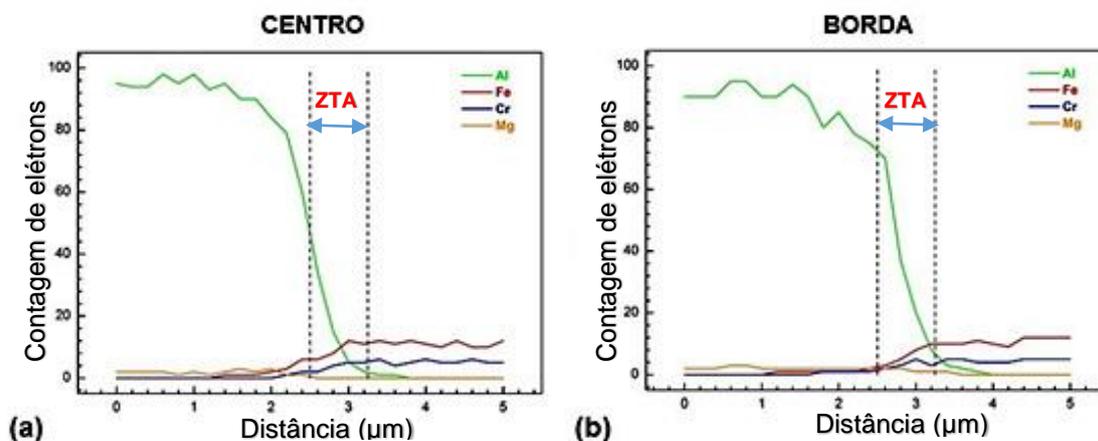
Os gráficos apresentados nas Figuras 6.14 e 6.15 mostram que ocorre interdifusão entre os principais elementos químicos que compõem a liga de alumínio e o aço inoxidável utilizado (Al e Fe, por exemplo), além de outros elementos como o Cr, Ni, Mg e o Si. Esta interdifusão dos elementos evidencia o mecanismo de ligação no processo de soldagem por fricção, a difusão.

Figura 6.14 – Análise semiquantitativa por *line scan*/EDX da Amostra 1. (a) centro da IL; e (b) borda da IL.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.15 – Análise semiquantitativa por *line scan*/EDX da Amostra 2. (a) centro da IL; e (b) borda da IL.



Fonte: Produção do autor.

Observou-se que nas Amostras 1 (pino de alumínio com geometria regular), apresentaram maior interdifusão nas bordas do que no centro da IL, o que justifica a maior ocorrência de falhas nessa região, uma vez que há uma menor difusão de átomos nessa área.

Observou-se que nas Amostras 2 (pino de alumínio com geometria cônica), as mesmas apresentaram uma interdifusão mais homogênea nas bordas e no centro da IL. Isto ocorreu devido a geometria cônica do pino de alumínio que promoveu o deslocamento do raio médio (região onde ocorre a maior elevação de temperatura no início do processo de soldagem por fricção), possibilitando uma melhor distribuição de calor na região central da amostra e em toda a superfície de contato ao longo da operação de soldagem.

Ao termino da análise, podemos concluir de forma semiquantitativa que ocorreu a interdifusão de vários elementos na interface de ligação das diversas amostras analisadas, e que, quando comparadas as Amostras do tipo 1 e 2, observou-se uma difusão mais homogênea/uniforme de Al e Fe em toda a interface de ligação.

- Análises das superfícies fraturadas na interface de ligação durante ensaios mecânicos de tração:

As análises das superfícies fraturadas na interface de ligação durante os ensaios mecânicos de tração tiveram suas superfícies analisadas pela técnica de varredura por área do EDX. Amostras do tipo 1 e 2 tiveram suas superfícies de contato analisadas e os resultados comparados com valores de resistência a tração das respectivas amostras. Foram considerados para o estudo seis corpos de provas de junções dissimilares, três para cada geometria do pino de alumínio (Figura 6.16), sendo analisadas as superfícies de contato tanto do alumínio quanto do aço inoxidável, regiões centrais e extremidades (bordas).

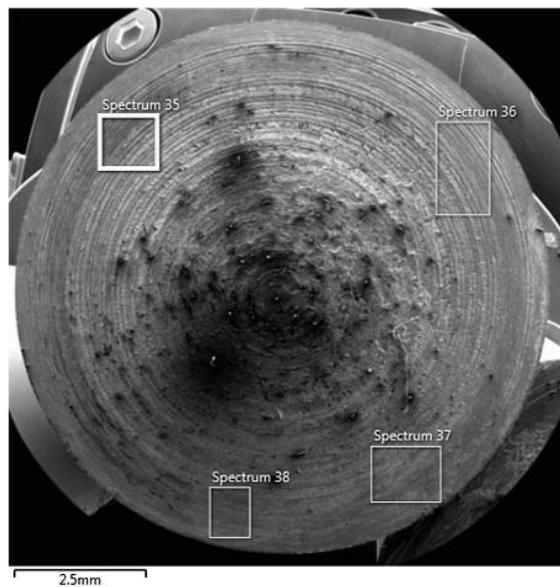
Figura 6.16 – Superfícies dos pinos fraturados analisadas por EDX.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 6.17 é apresentada uma imagem MEV da superfície de um pino de aço inox, onde podem ser observadas as áreas analisadas nas bordas de uma das amostras, nomeados (nessa amostra) como *Spectrum 35*, *Spectrum 36*, *Spectrum 37* e *Spectrum 38*.

Figura 6.17 – Imagem MEV da superfície analisada por EDX.



Fonte: Produção do autor.

A análise da superfície de fratura do aço inox apresentou concentrações variáveis de Al e Mg elementos não pertencentes a sua composição química, porém elementos básicos da liga de alumínio, tanto nas bordas quanto na região central em todas as amostras analisadas. Enquanto que, nos pinos da superfície do alumínio apresentou concentrações variáveis de Fe, Cr e Ni elementos não pertencentes a sua composição química, porém elementos básicos do aço inox, tanto nas bordas quanto na região central em todas as amostras analisadas.

As Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam os resultados estatísticos obtidos pela análise por EDX das superfícies fraturadas na borda e no centro, assim como a resistência a tração dos pinos analisados.

Considerando-se apenas os pinos de alumínio (regular ou cônico), observou-se que nas superfícies das amostras em que se utilizaram pinos com geometria cônica na junção (Amostras tipo 2), elas apresentaram maiores concentrações de Fe e menores de Ni, nas bordas e no centro.

Tabela 6.6 – Análise estatística dos resultados do EDX das Amostras 1.

AMOSTRAS 1 – GEOMETRIA REGULAR								
PINO	REGIÃO	COMPOSIÇÃO (%)					σ_R (MPa)	
		Fe	Al	Cr	Ni	Mg		
# 1 - aço	Centro	48,83	26,57	13,22	5,08	3,14	292	
	Borda	49,40	27,44	13,07	5,20	1,75		
# 1 - alumínio	Centro	2,57	94,00	0,34	0,20	1,77		
	Borda	2,08	92,23	0,25	0,16	1,94		
# 2 - aço	Centro	65,24	22,13	10,50	0,14	0,96		297
	Borda	67,38	19,72	10,42	0,12	0,96		
# 2 - alumínio	Centro	9,62	84,87	1,74	0,12	1,73		
	Borda	1,45	93,82	0,14	0,22	1,70		
# 3 - aço	Centro	47,00	26,82	12,77	4,88	4,51	255	
	Borda	53,21	22,32	14,05	5,57	2,67		
# 3 - alumínio	Centro	1,49	89,78	1,17	0,38	1,65		
	Borda	1,56	92,99	0,21	0,09	1,50		

Fonte: Produção do autor.

Tabela 6.7 – Análise estatística dos resultados do EDX das Amostras 2.

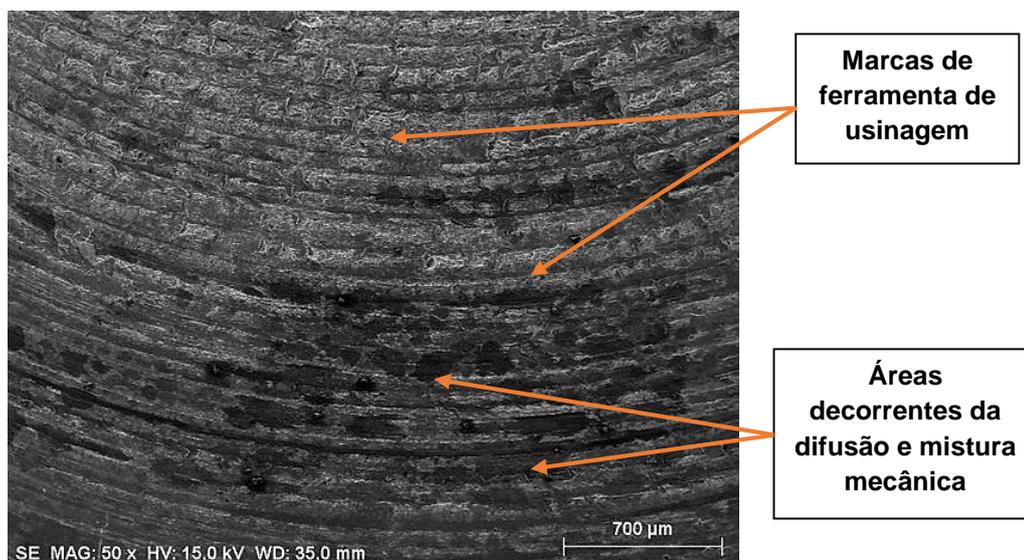
AMOSTRAS 2 – GEOMETRIA CÔNICA								
PINO	REGIÃO	COMPOSIÇÃO (%)					σ_R (MPa)	
		Fe	Al	Cr	Ni	Mg		
# 4 - aço	Centro	48,5	28,9	13,63	5,4	0,7	315	
	Borda	52,05	18,7	14,39	6,01	0,51		
# 4 - alumínio	Centro	2,75	94,95	0,35	0,12	0,72		
	Borda	3,65	90,25	0,45	0,25	0,65		
# 5 - aço	Centro	51,9	26,18	14,90	6,24	0,63		319
	Borda	56,58	29,75	9,63	0,15	1,65		
# 5 - alumínio	Centro	31,21	60,00	5,03	0,14	2,09		
	Borda	4,18	89,45	0,77	0,06	2,31		
# 6 - aço	Centro	45,17	26,61	10,74	4,64	6,44	278	
	Borda	46,85	29,6	12,83	4,53	3,15		
# 6 - alumínio	Centro	1,18	92,3	0,23	0,15	2,53		
	Borda	2,74	90,36	0,44	0,19	2,38		

Fonte: Produção do autor.

Observou-se que, pinos de alumínio, amostras que apresentaram maior concentração de Fe e menor de Ni na região central e bordas tiveram os maiores valores de resistência mecânica. Enquanto que, baixas concentrações de Fe e elevadas de Mg ocasionaram baixa resistência mecânica.

A Figura 6.18, apresenta uma imagem MEV (50x) da superfície do aço inoxidável após a ruptura na interface de ligação, onde é possível verificar marcas da ferramenta de usinagem no sentido radial e pequenas áreas metálicas (liga de alumínio) decorrentes da difusão e mistura mecânica, que se fixaram na superfície durante o processo de soldagem.

Figura 6.18 – Imagem MEV da superfície do aço inox após ruptura.

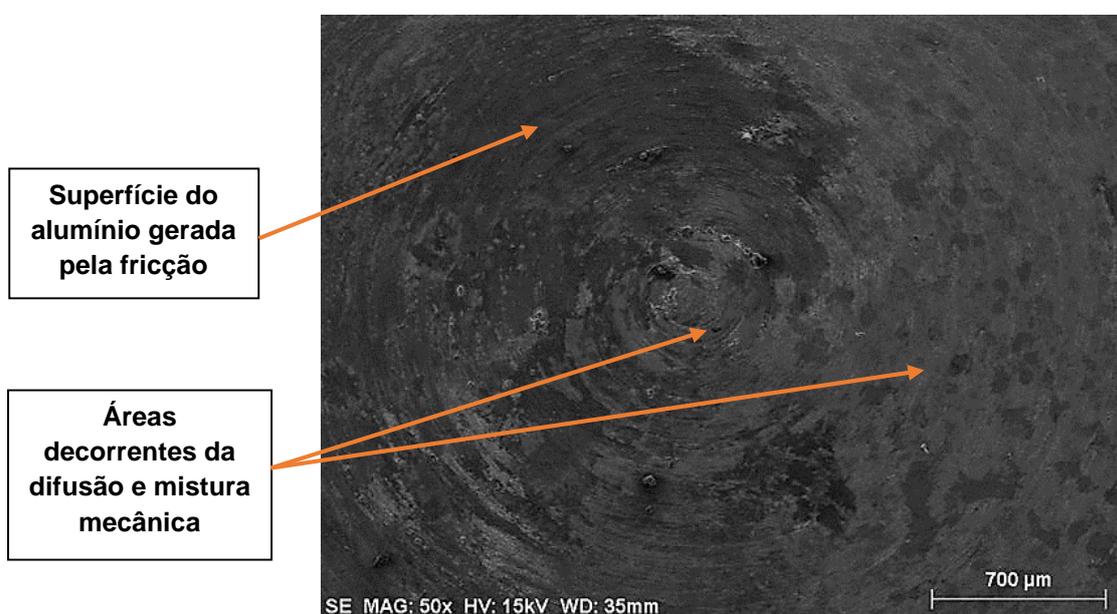


Fonte: Produção do autor.

Outro aspecto de grande importância para o entendimento do processo e dos mecanismos responsáveis pela maior ou menor resistência mecânica da junção, refere-se a superfície de ligação final da liga de alumínio formada durante a deformação plástica e escoamento dinâmico decorrentes da temperatura gerada na interface de ligação.

Em todas as superfícies observadas referentes a liga de alumínio após a soldagem, constatou-se a presença de um acabamento fino, com linhas circulares discretas descrevendo o sentido do deslocamento dinâmico do material. As rugosidades superficiais e características das superfícies analisadas apresentaram muitas semelhanças entre si, originadas durante o processo pelas características da superfície do aço inoxidável utilizado como uma matriz pressionada sobre a superfície do alumínio em alta rotação. A Figura 6.19 apresenta uma imagem MEV (50x) de uma dessas superfícies da liga de alumínio, após ruptura, geradas durante o processo.

Figura 6.19 – Imagem MEV da superfície do alumínio após ruptura.



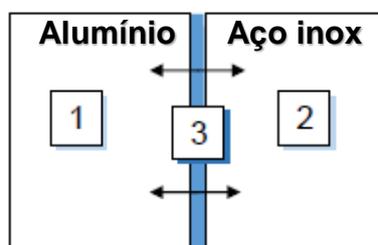
Fonte: Produção do autor.

(b) Análises por XPS

As análises realizadas tiveram como objetivo identificar a presença dos elementos Fe, Al, e Cr na região conhecida como interface de ligação. Para tal, realizaram-se análises desses elementos presentes no lado do alumínio (1), no lado do aço inoxidável (2) e na interface de ligação (3), sentido alumínio e sentido aço inoxidável a uma espessura de camada de 10 – 30 nm (0,001µm a

0,003 μ m). A Figura 6.20 apresenta esquema ilustrativo referente ao mapeamento da amostra.

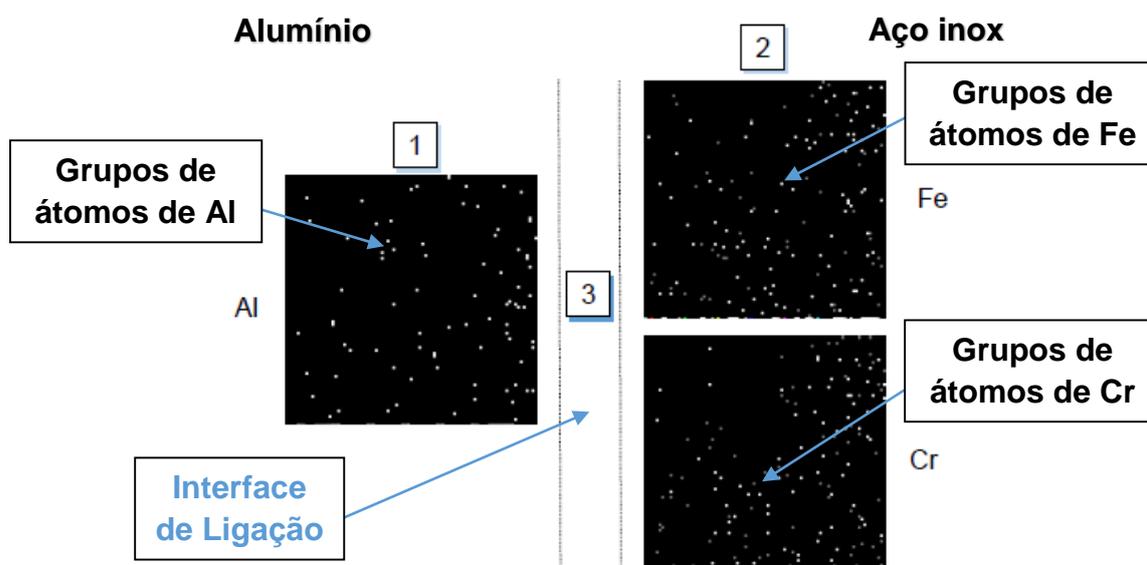
Figura 6.20 – Esquema ilustrativo do mapeamento da amostra para análises.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 6.21 são mostradas imagens obtidas por meio de XPS, onde podemos verificar a presença de um grande número de regiões ricas em Al (lado do alumínio), e também a presença regiões ricas em Fe e Cr (lado do aço inoxidável).

Figura 6.21 – Imagens obtidas por XPS mostrando grande número de átomos de Al no material alumínio, e grande número de átomos de Fe e Cr no material aço inoxidável.

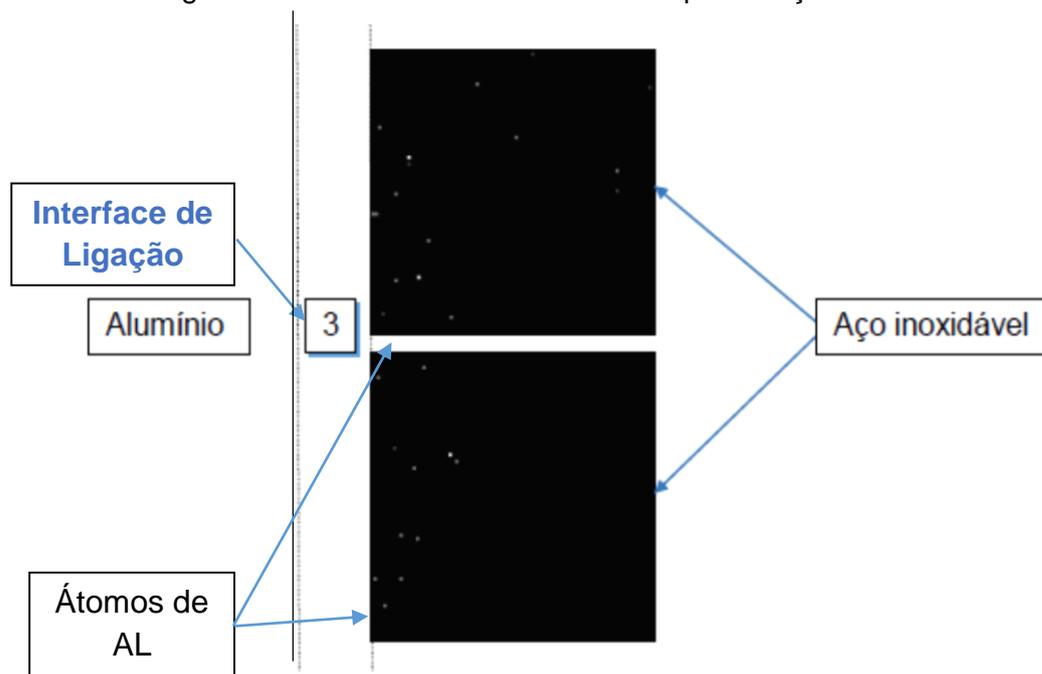


Fonte: Produção do autor.

As análises realizadas que tiveram como base a interface de ligação sentido lado do alumínio e sentido lado do aço inoxidável, mostraram a presença destes elementos. Partindo da interface de ligação sentido lado do alumínio foram identificadas regiões ricas de átomos de Fe e de Cr, enquanto que no sentido lado do aço inoxidável foram identificadas regiões ricas em átomos de Al. Em ambos os casos, observou-se que estes elementos se difundem do material principal, neste caso alumínio/aço inoxidável para a interface de ligação. Também foi observado que o Al se difundiu no aço inoxidável, e átomos de Fe e Cr se difundiram no alumínio além da região conhecida como interface de ligação.

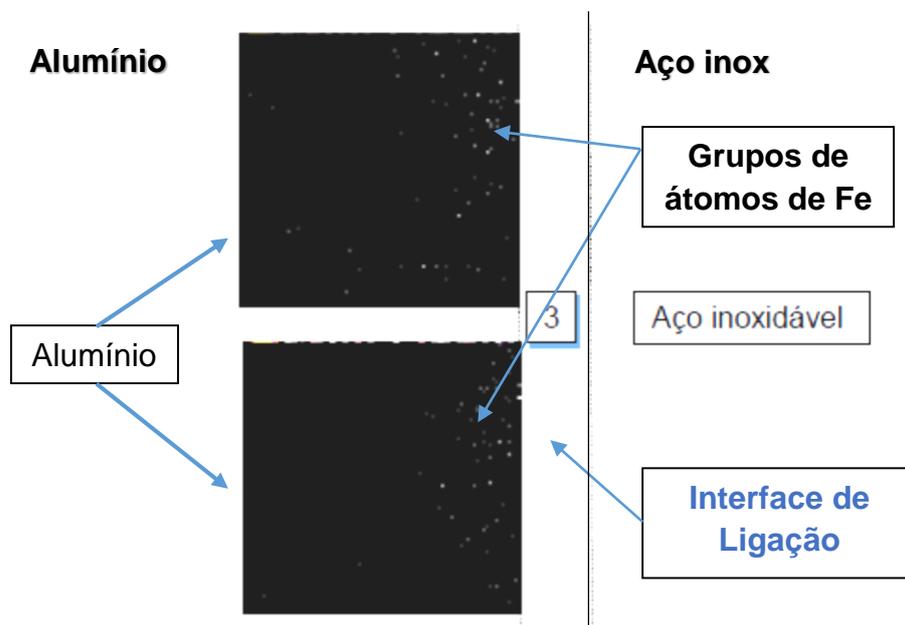
São mostrados nas Figuras 6.22, 6.23, e 6.24 a difusão dos elementos Al para o aço inoxidável, e dos elementos Fe e Cr para o alumínio, respectivamente.

Figura 6.22 – Difusão dos átomos de Al para o aço inoxidável.



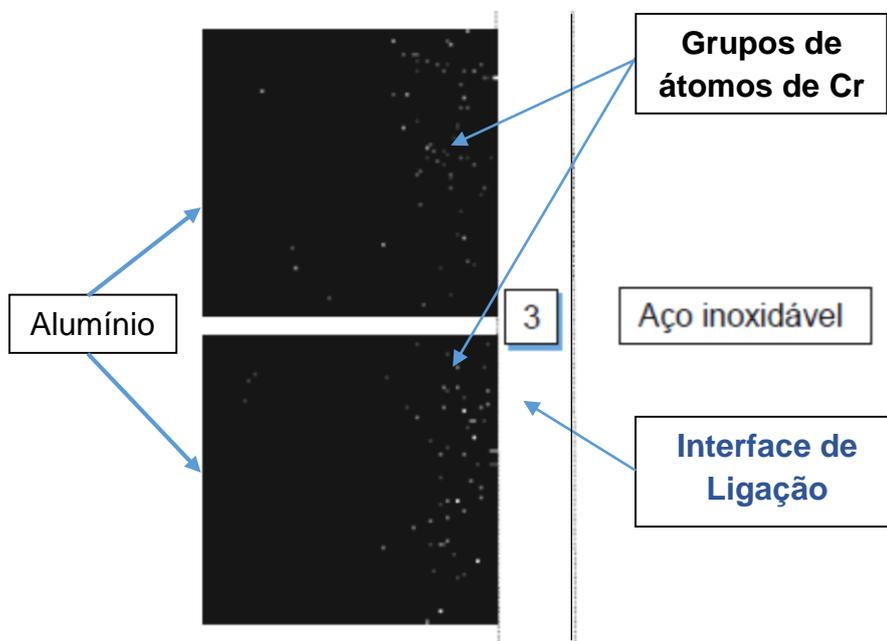
Fonte: Produção do autor.

Figura 6.23 – Difusão dos átomos de Fe presentes no aço inoxidável para o alumínio.



Fonte: Produção do autor

Figura 6.24 – Difusão dos átomos de Cr presentes no aço inoxidável para o alumínio.



Fonte: Produção do autor.

Importante ressaltar que na análise em questão por XPS foram considerados apenas os elementos Al, Fe, Cr devido ao fato de serem os principais

elementos da liga e que apresentam consideráveis aspectos difusivos quando caracterizados por EDX. A porcentagem atômica destes elementos (Al, Fe, Cr), bem como a de outros elementos presentes nas ligas foi apresentada no Capítulo 5 (Tabela 5.3, página 93).

6.4.3 Análise térmica

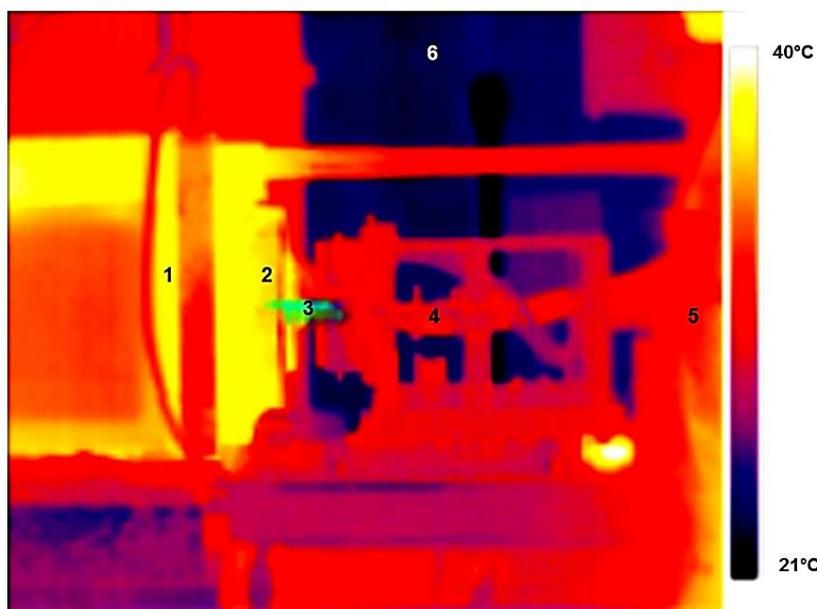
(a) Análise por termocâmara

A análise por termocâmara das junções dissimilares soldadas por SFR, possibilitou um entendimento qualitativo do processo. Para a análise se realizou doze ensaios, sendo seis para cada tipo de amostra, e os parâmetros (P1, t1, P2 e t2) adotados foram os que resultaram junções com maiores resistências a tração. Para eliminar/reduzir a influência das variáveis externas ao processo, os ensaios foram realizados em um único dia em sequência, dessa forma garantiu-se que os ensaios foram realizados sob as mesmas condições.

Para a aquisição de dados durante os ensaios, posicionou-se a termocâmara em um tripé em frente ao equipamento de soldagem, de forma a possibilitar a filmagem de todo o processo e as diferentes partes do equipamento utilizado.

Numa etapa pré-ensaio, observou-se pela termocâmara as diferentes temperaturas do ambiente (temperatura: do equipamento; dos pinos; do operador; do local, ...) que envolvem/interferem no processo fabricação de junções dissimilares. A Figura 6.25, apresenta uma imagem da termocâmara onde é mostrado os pontos que foram considerados relevantes para essa análise, e pode-se observar que as temperaturas variam de 21 a 40°C aproximadamente antes do ensaio propriamente dito.

Figura 6.25 – Imagem da termocâmera pré-ensaio. (1) motor; (2) pinça de fixação; (3) pinos que serão soldados; (4) pistão hidráulico; (5) operador; e (6) meio ambiente.



Fonte: Produção do autor.

No início do processo de soldagem, o contato/atrito entre os pinos ocasionou o aumento da temperatura na interface de ligação e nas suas proximidades em ambos os lados da junção, a termocâmera proporcionou a visualização em tempo real desse efeito. Observou-se ainda que, a dissipação de calor foi mais rápida no pino de alumínio, devido a sua condutividade térmica ser superior à do aço, e essa dissipação foi visível no primeiro terço do comprimento do pino (em relação a interface de ligação). Enquanto que, no lado do aço a dissipação do calor ocorreu de forma lenta e atingiu apenas as proximidades da interface de ligação.

A termocâmera possibilitou determinar o tempo fase de aquecimento da junção ocasionado pelo atrito e o aumento da área da superfície de contato em três segundos. Observou-se que, no intervalo entre 3 e 5s ocorreu a formação do “flash” em torno da interface de ligação, a uma temperatura de

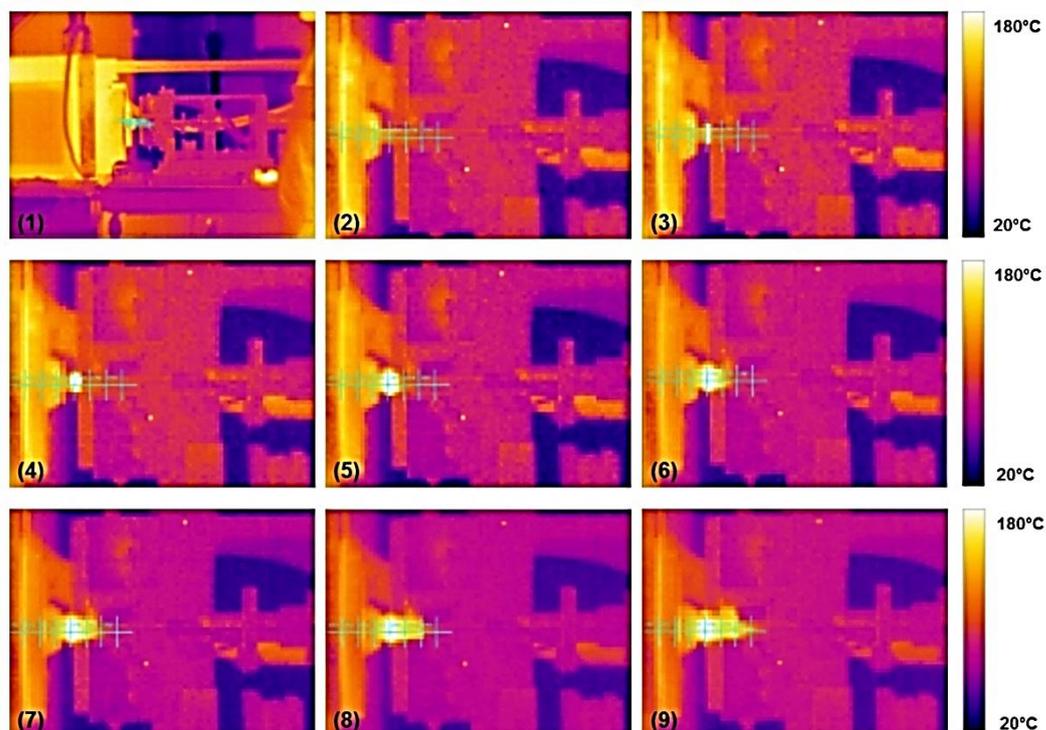
aproximadamente 180°C. A partir desse momento não se pode monitorar a interface de ligação, está encoberta pelo “*flash*”, dessa forma pode se observar apenas o fluxo de calor dissipado pelo “*flash*” a partir desse instante.

Na primeira fase de soldagem ou fase de aquecimento, observou-se um rápido aumento da temperatura nos primeiros três segundos devido ao atrito dos materiais e aumento da área nas superfícies de contato. Entre três segundos e cinco segundos ocorreu a formação do “*flash*” e a consequente estabilização da temperatura com valores aproximados de 180°C.

Na Figura 6.26 pode ser visto quadros representativos da variação da temperatura que ocorre durante o ensaio. Os quadros (1), (2) e (3) descrevem o momento da aproximação entre os materiais, o contato inicial, e o aumento da temperatura na superfície de contato, respectivamente. Enquanto os quadros (4), (5) e (6) representam a fase de aquecimento do processo, em que ocorre o início da deformação plástica, a formação do “*flash*”. Já os quadros (7), (8) e (9) representam a fase de forjamento do processo; após o quadro (9) tem se início a fase de resfriamento da junção, ocorrendo a dissipação de calor por condução e radiação.

Observou-se durante a fase de resfriamento que o calor acumulado no pino de aço inoxidável se dissipou em grande parte na direção ao pino de alumínio, devido a grande diferença de condutividade térmica entre os materiais, ocasionando um novo aumento de temperatura (recozimento) na interface de ligação e nas suas proximidades no lado do alumínio. Este fator justifica de certa forma os valores inferiores de microdureza obtidos próximos da interface de ligação, no lado do alumínio, uma vez que se permite que os grãos deformados durante o processo de soldagem se restabeleçam parcialmente.

Figura 6.26 – Quadros ilustrativos do processo de soldagem obtidos pela termocâmara.



Fonte: Produção do autor.

A forma com que se processa o resfriamento, também esclarece o fato de uma junção dissimilar soldada por fricção apresentar resistência mecânica igual ou superior à do material de menor resistência mecânica, pois a reversão de fluxo de calor permite ao material um resfriamento mais lento, com alterações mínimas na microestrutura formada na interface de ligação, ZTA e regiões adjacentes.

(b) Análise por termopares

A análise por termopares das junções dissimilares soldadas por SFR, possibilitou um entendimento quantitativo do processo. Para a análise se realizou trinta ensaios, sendo quinze para cada tipo de amostra, e os parâmetros (P1, t1, P2 e t2) adotados foram os que resultaram junções com maiores resistências a tração. Para eliminar/reduzir a influência das variáveis

externas ao processo, os ensaios foram realizados em um único dia em sequência, dessa forma garantiu-se que os ensaios foram realizados sob as mesmas condições.

Para realizar a investigação do perfil de temperatura durante o processo por SFR, utilizou-se o sistema MGS para aquisição e monitoramento dos dados e três configurações distintas de pinos em aço inox: medição radial; medição longitudinal a 7,4 mm de profundidade; e medição longitudinal a 4,3 mm de profundidade. Os termopares utilizados para medições longitudinais foram distanciados a 5mm, 10mm, 15mm e 20mm da interface de ligação. Em todas as configurações as medições foram realizadas no pino de aço inoxidável, que apresenta uma redução de comprimento praticamente desprezível (Figura 6.27).

Figura 6.27 – Sistema MGC utilizado nos ensaios; e ao lado corpos de prova soldados que foram monitorados durante o processo.

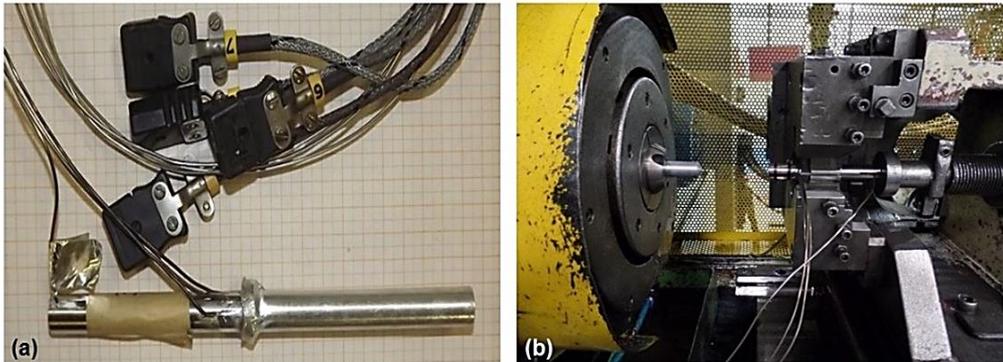


Fonte: Produção do autor.

Os termopares do tipo J utilizados nos ensaios foram calibrados e fixados nos pinos de aço inoxidável especiais (descritos no capítulo anterior) fabricados para os testes de medição de temperatura por termopares (Figura 6.28 a). Após a fixação dos termopares o pino foi fixo ao equipamento de soldagem por

SFR (Figura 6.28 b). O Sistema MGC possibilitou o acompanhamento em tempo real das medições.

Figura 6.28 – (a) termopares fixos no pino de aço inoxidável após término do ensaio; (b) equipamento de soldagem momentos antes da realização do ensaio.

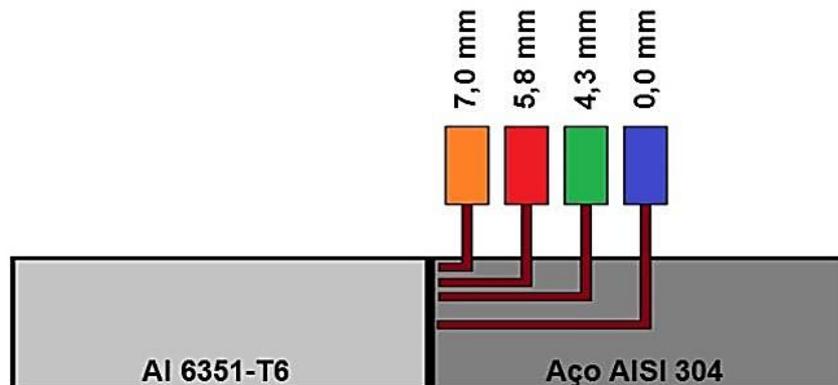


Fonte: Produção do autor.

– Perfil radial de temperatura

Nos ensaios de perfil radial, foi utilizada a configuração dos termopares mostrada na Figura 6.29, onde o termopar na posição 0,0 mm se encontra no centro do pino e o termopar na posição 5,8 mm se encontra na região denominada como raio médio (região de maior temperatura).

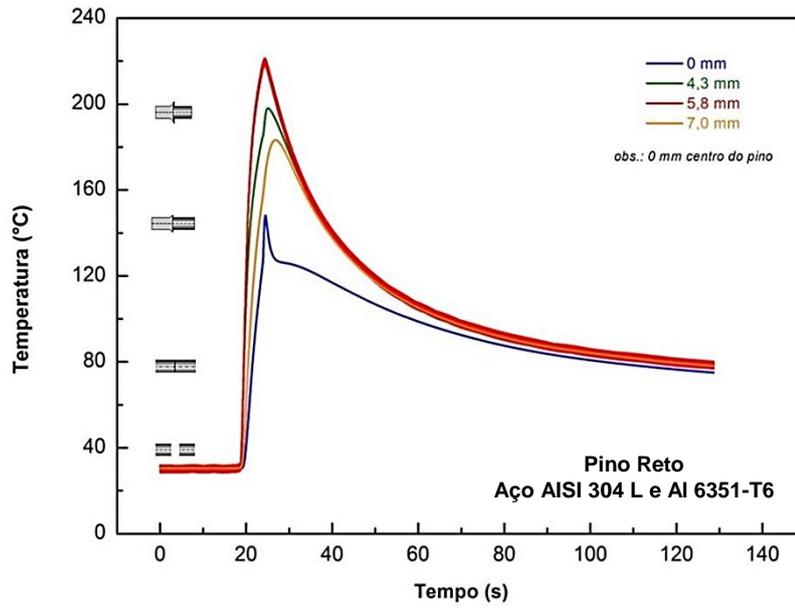
Figura 6.29 – Configuração dos termopares para perfil radial de temperatura.



Fonte: Produção do autor.

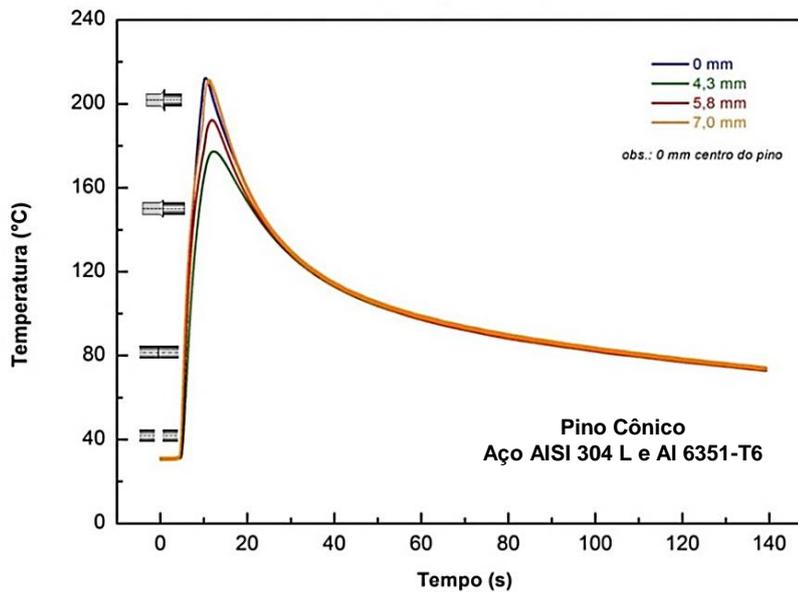
As Figuras 6.30 e 6.31 apresentam os perfis radiais das Amostras 1 e 2 respectivamente.

Figura 6.30 – Perfil radial de temperatura, Amostra 1.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.31 – Perfil radial de temperatura, Amostra 2.



Fonte: Produção do autor.

Observando os gráficos de $T \times t$, percebe-se que os ensaios realizados com as Amostras 2 (pinos de alumínio com geometrias cônicas) apresentaram a região central do pino como região de maior temperatura, ao contrário das Amostras 1 (pinos de alumínio com geometrias regulares), ou seja, podemos afirmar que a geometria cônica do pino de alumínio, ocasionou o deslocamento da região de maior temperatura localizada no raio médio (pino de alumínio com geometria regular), para a região central (pino de alumínio com geometria cônica).

Pode-se observar ainda, os instantes e etapas de soldagem referentes a 1ª fase de soldagem, conhecida como fase de aquecimento, a 2ª fase de soldagem ou fase de forjamento, e também a fase de resfriamento da junção dissimilar pós soldagem. Em ambos os casos, pode-se afirmar que as maiores variações de temperatura na interface de ligação ocorreram na fase de aquecimento, compreendida entre os 5 (cinco) primeiros segundos de soldagem. As temperaturas máximas atingidas ao final desta fase variaram pouco, registrando valores aproximados de 220 °C (pino cilíndrico com geometria regular) e 216°C (pino cilíndrico com geometria cônica).

Na soldagem onde se utilizou o pino de alumínio com geometria cônica, o fluxo de calor se deslocou da região central da interface de ligação, região de maior temperatura durante a fase de aquecimento, para as regiões periféricas das amostras testadas. Já no caso da soldagem realizada com pino cilíndrico de geometria regular, o fluxo de calor deslocou-se da região de maior temperatura registrada no “Raio Médio” para as regiões centrais.

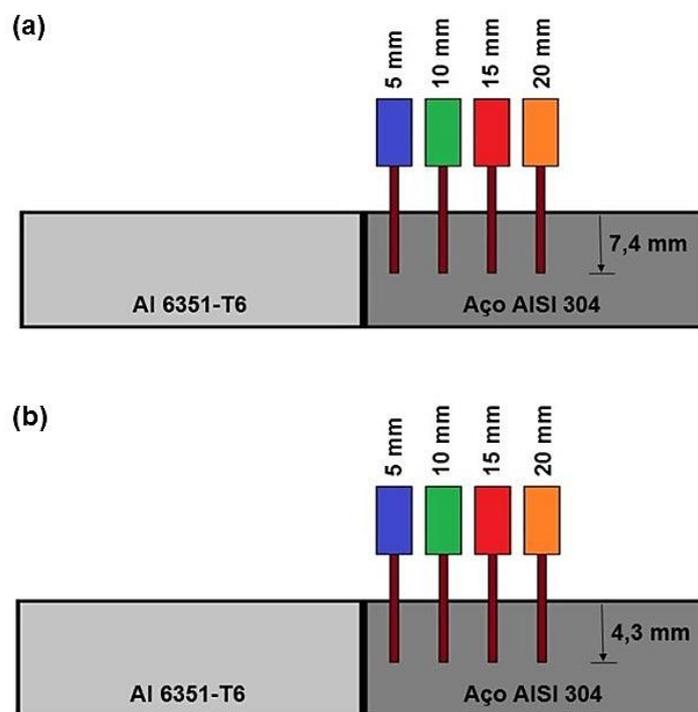
A transferência de calor da região central para a periferia na interface de ligação fez com que ocorresse melhor distribuição de calor na interface de ligação, em particular na região central, onde ocorre a maior parte das falhas por falta de difusão, fato observado nas junções dissimilares unidas por SFR onde se utilizam pinos de alumínio com geometria regular. A falta de difusão nestes casos deve-se a menor velocidade tangencial e menor temperatura nesta região.

A utilização do pino de alumínio com geometria regular também melhora de forma considerável a remoção de óxidos nas superfícies de contato, visto que, a elevação da temperatura na região central faz com que a deformação plástica tenha início próxima à região central da interface de ligação e se desloque para as regiões periféricas, e dessa forma, elimine os óxidos presentes nestas regiões, fator problemático na soldagem do alumínio com o aço inoxidável quando se utiliza pino cilíndrico de alumínio com geometria regular.

– Perfil longitudinal de temperatura

Nos ensaios de perfil longitudinal, foi utilizada a configuração dos termopares mostrada na Figura 6.32, com duas profundidades diferentes, 7,4 e 4,3 mm.

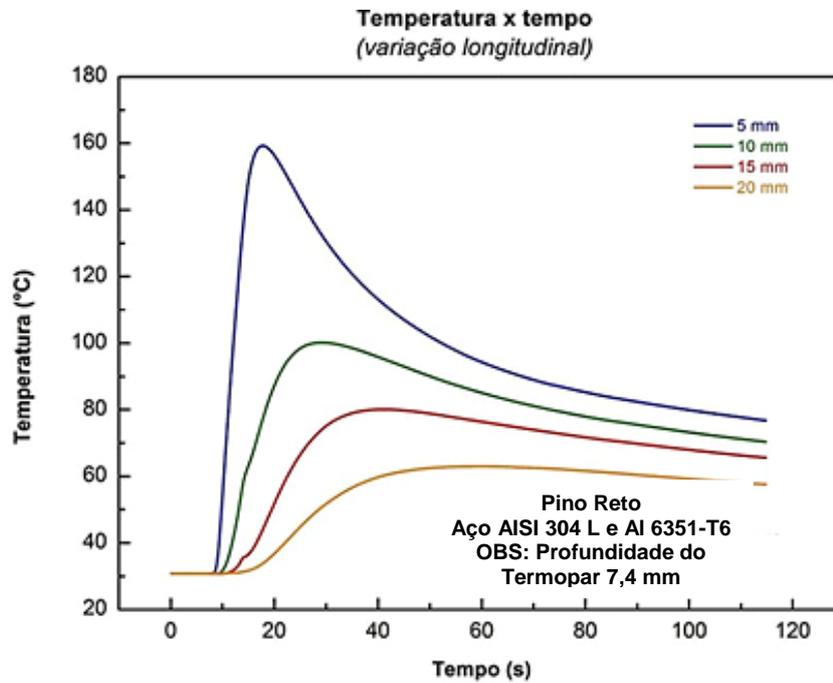
Figura 6.32 – Configuração dos termopares para perfil longitudinal de temperatura. (a) 7,4 mm de profundidade; e (b) 4,3 mm de profundidade.



Fonte: Produção do autor.

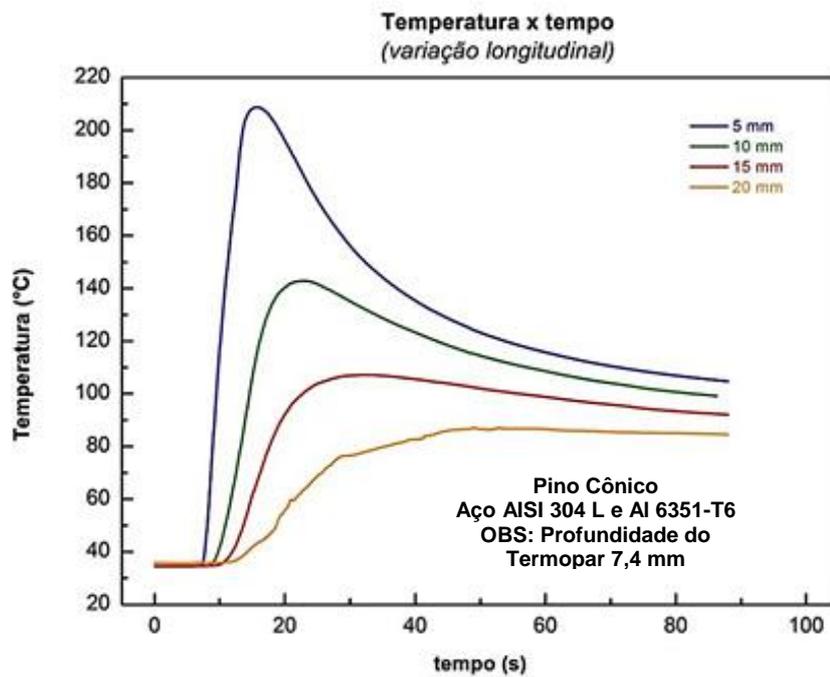
As Figuras 6.33, 6.34, 6.35 e 6.36 apresentam os perfis longitudinais à 7,4 e 4,3 mm das Amostras 1 e 2 respectivamente.

Figura 6.33 – Perfil longitudinal de temperatura a 7,4 mm, Amostra 1.



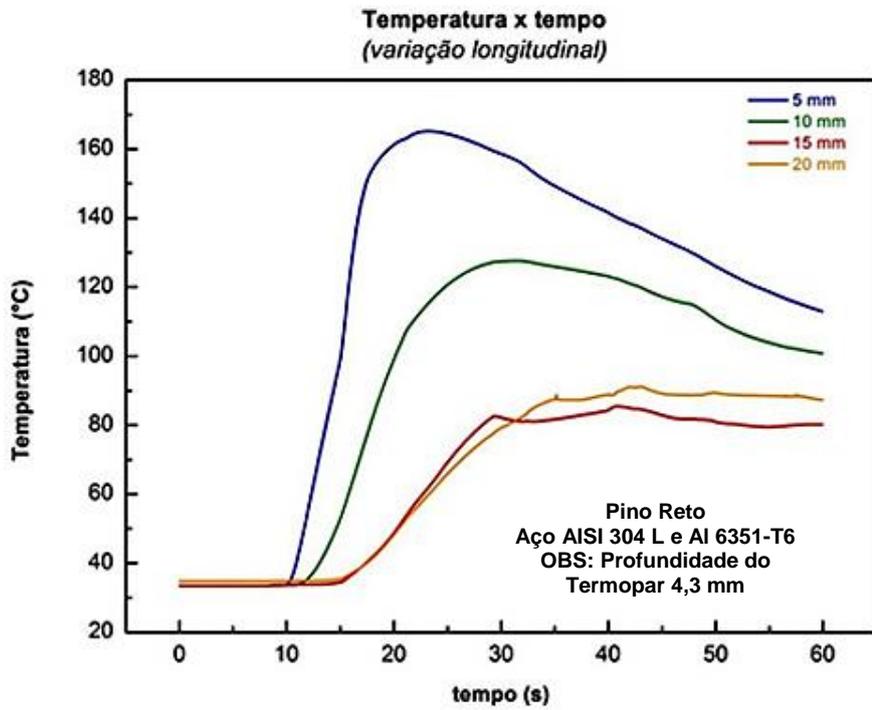
Fonte: Produção do autor.

Figura 6.34 – Perfil longitudinal de temperatura a 7,4 mm, Amostra 2



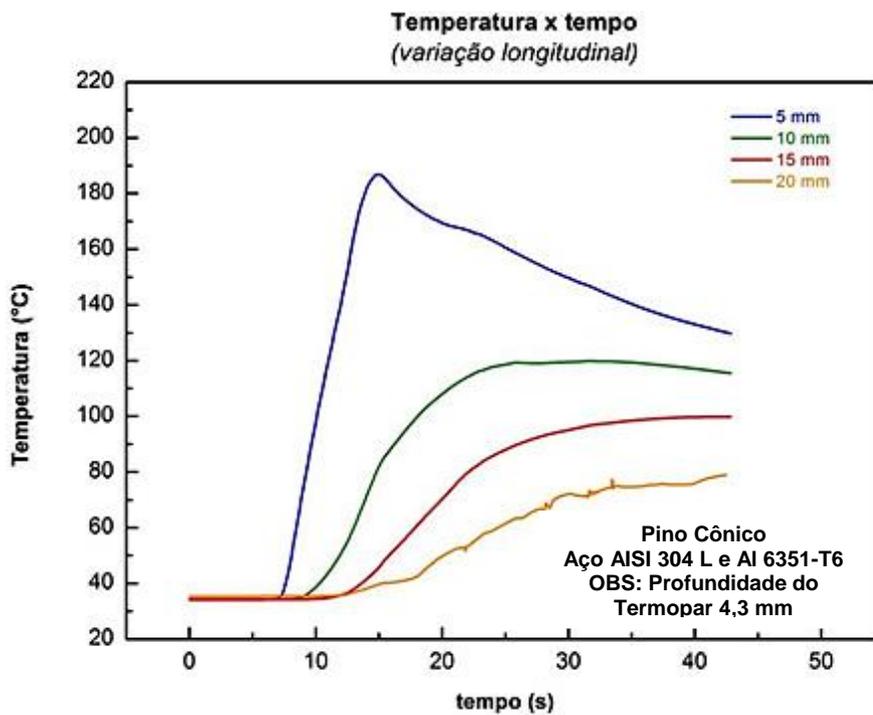
Fonte: Produção do autor

Figura 6.35 – Perfil longitudinal de temperatura a 4,3 mm, Amostra 1.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.36 – Perfil longitudinal de temperatura a 4,3 mm, Amostra 2.



Fonte: Produção do autor.

Os resultados do monitoramento do deslocamento do fluxo de calor no sentido longitudinal do pino de aço inoxidável com termopares fixados em diferentes distâncias da interface, apresentaram curvas semelhantes, considerados a realização de testes de soldagem com as duas geometrias de pino de alumínio estudadas neste trabalho, e pinos de aço inoxidável com profundidades dos furos de 7,4 mm e 4,3 mm onde foram fixados os termopares responsáveis pela coleta dos dados de temperatura.

Nestes testes para monitoramento do deslocamento de calor no sentido longitudinal dos pinos de aços inoxidáveis, a maior temperatura registrada foi de 210°C. Estava a uma distância de 5,0 mm da interface de ligação, sentido do comprimento do pino de aço inoxidável com profundidade de fixação de termopar de 7,4 mm, com utilização de pino de alumínio com geometria cônica.

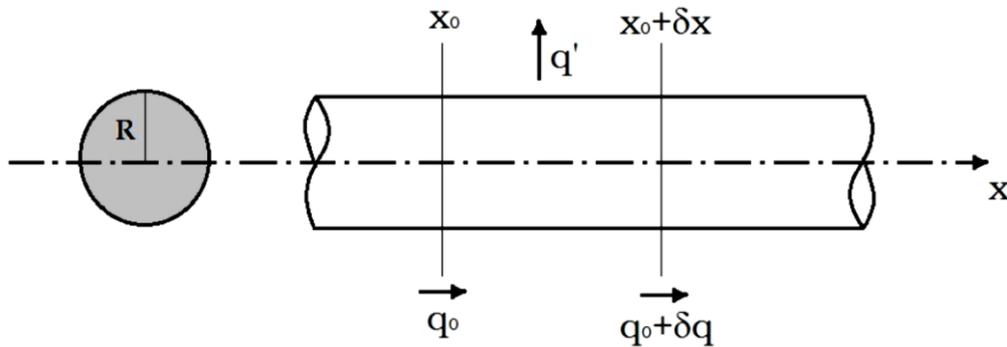
6.5 Análise teórica

O estudo do perfil térmico durante a soldagem por fricção rotativa de materiais dissimilares é importante para entender os processos físicos e químicos que ocorrem para a formação da junção. O modelo proposto neste trabalho para a análise térmica, busca a obtenção de um perfil médio de temperatura versus tempo em uma dimensão (1D) ao longo do comprimento dos pinos a serem soldados.

A Figura 6.37 apresenta o esquema adotado para estudar o perfil térmico, no qual admitiu-se que:

- fluxo de energia ocorra somente no eixo x;
- problema seja axissimétrico; e
- coeficiente de condutividade térmica (k) é constante.

Figura 6.37 – Esquema do modelo de perfil térmico proposto



Fonte: Produção do autor.

Em um determinado instante $t = t_0$, temos $T(x_0) = T_0$. Dessa forma, após um intervalo de tempo δt , temos que $t = t_0 + \delta t$ e $T(x_0) = T_0 + \delta T$. Assim:

$$q_{\text{entrada}} = \pi \cdot R^2 q_0 \delta t \quad (6.1)$$

$$q_{\text{saída}} = \pi \cdot R^2 (q_0 + \delta q) \delta t + 2\pi \cdot R q' \delta x \delta t \quad (6.2)$$

onde q é o calor; e R o raio do cilindro. Podemos escrever a variação da quantidade de calor, δQ , como:

$$\delta Q = q_{\text{entrada}} - q_{\text{saída}} \quad (6.3)$$

Substituindo as equações 6.1 e 6.2 na Equação 6.3, temos:

$$\delta Q = \pi \cdot R^2 q_0 \delta t - [\pi \cdot R^2 q_0 \delta t - [\pi \cdot R^2 (q_0 + \delta q) \delta t + 2\pi \cdot R q' \delta x \delta t]] \quad (6.4)$$

$$\delta Q = \pi \cdot R^2 q_0 \delta t - \pi \cdot R^2 q_0 \delta t - \pi \cdot R^2 \delta q \delta t - 2\pi \cdot R q' \delta x \delta t \quad (6.5)$$

$$\delta Q = - \pi \cdot R^2 \delta q \delta t - 2\pi \cdot R q' \delta x \delta t \quad (6.6)$$

Como houve um aumento da temperatura (T) no processo, da primeira lei da termodinâmica (BIRD et al., 2004; INCROPERA et al., 2008; ÇENGEL, 2010), temos:

$$\delta Q = \delta m c_p \delta T \quad (6.7)$$

onde m é a massa; c_p é o calor específico; e T a temperatura.

Podemos escrever a equação 6.7, substituindo δQ pela equação 6.6 e obtemos:

$$-\pi.R^2\delta q\delta t - 2\pi.Rq'\delta x\delta t = \delta m c_p \delta T \quad (6.8)$$

mas $\delta m = \pi.R^2\rho\delta x$, onde ρ é a massa específica do material. Assim reescrevendo a Equação 6.8 temos:

$$-\pi.R^2\delta q\delta t - 2\pi.Rq'\delta x\delta t = \pi.R^2\rho\delta x c_p \delta T \quad (6.9)$$

Dividindo a equação 6.9 por $\pi.R^2\delta x\delta t$, temos:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{2}{R} q' \quad (6.10)$$

Sabe-se que, da Lei de Fourier que $q = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ e da Lei de resfriamento de Newton $q' = h(T - T_{amb})$ (BIRD et al., 2004; INCROPERA et al., 2008; ÇENGEL, 2010). Onde k é a condutividade térmica do material; h é o coeficiente de transferência de calor; T é a temperatura da superfície; e T_{amb} é a temperatura do meio ambiente. Assim, reescrevendo a Equação 6.10 temos:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{2}{R} h(T - T_{amb}) \quad (6.11)$$

Adimensionando o problema:

Rescrevendo a Equação 6.11, temos:

$$\theta = \frac{T - T_{amb}}{T_{amb}} \quad (6.12)$$

$$\xi = \frac{x}{R} \quad (6.13)$$

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{k}{R^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{2h}{R} \theta \quad (6.14)$$

dividindo a equação 6.14 por $\frac{R^2}{k}$, temos:

$$\frac{\rho c_p R^2}{k} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{2Rh}{k} \theta \quad (6.15)$$

Porém sabe-se, a difusividade térmica (α) é dada por $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ e o número de Nusselt (Nu) é dado por $Nu = \frac{2Rh}{k}$, (BIRD et al., 2004; INCROPERA et al., 2008; ÇENGEL, 2010), logo reescrevendo a Equação 6.15, temos:

$$\frac{R^2}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - Nu \theta \quad (6.16)$$

Admitindo que:

$$\tau = \frac{\alpha t}{R^2} \quad (6.17)$$

Substituindo na Equação 6.16, temos:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - Nu \theta \quad (6.18)$$

No equilíbrio, temos que:

$$\frac{\partial^2 \theta_{eq}}{\partial \xi^2} = Nu \theta_{eq} \quad (6.19)$$

Admitindo que:

$$\theta_{eq} = A e^{-\alpha \xi} \quad (6.20)$$

onde A é constante, temos que:

$$\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} (Ae^{-\alpha \xi}) = NuAe^{-\alpha \xi} \quad (6.21)$$

$$A\alpha^2 e^{-\alpha \xi} = NuAe^{-\alpha \xi} \quad (6.22)$$

$$\alpha = \sqrt{Nu} \quad (6.23)$$

logo:

$$\theta_{eq} = Ae^{-\sqrt{Nu}\xi} \quad (6.24)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_{eq}}{\partial \xi} \right|_{\tau=0} = C \quad (6.25)$$

Onde C é constante. Assim:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \xi} (Ae^{-\sqrt{Nu}\xi}) \right|_{\tau=0} = C \quad (6.26)$$

$$-A\sqrt{Nu}e^{-\sqrt{Nu}\xi} \Big|_{\tau=0} = C \quad (6.27)$$

$$-A\sqrt{Nu}1 = C \quad (6.28)$$

$$A = -\frac{C}{\sqrt{Nu}} \quad (6.29)$$

Logo:

$$\theta_{eq} = -\frac{C}{\sqrt{Nu}} e^{-\sqrt{Nu}\xi} \quad (6.30)$$

Cálculo da constante C.

$$C = \frac{\dot{Q}}{\pi RT_{amb} k_{material}} \quad (6.31)$$

Onde:

$$\dot{Q} = \frac{d}{dt} \int c_p T dm \quad (6.32)$$

mas $dm = \pi R^2 \rho_{material} dx$, logo:

$$\dot{Q} = \frac{d}{dt} \int \pi R^2 c_p \rho_{material} T dx \quad (6.33)$$

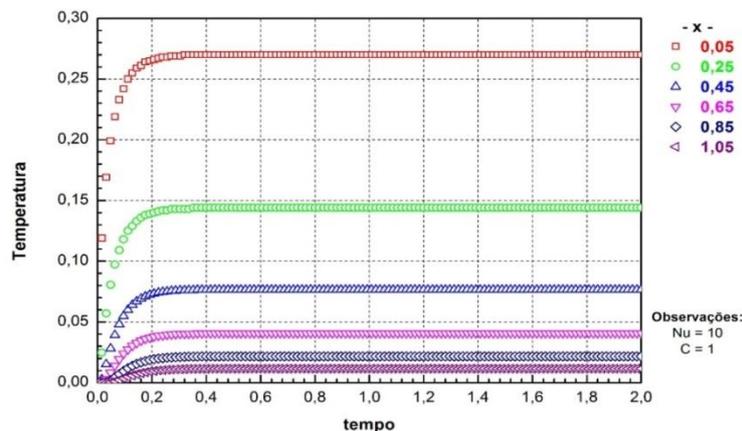
Análise adimensional do processo

Admitindo que C e Nu sejam constantes, e resolvendo a Equação 6.19 numericamente, optou-se por utilizar o método de Runge-Kutta de segunda ordem (BARROSO et al., 1987; SPERANDIO, 2003).

- 1º caso: adotando-se que $Nu = 10$ e $C = 1$ e variando x .

A figura 6.38, apresenta o gráfico do perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de x (distância da interface da solda). Pode-se observar que, conforme nos afastamos da interface, para maiores valores de x , menor será a temperatura.

Figura 6.38 - Perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de x .

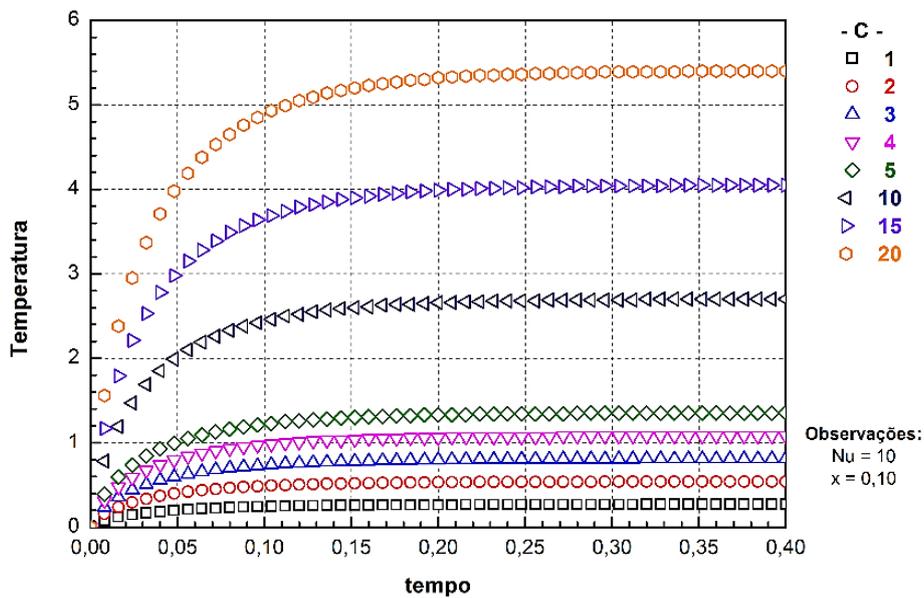


Fonte: Produção do autor.

- 2º caso: adotando que $Nu = 10$ e $x = 0,1$ e variando C .

A Figura 6.39, apresenta o gráfico do perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de C . Pode se observar que, quanto maiores os valores de C , maior será a temperatura de estabilização.

Figura 6.39 – Perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de C .

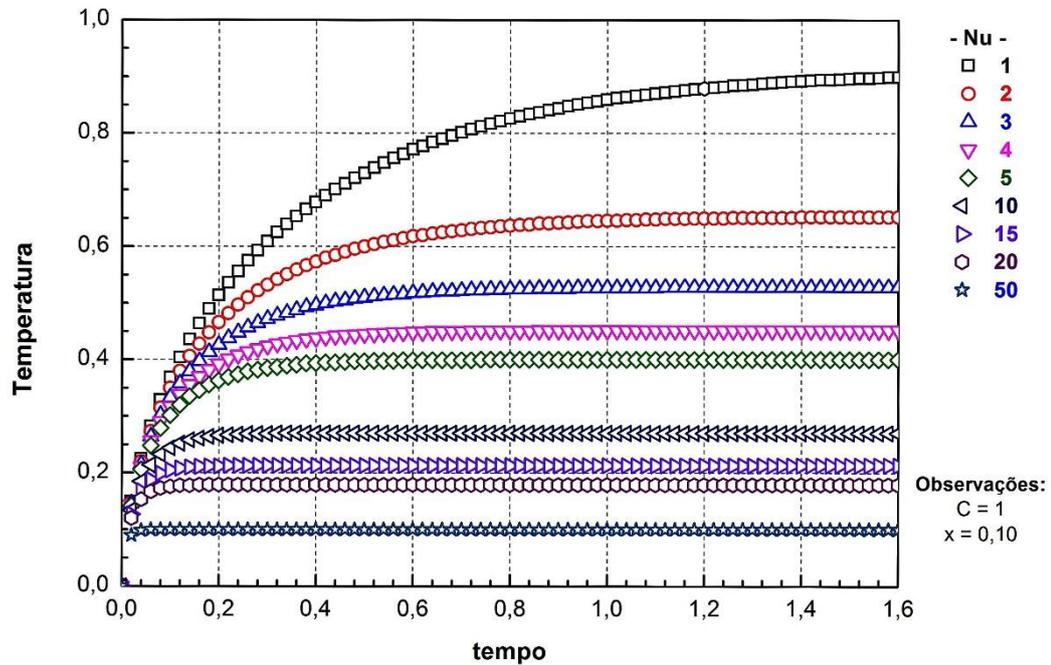


Fonte: Produção do autor.

- 3º caso: adotando que $C = 1$ e $x = 0,1$ e variando Nu .

A Figura 6.40, apresenta o gráfico do perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de Nu . Pode se observar que, quanto maiores valores de Nu , mais rápido se atinge a temperatura de estabilização.

Figura 6.40 - Perfil de temperatura em função do tempo para diferentes valores de Nu .

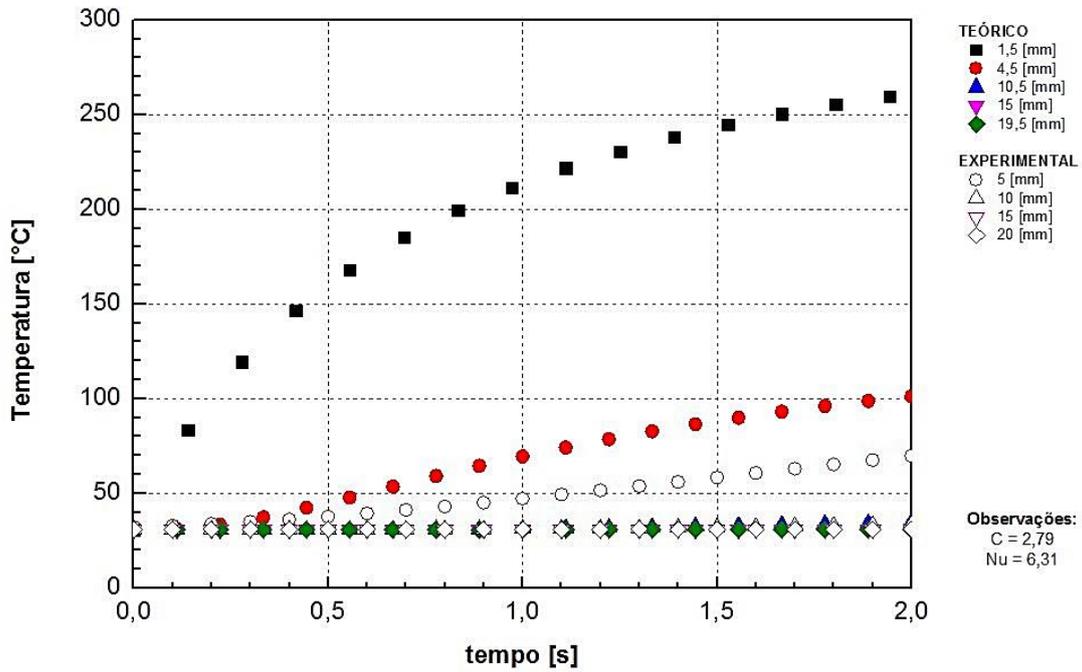


Fonte: Produção do autor.

Análise “real” do processo

Adotando $g = 9,8\text{m.s}^{-2}$, $D = 15\text{mm}$, $T_s = 40^\circ\text{C}$, $T_\infty = 180^\circ\text{C}$, $T_{filme} = 110^\circ\text{C}$, $Pr = 0,71326$ e os parâmetros da Tabela 6.8, calculou-se os valores de Nu e C do processo para o lado do aço inoxidável e comparou-se os resultados com os dados experimentais (Figura 6.41).

Figura 6.41 – Perfil de temperatura em função do tempo



Fonte: Produção do autor

Tabela 6.8 – Propriedades físicas dos materiais.

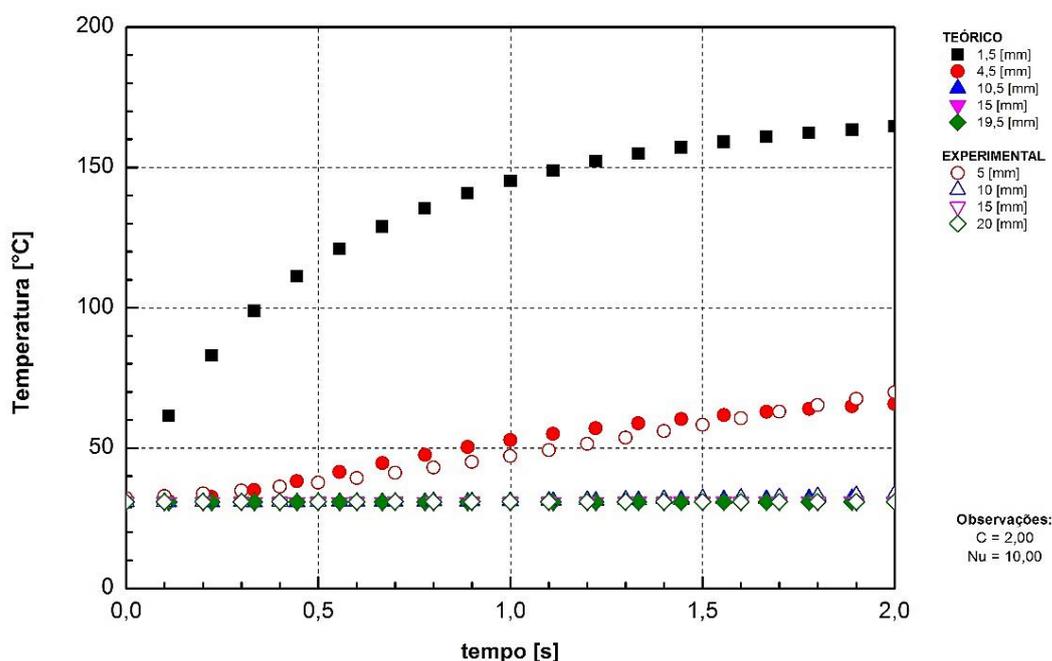
Parâmetro	Definição	Unidade	Ar	Aço
ρ	Massa específica	$kg.m^{-3}$	0,92856	7900
C_p	Calor específico	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	1,0122	477
k	Condutividade térmica	$W.m^{-2}.K^{-1}$	0.031583	14,9
ν	Viscosidade cinemática	$m^2.s^{-1}$	0,00002397	1670
μ	Viscosidade dinâmica	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$	0,000022256	1670
ΔT_f	Intervalo de fusão	K	-	1670

Fonte: CALLISTER (1999); BIRD et al. (2004); INCROPERA et al.(2008); ÇENGEL (2010).

A Figura 6.42 apresenta o gráfico de temperatura em função do tempo nos instantes iniciais (0-2s) do processo, adotando-se $Nu = 2,79$ e $C = 6,31$. Foram analisados os instantes iniciais do processo, uma vez que a variação do fluxo de energia é desprezível, porém, devido ao Nu e C serem variáveis durante o processo não se obteve um bom ajuste.

Realizou-se um ajuste das variáveis Nu e C para que o perfil teórico se adeque melhor aos dados experimentais, uma vez que nos instantes iniciais do processo ocorre a maior taxa de aquecimento devido ao atrito entre as superfícies dos materiais, deformação plástica e formação de “flash”. A Figura 6.42 apresenta o gráfico de temperatura em função do tempo, adotando-se $Nu = 10,0$ e $C = 2,0$, onde pode se observar um bom ajuste da curva.

Figura 6.42 – Perfil de temperatura em função do tempo.



Fonte: Produção do autor.

7 CONCLUSÕES

É possível utilizar o processo de soldagem por fricção rotativa (SFR) e obter a soldagem (junção) dos materiais dissimilares alumínio 6351-T6 e o aço inoxidável AISI 304L, com qualidade estrutural, ou seja, resistência mecânica na junção superior a menor resistência mecânica do material que a constitui (alumínio).

A soldagem utilizando pino de alumínio com geometria cônica possibilitou uma melhor remoção de óxidos, impurezas e outros contaminantes presentes nas superfícies de contato. A deformação plástica e a elevação da temperatura na região central da interface ocasionaram o escoamento dinâmico do material, resultando na formação de novas superfícies isentas de impurezas e elementos contaminantes, o que criou condições ideais para ocorrência de adesão física e química das superfícies de contato e a perfeita união dos materiais por difusão atômica.

A utilização de pinos cilíndricos com geometria cônica utiliza maior tempo de usinagem na sua preparação, entretanto, fornecem resistência mecânica superior e mais uniforme, reduzindo o número de defeitos em áreas internas das amostras (regiões centrais), como inclusões de óxidos e contaminantes, responsáveis pela falta de difusão.

Na soldagem por fricção de materiais dissimilares como o aço inoxidável e o alumínio, a rugosidade superficial do pino de aço inoxidável não se altera durante o processo e influencia diretamente na formação da nova superfície de contato do alumínio como resultante da aplicação e interação dos parâmetros de pressão, velocidade de rotação e tempo que ocorrem durante a fase de aquecimento.

Os ensaios mecânicos mostraram que as junções fabricadas com os pinos de alumínio com geometria cônica apresentaram resistência mecânica superior aos fabricados com geometria regular (plana), em aproximadamente 7%. Os

altos valores apresentados na junção quando comparados aos resultados obtidos utilizando-se pinos de alumínio com geometria regular, deve-se principalmente a melhor distribuição do fluxo de calor na interface de ligação e a inversão da direção deste fluxo no aço inoxidável durante o resfriamento, confirmada pelo ensaio térmico com a termocâmara.

Os testes de microdureza realizados no lado do alumínio, próximo da interface de ligação, mostraram claramente a existência de três regiões distintas. A região “A” onde os valores apresentaram um pequeno decréscimo, a região “B” onde temos elevação dos valores de microdureza, e a região “C” onde os valores de microdureza se equalizam com os valores de microdureza do material (alumínio).

As análises por EDX das superfícies fraturadas na interface de ligação por EDX mostraram que a percentagem dos elementos metálicos ferro (Fe), níquel (Ni) e manganês (Mg) na interface de ligação interferem na resistência mecânica da junção, conseqüentemente na qualidade estrutural da solda. Percentagens elevadas de Fe combinada a baixas percentagens de Ni ocasionam o aumento da resistência mecânica da junção, enquanto que, elevadas percentagens de Mg ocasionam a diminuição da resistência mecânica da junção.

As análises realizadas por XPS na interface de ligação das junções dissimilares fabricadas com os materiais aço inoxidável AISI 304L e a liga AA 6351-T6, mostraram a presença dos elementos Al, Fe, Cr nesta região em decorrência de difusão atômica, o que confirma os resultados obtidos nas análises por EDX utilizando as mesmas amostras.

O uso de termocâmara para monitoramento da temperatura durante a operação de soldagem por fricção possibilita a visualização em tempo real dos diferentes gradientes de temperatura envolvendo o equipamento, os materiais em contato e o meio ambiente. As perdas de calor por transferência de calor entre os materiais que estão sendo unidos e partes do equipamento (pinças, suportes, barramentos) fornecem dados importantes que podem auxiliar na

realização dos cálculos analíticos para determinação e modelagem da temperatura de soldagem.

Com o uso da termocâmara é possível visualizar o momento exato que se inicia o *flash*, acompanhar visualmente o deslocamento do fluxo de calor nas superfícies externas dos materiais durante a soldagem, e também verificar a reversão do fluxo de calor do aço inoxidável para o alumínio após o término da soldagem. Isto faz com que o resfriamento na interface de ligação ocorra de forma lenta, o que interfere diretamente nas propriedades mecânicas da junção dissimilar.

Resultados dos testes realizados com o Sistema MGC-PLUS – HBM utilizado para medições e monitoramento das temperaturas, demonstraram a sua eficiência e grande capacidade de coleta de dados durante a realização da soldagem por fricção. Nos pinos com geometria regular, as curvas de temperatura mostraram que a maior elevação de temperatura ocorre nos primeiros três segundos no chamado “raio médio”, região próxima da extremidade do pino. Já nos pinos com geometria cônica, embora a maior elevação de temperatura também aconteça nos instantes iniciais do processo, ela ocorre na região central da interface de ligação e permite melhor distribuição de calor durante a operação de soldagem.

A obtenção de junções dissimilares onde a ruptura do corpo de prova ocorreu fora da interface de ligação, é um ótimo indicativo de que houve uma perfeita distribuição da temperatura nas superfícies de contato durante a operação de soldagem por fricção.

Os valores numéricos obtidos a partir do modelamento matemático realizado em 1D, representados por meio das curvas onde se analisou o perfil da temperatura em função do tempo, apresentaram grande aproximação quando comparados aos dados obtidos experimentalmente.

8 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros voltados à formação de mestres e doutores nesta área são sugeridos os seguintes tópicos:

- 1-** Projetar e desenvolver equipamentos de soldagem por fricção rotativa que possam ser utilizados em laboratórios de pesquisas;
- 2-** Desenvolver modelos matemáticos computacionais que permitam cálculo da temperatura na interface de ligação a partir da inserção de dados de parâmetros de soldagem;
- 3-** Desenvolver junções dissimilares entre diferentes ligas metálicas e não metálicas;
- 4-** Estudar e caracterizar os mecanismos de ligação entre junções dissimilares utilizando o XPS;
- 5-** Projetar e desenvolver junções dissimilares para aplicações no setor aeroespacial e aeronáutico;
- 6-** Estudar e analisar valores de microdureza Vickers na interface de ligação de junções dissimilares;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHAMAD, S. I. **Three-dimensional, transient temperature analysis of friction welding of cylindrical bars**. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) — University of Petroleum & Minerals, Saudi Arabia, 1996.

ALCAN. **Manual de soldagem**. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 2015. 141 p. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/213095390/Manual-Soldagem-Aluminio-Alcan>>. Acesso em: 26 outubro 2015.

ALVES, E. P.; AN, C. Y.; NETO, F. P.; SANTOS, E. F. dos. Experimental determination of temperature during rotary friction welding of dissimilar materials. **Frontiers in Aerospace Engineering**, v. 1, n. 1, p. 20–26, 2012.

ALVES, E. P.; AN, C. Y.; NETO, F. P.; CASTORINO, E. S. dos. Experimental determination of temperature during rotary friction welding of AA1050 Aluminum with AISI 304 stainless steel. **Journal of Aerospace Technology and Management**, vol. 4, N° 1, p. 61-67, 2012.

ALVES, E. P. **Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa**. 126 p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - INPE, São José dos Campos/SP, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/374LNN2>>. Acesso em: 17 mar. 2016.

ALVES, E. P.; AN, C. Y.; NETO, F. P.. Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by Rotary friction welding process. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 2, n. 3, p. 301-306, 2010.

AMBROZIAK, A. **Badania Zgrzewanych Tarciowo Zlaczy AlMg3-Stal Austenityczna**. [S.l.]: Inzynieria Materialowa, 2003.

AMBROZIAK, A.; WINNICKI, M.; LASKA, P.; LACHOWICZ, M.; ZWIERZCHOWSKI, M.; LESNIEWSKI, J. Examination of friction coefficient in friction welding process of tubular steel elements. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 56, n. 4, p. 975–980, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. In: OLSON, D. L. (Ed.). **ASM metals handbook: properties and selection: irons, steels, and high performance alloys**. 10. ed. Ohio: Materials Park, 1990. v. 1, p. 1063. ISBN 978-0-87170-377-4.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. In: OLSON, D. L.; SIEWERT, T. A.; LIU, S.; EDWARDS, G. R. (Ed.). **ASM handbook: welding, brazing, and soldering**. 10. ed. Ohio: Materials Park, 1992. v. 6, p. 1299. ISBN 978-0-87170-382-8.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 8M - 04**: standard test methods for tension testing of metallic materials [metric]. [S.l.]: ASTM, 2004.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Friction welding. In: **Welding handbook**. 8. ed. Miami, 1991. v. 2. ISBN 0-87171-354-3.

ANANTHAPADMANABAN, D. **Studies on friction weldability of low carbon steel with stainless steel and aluminum with copper**. 119 p. Thesis (Doctor of Mechanical Engineering) - Sathyabama University, India, 2011.

ARCELOR MITTAL. **Aços Inoxidáveis**: aplicações e especificações. São Paulo: Arcelor Mittal Inox Brasil, 2008. 29 p. Catálogo eletrônico. Disponível em: <<http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>>. Acesso em: 24 março 2015.

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

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM metals handbook**: v.1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. Metals Park, Ohio, USA: Wrought Stainless Steels, September, 2005.

ATES, H.; TURKER, M.; A., K. Effect of friction pressure on the properties of friction welded ma 956 iron-based superalloy. **Materials and Design**, v. 28, n. 3, p. 948–953, 2007.

B., A. F.; S., A. T.; NINAN, R. T. An investigation of mechanical properties of aluminium 6063-t6 after friction welding process. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 17, n. 5, p. 203–207, 2014.

BANKER, J. G.; NOBILI, A. Aluminum-steel electric transition joints, effects of temperature and time upon mechanical properties. In: SCHNEIDER, W. (Ed.). **Light Metals**. Pennsylvania: The Minerals, Metals and Materials Society, 2002. p. 439–445.

BARROSO, L. C.; BARROSO, M. M. A.; CAMPOS FILHO, F. F.; CARVALHO, M. L. B.; MAIA, M. L. **Cálculo numérico**: com aplicações. [S.l.]: Harbra, 1987. ISBN 8529400895.

BASHER, U. M. **Friction Welding of 6061 Aluminum Alloy with YSZ-Alumina Composite for Improved Mechanical and Thermal Properties**. Thesis (Doctor) - University Sains Malaysia, Malaysia, 2013.

BHUSHAN, B.; GUPTA, B. **Handbook of tribology**: materials coatings, and surface treatments. New York: Mc Graw-Hill, 1991.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2004. ISBN 8521613938.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de soldagem por fricção - FW**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. Notas de Aula.

BURAKOWISKI, T.; WIERZCHON, T. **Surface engineering of metals**: principes, equipment, technologies. [S.l.]: Thermal Effects of Friction, 1998.

CALLISTER, W. **Material science and engineering**: an introduction. [S.l.]: John Wiley & Sons Incorporated, 1999. ISBN 9780471352433.

CENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa**. 4. ed. São Paulo, SP: MCGRAW HILL - ARTMED, 2010. ISBN 8580551277.

CHALMERS, R. E. The friction welding advantage. **Manufacturing Engineering**, v. 126, n. 5, p. 64–70, 2001.

CHMIELEWSKI, T.; GOLASKI, D.; WLOSINSKI, W.; ZIMMERMAN, J. Utilizing the energy of kinetic friction for the metallization of ceramics. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences**, v. 63, n. 1, p. 201-207, 2015.

COPPERMETAL Comércio de Aços e Metais Ltda. **Relatório de análises química e ensaios de tração – aço inoxidável AISI 304 L**. São Paulo: Coppermetal, 2008, p. 1/1, Nº 51.439.

COPPERMETAL Comércio de Aços e Metais Ltda. **Relatório de análises química e ensaios de tração – alumínio AA6351- T6**. São Paulo: Coppermetal, 2008, p. 1/1, Nº 46.877.

CRUZ, M. F.; MOURA NETO, C. Friction stir welding review: potencial de aplicação na indústria aeroespacial. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 9., 2009, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: ITA, 2009.

CZICHOS, H. Presentation of friction and wear data. In: AND, P. J. B. (Ed.). **ASM handbook**: friction, lubrication, and wear technology. 10. ed. Ohio: Materials Park, 1992. v. 18, p. 489–492. ISBN 0-87170-706-3.

D'ALVISE, L.; MASSONI, E.; WALLOE, S. Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 125-126, p. 387–391, 2002.

DONACHIE, M. J.; DONACHIE, S. J. **Superalloys: a technical guide**. 2. ed. [S.I.]: ASM International, 2002. 439 p. ISBN 978-0-87170-749-9.

ELLIS, C. R. G. Continuous drive friction welding of mild steel. **Welding Research Supplement**, v. 169, p. 183–197, 1972.

FARIA P. E.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem por fricção**. infosolda, 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol03.pdf>>. Acesso em: 22 abril 2009.

FU, L.; DUAN, L. Y.; DU, S. G. Numerical simulation of inertia friction welding process by finite element method: A model was developed to predict temperature evolution, stress, strain, and the final geometry of inertia friction welded parts. **Welding Journal**, p. 65–70, 2003.

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

FUKUMOTO, S.; AL. et. Evaluation of friction weld interface of aluminum to austenitic stainless steel joint. **Materials Science and Technology**, v. 13, n. 8, p. 686, 1997.

FUKUMOTO, S.; INOUE, T.; MIZUNO, S.; TOMITA, K. O. T.; YAMAMOTO, A. Friction welding of titanium alloy to stainless steel using ni interlayer. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 15, n. 2, p. 124–130, 2010.

FUKUMOTO, S.; TSUBAKINO, H.; OKITA, K.; ARITOSHI, M.; TOMITA, T. Friction welding process of 5052 aluminum alloy to 304 stainless steel. **Materials Science and Technology**, v. 15, p. 1080, 1999.

FUTURE-TECH CORP. **Microhardness tester FM-800/FM-300/FM-100series**. 2015. Disponível em: <<http://www.ft-hardness.com/en/product/fm.html>>. Acesso em: 27 outubro 2015.

GARG, S. F. Comprehensive workshop technology: manufacturing process. In: . [S.I.]: **Laxmi publications**, 2009. cap. Solid State Welding, p. 542. ISBN 978-8170086352.

GATWICK TECHNOLOGIES LTD. **Friction welding machines**. 2015. Disponível em: <<http://www.gatwicktechnologies.com/products/friction-welding-machines>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

GENICOLO, M. A. C. G. **Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método Friction Stir Welding em estruturas**

aeronáuticas. 62 p. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GIPIELA, M. L. **Influência dos parâmetros de processo na geração de defeitos na soldagem FSW da liga de alumínio 5052**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

GRONG, O. **Metallurgical modelling of welding**. London: The Institute of Materials, 1994.

HBM. **MGCplus - Sistema de amplificação de medição**. 2015. Disponível em: <<http://www.hbm.com/pt/menu/produtos/sistema-aquisicao-dados/laboratorio-banco-prova/>>. Acesso em: 14 março 2015.

HIROSHI, H.; HUANG, W.; MITSURU, N.; TOSHINORI, K.; MASAYOSHI kitagawa; CHANG-GYU, K. **Effects of upset conditions on friction welding charecteristics of spheroidal graphite cast iron to mild steel**. Tokyo/Japan: Nihon Chuzo Kogakuka, 1996. Revue.

HOSKING, F. M.; STEPHENS, J. J.; REJENT, J. A. Intermediate temperature joining of dissimilar metals: Stainless steel and Ag-Ni-Ag laminate are joined to copper with au-based alloys at 400-550°C (752-1022°F). **Welding Research Supplement**, p. 127–136, 1999.

HOWES, T.; THREADGILL, P. **Rotary friction welding: a guide to best practice**. Whashington: Manufacturing Technology, Inc, 2016.

INCROPERA, F. P.; DEWITT D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e da massa**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. ISBN 8521615841.

JACOBY, B. R. **Fundamental mechanisms affecting friction welding under vacuun**. Thesis (Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering and Master of Science in Mechanical Engineering) – Massachusetts Institute of Technology, U.S.A., 1991.

JAMES F. LINCOLN ARC WELDING FOUNDATION. Welding stainless steel In: SABO, R. S. (ed.). **The procedure handbook of arc welding**. 12. ed. Ohio: James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1973. p. 742. Hardcover.

KANNAN, P. **Contemplating the feasibility of friction welding for dissimilar joints with interlayers**. Thesis (Doctor) — Anna University, India, 2014.

KHAN, I. A. **Experimental and numerical investigation on the friction**

welding process. Thesis (Doctor of Mechanical Engineering) - Jawaharlal Nehru Technological University, India, 2011.

KHAN, M. A. Z. K. **Bonding of stainless steel to aluminum base alloy.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Mehran University of Engineering and Technology, Pakistan, 2008.

KHANY, S. E.; KRISHNAN, K. N.; WAHED, M. A. Study of transient temperature distribution in a friction welding process and its effects on its joints. **International Journal of Computational Engineering Research**, v. 2, n. 5, p. 1645–1655, 2012.

KIMURA, M.; INOUE, H.; KUSAKA, M.; KAIZU, K.; FUJI, A. Analysis method of friction torque and weld interface temperature during friction process of steel friction welding. **Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering**, v. 4, n. 3, p. 401–413, 2010.

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. 43, n. 3, 2003.

KRAGEL'SKIY, I. V.; VINOGRADOVA, I. E. **Friction coefficients.** [S.I.]: Mashgiz, 1955.

KRAGEL'SKIY, I. V.; VINOGRADOVA, I. E. **Development of friction science.** [S.I.]: Academy of Sciences, 1956. USRR.

KUCHUK-YATSENKO, S. I.; ZYAKHOR, I. V. I. Mechanism of bimetal joints formation in friction welding. **The Paton Welding Journal**, p. 2–9, 2002.

KUHLMAN, G. Forging of aluminum alloys. In: SEMIATIN, S. (ed.). **ASM handbook: metalworking: bulk forming.** 10. ed. Ohio: Materials Park, 2005. v. 14A, p. 299–312. ISBN 0-87170-706-3.

KUSCU, H.; SAHIN, M.; BECENEN, I. Experimental determination of temperature by the friction welding method. **Heat Transfer Research**, v. 40, n. 2, p. 103–110, 2009.

LARSEN-BASSE, J. Introduction to friction. In: AND, P. J. B. (ed.). **ASM handbook: friction, lubrication, and wear technology.** 10. ed. Ohio: Materials Park, 1992. v. 18, p. 27–38. ISBN 0-87170-706-3.

LEE, K.; SAMANT, A.; WU, W. Finite element modeling of inertia welding processes. In: **Proceedings...** [S.I.]: NUNIFORM Conference, 2001. p. 1095-1100.

- LEE, W. B. Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of aluminum alloy 5052 - a36 steel joint. **Materials Science and Technology**, v. 19, p. 773–778, 2003.
- LESSA, C. R. L.; CAREGNATO, M. F.; CUNHA, P. H. C. P.; CHLUDZINSKI, M.; STROHAECKER, T. R.; MACEDO, M. A. L. K.; PAES, M. T. P. Estudo da microestrutura formada no processo de soldagem por atrito em aço C-Mn com pino consumível. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 1, 2011.
- LI, R. DI; LI, J. LONG; XIONG, J. TAO; ZHANG, F. SHENG; ZHAO, K.; JI, C. ZHONG. Friction heat production and atom diffusion behaviors during mg-ti rotating friction welding process. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 22, n. 11, p. 2665–2671, 2012.
- LIN, C. B.; MU, C. K.; WU, W. W.; HUNG, C. H. The effect of joint design and volume fraction on friction welding properties of A360/SIC (p) composites. **Welding Journal-New York**, v. 78, n. 3, p. 100–108, 1999.
- LOPEZ, F. S. **Montagem e avaliação de uma máquina de soldagem por fricção**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- LOW, M. **Determinação do estágio inicial da recristalização em ligas de alumínio por difração de raios-x**. 2000. 113 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2000.
- MAALEKIAN, M.; KOZESCHNIK, E.; BRANTNER, H.; CERJAK, H. Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars. **Acta Materialia**, v. 56, n. 12, p. 2843–2855, 2008.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas**: processos. Porto Alegre: Livraria Conceitual, 1996. 477 p.
- MACKWOOD, A.; CRAFER, R. Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review. **Optics & Laser Technology**, v. 37, n. 2, p. 99–115, 2005.
- MARCONATO, E. A. **Influência de defeitos nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por FSW da liga AA6013 - T6**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- MILAN, M. T.; MALUF, O.; SPINELLI, D.; FILHO, W. W. B. **Metais**: uma visão objetiva. 2. ed. São Carlos: Editora Cubo, 2014. 284 p. ISBN 978-85-60064-46-5.

MISIRLI, C.; SAHINB, M.; KUSCU, H. Temperature determination of ST-Al joints during friction welding. **Advanced Materials Research**, v. 463-464, p. 1538–1542, 2012.

MOAL, A.; MASSONI, E. Finite element modelling of the inertia welding of two similar parts. **Engineering with Computers**, v. 12, n. 6, p. 479–512, 1995.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Apostila de sala de aula.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte/MG: Editora UFMG, 2005. 363 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Apostila de sala de aula. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 22 outubro 2015.

MONTEIRO, W. R. **Junção de materiais dissimilares - aço inoxidável AISI 304 - ligas de alumínio para aplicações espaciais**. 124 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Aeroespacial) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

MORELLATO, F. **Decapagem & passivação de aço inoxidável**. São Paulo: Grupo Humma, 2015. Apostila Técnica. Disponível em: <http://www.grupohumma.com.br/biblioteca/Decap_Passiv.pdf>. Acesso em: 20 março 2015.

NEELAN, R. J. **A Study of interlayer assisted friction welding of incompatible materials**. Thesis (Master of Applied Science) - University of British Columbia, Canada, 1984.

NIKOLAEV, G.; OLSHANSKY, N. **Advanced welding process**. Moscow: MIR Publishers, 1977. 245 p.

NOH, M. Z.; HUSSAIN, L. B.; AHMAD, Z. A. Alumina-mild steel friction welded at lower rotational speed. **Journal of materials processing technology**, v. 204, n. 1-3, p. 279–283, 2008.

OKIMOTO, P. C. **Soldagem: conceitos fundamentais e classificação**. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2005. Apostila de sala de aula. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM254/Aula1.pdf>>. Acesso em: 27 junho 2014.

PARDINI, A. C. P. **Estudo da oxidação em alta temperatura dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 430 A e AISI 430E em ar.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

PIGORETTI, E. V. **Junção por difusão da liga Ti-6Al-4V ao aço inoxidável AISI 316 L.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos/SP, 1999.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear.** New York: Wiley, 1964.

RICH, T.; ROBERTS, R. **The forge phase of friction welding:** a plastic model is designed to theoretically describe the movement of interfacial material during the forging phase of friction welding. *Welding Research Supplement*, p. 137–146, 1971.

RICH, T.; ROBERTS, R. Thermal analysis for basic friction welding. **Metal Construction and British Welding Journal**, p. 93-98, 1971.

RICKS, R. A.; PARSON, N. C.; YIU, H. L.; COURT, S. A. Microstructural optimization for extrusion of 6063 alloys. In: INTERNATIONAL ALUMINUM EXTRUSION TECHNOLOGY SEMINAR, 5., 1992, Chicago. **Proceedings...** Chicago: Aluminum Association, 1992. v. 2, p. 57–71.

RODRIGUES, D.; LOUREIRO, A.; LEAL, R. **Soldadura por fricção linear.** Universidade de Coimbra, 2014. Disponível em: <http://www2.dem.uc.pt/dulce.rodrigues/ref_web/rn_1.pdf>. Acesso em: 03 outubro 2014.

ROMBAULT, P. **Joining of dissimilar materials through rotary friction welding.** Thesis (Master in Electromechanical Engineering) - Ghent University, Belgium, 2011.

RUMA; WAHED, M. A.; FARHAN, M. A study on the effect of external heating of the friction welded joint. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 5, 2013.

SAHOO, R. **Study of friction welding.** 2007. Thesis (Bachelor of Technology in Mechanical Engineering) - National Institute of Technology, Rourkela/India, 2007.

SATHIAN, S. **Metallurgical and Mechanical Properties of Ni-Based Superalloy Friction Welds.** Thesis (Master of Applied Science) — University of Toronto, Canada, 1990.

SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S.; HAQ, A. N. Effect of friction welding parameters

on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 31, n. 11-12, p. 1079–1082, 2006.

SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S.; Noorul Haq, A. Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints. **Materials and Design**, v. 29, n. 6, p. 1099–1109, 2008.

SCZANCOSKI, J. C. **Propriedades mecânicas e tribológicas de al submetido a nitrocementação por implantação iônica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005.

SELI, H.; M, A. I.; ISMAILB, E. R.; AHMAD, Z. A. Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 20, n. 9, p. 1209-1216, 2010.

SELI, H.; NOH, M. Z.; ISMAI, A. I. M.; RACHMAN, E.; AHMAD, Z. A. Characterization and thermal modelling of friction welded alumina-mild steel with the use of al 1100 interlayer. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 506, n. 2, p. 703–709, 2010.

SHIZARDI, A. A. **diffusion bonding aluminum alloys and composites: new approaches and modelling**. Thesis (Doctor of Materials Science and Metallurgy) — University of Cambridge, England, 1997.

SHRIBMAN, V. Magnetic pulse welding for dissimilar and similar materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH SPEED FORMING, 3., 2008, Israel. **Proceedings...** Deutsch: Technische Universitat Dortmund, 2008.

SINGLA, Y. K. **Evaluation of mechanical behaviour of friction welded bimetallic welds**. 2010. Thesis (Master of Engineering in Production & Industrial) - University Patiala, India, 2010.

SLUZALEC, A. Thermal effects in friction welding. **International Journal of Mechanical Science**, v. 32, p. 467–478, 1990.

SPERANDIO, D. **Cálculo numérico características matemáticas e computacionais dos métodos numéricos**. São Paulo: Prentice Hall, 2003. ISBN 8587918745.

STONEHAM, A.; DUFFY, D.; HARDING, J.; TASKE, P. Wetting and interfacial energies for carbides and oxides. In: PETEVES, S. (Ed.). **Ceramic Interfaces II: Understanding and tailoring interfaces for coating, composite and joining applications**. Netherlands: Commission of the European Communities, 1991. p.

573-582.

TAKEGAMI, H. & SHINODA, T. 2004. Friction welding of Cr-Zr copper alloy. **quarterly journal of the japan welding society**, 22, 477-483.

TANIGUSHI, C.; OKUMURA, T. **Engenharia de soldagem e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1982. 461 p.

THOMASNET. **Infrared camera includes FireWire digital output**. 2015. Disponível em: <<http://news.thomasnet.com/fullstory/infrared-camera-includes-firewire-digital-output-17793>>. Acesso em: 27 outubro 2015.

TRAVESSA, D. N. **Ligação por difusão de Al₂O₃ ao aço inoxidável AISI 304, com intercamadas de alívio de tensões**. 1998. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.

TYLECOTE, R. F. **The Solid Phase Welding of Metals**. [S.l.]: St. Martin's Press, 1968. 334 p.

UNFRIED, J.; HERMENEGILDO, T. F.; PAES, M. T. P.; POPE, A. M.; RAMIREZ, A. J. Estudo da influência dos parâmetros de processo na microestrutura da zona termo mecanicamente afetada na soldagem por atrito com pino consumível em aços C-Mn. **Tecnol. Metal. Mater. Miner**, v. 6, n. 2, p. 73-79, 2009.

VAIRIS, A. Investigation of frictional behaviour of various materials under sliding conditions. **European Journal of Mechanics Series**, v. 6, p. 929–945, 1997.

VERSTRAETE, J.; WAELE, W. D.; FAES, K. Magnetic pulse welding: Lessons to be learned from explosive welding. **International Journal of Sustainable Construction and Design**, v. 2, n. 3, p. 458–464, 2011. ISSN 2032-7471.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, V. D. O. **Soldagem**: processos e metalurgia. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 504 p.

WEISS, R.; SASSANI, F. Strength of friction welded ceramic metal joints. **Materials Science and Technology**, v. 14, p. 554–560, 1998.

WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA. **Friction stir welding**. 2015. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding>. Acesso em: 26 outubro 2015.

YILBAS, B. S.; SAHIN, A. Z. **Friction welding**: thermal and metallurgical characteristics. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 71 p.

YLBAS, B. S.; AHMET, Z. S.; KAHRAMAM, N.; AL-GARNI, A. Z. Friction welding of St-Al and Al-Cu materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 49, p. 431–443, 1994.

ÖZDEMİR, N. Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304I and AISI 4340 steel as a function rotational speed. **Materials Letters**, v. 59, n. 19-20, p. 2504–2509, 2005.

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

ZHANG, Q. Z.; ZHANG, L. W.; LIU, W. W.; ZHANG, X. G.; ZHU, W. H.; QU, S. 3d rigid viscoplastic Fe modelling of continuous drive friction welding process. **Science and Technology of Welding & Joining**, v. 11, p. 737–743, 2006.

ZIEDAS, S.; TATINI, I. (Ed.). **Soldagem**. São Paulo: SENAI/SP, 1997. 553 p. Apostila de sala de aula.