Ministério da
Ciência e Tecnologia

UM PAÍS DE TODOS
GOVERNO FEDERAL

INPE-16704-TDI/1645

JUNÇÕES DE MATERIAIS DISSIMILARES UTILIZANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA

Eder Paduan Alves

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pela Drs. Chen Ying An, e Francisco Piorino Neto, aprovada em 24 de março de 2010.

URL do documento original:
<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.05.23.42>

INPE
São José dos Campos
2010

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

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@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):
Presidente:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Membros:
Drª Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Drª Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTRIA:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Ministério da
Ciência e Tecnologia

UM PAÍS DE TODOS
GOVERNO FEDERAL

INPE-16704-TDI/1645

JUNÇÕES DE MATERIAIS DISSIMILARES UTILIZANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA

Eder Paduan Alves

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pela Drs. Chen Ying An, e Francisco Piorino Neto, aprovada em 24 de março de 2010.

URL do documento original:
<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.05.23.42>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Alves, Eder Paduan.
Al87j Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa / Eder Paduan Alves. – São José dos Campos : INPE, 2010.
xxix + 126 p. ; (INPE-16704-TDI/1645)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
Orientadores : Drs. Chen Ying An, e Francisco Piorino Neto.

1. Soldagem por fricção. 2. Soldagem de materiais dissimilares. 3. Soldagem no estado sólido. 4. Parâmetros de soldagem. 5. Aço inoxidável. I.Título.

CDU 621.791.1

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores

Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Chen Ying An

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Francisco Piorino Neto

Orientador(a) / IAE/CTA / SJCampos - SP

Dr. Carlos Moura Neto

Convidado(a) / ITA / SJCampos - SP

Aluno (a): Eder Paduan Alves

São José dos Campos, 24 de março de 2010

“De nada vale nosso conhecimento se não soubermos expressa-lo no mundo”.

(Autor Desconhecido)

Dedico este trabalho em especial a minha esposa Vânia e a meu filho Thales, pelo apoio, incentivo e compreensão, pois precisei dedicar grande parte do meu tempo aos estudos, à pesquisa, e ao desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A meus pais e irmãos que, mesmo com todas as dificuldades, sempre me incentivaram a continuar. Ao meu tio Osni Padoan (*in memoriam*), responsável pelo início da minha carreira profissional e apoio nos momentos mais difíceis. A minha esposa, que sempre teve paciência em me dividir com os estudos, pelo seu envolvimento e pelo seu carinho.

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 tornar realidade um sonho antigo, o sonho de voltar a estudar e concluir o curso de mestrado.

À Divisão de Mecânica (AME) – IAE, pela disponibilização da matéria prima, preparação dos corpos de prova, dispositivos e usinagem final das conexões dissimilares obtidas através do processo de soldagem por fricção.

Em especial ao Dr. Chen Ying An e ao Dr. Francisco Piorino Neto 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 idéia 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 Dissertação de Mestrado.

À Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono pela confiança depositada no Projeto de Pesquisa apresentado, motivando novas descobertas e permitindo acreditar que o caminho buscado, desde o início do trabalho, estava correto.

Ao Dr. Carlos de Moura Neto (ITA), pela capacidade de reorientar caminhos gerando a reflexão necessária ao pensar e fazer científico e, pela atenção dispensada nos momentos conclusivos deste trabalho.

Ao Dr. Paulo Henrique de Oliveira Rappl, pela maestria na arte de comunicar, por demonstrar como a comunicação é suporte relevante para a aproximação do conhecimento científico ao meio social.

Ao Chefe da Divisão de Mecânica (AME) - IAE, Engº Valderci José Giacomelli, que foi um dos pilares que sustentou e viabilizou junto à Instituição na qual trabalho a realização da Pesquisa. Desde o momento da permissão para a realização do Curso de Mestrado, assegurando o meu afastamento nos dias de aulas, oferecendo sugestões e demonstrando interesse no trabalho, possibilitando a realização dos testes de soldagem e ensaios mecânicos, sem os quais a realização da etapa experimental não seria possível.

Ao Dr. Euclides Castorino da Silva, pela valiosa contribuição, promovendo a necessária aproximação com o mundo acadêmico e ensinando a apurar o olhar em relação ao campo de análise teórica, tão complexa num trabalho de Mestrado.

À técnica em química Maria Lúcia Brison pela participação e colaboração na realização das análises por MEV-EDX no Laboratório Associado de Materiais e Sensores – LAS/INPE.

RESUMO

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de junções no estado sólido de materiais dissimilares alumínio AA 1050 e aço inoxidável AISI 304, que possam ser utilizadas nas tubulações de reservatórios de propelentes líquidos e demais tubulações dos Veículos Lançadores de Satélites. As junções foram obtidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional, que combina o calor gerado entre o atrito de duas superfícies e deformação mecânica. Foram realizados testes de soldagem com diferentes parâmetros de processo e medida a temperatura na interface de ligação. Os resultados desses testes foram analisados por meio de ensaios mecânicos de tração, microdureza Vickers, ensaios metalográficos e MEV-EDX. A resistência da junta variou com o aumento do tempo de fricção e com a utilização de diferentes valores de pressão. Foram obtidas junções com propriedades mecânicas superiores a da liga de alumínio AA 1050 no tempo de fricção de 34 segundos, com a fratura ocorrendo no alumínio longe da interface de ligação. A temperatura monitorada na região de contato entre os dois materiais durante o processo apresentou um valor de 376ºC, coincidindo com a faixa de temperatura de forjamento á quente para o alumínio AA 1050 (315°C - 430°C). A análise feita pelo EDX na interface da junção mostra que ocorre interdifusão entre os principais elementos químicos dos materiais envolvidos. O processo de soldagem por fricção convencional demonstra ser um ótimo método para obtenção de junções entre materiais dissimilares que não são possíveis pelos processos de soldagem por fusão.

JOINTS OF DISSIMILAR MATERIALS USING THE PROCESS OF ROTATIVE FRICTION WELDING

ABSTRACT

The purpose of this work is the development of solid state joints of dissimilar material AA 1050 aluminum alloy and AISI 304 stainless steel, which can be used in pipes of tanks of liquid propellants and other pipes of the Satellite Launch Vehicle. The joints were obtained using welding process by conventional rotary friction, which combines the heat generated from friction between two surfaces and mechanical deformation. Tests were conducted with different welding process parameters and measured the temperature at the interface of bonding. The results of these tests were analyzed by means of tensile tests, Vickers microhardness, metallographic tests and SEM-EDX. The strength of the joints varied with increasing friction time and the use of different pressure values. Joints with superior mechanical properties of the AA 1050 aluminum alloy could be obtained at a frictional time of 34 seconds, with the fracture occurring in the aluminum away from the interface of bonding. The temperature monitored in the region of contact between the two materials during the process had a value of 376°C, coinciding with the temperature range for hot forging of the AA 1050 aluminum alloy (315°C - 430°C). The analysis by EDX at the interface of the junction shows that occur interdiffusion between the main chemical components of the materials involved. The welding process by conventional rotary friction proves to be a good method for obtaining joints between dissimilar materials that are not possible by the fusion welding processes.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1 - Vista geral do Veículo Lançador de Satélite – VLS-1 e localização da Baia de Controle 02
Figura 1.2 - Interior da Baia de Controle. Vista do reservatório esférico de hidrazina e junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação de alumínio AA 1050 03
Figura 1.3 - Vista ampliada da junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação de alumínio AA 1050 03
Figura 3.1 - Diagrama de fases Fe-Al. 12
Figura 3.2 - Falta de fusão causada pela não remoção da camada de óxidos de forma adequada. Cortesia de Roland Andrews 24
Figura 3.3 - Pequenas porosidades distribuídas numa chapa de 6 mm de espessura, soldada de topo pelo processo TIG. Cortesia da TWI Ltd. 25
Figura 3.4 - Trinca de solidificação obtida após a soldagem da liga de alumínio AA 5083 com o processo TIG. Cortesia da TWI Ltd. 26
Figura 3.5 - Trinca de solidificação obtida após a soldagem de uma chapa de alumínio A6083, com 3 mm de espessura e metal de adição 4043 pelo processo TIG. Cortesia da TWI Ltd. 26
Figura 3.6- Soldagem GTAW: (a) detalhe da região do arco; (b) montagem usual. 29
Figura 3.7 - Vista esquemática do processo GMAW. 30
Figura 3.8 - Passividade dos aços cromo, expostos durante 10 anos a atmosfera industrial 33
Figura 3.9 - Curvas de Tensão – Deformação para alguns aços inoxidáveis .. 38
Figura 3.10 - Microestrutura típica do aço inoxidável austenítico 304 (50X) 39
Figura 3.11 - Etapas do processo de soldagem por atrito convencional. A) Período de aproximação; B) Aplicação de P1, t1; C) Término de aplicação de P1, t1, e frenagem da máquina (RPM =0); D) Aplicação de P2, t2 e término da soldagem. 47

Figura 3.12 - Equipamento de soldagem por fricção convencional 52
Figura 3.13 – Etapas da soldagem por fricção inercial. A) Período de aproximação; B) Desligamento da unidade motora e aplicação da pressão “P”; C) Redução da velocidade (RPM) através aplicação da pressão “P”; D) Término da soldagem (RPM=0, P=0)..... 53
Figura 3.14- Equipamento de soldagem por fricção inercial 54
Figura 3.15 - Linhas de fluxo nas duas variantes do processo 56
Figura 3.16 - Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a velocidade constante 67
Figura 3.17 - Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a pressão constante. 73
Figura 3.18 - Diferentes formatos e aparências de rebarbas, obtidos com o uso diferentes parâmetros na soldagem da liga AA 1050 com o aço inoxidável AISI 304 76
Figura 3.19 - Distribuição da temperatura na interface de ligação: TA – Temperatura ambiente 79
Figura 4.1 - Máquina de soldagem por fricção rotativa convencional GATWICK..... 83
Figura 4.2 - Ilustração esquemática do processo de soldagem. 85
Figura 4.3 - Dimensões dos corpos-de-prova conforme previsto na Norma ASTM E 8M 85
Figura 4.4 - Foto da máquina de ensaios de tração utilizada para a realização dos ensaios de tração, pertencente à Divisão de Química – Instituto de Aeronáutica e Espaço – DCTA..... 86
Figura 4.5 - Amostra utilizada para realização de ensaios metalográficos e análise por EDX..... 87
Figura 4.6 - Fotografia do microscópio eletrônico de varredura (MEV com EDX) – Laboratório Associado de Materiais e Sensores/INPE 88
Figura 4.7 - Sistema TDL composto de termopar TK, Data Logger, leitor IR (infravermelho) e notebook para monitoramento da temperatura ... 89
Figura 5.1 - Interfaces dos pinos que foram unidas (a); rebarba gerada pelo processo (b); corpo-de-prova para ensaio e tração (c)..... 93
Figura 5.2 – Corpo-de-prova Nº 5 com ruptura na interface de ligação. 95

Figura 5.3 – Corpo-de-prova Nº 8 momentos antes da ruptura, longe da interface de ligação 95
Figura 5.4 – Corpo-de-prova Nº 5 (a) – ruptura na interface; corpo de prova Nº 8 (b) – ruptura longe da interface de ligação. 96
Figura 5.5 – Corpos-de-prova Nº 1,2,e 3, em alumínio AA 1050 / aço inoxidável AISI 304 após a realização dos ensaios de tração 96
Figura 5.6 – Fotomicrografia da liga de alumínio AA 1050, próxima à interface de ligação com a localização dos pontos de medição e seus valores de dureza Vickers (HV) 97
Figura 5.7– Fotomicrografia aço inoxidável AISI 304, próximo à interface de ligação com a localização dos pontos de medição e seus valores de dureza Vickers (HV) 97
Figura 5.8 – Fotomicrografia da interface de ligação entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, mostrando os pontos de medição e a distância aproximada, em escala, das regiões que apresentaram variação da microdureza Vickers..... 99
Figura 5.9 – Gráfico Microdureza HV x Distância da Interface de Ligação – liga AA 1050..... 100
Figura 5.10 – Gráfico Microdureza HV x Distância da Interface de Ligação – aço inoxidável AISI 304. 100
Figura 5.11 - Fotomicrografia da interface de soldagem entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 com aumento de 100 X 101
Figura 5.12 - Fotomicrografia da liga de alumínio AA 1050 com aumento de 500 X. 102
Figura 5.13 - Fotomicrografia do aço Inoxidável AISI 304 com aumento de 500 X 103
Figura 5.14 - Fotomacrografia da seção transversal da liga AA 1050 com aumento de 8X 104
Figura 5.15 - Análise por EDX mostrando a interdifusão entre os principais elementos da liga AA 1050 (Al) e do aço inoxidável AISI 304(Fe) 105
Figura 5.16 - Análise por EDX mostrando a interdifusão entre os elementos Fe, Cr e Ni (aço inoxidável AISI 304), e o Al (alumínio AA 1050)..... 106

Figura 5.17 - Espessura da camada intermetálica medida na interface de ligação entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 (20.000 X) 106
Figura 5.18 - Gráfico Tempo X Temperatura – Liga AA 1050 e aço Inoxidável AISI 304 com tempo total de 34 segundos..... 107
Figura 5.19 - Gráfico Tempo X Temperatura – liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304 com tempo total de 62 segundos..... 109
Figura 5.20 - Corpos-de-prova soldados da liga AA 1050 e aço inoxidável 304 com diferentes medidas de deslocamentos de fluxos térmicos (DFT – Tabela 3) 110
Figura 5.21 - DFC dos corpos de prova 5, 6,7, e 8, após soldagem e remoção da rebarba 111
Figura 5.22 - Gráfico Tempo X Temperatura – liga AA1050 e aço inoxidável AISI 304, com tempo real de 34s, mostrando diferentes taxas de aquecimento e resfriamento pelo espaçamento entre os pontos .. 112
Figura 5.23 - Gráfico Tempo X Temperatura – liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304, com tempo real 62s, mostrando diferentes taxas de aquecimento e resfriamento pelo espaçamento entre os pontos .. 113
Figura 5.24 – Conexões produzidas através do processo de soldagem por fricção rotativa convencional (parte mais escura – aço inoxidável AISI 304; parte mais clara – liga AA 1050)..... 114

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 3.1 - Principais elementos de liga e suas funções dentro da liga 15
Tabela 3.2 - Designação das ligas trabalháveis por grupos de acordo com a ABNT – NBR 6834 16
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas das principais ligas de alumínio trabalháveis 22
Tabela 3.4 - Propriedades físicas típicas de vários tipos de aços inoxidáveis . 37
Tabela 3.5 - Composições Típicas para Aços Inoxidáveis Austeníticos..... 40
Tabela 3.6 - Propriedades Mecânicas Típicas dos Aços Inoxidáveis Austeníticos..... 42
Tabela 3.7 – Comparações entre as duas variações do processo..... 55
Tabela 3.8 - Valores de força e velocidade crítica mínima de soldagem..... 72
Tabela 3.9 - Valores de algumas variáveis do processo, características da soldagem por fricção rotativa convencional 74
Tabela 4.1 - Composições químicas nominais dos materiais (%) 81
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas nominais dos materiais 81
Tabela 5.1 - Composições químicas dos materiais utilizados no estudo atual (%)..... 91
Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no estudo atual 92
Tabela 5.3 - Resultados obtidos nos ensaios de tração..... 94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

DCTA – Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial

IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço

AME - Divisão de Mecânica do IAE

AME-F - Subdivisão de Fabricação

AMR - Divisão de Materiais do IAE

RPM – Rotação por Minuto

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

EDX - Espectroscopia Dispersiva de Raios X

IACS – *International Annealed Copper Standard*

HB – Dureza Brinell

LAS - Laboratório Associado de Materiais e Sensores - INPE

ZTA - Zona Termicamente Afetada

SCR - Sistema de Controle de Rolamento

VLS - Veículo Lançador de Satélite

TDL - Sistema Termopar / Data Logger

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

GMAW - *Gas Metal Arc Welding*

TIG -*Tungsten Inert Gas*

MIG - *Metal Inert Gas*

MAG - *Metal Active Gas*

CNC – Comando Numérico Computadorizado

RC – Redução do comprimento

DFC – Deslocamento do Fluxo de Calor

AA - *Aluminum Association*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AWS – *American Welding Society*

FW – *Friction Welding*

LISTA DE SÍMBOLOS

P – Pressão aplicada

t – Tempo

V – Velocidade de soldagem

$\mathbf{C_t}$ – Condutividade térmica

$\boldsymbol{\alpha_t}$ – Difusividade térmica

$\boldsymbol{\sigma_t}$ máx – Tensão de tração máxima

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 01

2 OBJETIVOS 07

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11

3.1 Introdução 11

3.2 Alumínio 14

3.2.1 Classificação das ligas de alumínio 15

3.2.1.1 Ligas trabalháveis 16

3.2.1.2 Características e aplicações das ligas de alumínio 16

3.2.2 Propriedades físicas e químicas do alumínio e suas ligas 18

3.2.2.1 Propriedades físicas 18

3.2.2.2 Propriedades químicas 20

3.2.2.3 Propriedades mecânicas 20

3.2.3 Soldabilidade do alumínio e das sua ligas 23

3.2.4 Processos de soldagem soldagem do alumínio e das suas ligas 28

3.3 Aços inoxidáveis 32

3.3.1 Influência de outros elementos de liga 33

3.3.2 Classificação dos aços inoxidáveis 35

3.3.3 Propriedades físicas, quimicas e mecâncias dos aços inoxidáveis 36

3.3.3.1 Propriedades físicas 36

3.3.3.2 Propriedades químicas 37

3.3.3.3 Propriedades mecânicas 38

3.3.4 Aços inoxidáveis austeníticos 39

3.3.4.1 Corrosão intergranular (sensitização) 42

3.3.5 Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos 43

3.3.6 Processos de soldagem dos aços inoxidáveis 44

3.4 Processo de soldagem por fricção rotativa - FW 46

3.4.1 Histórico **..... 46**

3.4.2 Características do processo **..... 46**

3.4.3 Variações do processo **..... 50**

3.4.3.1 Processo de soldagem por fricção convencional **..... 51**

3.4.3.2 Processo de soldagem por fricção inercial **..... 52**

3.4.4 Diferenças entre os dois métodos de soldagem por fricção **..... 54**

3.4.5 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção **..... 56**

3.4.5.1 Vantagens do processo de soldagem por fricção 56

3.4.5.2 Limitações do processo de soldagem por fricção 58

3.5 Mecanismos de ligação 59

3.5.1 Teoria da ligação por difusão **..... 60**

3.5.2 Formação de compostos intermetálicos durante a ocorrência da ligação por difusão **..... 62**

3.6 Modelamento de uma junção no estado sólido 64

3.6.1 Influência dos parâmetros de soldagem nas junções obtidas pelo processo de soldagem por fricção **64**

3.6.2 Velocidade de rotação 65

3.6.3 Pressão de aquecimento P1 66

3.6.4 Tempo de aquecimento t1 68

3.6.5 Pressão de forjamento P2 70

3.6.6 Tempo de forjamento t2 71

3.6.7 Velocidade de deslocamento 72

3.6.8 Interação entre os parâmetros 73

3.6.9 Formato da rebarba 74

3.6.10 Quantidade de calor na interface de ligação ou *heat input* 76

4 MATERIAIS E MÉTODOS 81

4.1 Materiais 81

4.1.1 Composição quimica 81

4.1.2 Propriedades mecânicas 81

4.2 Métodos 82

4.2.1 Verificação da conformidade dos materiais quanto a sua composição química e propriedades mecânicas 82

4.2.2 Confecção dos pinos cilindricos para a realização dos testes de soldagem 82

4.2.3 Limpeza e preparação das superfícies 83

4.2.4 Processo de soldagem por fricção rotativa usado para a realização dos testes de soldagem 83

4.2.5 Ensaios de tração 85

4.2.6 Ensaios de microdureza Vickers 86

4.2.7 Análise metalográfica 86

4.2.8 Análise da interface de ligação por MEV-EDX 87

4.2.9 Monitoramento da temperatura na interface de ligação durante a soldagem 88

4.2.10 Produção das conexões dissimilares dissimilares - liga AA1050 e aço inoxidável AISI 304 90

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 91

5.1 Resultados 91

5.1.1 Análise da composição química e propriedades mecânicas 91

5.1.1.1 Análise química 91

5.1.1.2 Ensaios mecânicos 91

5.1.2 Macroestrutura 92

5.1.3 Resistência da junta soldada por fricção 93

5.1.4 Ensaios de microdureza Vickers 96

5.1.5 Análise metalográfica da interface de ligação 101

5.1.6 Análise da interface de ligação por EDX 104

5.1.7 Medidas de temperatura obtidas na interface de ligação 107

5.1.8 Conexões produzidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional 113

6 CONCLUSÕES 115

7 TRABALHOS FUTUROS..... 119

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 121

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento deste trabalho traduz a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para o setor aeroespacial para nacionalização de componentes, subsistemas e sistemas inteiros que atualmente são importados de outros países, e o desafio de se unir materiais diferentes para aplicações especiais no setor aeroespacial.

O Veículo Lançador de Satélites (VLS1) desenvolvido e fabricado pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pertencente 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). Esse sistema é composto por um reservatório de combustível dimetil hidrazina assimétrica, um reservatório de oxidante tetróxido de nitrogênio (N_2O_4), e por diversas tubulações responsáveis pelo transporte desses compostos químicos. Atualmente, esse sistema é fornecido pela empresa SALYUT Design Bureau de Moscou, Rússia [43].

Os reservatórios são fabricados na liga de alumínio AA 1050 e as tubulações em aço inoxidável AISI 304. Nas Figs. 1.1, 1.2 e 1.3 são mostrados respectivamente, o VLS-1, o reservatório de hidrazina existente no interior a Baia de Controle, e uma vista ampliada da junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação da liga AA 1050.

A união desses materiais dissimilares por processos de soldagem por fusão tem sido um 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 à solidificação

normalmente leva a formação de fases intermetálicas frágeis e à formação de uma ampla ZTA (Zona Termicamente Afetada) [1].

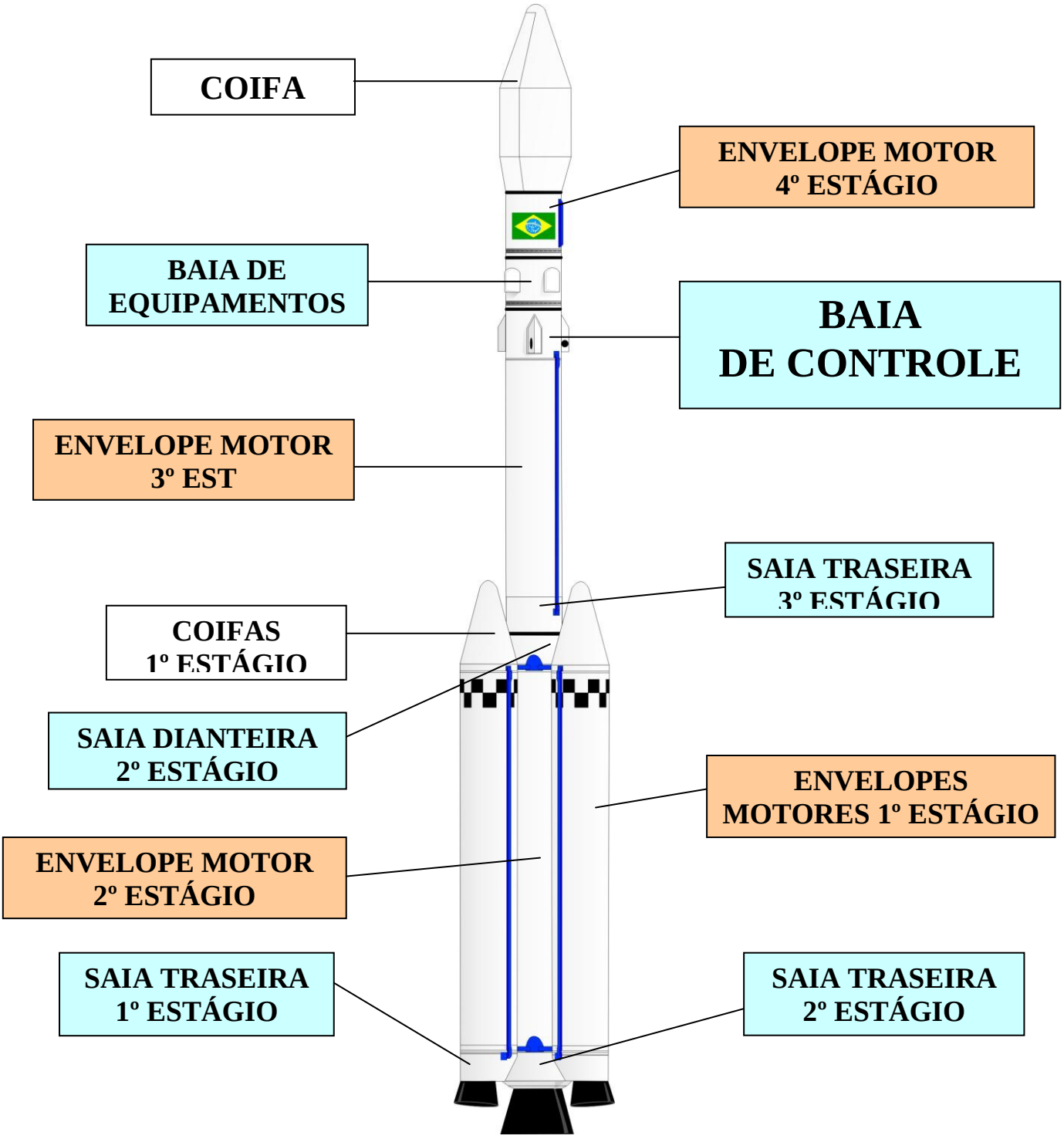


Figura 1.1 – Vista geral do Veículo Lançador de Satélite – VLS-1 e localização da Baia de Controle.

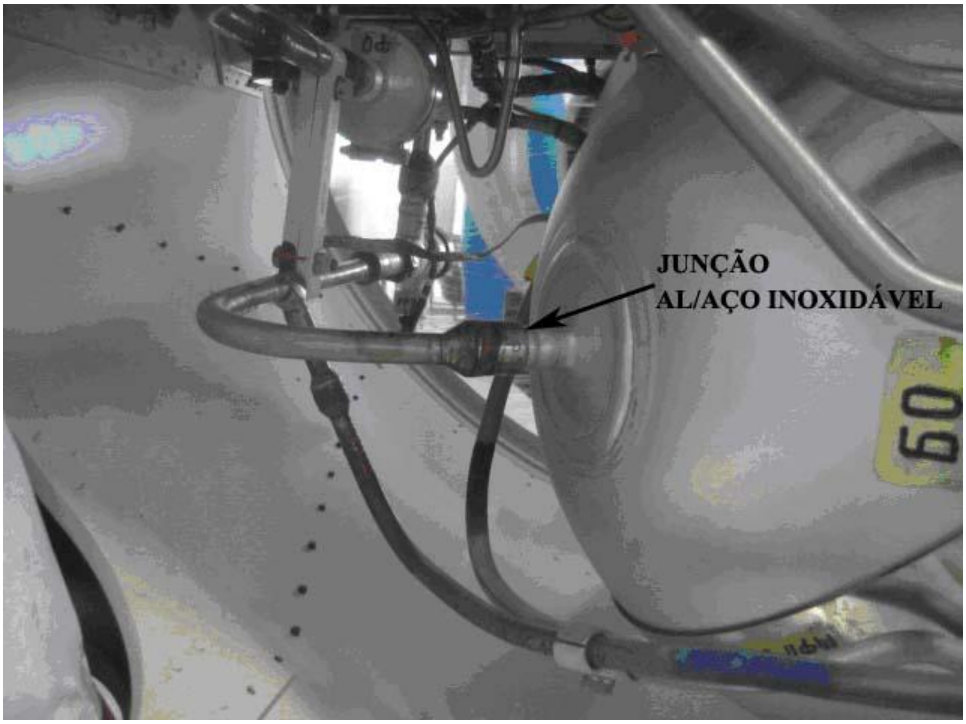


Figura 1. 2 – Interior da Baia de Controle. Vista do reservatório esférico de hidrazina e junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação da liga AA 1050.

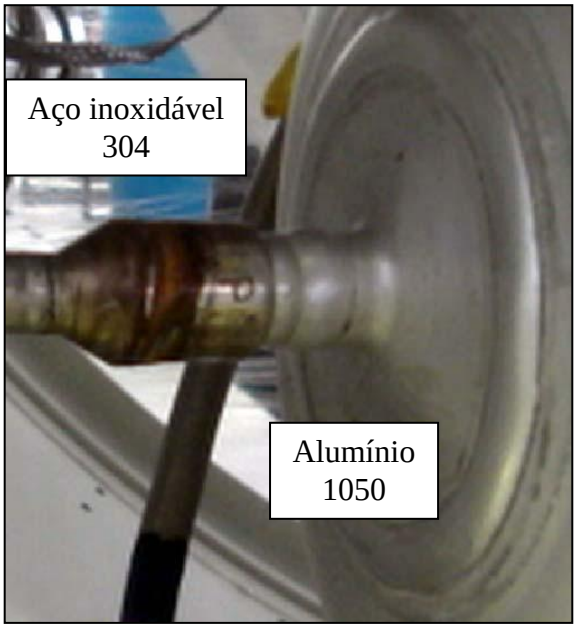


Figura 1.3 – Vista ampliada da junção entre a tubulação de aço inoxidável AISI 304 e a tubulação de alumínio AA 1050 (Cortesia IAE).

As juntas de união resultantes das combinações de materiais dissimilares são empregadas em diversas aplicações que requerem combinações especiais de propriedades físicas e químicas, reduções de custos, alta produtividade.

As ligas de alumínio apresentam boa transferência de calor, ótima resistência mecânica, boa conformabilidade e são leves, o que as tornam bastantes atrativas para aplicações em estruturas no setor aeronáutico e aeroespacial. Os aços inoxidáveis apresentam uma excelente resistência à corrosão, alta resistência mecânica estática e dinâmica, alta tenacidade, etc., com aplicações estruturais promissoras na fabricação de diversos componentes utilizados em veículos lançadores de satélites e naves espaciais [2]. A união desses dois materiais é dificultada principalmente pela grande diferença dos seus pontos de fusão.

A fim de combinar as propriedades do alumínio e do aço inoxidável e obter junções estruturais entre os dois materiais para aplicações no setor aeroespacial têm sido analisados diversos processos de soldagem por fusão e no estado sólido.

Os melhores resultados foram obtidos com o processo de soldagem por fricção rotativa. O calor na interface é gerado pela conversão de energia mecânica em energia térmica por meio de rotação e pressão [3].

As junções soldadas por fricção apresentam boa qualidade e resistência mecânica no mínimo igual o superior ao material com menor resistência mecânica, não utilizam metal de adição, fluxo ou gás de proteção e normalmente são obtidos por processos automatizados que garantem rapidez, economia e repetibilidade.

Esse tipo de junção também pode ser aplicado a diversos setores, tais como: aeroespacial (componentes para satélites), indústrias automobilísticas, alimentícia, nuclear, aplicações criogênicas, etc.

Durante os últimos anos, o uso de junções entre materiais dissimilares tem aumentado consideravelmente. As estruturas convencionais confeccionadas em aço têm sido substituídas por materiais mais leves, capazes de proporcionar alta resistência mecânica, menor volume de materiais e boa resistência à corrosão. No caso de automóveis e aviões, uma fração de material substituída por outro mais leve, proporciona menor consumo de combustível, mais economia, menor geração de rejeitos durante a produção, mais segurança, mais autonomia e menor emissão de poluentes durante o transporte. Para o setor aeroespacial, a redução de massa dos sistemas e subsistemas é bastante significativa, proporcionado menor consumo de energia, mais segurança, maior capacidade de carga útil.

Atualmente, existem diversas técnicas que possibilitam a união entre materiais dissimilares. Dentre elas o processo de soldagem por fricção representa uma alternativa para a obtenção de junções entre materiais dissimilares. A união por fricção de materiais dissimilares é um processo de soldagem que está sendo desenvolvido para fazer frente aos crescentes desafios provocados pelos avanços tecnológicos.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de junções estruturais entre os materiais dissimilares a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 para aplicações nos setores aeronáutico e aeroespacial e que atenda aos requisitos básicos de projeto, ou seja, a obtenção de junções com resistência mecânica na região de ligação, superiores ao material de menor resistência mecânica (liga AA 1050).

Outra particularidade deste trabalho, diz respeito ao monitoramento da temperatura gerada na interface de ligação pelo atrito entre os dois materiais, análise da sua relação com os resultados dos ensaios mecânicos de tração, e caracterização de todas as etapas do processo por meio de gráficos (tempo x temperatura) obtidos durante a soldagem em tempo real. E com isso, mostrar a importância e eficiência do processo de soldagem por fricção rotativa convencional na obtenção e junções entre materiais dissimilares.

Foi utilizado o método de soldagem por fricção rotativa convencional, a pressão atmosférica normal, para obtenção de amostras de junções entre os dois materiais.

A partir de tais amostras são avaliadas as propriedades mecânicas das junções em função dos parâmetros de pressão, tempo, e velocidade relativa (RPM), otimização do processo, obtenção do parâmetro ideal que possibilite a junção ter resistência mecânica superior a liga de alumínio AA 1050, monitoramento da temperatura na interface de ligação e caracterização de todas as etapas do processo nos gráficos resultantes.

A caracterização dessas junções é feita por meio de ensaios mecânicos de tração, microdureza Vickers, investigação por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura e EDX. Para o monitoramento da

temperatura na interface de ligação foi desenvolvido um dispositivo mecânico e um novo método de medição da temperatura para esse tipo de junção.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram executadas as seguintes operações:

1- Compra da matéria prima para a fabricação dos pinos cilíndricos de alumínio AA 1050 e de aço inoxidável AISI 304.

2- Análise da composição química de ambos os materiais.

3- Ensaios mecânicos de tração de ambos os materiais.

4- Usinagem dos corpos de prova utilizando os materiais comerciais e equipamentos de usinagem.

5- Definição e escolha do método para limpeza e preparação das superfícies a serem soldadas.

6- Realização da soldagem por fricção rotativa convencional utilizando diferentes parâmetros.

7- Usinagem dos corpos-de-prova soldados de acordo com a norma ASTM E – 8M.

8- Ensaios de tração para caracterização mecânica da resistência das junções formadas pelos dois materiais.

9- Qualificação e otimização do processo utilizando parâmetros que resultaram em junções com 100% de eficiência em relação ao material de menor resistência mecânica (liga AA 1050).

10- Análise metalográfica das interfaces geradas pela junção dos dois materiais, e regiões próximas da interface tanto do lado da liga AA 1050 quanto do aço inoxidável 304.

11- Realização de ensaios de microdureza Vickers na região de interface da liga AA 1050 e também do aço inoxidável AISI 304 para análise das variações de dureza.

12- Análise por meio de microscopia eletrônica de varredura por EDX para verificação da interface de ligação, e da existência do mecanismo de difusão entre os dois materiais.

13- Projeto do dispositivo e desenvolvimento de uma nova metodologia de medição da temperatura de soldagem entre materiais dissimilares a liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304.

14- Monitoramento da temperatura através da nova metodologia de medição durante a realização da soldagem por fricção rotativa convencional.

15- Caracterização de todas as etapas do processo de soldagem por fricção utilizando os gráficos obtidos (tempo x temperatura).

16- Usinagem final das junções entre os dois materiais envolvidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

As dificuldades na soldagem das ligas de alumínio com o aço pelos processos de soldagem por fusão (ver 3.2.4) resultam de fases intermetálicas que são formadas em elevadas temperaturas (Fe_3Al, FeAl, $FeAl_2$, Fe_2Al_5, $FeAl_3$). A Figura 3.1 representa um diagrama de fase Fe-Al que mostra fases intermetálicas bem definidas. Essas fases são geralmente duras e frágeis [5].

Os processos de soldagem por fusão existentes até o momento não possibilitam a obtenção de junções entre materiais dissimilares com boas propriedades mecânicas que possam ter aplicações estruturais. Até mesmo os processos de soldagem por fusão que apresentam uma ZTA (Zona Termicamente Afetada) bem reduzida, como é o caso do processo de soldagem a laser e por feixe de elétrons, geram junções com propriedades inferiores às do metal base. No caso da liga AA 1050 com o aço inoxidável AISI 304 pelo processo de soldagem a laser com proteção gasosa de argônio, a soldagem assemelha-se ao processo de brasagem, a junção possui baixa resistência mecânica e um grande número de defeitos superficiais.

Tendo como objetivo principal a obtenção de junções entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 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, cujo principal mecanismo de ligação é a difusão.

Os processos de soldagem no estado sólido são aqueles que produzem junções metalúrgicas à temperaturas abaixo do ponto de fusão dos materiais

que estão sendo unidos (soldagem por ultra som, explosão, difusão, fricção, etc..). Esses processos envolvem o uso de deformação, ou difusão e deformação limitada para produzir junções com alta qualidade entre materiais similares e dissimilares [6]. Por envolverem pressão, normalmente não é requerida a formação de uma fase líquida [7].

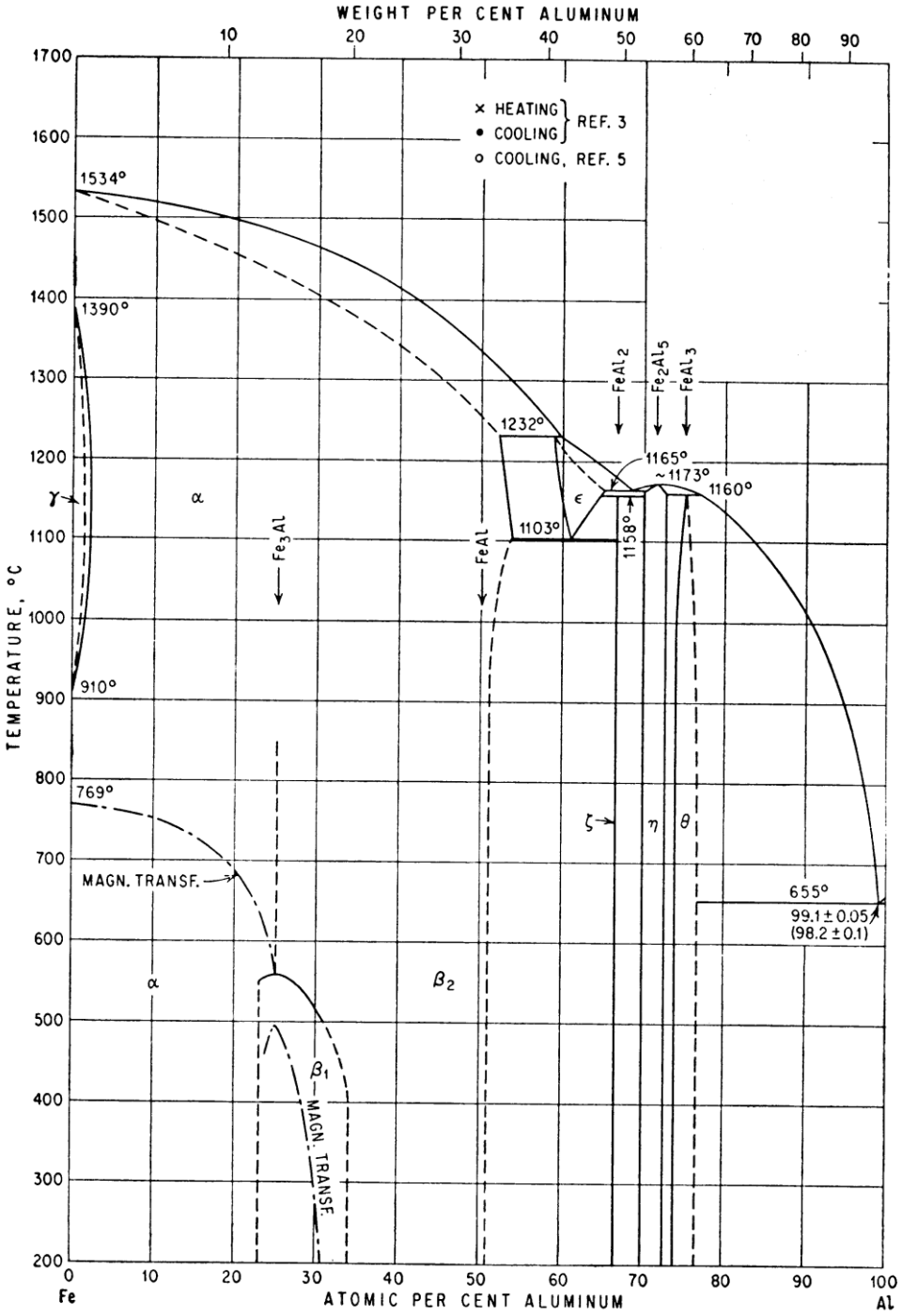


Figura 3.1 – Diagrama de fases Fe-Al.

Fonte: [5]

Quando se estuda o sistema Fe-Al à temperatura de 590°C e submetido à pressão atmosférica normal, a taxa de difusão é pequena. Entretanto quando esse sistema é submetido a um trabalho a frio sujeito à pressão e deformação, pode ocorrer a formação de uma fase η Al_2 Fe abaixo de 400°C, o que confirma um aumento da taxa de difusão quando se tem o sistema submetido a pressão e deformação [8], O aumento da taxa de difusão favorece a ligação entre a liga de alumínio e o aço inoxidável no estado sólido. Os compostos metálicos também podem se formar a baixas temperaturas, entretanto, eles podem ser controlados pela utilização adequada dos parâmetros de soldagem e pela remoção de óxidos e contaminantes das superfícies em contato.

3.2 Alumínio

O alumínio é um metal que, na sua forma pura apresenta baixa densidade, baixo ponto de fusão (660°C), estrutura cúbica de face centrada (c.f.c), boa resistência a corrosão, condutividade térmica e elétrica, soldabilidade e conformidade, ótima resistência mecânica, entre outras propriedades. Na forma de suas ligas, essas propriedades se mantêm ou são alteradas em função das necessidades de suas aplicações [9].

As propriedades do alumínio que fazem com que esse metal e suas ligas sejam mais atrativos economicamente, para a uma grande variedade de aplicações estão relacionadas às suas propriedades físico-químicas com destaque para a sua baixa massa específica (2,7 g/cm^3). O alumínio é um material leve, algumas ligas excedem a resistência do aço doce, possui boa ductilidade para temperaturas abaixo de zero, não é tóxico, e pode ser reciclado [10].

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 [11].

A função de cada elemento de liga altera-se conforme a quantidade dos elementos presentes na liga e com a sua interação com outros elementos. Esses elementos de liga podem conferir à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento dos moldes, etc.), ou ter uma função secundária, como o controle da microestrutura e de impurezas que dificultam a fabricação ou aplicação final do produto [11]. A Tabela 3.1 apresenta os principais elementos de liga e as suas funções.

Tabela 3.1 – Principais elementos de liga e suas funções dentro da liga.

PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA ADICIONADOS AO AL	
ELEMENTOS DE LIGA	**FUNÇÃO**
Cu	Fornece alta resistência mecânica.
Mg	Melhora a resistência mecânica e possibilita boa resistência a corrosão.
Mn	Confere aumento moderado da resistência mecânica e excelente ductilidade.
Si	Diminui o ponto de fusão.
Zi	Aumenta a resistência mecânica.
Mg + Si	Melhoram a resistência mecânica, plasticidade, extrudabilidade e tratamento térmico.
Zn + Mg + Cu	Conferem resistência elevada.
Zn + Mg	Permitem recuperar parte da sua resistência mecânica por meio de envelhecimento a temperatura ambiente.
Fe, Cr, V, Ni, Ti, etc..	Elementos de liga secundários adicionados para melhoraram a resistência mecânica, a resistência à corrosão e o tratamento térmico.

Fonte: [11]

3.2.1 Classificação das ligas de alumínio

O sistema de classificação atualmente mais aceito no mundo é o sistema adotado pela *Aluminum Association Inc. (AA)* em 1971. No Brasil, é seguido 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 características e propriedades mecânicas são obtidas por meio de fundição).

Em função da utilização da liga AA 1050, trabalhável, são apresentados nesse trabalho estudos referentes apenas às ligas trabalháveis.

3.2.1.1 Ligas trabalháveis

Para identificar as ligas trabalháveis é utilizado um sistema de numeração com quatro dígitos, onde o primeiro número caracteriza o elemento principal da liga, e os outros as diversas composições dessa liga. Na Tabela 3.2 são mostradas essas ligas e seus elementos principais.

Tabela 3.2 **–** Designação das ligas trabalháveis por grupos de acordo com a ABNT – NBR 6834.

Designação das ligas Trabalháveis – ABNT – NBR 6834	
Série	**Principal elemento químico da liga**
1XXX	Alumínio puro não ligado com mínimo de 99,00% de pureza
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg, Si
7XXX	Zn
8XXX	Sn, Li, Fe, Cu, Mg

Fonte: [12].

3.2.1.2 Características e aplicações da liga trabalhável da série 1XXX

No grupo da série 1XXX, encontra-se o alumínio não ligado com no mínimo de 99,50% de pureza. O segundo dígito indica as variações nos limites de impurezas. O algarismo 0 (zero) indica o alumínio não ligado que contém

impurezas em seus limites naturais ou que não teve um controle especial, e os algarismos de 1 a 9 indicam que houve controle especial de um ou mais elementos presentes tidos como impurezas. A liga 1050 indica uma liga com no mínimo 99,50% de alumínio sem controle especial de impurezas, já a liga 1350 indica a mesma pureza (99,50% de alumínio), mas com controle de impurezas [12].

Embora recebam o nome de liga, essa série refere-se ao alumínio com grau de pureza mínima de 99,0% (denominado 1000) até 99,99% (denominado 1099). Os dois últimos números referem-se ao grau de pureza da liga. As ligas dessa série são muito dúcteis no estado recozido apresentam excelente resistência à corrosão, elevada condutividade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica. São aplicadas em sistemas térmicos e elétricos, indústrias alimentícias, químicas, bebidas, utensílios domésticos, etc. A liga AA 1050 apresenta cerca de 99,50% de Al e 0,50% de outros elementos chamados de impurezas.

As ligas da série 1XXX apresentam uma resistência mecânica compreendida entre 70 a 185 MPa, podem ser unidas por brasagem e soldagem. Esses materiais podem ser usinados, laminados, extrudados e forjados a quente.

O processo de forjamento induz deformações plásticas através de aplicação de forças cinéticas, mecânicas, ou hidráulicas. Pode ser um processo manual para a produção de peças pequenas com geometrias simples, ou processo mecanizado para produção de peças com dimensões variadas e com diferentes geometrias.

Para o forjamento das ligas da série 1XXX, é utilizada uma faixa de temperatura compreendida entre 315ºC e 430ºC. Geralmente a faixa de temperatura de forjamento entre uma liga e outra é bastante pequena, e o processo é realizado com a mesma severidade [13].

3.2.2 Propriedades físicas, químicas e mecânicas do alumínio e das suas ligas.

O alumínio é um material bastante utilizado pela engenharia em uma grande variedade de aplicações em função das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Essas propriedades variam de liga para liga e 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.

3.2.2.1 Propriedades físicas

3.2.2.1.1 Massa específica

A baixa massa específica do alumínio e das suas ligas (2,7 g/cm^3) é que o tornam atrativos e um dos mais utilizados para diversas aplicações de engenharia. Ela corresponde a 1/3 da massa específica do aço (7,8 g/cm^3) e cerca de 30% da massa específica do cobre (8,9 g/cm^3). O baixo valor da sua massa específica, e o desenvolvimento de novas ligas de alumínio estruturais com propriedades mecânicas cada vez mais superiores tem levado diversos fabricantes a substituir estruturas inteiras feitas em aço, por estruturas mais leves de alumínio. A sua baixa massa específica também facilita o manuseio e o transporte de chapas e barras utilizadas nos setores produtivos.

3.2.2.1.2 Condutividade elétrica

O alumínio é um bom condutor de eletricidade o que lhe confere a condição de ser transformado em fios e poder ser utilizado para diversas aplicações nos setores de transmissão e distribuição de energia elétrica. Apresenta condutividade elétrica de 65% do padrão internacional do cobre (IACS) que é um dos melhores condutores de eletricidade. A condutividade elétrica varia de liga para liga, sendo as ligas da série 1XXX aquelas que apresentam a melhor condutividade elétrica. Quando se relaciona a condutividade elétrica com a sua massa específica e se compara com o cobre, a do alumínio é bem superior [14].

3.2.2.1.3 Condutividade térmica (C_t)

A condutividade térmica do alumínio e das suas ligas é uma das mais altas entre os materiais (C_t = 222 $W.m^{-1}.ºC^{-1}$ a 25ºC), sendo metade da condutividade térmica do cobre e cerca de cinco maior que a do aço. Essa propriedade exerce grande influência na soldabilidade do alumínio e das suas ligas porque exige um fornecimento cinco vezes maior do que o calor necessário para a soldagem do aço referente a uma mesma massa, isso significa o uso de uma fonte de calor com maior intensidade para a realização de uma boa soldagem [12].

3.2.2.1.4 Difusibilidade térmica (α_t)

No alumínio e nas suas ligas o seu valor é elevado (α_t = 8,5 – 10 x 10^{-5} $m^2.s^{-1}$), a exemplo da condutividade térmica. Essa é uma propriedade importante e desejável em componentes que necessitam apresentar essas características no desempenho das suas funções de forma isolada ou dentro de um sistema. Para a soldagem do alumínio e das suas ligas por fusão, torna-se necessário atentar para uma série de detalhes como velocidade de soldagem, amperagem, etc. Quando a soldagem é realizada no estado sólido, como ocorre pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional e entre materiais dissimilares do tipo Al – aço inoxidável, a alta difusibilidade do alumínio em relação ao aço inoxidável pode ser favorável a formação de uma junção com boas propriedades mecânicas.

3.2.2.1.5 Temperatura de fusão

O alumínio e as suas ligas apresentam baixa temperatura de fusão (cerca de 660ºC) se comparado a outros metais e suas ligas (aço – 1050ºC e cobre – 1080ºC) [14]. À medida que são adicionados elementos de liga, há pequenas variações de temperatura de fusão entre as ligas.

3.2.2.1.6 Coeficiente de expansão linear

Definido como sendo uma medida de variação do comprimento de um dado material com a elevação de temperatura, o coeficiente de expansão linear do alumínio e das suas ligas é praticamente o dobro do coeficiente de expansão linear dos aços. Essa propriedade representa um grande problema na soldagem de materiais dissimilares que possuam coeficientes de expansão lineares muito diferentes por meio de um processo de soldagem por fusão, visto que os materiais se expandem de forma diferente e se contraem também de forma diferente.

3.2.2.2 Propriedades químicas

Uma das principais características do alumínio e das suas ligas é a formação de uma camada natural de óxido na sua superfície (Al_2O_3). Essa camada de óxido extremamente fina com espessura em torno de 25 - 50 Å (2,5 – 5,0 mm), é formada a partir do contato do alumínio com o oxigênio presente na atmosfera. Ela tem a função de proteger o metal contra o ataque dos mais variados meios corrosivos, o que justifica a sua excelente resistência a corrosão. Essa resistência pode ser melhorada por meio de tratamentos superficiais de alodinização e anodização que tem como objetivo aumentar essa camada de óxidos na superfície [12].

Durante a soldagem por fusão são utilizados diferentes métodos e gases de proteção como o He, Ar, ou mistura deles para evitar a formação de novas camadas de óxidos durante a soldagem. No processo de soldagem por difusão, que ocorre no estado sólido, essa camada de óxido também precisa ser removida antes da soldagem, pois interfere na qualidade da junta de ligação. Quando o processo de soldagem é por fricção rotativa, as camadas de óxidos são removidas pela aplicação de pressão através da rebarba.

3.2.2.3 Propriedades mecânicas

Dentre as propriedades dos materiais, as propriedades mecânicas são as mais utilizadas na escolha de materiais para as mais diferentes aplicações.

Mesmo quando outras propriedades físicas são prioritárias no desenvolvimento de um determinado produto para aplicações específicas, as propriedades mecânicas sempre são levadas em consideração no momento de escolha do material.

O desenvolvimento de novas ligas de alumínio vem possibilitando sua utilização com vantagens, em aplicações onde antes se utilizavam ligas de aço. A resistência mecânica do alumínio e de suas ligas apresenta uma grande variação de valores que vão desde 70 MPa (ligas da série 1XXX), até valores superiores a 600 MPa (ligas da série 7XXX) [14].

Quanto mais puro o alumínio, mais baixa é a sua resistência mecânica e a sua dureza, e maior a sua ductilidade. À medida que são adicionados determinados elementos de liga de forma simples ou combinada, essa resistência mecânica aumenta. A forma de processamento do material (laminação, extrusão, etc.) é outro fator responsável pelo aumenta das propriedades mecânicas da liga. Se as ligas forem trabalháveis e não tratáveis termicamente das séries 1XXX, 3XXX, 4XXX ou 5XXX, as suas propriedades são melhoradas por meio de deformação a frio do material. Já as ligas trabalháveis tratáveis termicamente das séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e 8XXX, além da melhoria das suas propriedades mecânicas por meio de processos de deformação a frio, melhoram ainda mais as suas propriedades mecânicas por meio de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento que pode ser natural ou artificial. Existem determinadas ligas que são conformadas a frio, tratadas termicamente e novamente conformadas para atingir valores de resistência mecânica e dureza adequados as suas aplicações.

As ligas de alumínio fundidas apresentam propriedades mecânicas inferiores às ligas de alumínio trabalháveis que foram submetidas a trabalhos de deformação a frio. De uma forma geral, as ligas de alumínio perdem parte das suas propriedades mecânicas quando submetidas a temperaturas superiores a 200ºC.

A dureza de uma determinada liga de alumínio depende da sua composição química, do método de processamento e/ou tratamento térmico aplicado. Pode variar de 19 HB (liga 1060-O) a 145 HB (liga 7079-T6).

Após a soldagem das ligas de alumínio que foram tratadas termicamente, normalmente ocorrem perdas de propriedades mecânicas. Dependendo da sua aplicação, pode ser necessária a realização de um novo tratamento térmico para que a liga adquira a resistência mecânica desejada. Na Tabela 3.3 são apresentadas as propriedades mecânicas das principais ligas de alumínio.

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas das principais ligas de alumínio trabalháveis.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS PRINCIPAIS LIGAS DE AL					
Liga	**Têmpera**	**Limite de Resistência a Tração (MPa)**	**Limite de Escoamento (MPa)**	**Alongamento em 50 mm (%)**	**Dureza Brinell (HB)**
1050	O	77	20	27	20
1050	H14	100	70	8	30
1100	O	90	35	35	23
1100	H14	125	115	9	32
2024	T3	483	345	18	120
2024	T4	469	324	20	120
5052	H34	260	215	10	68
5052	H38	290	255	7	77
6061	T6	310	276	12	95
6351	T6	330	310	14	95
7050	T6	550	490	11	145
7075	T6	570	505	11	150

Fonte: [12].

3.2.3 Soldabilidade do alumínio e das suas ligas

A soldabilidade é um termo utilizado para expressar a maior ou a menor facilidade de um material ou liga poderem ser soldados. Por muito tempo o alumínio e as suas ligas apresentaram uma soldabilidade bastante limitada em função de algumas das suas propriedades físicas e químicas, da pouca variedade de ligas, metais de adição correspondentes e, principalmente, devido às limitações dos processos de soldagem por fusão.

O alumínio e suas ligas podem ser unidos por uma variedade de métodos, incluindo soldagem por fusão, resistência, brasagem, união por adesivos e métodos mecânicos como rebitagem e fixação por parafusos [15].

Seções finas requerem pré-aquecimento, o material não apresenta nenhuma mudança de cor quando aquecido a temperaturas na faixa de soldagem tanto nos processos de soldagem por fusão quanto no estado sólido (soldagem por fricção) [10].

Diferentemente dos aços, as suas propriedades físicas e químicas tão importantes para determinadas aplicações, como a formação de uma camada de óxido de proteção na superfície, a sua alta condutividade, elevado coeficiente de expansão térmica e baixo ponto de fusão, representam grandes problemas na soldagem do alumínio e das suas ligas repercutindo diretamente na perda das propriedades mecânicas da junta soldada, redução da ductilidade e surgimento de trincas [15].

Os maiores problemas de soldabilidade do alumínio e das suas ligas são a formação de porosidades pelo H_2, o aparecimento de trincas em altas temperaturas (trincas de solidificação), a perda de resistência mecânica na ZTA (ligas trabalháveis ou endurecidas por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento), redução da resistência à corrosão e resistência elétrica. As principais fontes de hidrogênio são originárias da umidade da camada de óxido

no metal base e no metal de adição, resíduos de lubrificantes, umidade absorvida no revestimento dos eletrodos, e também devido à falta de proteção gasosa ou insuficiente [16].

A camada de óxido formada na superfície em decorrência da reação do alumínio com o oxigênio do ar é uma camada muito dura, impermeável, e funde-se a uma temperatura de cerca de 2052ºC, que é três vezes maior que a temperatura de fusão do alumínio (660ºC). Para a soldagem do alumínio e das suas ligas por fusão, é de extrema importância a remoção dessa camada de óxidos pouco antes da soldagem por meio de decapagem química, raspagem, lixamento, usinagem, etc. Caso contrário, o alumínio vai se fundir antes da camada de óxido, fato que pode impedir a união da junção e gerar falta de fusão e/ou porosidades. Nas Figuras 3.2 e 3.3 podem ser vistos esses defeitos.

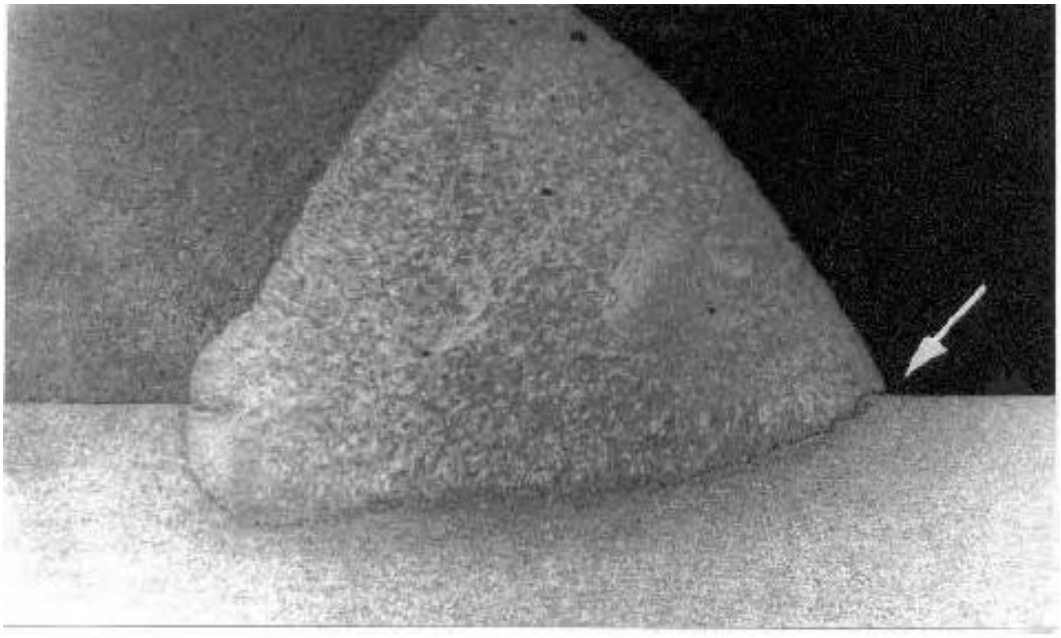


Figura 3.2 – Falta de fusão causada pela não remoção adequada da camada de óxidos.
Fonte: [17].

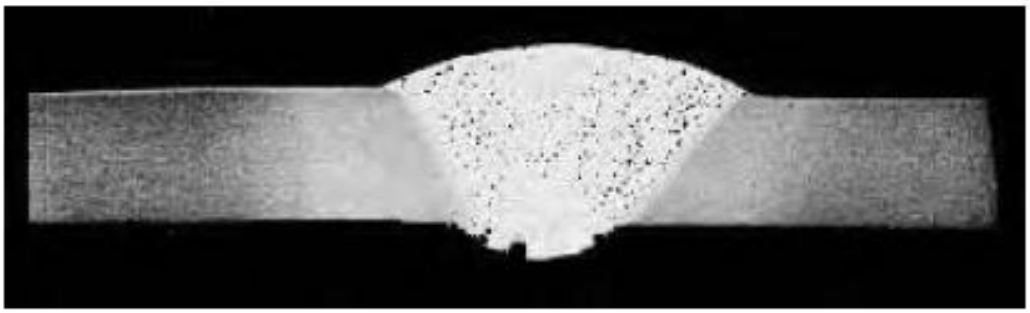


Figura 3.3 – Pequenas porosidades distribuídas numa chapa de 6 mm de espessura, soldada de topo pelo processo TIG.
Fonte [17].

Devido à condutividade térmica do alumínio e das suas ligas serem muito elevadas, o calor gerado não é tão eficiente na soldagem desse metal como ocorre na soldagem do aço, o que pode tornar necessário um pré-aquecimento ou um maior aporte térmico na soldagem de grandes espessuras. Quando a soldagem é realizada em ligas tratáveis termicamente, essa temperatura precisa ser bem controlada para minimizar a ocorrência de super envelhecimento. Por outro lado, quando a soldagem é realizada fora da posição plana, essa propriedade facilita a rápida solidificação da poça de fusão, melhorando a qualidade da solda [16].

Devido ao alto coeficiente de expansão térmica do alumínio e a rápida solidificação da poça de fusão, as junções obtidas utilizando-se os processos de soldagem por fusão causam uma série de distorções e surgimento de trincas de solidificação, fato que pode ser visto nas Figuras 3.4 e 3.5.

O baixo ponto de fusão do alumínio faz com ele não mude de cor quando a sua temperatura aumenta. Isso dificulta a visualização da poça de fusão pelo soldador, principalmente no processo de soldagem por brasagem manual [16]. Quando fundido, a sua cor também dificulta a visualização da poça de fusão, o que é problemático para a maioria dos soldadores que estão acostumados a soldar aços, onde é possível visualizar perfeitamente a poça de fusão.

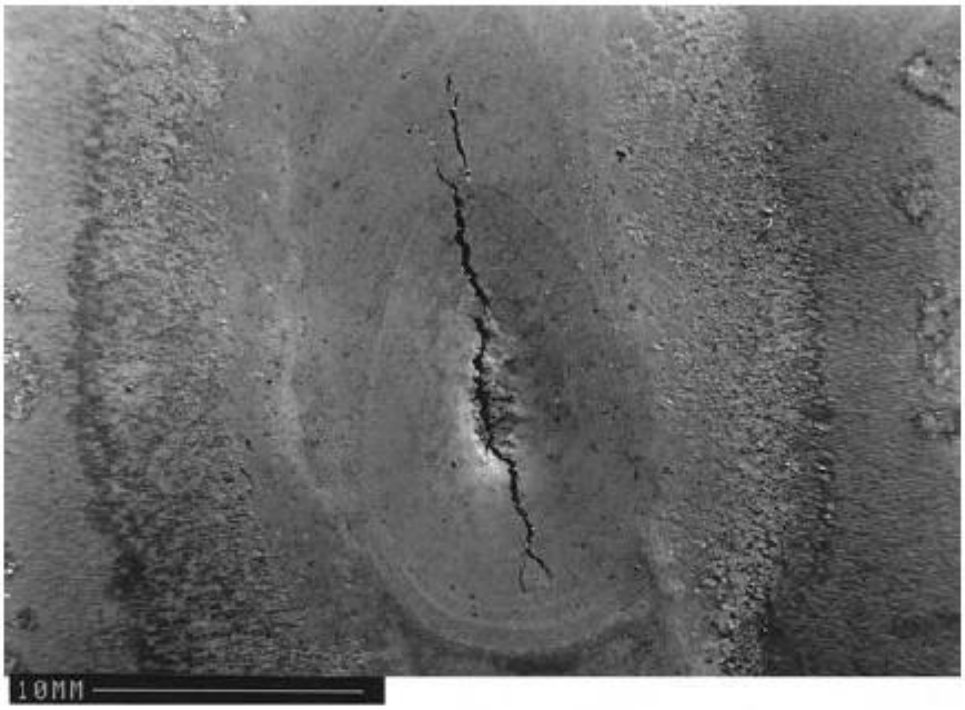


Figura 3.4 – Trinca de solidificação obtida após a soldagem da liga de alumínio A5083 com o processo TIG.
Fonte: [17].

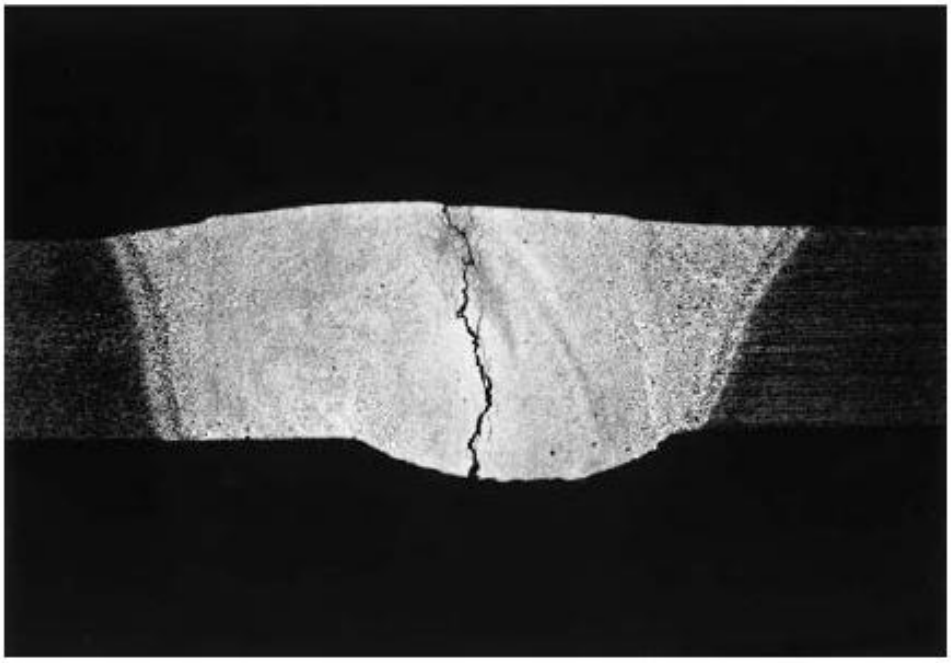


Figura 3.5 – Trinca de solidificação obtida após a soldagem de uma chapa de alumínio A6083, com 3 mm de espessura e metal de adição 4043 pelo processo TIG.
Fonte: [17].

Na soldagem do alumínio pelos processos de soldagem no estado sólido como a soldagem por difusão ou fricção, esses efeitos são minimizados ou inexistentes e permitem a sua união com materiais dissimilares que possuem grandes diferenças de propriedades físicas e químicas, não possíveis de se realizar por meio dos processos de soldagem por fusão.

A soldabilidade do alumínio está diretamente relacionada com as exigências de propriedades mecânicas definidas para uma determinada junta de união.

As ligas da série 1XXX E 3XXX apresentam boa soldabilidade e normalmente as soldas são feitas com o metal de adição contendo a mesma composição química ou classe AWS correspondente.

Por muito tempo as ligas da série 2XXX não podiam ser soldadas por fusão devido à forte tendência a trincas, quando a soldagem envolvia grandes espessuras. Com o desenvolvimento das ligas 2014, 2024 e 2219, de novos metais de adição, novos equipamentos e processos, junções com boa qualidade passaram a ser obtidas e utilizadas para diversas aplicações.

Embora as ligas da série 4XXX sejam de ótima soldabilidade, elas são utilizadas mais como metal de adição para a soldagem de outras ligas.

Nas ligas da série 5XXX (Al-Mg), como as ligas 5052, 5252 e 5005, existe uma grande tendência à formação de trincas durante a solidificação, principalmente quando for usado metal de adição com a mesma composição química do metal base. Isso ocorre porque parte do magnésio se perde quando a liga se funde. O acréscimo de uma porcentagem maior de magnésio na liga evita que isso aconteça, mantendo as suas propriedades mecânicas.

As ligas da série 6XXX apresentam ótima soldabilidade, são sensíveis a trincas durante a soldagem e solidificação quando não são utilizados metais de

adição adequados, a exemplo de outras ligas tratáveis termicamente, como as ligas das séries 2XXX e 7XXX. Quando o material é submetido a tratamento térmico de solubilização e envelhecimento antes da soldagem, perde parte das suas propriedades mecânicas tornando necessário um novo tratamento térmico para adquirir a dureza e resistência mecânica desejadas.

As ligas da série 7XXX, a exemplo das outras ligas tratáveis termicamente, também são sensíveis a trincas durante a solidificação. O uso do metal de adição adequado e de procedimentos bem elaborados para o processo de soldagem escolhido permite a obtenção de junções com boa qualidade.

3.2.4 Processos de soldagem utilizados para a soldagem do alumínio e das suas ligas

Um dos motivos da crescente aplicação do alumínio e das suas ligas está no grande número de processos de soldagem por fusão e no estado sólido que podem ser usados para a união desse material.

Existem diversos processos de soldagem disponíveis para unir o alumínio e suas ligas. A seleção do melhor processo depende de uma série de fatores, como geometria da peça, material das peças a serem unidas, resistência mecânica requerida para a junta, espessura do material, posição de soldagem, e condições de serviço como o meio, temperatura, atmosfera inerte e corrosão.

Na soldagem por fusão podem ser citados os processos de soldagem, GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), Plasma, Resistência, Laser, Feixe de elétrons e Brasagem. Os processos de soldagem GTAW e GMAW são os mais utilizados nos setores produtivos; já os processos de soldagem automáticos a Laser e a Plasma estão aumentando a sua área de

aplicação, principalmente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e automobilística, devido ao desenvolvimento de novos equipamentos de soldagem e de novos produtos.

O processo de soldagem GTAW é mais conhecido no Brasil como processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*). Nesse processo a união é obtida pelo aquecimento dos materiais por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o metal base. A proteção do eletrodo e da ZTA é feita por um meio de um gás inerte que pode ser Ar, He, ou uma mistura dos dois, podendo ou não ser utilizado metal de adição. Essa deposição de material pode ser feita de forma manual ou automática. Na Figura 3.6 pode visto esquematicamente o processo [18].

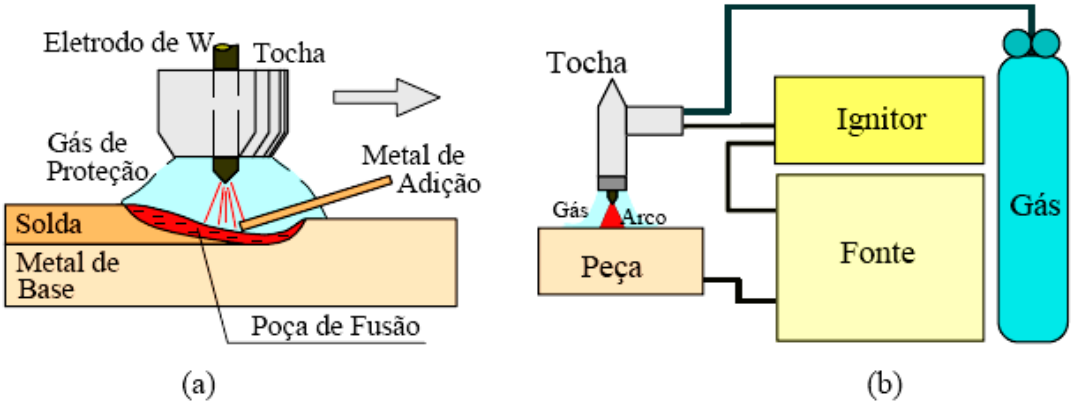


Figura 3.6 – Soldagem GTAW: (a) detalhe da região do arco, (b) montagem usual.
Fonte: [18].

A soldagem GMAW é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e o metal base [18], podendo ser semiautomático ou automático. Na Figura 3.7 é apresentada uma vista esquemática do processo.

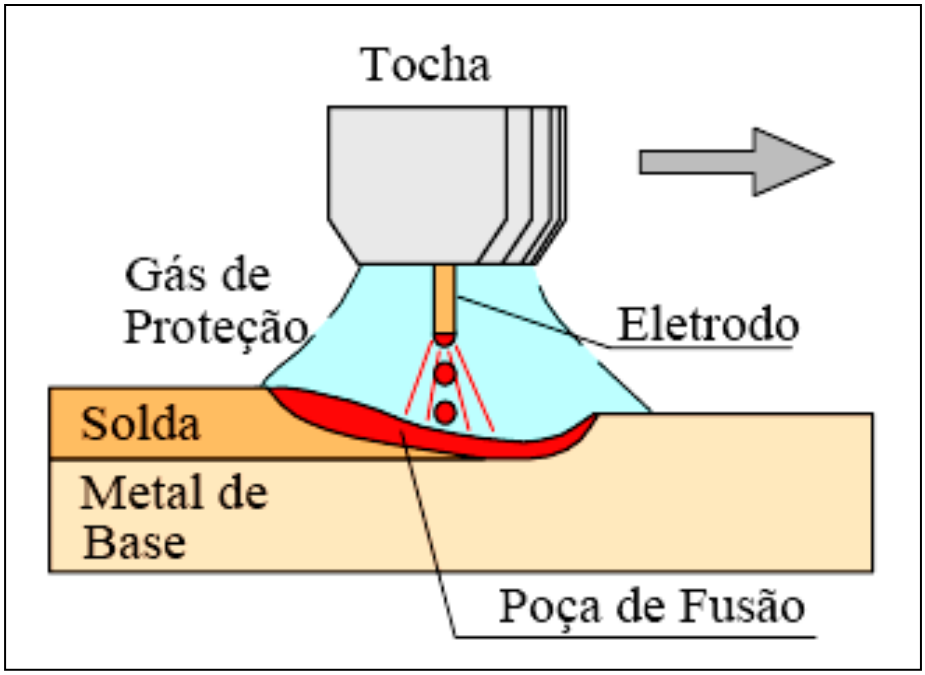


Figura 3.7 – Vista esquemática do processo GMAW.
Fonte: [18].

A proteção do arco e da poça de fusão é obtida por um gás ou por uma mistura de gases. Quando o gás é inerte (Ar ou He), o processo recebe o nome de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*). Se o gás for ativo (CO_2 ou misturas $Ar/O_2/CO_2$), o processo é chamado de MAG (*Metal Active Gas*) [18].

Os gases inertes puros são, em geral, usados na soldagem de metais e ligas não ferrosas. As misturas de gases inertes com pequenos teores de gases ativos são usadas geralmente para a soldagem de aços ligas, enquanto que misturas mais ricas em gases ativos ou CO_2 puro, são usadas na soldagem de aços ao carbono [18].

A grande dificuldade de soldagem das ligas de alumínio estruturais utilizadas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial pelos processos de fusão existentes até o momento, e a busca constante por processos alternativos que reduzam custos de produção, levaram ao desenvolvimento de processos de soldagem no estado sólido.

Atualmente, o processo de soldagem no estado sólido utilizado para a soldagem das ligas de alumínio estruturais das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX em forma de chapas, é o processo denominado *Friction Stir Welding* (FSW). Essa técnica foi criada e desenvolvida no *The Welding Institute* (TWI) em 1991. Apresentam altas velocidades de soldagem (~4 mm/s), baixos valores de *heat input* e é contínuo [19].

3.3 Aços inoxidáveis

Aços são ligas Fe-C que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos; Existem ligas que possuem composições diferentes e são submetidas a tratamentos térmicos diferentes [7].

Devido a uma série de problemas de corrosão nos aços utilizados para a realização de trabalhos em diversas partes do mundo, por volta de 1910 foram descobertos e desenvolvidos os aços inoxidáveis, mas somente após o término da Segunda Guerra Mundial com o desenvolvimento dos processos metalúrgicos é que eles se difundiram para o mundo todo.

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que apresentam como principal elemento de liga o 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 5 mm na superfície dos aços inoxidáveis, conhecido como camada de passivação [21]. A Figura 3.8 mostra o resultado desses estudos com a concentração necessária de Cr para a proteção da liga contra ataques corrosivos.

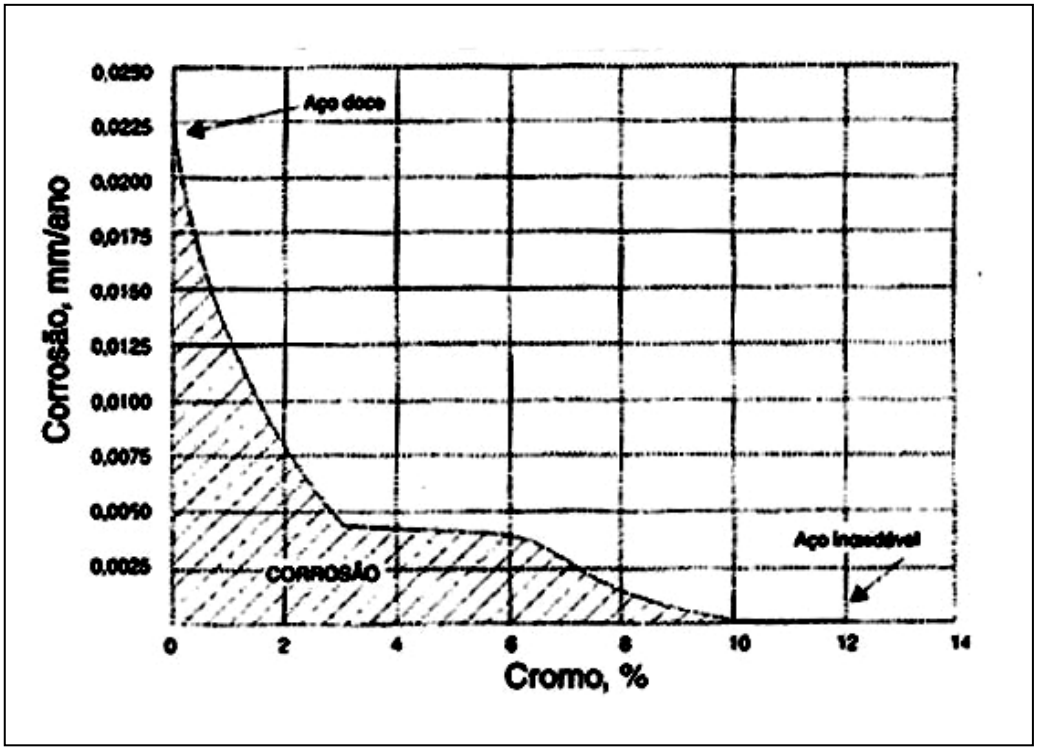


Figura 3.8 – Passividade dos aços cromo, expostos durante 10 anos a atmosfera industrial.
Fonte: [21].

3.3.1 Influência de outros elementos de liga

Os elementos de liga quando adicionados, conferem a liga diferentes propriedades mecânicas e características permitindo a sua utilização em diversas aplicações da engenharia.

Cromo: É o elemento mais importante na formação da camada passiva de óxidos, entretanto, outros elementos de liga sempre estão presentes nos aços inoxidáveis como o Ni, Mo, Nb, Ti, em determinadas porcentagens que caracterizam as suas estruturas, propriedades mecânicas e comportamentos quando submetidos a diferentes tensões [22].

Níquel: Adicionado em determinados teores, estabiliza a estrutura austenítica, aumenta as suas propriedades mecânicas e melhora

consideravelmente a ductilidade, resistência a corrosão, usinabilidade, soldabilidade. Combinado com o Cr representa um dos elementos mais importantes dos aços inoxidáveis.

Manganês: A presença de certos teores de Mn combinado com o Ni pode substituí-lo em diversas funções. Entretanto, altas porcentagens de Mn podem afetar a resistência à corrosão dos aços, principalmente a resistência ao *pitting* [23].

Carbono: Elemento de liga presente praticamente em todos os aços provoca pequena diminuição na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis quando no estado dissolvido. Nesta condição e em determinadas porcentagens, pode levar à formação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos, podendo causar corrosão intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos. Nos aços inoxidáveis martensíticos que são tratáveis termicamente é responsável pelo aumento da dureza e resistência mecânica.

Nitrogênio: Quando adicionado aos aços inoxidáveis ao cromo, pode substituir o Ni quando esse for usado em baixos teores (0,5 a 1,0% para melhorar a usinabilidade). Melhora a dureza dos aços inoxidáveis com 14% de Cr e entre 0,3 a 0,4% de C, sem diminuir a resistência à corrosão em pequenas concentrações. Nos aços com 16 a 19% de Cr e baixo carbono, o Ni melhora a soldabilidade e a resistência à corrosão intergranular. Já nos aços com Cr e Ni, e Mn, melhora a austenita em relação às temperaturas de trabalho a frio [24].

Molibdênio e Cobre: Aumentam a passividade e também a resistência à corrosão em presença de ácido sulfúrico e sulfuroso quando submetido a altas temperaturas e pressões, soluções neutras de cloreto e água do mar [24].

Silício e Alumínio: Melhoram a resistência dos aços inoxidáveis em altas temperaturas.

Titânio e Nióbio: São agentes estabilizantes que, quando adicionados aos aços austeníticos, evitam a formação de corrosão intergranular devido a sua avidez pelo carbono [24].

3.3.2 Classificação dos aços inoxidáveis

Inicialmente, os aços inoxidáveis eram denominados de acordo com os tores 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 [25].

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

- Aços inoxidáveis da série 200, com cromo, níquel e manganês;
- Aços inoxidáveis da série 300, com cromo e níquel;
- Aços inoxidáveis da série 400, com cromo ou cromo carbono;
- Aços inoxidáveis da série 500, com cromo molibdênio;
- 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).

3.3.3 Propriedades físicas, químicas e mecânicas dos aços inoxidáveis

O conhecimento das propriedades físicas, químicas e mecânicas é de fundamental importância no momento da escolha de um material para determinada aplicação. A seleção do material adequado considerando essas propriedades possibilita a obtenção de produtos com ótima qualidade e consideráveis reduções de custos.

3.3.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas dos aços inoxidáveis são bem diferentes das propriedades físicas dos aços ao carbono. Eles apresentam menor temperatura de fusão, menor condutividade térmica, maior coeficiente de expansão térmica e menor condutividade elétrica, que implicam em diferentes procedimentos de soldagem. Na Tabela 3.4 são apresentados valores típicos de propriedades físicas entre as várias classificações de aços inoxidáveis.

Tabela 3.4 – Propriedades físicas típicas de vários tipos de aços inoxidáveis.

Propriedades	Tipos de Aços Inoxidáveis			
	Martensítico	**Ferrítico**	**Austenítico**	**Dupléx**
Massa Específica (g/cm^3)	7,6 – 7,7	7,6-7,8	7,9-8,2	8,0
Módulo de Young (N/mm^2) ou (MPa)	220.000	220.000	195.000	220.000
Coeficiente de Expansão Térmica ($x\ 10^{-6}/°C$) 200 - 600°C	12-13	12-13	17-19	13
Condutividade Térmica (W/m°C) 20°C	22-24	20-23	12-15	20
Capacidade Térmica (J/Kg°C) 20ºC	460	460	440	400
Resistividade (nΩm) 20°C	600	600-750	850	700-850
Ferromagnetismo	Sim	Sim	Não	Sim

Fonte: [26].

Como pode ser observado, nos aços inoxidáveis austeníticos a condutividade térmica é a mais baixa, e o coeficiente de expansão térmico o mais alto dentre os vários tipos de aços inoxidáveis, o que poder gerar tensões térmicas em situações onde ocorrem variações de temperatura.

3.3.3.2 Propriedades Químicas

Os aços inoxidáveis possuem a propriedade de formar uma película fina rica em cromo que protege a superfície do material do ataque de agentes externos. Essa camada é extremamente fina, invisível, e aderente ao material, protege toda a superfície do ataque de diversos meios corrosivos. Quando o material é submetido a usinagem, corte, etc., o filme é reparado

instantaneamente na presença do oxigênio. A adição de Ni melhora a resistência à corrosão a meios corrosivos mais agressivos. A adição de Mo nos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos melhora a resistência a sua resistência a corrosão por *pitting* e a sua resistência mecânica.

3.3.3.3 Propriedades mecânicas

Depois da resistência à corrosão, a resistência mecânica é outro fator bastante importante na escolha dos aços inoxidáveis para as mais diversas aplicações, visto a ótima resistência mecânica de algumas ligas de aços inoxidáveis quando submetidos a altas temperaturas.

A escolha dos aços inoxidáveis para uma determinada aplicação normalmente é feita em função da sua ótima resistência à corrosão e das suas propriedades mecânicas, como resistência a tração, ductilidade, tenacidade, etc. Entre os aços inoxidáveis existem variações dessas propriedades de acordo com a sua classificação. Na Figura 3.9 são evidenciadas algumas dessas diferenças por meio de curvas de tensão-deformação.

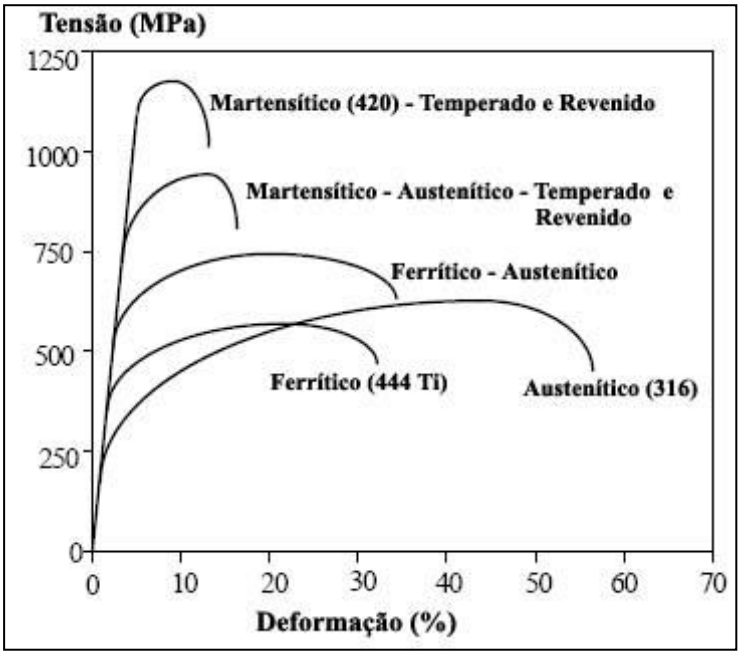


Figura 3.9 – Curvas de Tensão – Deformação para alguns aços inoxidáveis.
Fonte: [26].

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam uma ótima resistência à tração e baixos limites de escoamento, o que caracteriza sua baixa ductilidade. Nos aços inoxidáveis austeníticos ocorre o contrário; ocorre um baixo limite de resistência à tração e alta ductilidade em comparação às demais classes.

3.3.4 - Aços inoxidáveis austeníticos

Devido à utilização desse tipo de aço inoxidável no desenvolvimento do presente trabalho, foi dada mais importância na sua descrição.

Os aços inoxidáveis austeníticos, também conhecidos como aços inoxidáveis da série 300 de cromo níquel, são considerado os aços inoxidáveis mais importantes dentre os aços inoxidáveis devido a sua grande aplicação na indústria.

Apresentam como elementos principais o Cr (16 a 25%) e o Ni (6 a 22%). Possuem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), não são magnéticos, não temperáveis, e endurecidos somente por trabalho a frio. Esses aços também apresentam uma ótima resistência à corrosão, excelente resistência em baixas temperaturas e boa resistência em altas temperaturas. A Figura 3.10 mostra a microestrutura típica do aço inoxidável austenítico.

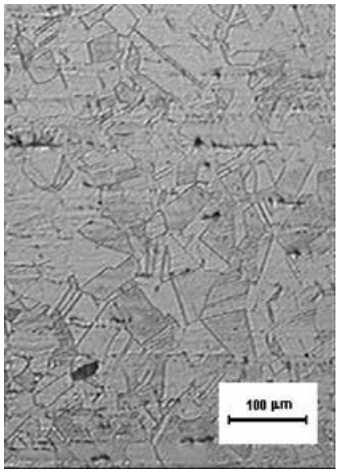


Figura 3.10 – Microestrutura típica do aço inoxidável austenítico AISI 304 (100X).

Os aços dessa série possuem uma porcentagem de Mn que pode chegar até 15%. A adição de determinados elementos de liga como o Cu, Mo, Si, Al, Ti e Nb, podem melhorar certas características dos aços inoxidáveis como a resistência à corrosão por *pitting* ou oxidação. Quando é desejável melhor usinabilidade são adicionados o Se e o S. [22]. Na Tabela 3.5 são mostradas as composições químicas típicas dos aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 3.5 **-** Composições típicas para aços inoxidáveis austeníticos.

Tipo AISI	**Composição* (%)**			
	Carbono	**Cromo**	**Níquel**	**Outros**
201	0,15	16,0 – 18,0	3,5 – 5,5	0,25 N, 5,5 – 7,5 Mn, 0,060 P
202	0,15	17,0 – 19,0	4,0 – 6,0	0,25 N, 7,5 – 10,0 Mn, 0,060 P
301	0,15	16,0 – 18,0	6,0 – 8,0	__
302	0,15	17,0 – 19,0	8,0 – 10	__
302B	0,15	17,0 – 19,0	8,0 – 10,0	2,0 – 3,0 Si
303	0,15	17,0 – 19,0	8,0 – 10,0	0,20 P, 015 S (Min), 0,60 Mo (opt)
303Se	0,15	17,0 – 19,0	8,0 – 10,0	0,20 P, 0,06 S, 0,15 Se (min)
304	0,08	18,0 – 20,0	8,0 – 12,0	__
304L	0,03	18,0 – 20,0	8,0 – 12,0	__
305	0,12	17,0 – 19,0	10,0 – 13,0	__
308	0, 08	19,0 – 21,0	10,0 – 12,0	__
309	0,20	22,0 – 24,0	12,0 – 15,0	__
309S	0,08	22,0 – 24,0	12,0 – 15,0	__
310	0,25	24,0 – 26,0	19,0 – 22,0	1,5 Si
310S	0,08	24,0 – 26,0	19,0 – 22,0	1,5 Si
314	0,25	23,0 – 26,0	19,0 – 22,0	1,5 – 3,0 Si
316	0,08	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0 Mo
316L	0,03	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0 Mo
316N	0,08	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	1,0 Si, 2,0 Mn, 2,0 – 3,0 Mo, 010-
317	0,08	18,0 – 20,0	11,0 – 15,0	016 N
				3,0 – 4,0 Mo
317L	0,03	18,0 – 20,0	11,0 – 15,0	3,0 – 4,0 Mo
321	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0	Ti (5 x % Min C)
329	0,10	25,0 – 30,0	3,0 – 6,0	1,0 – 2,0 Mo
330	0,08	17,0 – 20,0	34,0 – 37,0	0,75 – 1,5 Si, 0,04 P
347	0,08	17,0 -19,0	9,0 – 13,0	Cb + Ta (10 x % Min C)

*Valores únicos indicam porcentagem máxima a menos que sejam anotadas de outra forma.
L – "*Low Carbon*" (Baixo Carbono).

Fonte: [25].

Geralmente os aços inoxidáveis austeníticos apresentam alta ductilidade, baixo limite de escoamento e alto limite de ruptura, propriedades que os tornam apropriados para operações de conformação e estampagem profunda.

Para melhorar a ductilidade e tenacidade aos aços inoxidáveis austeníticos, pode-se fazer um tratamento térmico chamado de austenitização, que consiste em aquecer o material até a uma temperatura entre 1000°C a 1120°C, seguido de um resfriamento rápido até atingir a temperatura ambiente.

Os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados para aplicações nos setores aeronáutico, aeroespacial, nuclear, utensílios domésticos, equipamentos para indústrias químicas, naval, fabricação de alimentos, de forno, estufas, eletrodos, etc. O melhor tipo de aço para cada aplicação depende da sua composição química e da sua resistência mecânica. Para as aplicações que envolvem processos de soldagem, normalmente é utilizado um tipo de aço inoxidável com baixo teor de carbono.

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos variam de acordo com a sua composição química e métodos de processamento. Na Tabela 3.6 são mostradas as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas típicas dos aços inoxidáveis Austeníticos.

TIPO AISI	Temperatura Ambiente (Recozido)				Temp. Max. Serviço (°C) ao Ar	
	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento 0,2% (MPa)	Alongamento 50 mm %	Dureza Rockwell B	Contínuo	Intermitente
201	792	380	55	90	843	787
202	723	380	55	90	843	787
301	758	275	60	85	898	816
302	620	275	50	85	898	816
302B	655	275	55	85	955	816
304	580	290	55	80	898	843
304L	558	269	55	79	898	843
305	586	262	50	80	898	--
308	586	241	50	80	927	843
309	620	310	45	85	1066	1010
310	655	310	45	85	1121	1038
314	689	345	40	85	--	--
316	579	290	50	79	898	843
316L	558	290	50	79	898	843
317	620	275	45	85	927	871
317L	586	241	50	80	927	871
321	620	241	45	80	898	843
347	655	275	45	85	898	843

Fonte: [25].

3.3.4.1 Corrosão intergranular (Sensitização)

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam um sério problema de corrosão denominado de “corrosão intergranular”. Quando submetidos a tratamento térmico de austenitização, ou a serviços de soldagem onde a temperatura pode variar de 400 a 900°C, apresentam a formação de compostos intermetálicos conhecidos como carbonetos de cromo na região de contorno de grão, que produzem uma corrosão chamada de corrosão intergranular, mesmo que o material permaneça pouco tempo nessas faixas de temperaturas [24].

Um carboneto de cromo e ferro consegue dissolver-se na austenita com maior facilidade, à medida que a temperatura aumenta acima de 900°C. Depois que um aço inoxidável austenítico é aquecido até essa faixa de temperatura e

resfriado bruscamente até a temperatura ambiente, sua estrutura passa a ser homogênea; entretanto, torna-se instável em temperatura abaixo da linha de solubilidade sólida do carbono na austenita.

Quando é aquecido novamente a uma temperatura acima de 400°C, o carboneto, pelo aumento da solubilidade dos átomos de carbono, precipita-se ao redor dos contornos de grãos, ao invés do interior do material.

Os carbonetos de que se precipitaram nas regiões de contorno de grão não deixam essa região mais sensível à corrosão, mas a tornam mais rica em cromo do que a região da qual precipitaram, o que significa que houve uma retirada de cromo das regiões vizinhas. Essas regiões que normalmente também são contornos de grãos tornam-se menos resistentes ao ataque de certos reagentes, produzindo uma corrosão entre os grãos e a sua consequente separação, sensitizando a região. Os cristais expostos, de diferentes composições, são considerados como minúsculos elementos galvânicos que quando expostos a um eletrólito, passam a gerar correntes elétricas fracas, que irão consumir de forma constante o material da superfície dos cristais, fragilizando a estrutura, pela falta de coesão entre os grãos [24]. Para evitar esse problema e também distorções durante a soldagem, utiliza-se um aço inoxidável austenítico com menor teor de C (máximo de 0,03%) e adota-se uma maior velocidade de deslocamento.

3.3.5 - Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos

A soldabilidade da maioria dos materiais por fusão sempre leva à consideração de suas propriedades mecânicas e também a sua composição química. Embora os aços inoxidáveis austeníticos apresentem uma boa soldabilidade, podem ocorrer reações do cromo com o carbono e com o oxigênio na poça de fusão (sensitização), já mencionado anteriormente.

Os aços inoxidáveis austeníticos também são susceptíveis a trincas a quente. Essas trincas ocorrem quando a composição química do metal de adição é igual à do metal base. O teor de ferrita contida no metal de adição precisa ser diferente da contida no metal base e deve ser bem controlada para evitar a formação de uma estrutura totalmente austenítica que favoreça o aparecimento de trincas de solidificação. Normalmente esse problema é minimizado pelo uso de um metal de adição que leve a formação de uma estrutura austenítica-ferrítica, e à adoção de procedimentos de soldagem que diminuam as tensões na solda [16].

Como o seu ponto de fusão e condução de calor são menores que a do aço doce e o seu coeficiente de expansão térmica é maior, também podem surgir problemas de distorções nas soldas [16].

A exemplo de outros processos de soldagem, a ausência de porosidades, mordeduras e falta de penetração dependem grandemente da escolha correta do processo e do uso adequado dos procedimentos de soldagem.

3.3.6 – Processos de soldagem dos aços inoxidáveis

Os principais processos de soldagem empregados na soldagem dos aços inoxidáveis são os processos de soldagem por fusão TIG e MIG com proteção gasosa de gás inerte He ou Ar. Também são utilizados, em menor escala os processos de soldagem por Eletrodo Revestido, Soldagem por Resistência, Arco Submerso, Brasagem, Laser, Feixe de Elétrons e Plasma, etc.

Esses materiais também podem ser soldados no estado sólido pelos processos de soldagem por Explosão, Fricção, Difusão, em aplicações

especiais onde não é possível usar os processos de soldagem por fusão ou para produtos específicos.

Para a soldagem de chapas finas é mais utilizado o processo de soldagem TIG (manual, semiautomático, automático) com proteção gasosa de Ar, He ou o processo de soldagem por Resistência. Na soldagem de chapas mais espessas, utiliza-se o processo de soldagem MIG (semiautomático e automático), que possibilita o uso de maiores velocidades de soldagem e fornece maior taxa de deposição.

Na soldagem por fusão dos aços inoxidáveis com outros materiais como o Al, Cu, etc., é utilizado o processo de soldagem por brasagem, onde normalmente é adicionado um terceiro material com ponto de fusão inferior ao dos materiais que serão unidos. A brasagem pode ser feita pelo próprio soldador de forma manual ou dentro do forno, quando se deseja uma produção em larga escala.

Bons resultados têm sido obtidos com o processo de soldagem a laser, entretanto, devido ao alto custo do equipamento e inexistência de dispositivos portáteis até o momento esse processo limita-se à produção de soldas especiais que não podem ser realizadas por meio de outros processos.

3.4 Processo de soldagem por fricção rotativa (FW)

3.4.1 Histórico

O processo de soldagem por fricção, também conhecido como soldagem por atrito, tem o seu desenvolvimento reivindicado por diversos países. Em 1929 foi registrada a primeira patente alemã; de 1939 a 1944 foi registrada uma série de patentes sobre esse processo na Inglaterra. Ele foi introduzido na Rússia em 1956, e depois foram feitas diversas inovações nos Estados Unidos da América, sendo modificado e patenteado em 1966.

Devido a essas patentes existem duas variantes no processo, cujas diferenças estão no modo de geração de energia: a soldagem por atrito convencional (russa) e a soldagem por atrito inercial (americana). Na primeira, a energia para o processo é obtida por meio de um mandril que gira indeterminadamente e é mantido por um tempo determinado. Na segunda, a energia é obtida por intermédio de um volante em rotação [27].

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

3.4.2 Características do processo

O processo de soldagem por fricção é classificado pela *American Welding Society* (AWS) como um processo de união no estado sólido cuja ligação é produzida em temperaturas menores do que a temperatura de fusão dos materiais bases [28].

O aquecimento responsável pela união é gerado mecanicamente por atrito entre as peças a serem soldadas. Esse aquecimento ocorre devido a uma das peças (que está fixa) ser pressionada sobre a outra peça que se encontra em alta rotação [27].

O atrito entre as superfícies faz com que a temperatura aumente rapidamente até atingir a temperatura de forjamento a quente da liga, fazendo com que a massa se deforme plasticamente e flua em função da aplicação de pressão e da força centrífuga, gerando uma rebarba (*flash*). A Figura 3.11 mostra as etapas do processo.

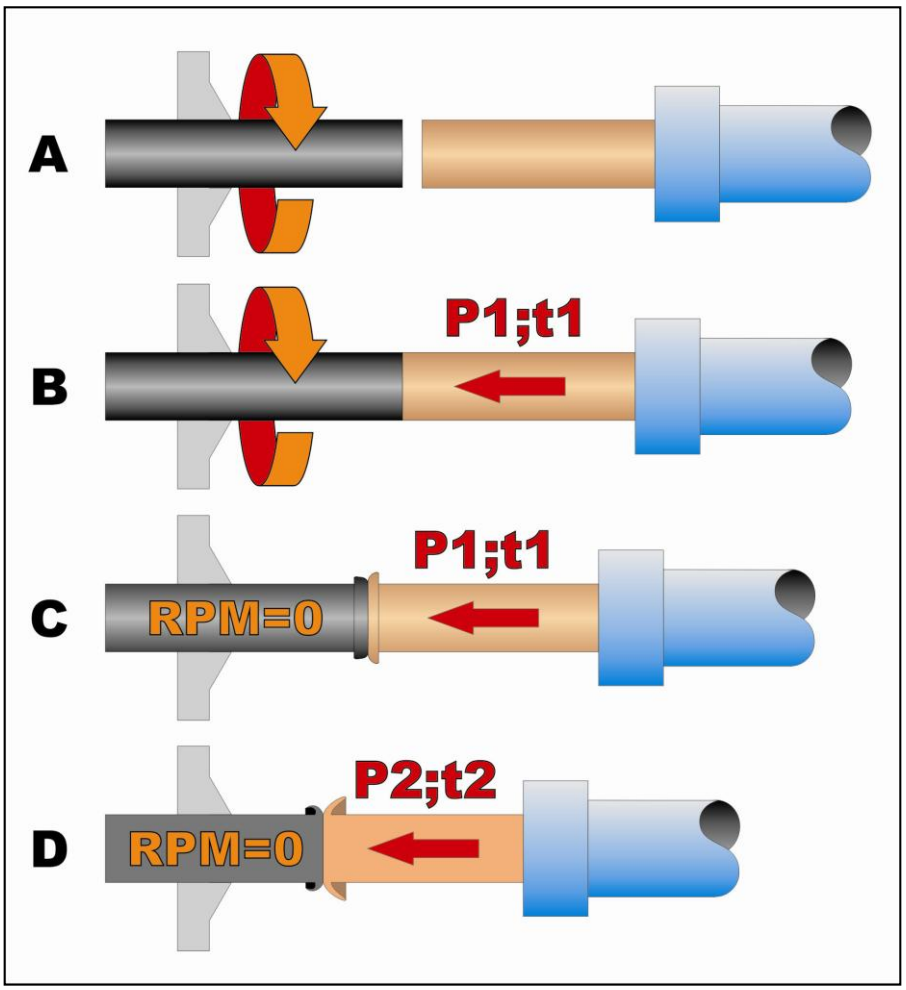


Figura 3.11 - Etapas do processo de soldagem por atrito convencional:
A) Período de aproximação; **B**) Aplicação de P1, t1; **C**) Término de aplicação de P1, t1, e frenagem da máquina (RPM =0); **D**) Aplicação de P2, t2 e término da soldagem.

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

Para a maioria dos materiais o acabamento das superfícies que serão unidas por esse processo não necessita ser polido, como acontece na soldagem por difusão, onde o controle da rugosidade superficial representa um dos parâmetros mais importantes. As superfícies podem ser forjadas, cortadas com tesoura, discos abrasivos, pois as junções serão de topo e haverá fricção entre elas [27]. Entretanto, na soldagem de materiais altamente dissimilares como alumínio e aço inoxidável, é fundamental que se realize antes da soldagem uma usinagem das superfícies e uma boa limpeza das interfaces a fim de evitar que elementos contaminantes, como água e hidrocarbonetos formem camadas superficiais extremamente tenazes durante a soldagem, capazes de reduzir a integridade estrutural da solda [29].

A rebarba resultante do processo de soldagem normalmente é removida por usinagem, cisalhamento ou esmerilhamento logo após o término da soldagem [27]. 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 [30]. Neste exato instante, o torque da máquina se eleva e a temperatura atinge a faixa de temperatura de forjamento a quente da liga.

Devido ao rápido aquecimento e resfriamento localizado do metal dentro de um volume limitado sob aplicação de elevada pressão, o processo de soldagem por fricção produz junções com estrutura metalúrgica composta por grãos finos e equiaxiais. Isso faz com que as junções tenham altas propriedades mecânicas de tração, dobramento e impacto [30]. A variação de dureza ao longo da zona termicamente afetada é muito pequena e a resistência à fadiga é pouco afetada principalmente quando o material soldado é submetido a tratamento de têmpera e revenimento após a soldagem [31].

Após o termino 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 [29].

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 [32].

Dependendo dos materiais soldados e das propriedades desejadas no metal base, na interface, ou em ambos, realiza-se um tratamento térmico de recozimento após a soldagem para aliviar as tensões e melhorar a ductilidade e a tenacidade da junta soldada [32].

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 [32].

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 do metal base ou decorrentes da combinação deles.

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

Com esse processo é possível unir barras cilíndricas com diâmetros dentro da faixa de 3,0 mm a 200 mm (barras de aço ao carbono, sólidas), utilizando um equipamento de soldagem por fricção fornecido comercialmente. As condições de soldagem por fricção, como pressão, velocidade de rotação, tempo de fricção, devem ser determinadas de acordo com os materiais envolvidos, configuração da junta (por exemplo, barra sólida e chapa, tubo e barra sólida, tubo e tubo, barras de diâmetros diferentes, etc.) e dimensões [33].

Quando se deseja soldar dois materiais similares ou dissimilares por esse processo, eles devem atender a dois requisitos fundamentais: (a) o material deve apresentar boa capacidade de forjamento a quente, e (b) o material deve ter baixa capacidade de lubrificação [34].

3.4.3 Variações do processo

Em função do objetivo principal do trabalho que é estudar a junção entre a liga 1050 e o aço inoxidável AISI 304 em forma de barras cilíndricas, são mencionadas as duas concepções mais importantes que são: a soldagem por fricção convencional, também conhecida como soldagem por atrito, e a soldagem por fricção inercial, conhecida por soldagem inercial.

Essas duas variações de soldagem por fricção são utilizadas pela aplicação de diferentes tipos de movimentos relativos com objetivo de gerar a fricção necessária para obter a solda [29]. O processo de soldagem por atrito convencional é o mais conhecido e utilizado em diversos países do mundo, inclusive no Brasil.

3.4.3.1 Processo de soldagem por fricção convencional (FW)

No processo de soldagem por fricção convencional mostrado na Figura 2, uma peça é fixada e rotacionada por uma unidade motora a uma velocidade pré-determinada, e a outra peça é posicionada, alinhada e deslocada por meio de um pistão hidráulico até tocar a peça que está girando. A seguir é aplicada uma pressão P1 por um determinado tempo t1; a máquina é frenada até atingir a rotação zero, e novamente é aplicada uma pressão P2 por um tempo t2, finalizando a soldagem. O resfriamento ocorre ao ar livre e os parâmetros de soldagem (RPM, Velocidade de deslocamento, P1, t1, P2, t2) são definidos pelos procedimentos de soldagem estabelecidos para cada material.

A Figura 3.12 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.

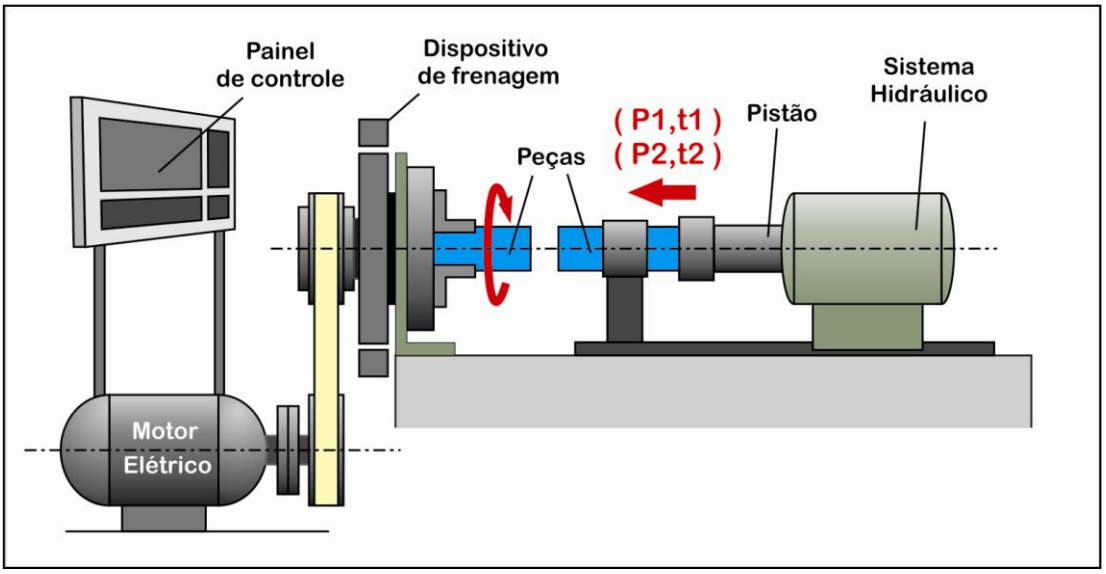


Figura 3.12 – Equipamento de soldagem por fricção convencional.

3.4.3.2 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 P1 constante até a peça parar [31]. 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 3.13 descreve as principais etapas do processo.

O equipamento é semelhante ao utilizado para a soldagem por fricção convencional, com ausência do sistema de frenagem e presença de um volante responsável pela geração da energia inercial necessária para realização da soldagem. Os parâmetros de soldagem (RPM, momento de inércia, velocidade

de deslocamento e P) são previamente definidos conforme procedimento de soldagem estabelecido.

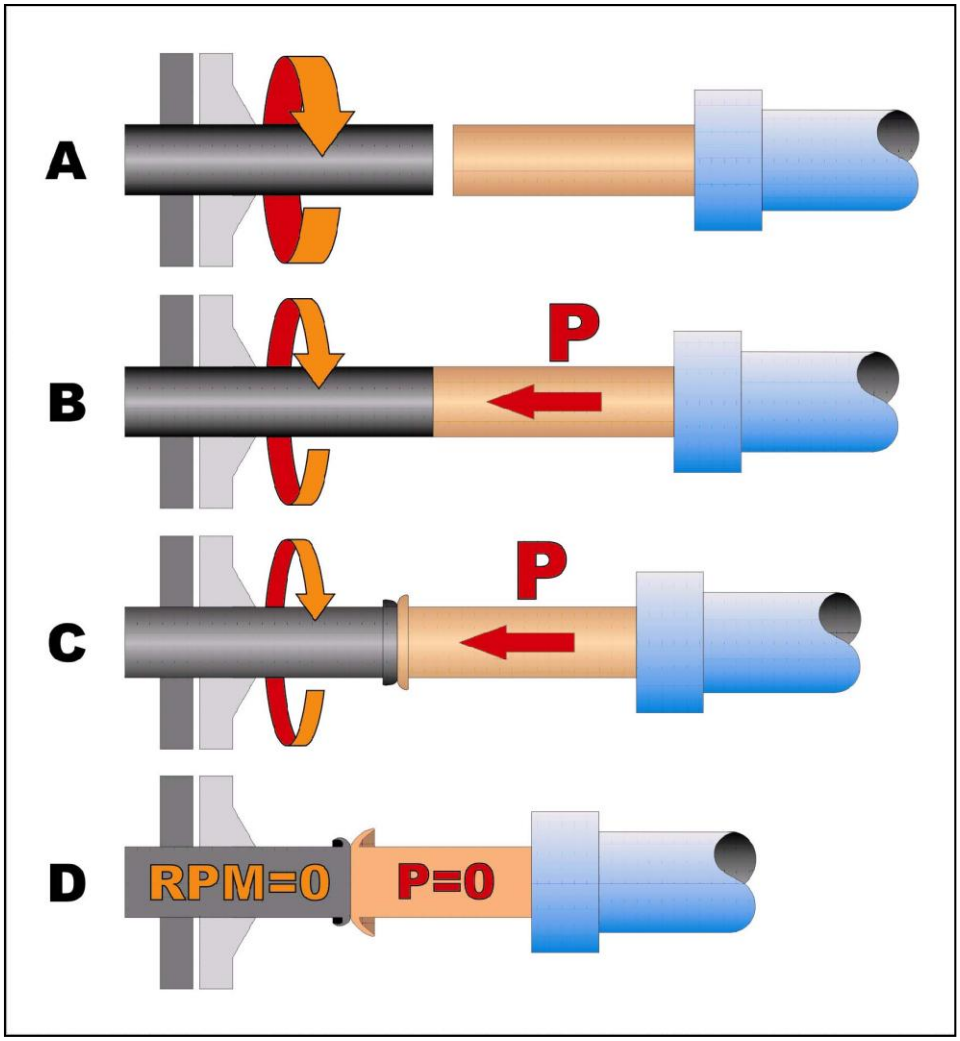


Figura 3.13 – Etapas da soldagem por fricção inercial: **A**) Período de aproximação; **B**) Desligamento da unidade motora e aplicação da pressão “P”; **C**) Redução da velocidade (RPM) através aplicação da pressão “P”; **D**) Término da soldagem (RPM=0, P=0).

A Figura 3.14 apresenta esquema básico de um equipamento de soldagem inercial.

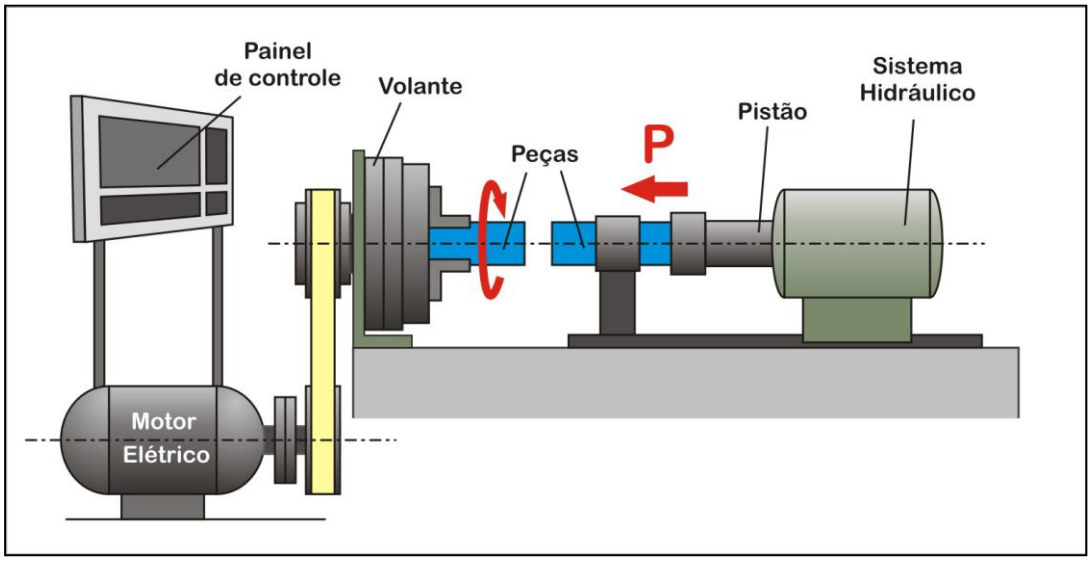


Figura 3.14 – Equipamento de soldagem por fricção inercial.

3.4.4 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 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.

A máquina de soldagem por fricção convencional possui mais parâmetros (RPM, velocidade de deslocamento, P1, t1, P2, t2) que devem ser ajustados se comparada com a máquina de soldagem inercial (RPM, P, inércia do volante). Isso faz com que os parâmetros de soldagem e otimização do processo sejam mais difíceis. Na Tabela 3.7 são feitas algumas comparações entre os dois processos.

Tabela 3.7 – 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: [27]

As linhas de fluxo do escoamento plástico que influenciam na resistência da solda são diferentes nas duas variantes do processo. No processo de soldagem convencional elas são radiais porque, quando é aplicada a pressão final sobre a junta, ela está praticamente imóvel. No processo de soldagem por atrito inercial elas são espiraladas, pois a pressão é aplicada com a peça ainda em movimento radial [27]. Esse detalhe é mostrado na Figura 3.15.

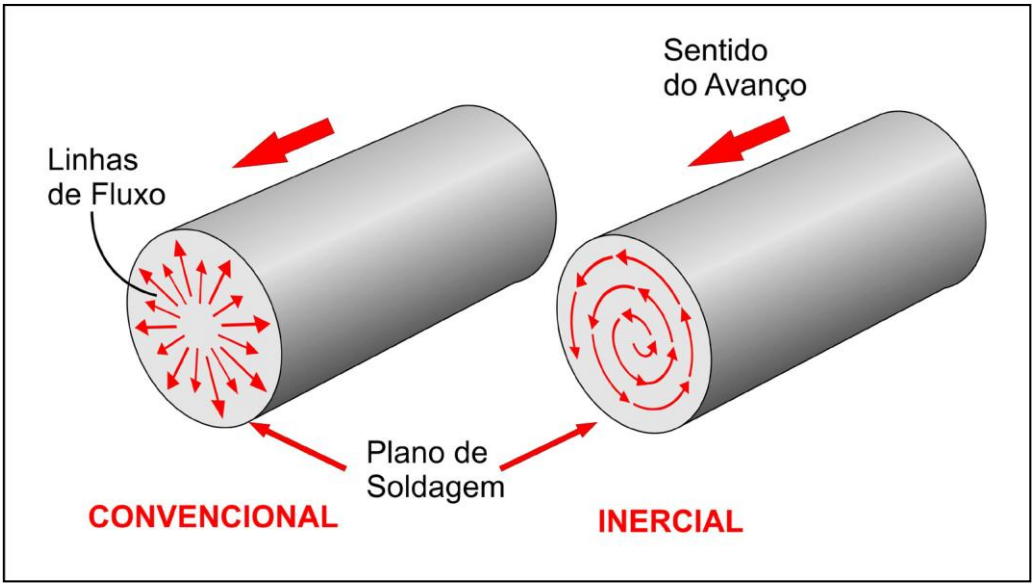


Figura 3.15 – Linhas de fluxo de escoamento plástico nas duas variantes do processo.
Fonte: Adaptado de [27].

3.4.5 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção

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

3.4.5.1 Vantagens do processo de soldagem por fricção:

- Como as ligações entre os materiais ocorrem através de difusão e não por fusão, a soldagem por fricção é capaz de soldar a maioria dos materiais, inclusive materiais altamente dissimilares que não são possíveis por meio dos processos por fusão até o momento [35];

- 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;

- A utilização de equipamentos automáticos de alta tecnologia reduz a necessidade de mão-de-obra experiente e altamente qualificada [36];

- As junções produzidas por esse processo possuem alta resistência mecânica das soldas, permitindo a sua utilização em aplicações estruturais;

- Não é utilizado metal de adição, fluxo ou gases de proteção, que conciliado ao baixo consumo de energia e rapidez na execução, representam baixo custo;

- O consumo de energia é mínimo se comparado com os processos por fusão, não gera fumos ou vapores tóxicos nocivos ao meio ambiente [20];

- Como a soldagem ocorre no estado sólido em baixa temperatura, preserva a microestrutura da maioria dos materiais eliminando a necessidade de tratamento térmico após a soldagem;

- Como o calor gerado por esse processo é pequeno, a temperatura na interface de ligação fica abaixo do ponto de fusão, e não gera distorções na junta soldada [35].

- 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.

3.4.5.2 Limitações do processo de soldagem por fricção:

- O custo do equipamento é elevado, sendo normalmente produzido em países como India, Alemanha, Inglaterra e exportado para o Brasil;

- Os equipamentos são robustos, não permitem o transporte e manuseio em outros locais de trabalho;

- Apresenta determinadas limitações quanto à geometria e dimensões das peças, não podendo ser usado para a soldagem de componentes com seções transversais não circulares [37];

- Não permite a soldagem de materiais com baixo coeficiente de atrito, como determinados ferros fundidos, bronzes, etc.;

- Limitado a certos tipos de juntas de topo, planas e angulares, devendo ser perpendiculares e concêntricas em relação ao eixo de rotação, qualquer desalinhamento das peças a serem unidas poderá comprometer a qualidade estrutural da junção.

- Superfícies de materiais que sofreram tratamentos superficiais de carbonetação, nitretação apresentam dificuldades para serem soldadas por fricção devido ao baixo coeficiente de fricção e apresentarem baixa forjabilidade [29].

3.5 Mecanismos de ligação

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

No processo de soldagem por fricção rotativa, o calor gerado na interface de ligação é consequência da transformação de energia mecânica em energia térmica e envolve fricção abrasiva, dissipação de calor, deformação plástica e interdifusão [29].

Segundo Fukumoto *et al*. [38, 39], 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*. [40] 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 1μm a 2μm nas ligas Al-Cu, Al-aço carbono, Al-aço inoxidável.

Kimura *et al*. [41] descrevem que é possível obter juncões 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.

Yilbas *et al*. [42] 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 [43] 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, é o mecanismo de difusão.

Zepeda [28] define a difusão como o principal mecanismo de ligação entre o alumínio 6351 T6 e o aço inoxidável 304. Entretanto, afirma que a interdifusão não é o único mecanismo envolvido na formação da camada intermetálica na soldagem por fricção, a mistura mecânica é outro mecanismo, mas que o seu papel na formação da junção ainda precisa ser totalmente compreendido.

No "*Welding Handbook*" [32], 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.

3.5.1 Teoria da ligação por difusão

Teoricamente, se dois materiais fossem colocados em contato perfeito e suas superfícies fossem idealmente planas (em escala atômica), livres de contaminantes e filmes óxidos, a união deveria ocorrer prontamente pela

simples aproximação dos átomos e o complemento das suas ligações. Isso é chamado de adesão física, e desse modo a resistência da junção seria similar à dos materiais [43]. Entretanto, é impossível obter tais condições, pois superfícies reais apresentam rugosidades não removíveis por métodos convencionais e uma camada de átomos adsorvidos estabiliza as ligações atômicas insaturadas nas superfícies dos substratos [43].

A difusão é um processo metalúrgico básico que resulta do maior ou menor movimento individual dos átomos. Devido à energia térmica, os átomos em um cristal metálico estão em constante movimento em busca da sua posição de equilíbrio na rede. Ocasionalmente, como resultado desse movimento, um átomo saltará para uma vizinhança mais próxima. Na temperatura ambiente, a frequencia com que um átomo se move para uma vizinhança é muito pequena. Entretanto, quando ocorre um aumento da temperatura, a frequencia 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 [44].

Na soldagem por fricção, temos outra variável de ordem de pressão, que quando aplicada ao sistema intensifica o contato entre as superfícies. Inicialmente é gerada uma superfície limpa e isenta de óxidos e agentes contaminantes com ótima capacidade de adesão. Com as superfícies de contato limpas, submetidas à pressão e elevada temperatura ocorre o processo de difusão. Segundo Zepeda [28], a ligação ocorre da região central para a periferia devido à menor velocidade tangencial.

3.5.2 Formação de compostos intermetálicos durante a ocorrência da ligação por difusão.

Dependendo dos parâmetros adotados (ver 3.6.1, pag. 64) e das condições de soldagem no processo de soldagem por fricção, pode ocorrer a formação de compostos intermetálicos indesejáveis que fragilizam a junção quando a ligação por difusão está sendo realizada entre materiais dissimilares. Por isso é importante estudar a formação e o mecanismo de crescimento dos compostos intermetálicos nas superfícies a fim de controlar o processo durante a ligação por difusão.

Para entender o mecanismo de formação dos compostos intermetálicos durante a ligação por difusão de materiais dissimilares, é necessário o entendimento do fenômeno da interdifusão no momento em que começam a se formar os compostos intermetálicos. Em contraste com as mudanças que ocorrem na fase líquida, a nucleação heterogênea raramente acontece durante as mudanças de fase sólida, mas ocorre nucleação nas impurezas, contornos de grãos e discordâncias [44].

Pesquisas indicam que a probabilidade de precipitação de uma nova fase depende do fator cinético, do estado de difusibilidade do átomo, da direção da força termodinâmica, da temperatura, e da região de contato, entre outros. Entretanto, nenhuma teoria pode prever e interpretar precisamente a formação e o crescimento de compostos intermetálicos durante a ligação por difusão. O primeiro estágio da formação e crescimento dos compostos intermetálicos durante a ligação por difusão é composto pelas seguintes fases: a interdifusão dos materiais ocorre a diferentes taxas, depois é formada uma solução sólida supersaturada. O núcleo do cristal das novas fases é formado nos defeitos onde a concentração dos elementos que estão se difundindo é alta. O núcleo do composto intermetálico cresce ao longo da interface; as regiões de crescimento dos compostos intermetálicos ligam-se e crescem longitudinalmente como acontece normalmente. Após isso, o núcleo do cristal

do segundo composto intermetálico é formado na interface e começa a aumentar [28].

3.6 Modelamento de uma junção no estado sólido.

Uma junção deve atender aos requisitos de projeto de acordo com os esforços e solicitações de trabalho na sua área de aplicação. Para que uma junção no estado sólido atenda a esses requisitos devem-se elaborar procedimentos de soldagem adequados, e que permitam a repetibilidade do processo com a mesma qualidade.

A modelagem de uma junção soldada por fricção envolve o estudo dos principais parâmetros do processo que tornam possível a elaboração dos procedimentos de soldagem, do formato da rebarba e também da quantidade de calor na interface de ligação.

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

Na soldagem por fricção convencional há diversos parâmetros que são ajustados e controlados diretamente no equipamento de forma a garantir a qualidade das juntas soldadas. Esses parâmetros são definidos em função das propriedades do metal ou metais que serão unidos e da geometria das peças [30].

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

- Velocidade de rotação – RPM

- Pressão de aquecimento P1;

- Tempo de aquecimento t1;

- Pressão de recalque P2;

- Tempo de recalque t2;

- Velocidade de deslocamento do pistão.

3.6.2 Velocidade de rotação (RPM)

A velocidade de rotação tem como função principal, produzir uma velocidade relativa nas superfícies em contato [32]. 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) [45], 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.

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* (ver 3.6.10, pg. 76) para obtenção de junções com boa qualidade [32]. 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 [32]. 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, os aspectos gerais de acabamento, evitar redução excessiva de comprimento e perda de material.

A velocidade de rotação, embora não seja um parâmetro tão importante se considerado isoladamente, exerce um papel fundamental na obtenção de uma junção com qualidade estrutural quando combinada com a velocidade de deslocamento, pressão P1 e tempo t1. Na Figura 7 é mostrada a influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento t1, mantida a velocidade constante [27].

3.6.3 Pressão de 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. Existe uma grande faixa de pressões que podem se aplicadas para aços, ligas de alumínio e materiais dissimilares que podem ser utilizadas para obter soldas com boa qualidade. Ela controla a gradiente de temperatura na interface da solda e deve ser ajustada de acordo com o material ou materiais envolvidos juntamente com o tempo t1 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, consequentemente, produzir juntas soldadas incompletas ou com falhas.

Durante a realização da soldagem a pressão P1 é mantida constante até o término do tempo t1. Podem-se modificar os valores de pressão durante a realização do processo, entretanto, essa prática não é recomendada, mesmo que os equipamentos permitam que o operador realize essa operação. Nas indústrias que utilizam o processo de soldagem por fricção rotativa

convencional, têm-se adotado medidas de segurança que limitam valores de pressão dentro de determinadas faixas de operação com objetivo de se evitar 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.

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 interfaces dos dois materiais.

O valor da pressão P1 ideal para um processo produtivo é o maior possível que permita altas taxas de produção, menor ZTA, menor redução do comprimento dos materiais envolvidos e que apresente como resultado final as propriedades mecânicas especificadas pelo projeto de forma que a qualidade do produto atenda as necessidades do cliente. A Figura 3.16 mostra à influência da pressão P1 no tempo de aquecimento t1, mantida a velocidade de rotação constante.

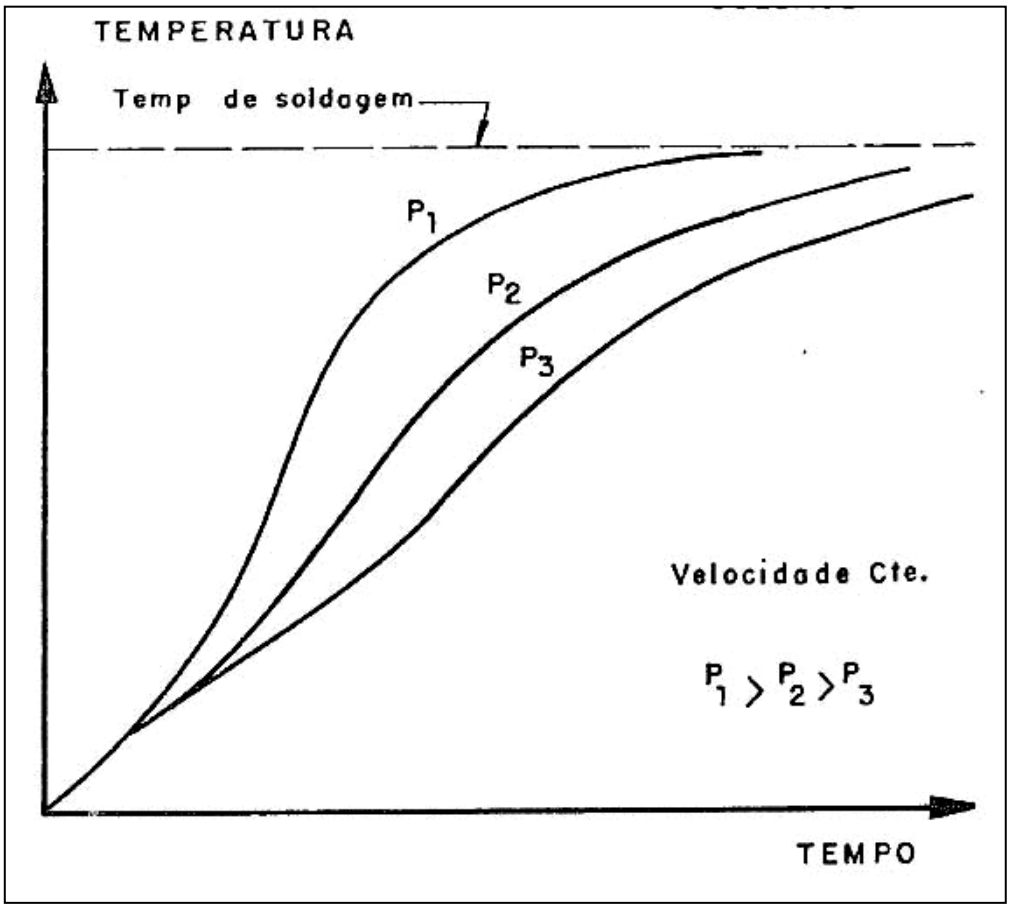


Figura 3.16 – Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a velocidade constante.
Fonte: [27].

3.6.4 Tempo de aquecimento t1

O tempo de aquecimento t1 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 t2.

Quando tempo de fricção é muito curto, o efeito do aquecimento pode se tornar irregular resultando no surgimento de regiões não soldadas. Caso o

tempo de fricção seja longo demais, haverá uma redução da produção e consumo excessivo de material [46].

Para que ocorra a soldagem no estado sólido é necessário que todos os óxido e impurezas existentes nas superfícies de contato entre os dois materiais sejam removidos através da rebarba. A principal função do tempo t1 é de fazer com que isso aconteça de forma efetiva logo no início da fase de aquecimento para que as novas superfícies de contato possam interagir e iniciar o processo de ligação.

Como parâmetro de soldagem atua juntamente com a velocidade de rotação, pressão P1 e velocidade de soldagem. Essa combinação de parâmetros é determinante na formação de uma boa microestrutura na ZTA e obtenção de junções com boas propriedades mecânicas.

A definição do tempo t1 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 t1 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.

3.6.5 Pressão de forjamento P2

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.

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.

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.

3.6.6 Tempo de forjamento t2

O tempo t2 juntamente com a velocidade de soldagem, é responsável pela aplicação efetiva da pressão de recalque P2. Quando se encerra o período de tempo t2 é completado o ciclo de soldagem.

Tanto o tempo de aquecimento t1 quanto o tempo de forjamento (recalque) t2, são controlados por meio de um dispositivo temporizador (*timer)* [32], que é ajustado diretamente no painel de controle do equipamento de soldagem por fricção. Quando a pressão de forjamento P2 aumenta, o tempo de recalque t2 é diminuído e vice-versa.

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

3.6.7 Velocidade de deslocamento do pistão

A velocidade de deslocamento do pistão ou velocidade de soldagem é outro parâmetro bastante importante que deve ser definido de acordo com os materiais a serem soldados. O tamanho da ZTA e o tempo de soldagem variam diretamente com a velocidade de soldagem [27]. Para cada material existe uma força e uma velocidade crítica mínima, cujos valores são mostrados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Valores de força e velocidade crítica mínima de soldagem.

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

Fonte: [27].

A velocidade de soldagem influencia diretamente na temperatura da interface de ligação, que está relacionada com o tamanho da ZTA e com as propriedades mecânicas da junta soldada [27]. Para a soldagem de materiais similares e dissimilares, a definição desse parâmetro deve ser feita analisando-se os valores dos outros parâmetros e das características da ZTA desejada. Normalmente os valores calculados são referenciais; na prática, sempre existe a necessidade de se realizar testes experimentais com diferentes velocidades e ajustá-las corretamente para obtenção dos melhores resultados.

Na soldagem de materiais dissimilares como o Al (1,25 m/s) e o aço inoxidável (1,0 m/s), a definição desse parâmetro depende de testes experimentais, onde são realizados ensaios mecânicos, análise do formato da rebarba, verificação da redução do comprimento dos materiais que foram soldados, etc. Entretanto, quando a soldagem se refere a dois materiais com velocidades criticas mínimas bem distintas, como é o caso da soldagem do aço inoxidável (1,0 m/s) com o cobre (9,0 m/s), pode haver a necessidade da realização de um número maior de testes experimentais e de ajustes dos

outros parâmetros relacionados ao processo. Na Figura 20 é mostrada a influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a pressão constante.

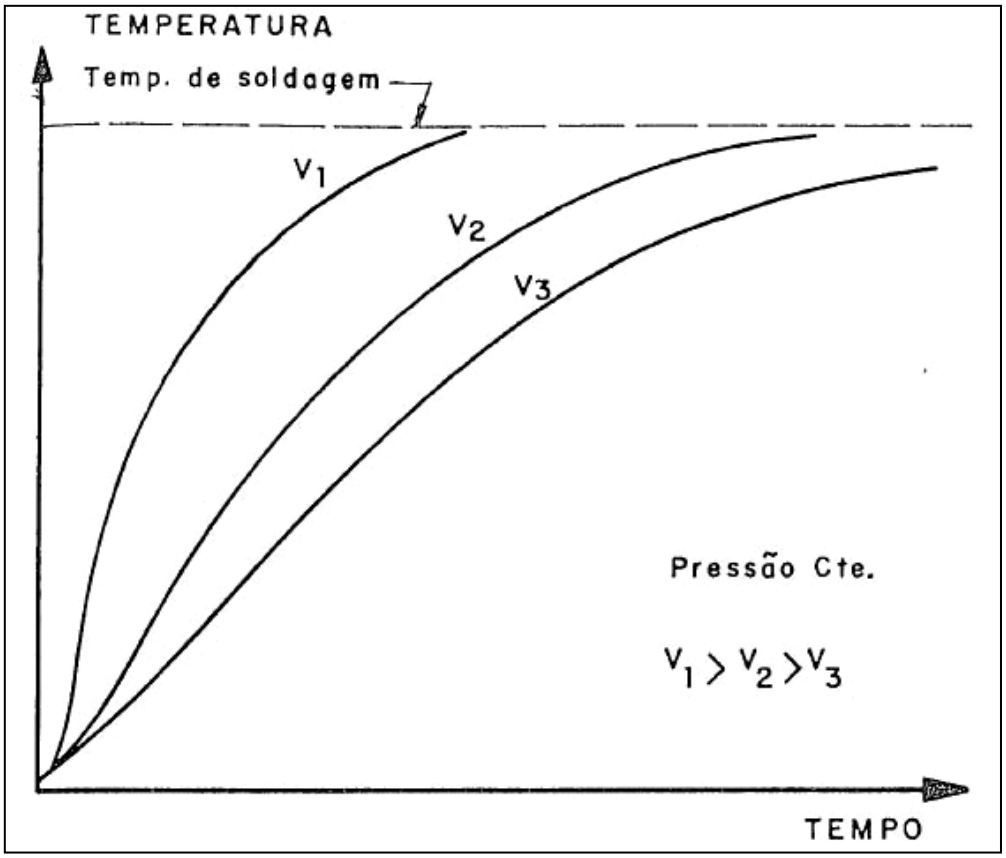


Fig. 3.17 – Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento, mantida a pressão constante.
Fonte: [27].

3.6.8 Interação entre os parâmetros

Embora tenham sido descritas anteriormente a função e a importância de cada parâmetro individualmente ou relacionado a outros parâmetros em cada fase da soldagem por fricção rotativa convencional, a interação entre todos os parâmetros e fases subsequentes é que resulta na formação de uma junção com boa qualidade e propriedades mecânicas ideais para a sua aplicação.

Na fase de aquecimento a interação dos parâmetros tem como objetivo a remoção da camada de óxidos e impurezas das interfaces dos materiais que serão unidos e fazer com que o atrito entre elas eleve a temperatura até um determinado valor para que, com a aplicação da pressão de forjamento P2 no intervalo de tempo t2, a solda seja finalizada com sucesso. Se essa interação não ocorrer de forma satisfatória na fase de aquecimento, e entre ela e a fase de forjamento que finaliza o ciclo de soldagem, camadas de óxidos e impurezas não forem removidas totalmente das superfícies, a temperatura necessária para que ocorra o forjamento não será suficiente para que ocorra a ligação em toda a superfície de contato, resultando em uma junção com propriedades mecânicas inferiores a dos metais base envolvidos. A Tabela 3.9 apresenta valores de variáveis típicas do processo de soldagem por fricção rotativa convencional.

Tabela 3.9 – Valores de algumas variáveis do processo, características da soldagem por fricção rotativa convencional.

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

Fonte: [27]

3.6.9 Formato da rebarba

A rebarba ou *flash* é a denominação dada para uma determinada quantidade de material extrudado que se forma ao longo da interface como consequência da pressão resultante do processo e do calor de contato [47].

Quando dois materiais são colocados em contato, um em movimento rotativo e o outro fixo, submetido à ação de um pistão hidráulico, o atrito entre eles eleva a temperatura na interface de ligação até atingir valores capazes de deformar plasticamente os materiais no sentido radial. A rebarba resultante dessa deformação remove todas as camadas de óxidos e impurezas existentes nas superfícies de contato. O contato entre essas superfícies evita a formação de novas camadas de óxidos durante o decorrer da soldagem [30].

O aumento da temperatura instantaneamente conduz o material a um escoamento dinâmico. Isso faz com que a rebarba não tenha uma espessura uniforme, mas se apresente na forma de saliência. Materiais extrudados dos lados que não estão em movimento dos corpos-de-prova que são paralelos a direção dos movimentos também mostram evidências de saliências. Devido à inexistência de movimento dos corpos de prova nessa direção, pode-se concluir que a redução axial é cíclica, fazendo com que o material escoado seja extrudado em pulsos [48].

Como a temperatura na periferia da interface soldada é maior do que nas regiões centrais, as novas superfícies são criadas a partir da periferia em direção as regiões centrais [41].

Dependendo dos parâmetros de soldagem, a rebarba pode apresentar diferentes formas e aparências. Normalmente são circulares, simétricas em relação à linha de centro das peças que foram soldadas, com diferentes diâmetros e geometrias. A sua aparência, na maioria das vezes, mostra linhas de deslocamento que representam as camadas removidas. Também é possível verificar visualmente níveis de encruamento quando os testes de soldagem são feitos com diferentes parâmetros e depois comparados. Na Figura 3.18 podem ser vistos diferentes formatos de rebarbas.

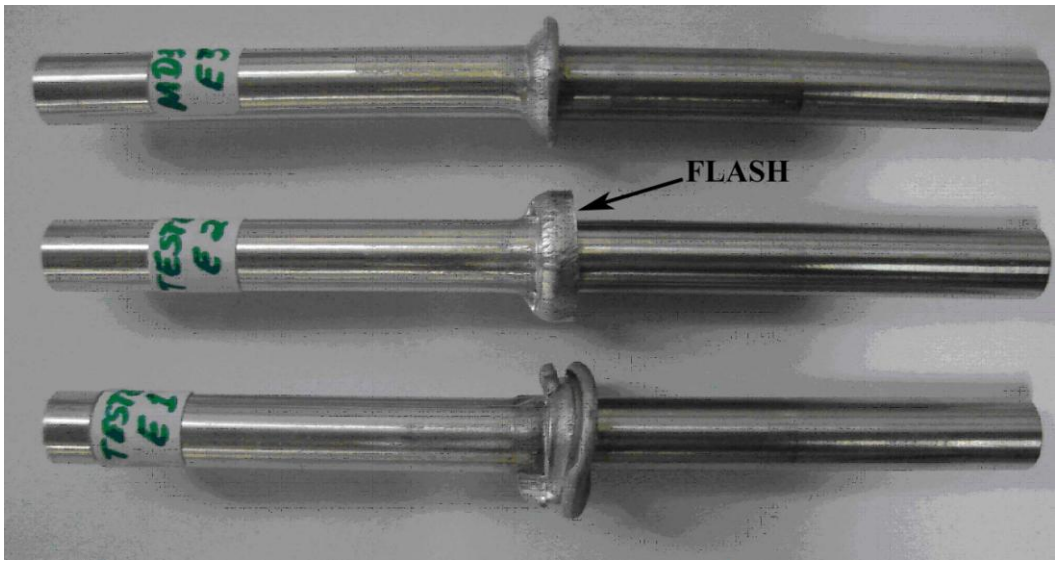


Figura 3.18 – Diferentes formatos e aparências de rebarbas obtidos com o uso diferentes parâmetros de pressão e velocidade, na soldagem da liga AA 1050 com o aço inoxidável AISI 304.

3.6.10 – Quantidade de calor na interface de ligação ou *heat input*

Durante o movimento relativo das superfícies, uma quantidade significante de calor é dissipada causando aumento da temperatura mesmo com valores pequenos de cargas e velocidades de deslizamentos [49].

A geração de calor na soldagem por fricção ocorre de forma diferente dos processos de soldagem convencionais por fusão, mas existe uma similaridade na distribuição da temperatura na junta de união do metal base [46].

O calor gerado como resultado da fricção é distribuído uniformemente em regiões onde ocorrem fricções dos materiais, e nos picos das asperezas. Isso leva ao aumento da temperatura a valores próximos da temperatura de fusão dos materiais e, consequentemente, a transformações estruturais e mudanças nas tensões residuais dos materiais ou à formação de micro soldas.

A temperatura da superfície depende da força de carregamento, da velocidade de deslocamento, da condutividade térmica e também do coeficiente de fricção. A dissipação de calor é um processo automático visto que a fricção e a adesão nos locais onde ocorrem micro soldas causam um aumento da taxa da dissipação de calor. Isso contribui para um aumento no número de micro soldas e leva a ligação de duas superfícies (soldagem por fricção) [49].

A quantidade de calor na interface de ligação ou "*heat input*" na soldagem por fricção consiste no trabalho de fricção e no trabalho de deformação gerado pelo movimento relativo entre dois materiais. O trabalho de fricção ocorre devido ao contato entre dois materiais, e o trabalho de deformação ocorre devido à deformação plástica com o empuxo axial ao longo da direção axial dos dois materiais [50].

Na soldagem por fricção de dois materiais, é extremamente importante saber a temperatura presente na interface de ligação, pois ela interfere diretamente na formação da estrutura cristalográfica da ZTA, repercutindo nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada.

Três fatores controlam as características das soldas geradas por esse processo: a velocidade relativa entre as peças, a duração do processo e a força axial. A soldagem por fricção linear e orbital requer a adição de um quarto parâmetro, a amplitude. Esses parâmetros é que determinam a entrada de energia para a solda e a taxa de geração de calor na interface [39].

A temperatura na região central da interface de ligação é menor do que a temperatura no raio médio e na superfície. Esse fato é consequência da geração de calor que é relativamente menor no centro [51], em função da menor velocidade tangencial.

Quando a soldagem envolve dois materiais similares, com as mesmas propriedades físicas, químicas e mecânicas, a temperatura na interface de soldagem aumenta rapidamente e de forma contínua da periferia para o centro. Parte do fluxo de calor se dissipa na massa dos materiais com a mesma velocidade durante a realização da soldagem; a outra parte desse fluxo de calor é dissipada pela rebarba e pelas partes do equipamento de soldagem que estão em contato direto com os materiais, como placas de fixação, suportes, etc. Após o término da soldagem, a elevação da temperatura na massa dos materiais envolvidos começa a diminuir com a mesma taxa de resfriamento a temperatura ambiente.

Na soldagem de materiais dissimilares, onde há grandes diferenças na capacidade de dissipação térmica entre dois materiais, como é o caso do Al e do aço inoxidável, o fluxo de calor dissipa-se de forma diferente nos dois materiais. Devido ao alumínio ser um material mais macio e ter o ponto de fusão mais baixo, após atingir uma determinada temperatura ele se deforma plasticamente formando a rebarba, enquanto o aço inoxidável se mantém inalterado. A dissipação de calor no alumínio, tanto na interface de ligação quanto na massa do material, ocorre para taxas mais elevadas do que no aço inoxidável durante a soldagem. Parte do fluxo de calor também se dissipa através da rebarba e de algumas peças do equipamento de soldagem que estão em contato direto com os materiais. Após o término da soldagem, a temperatura gerada pelo fluxo de calor na interface de ligação começa a diminuir gradativamente com diferentes taxas de resfriamento à temperatura ambiente, visto as grandes diferenças de condutividade térmica entre os dois materiais.

A quantidade de calor na interface de ligação gerada pelo atrito entre dois materiais soldados por fricção deve ser o suficiente para elevar a temperatura a valores capazes de permitir a união perfeita entre esses materiais. Uma temperatura baixa demais na interface de ligação pode não ser o suficiente para possibilitar a união perfeita. Uma temperatura muito alta na

interface de ligação pode gerar compostos metálicos indesejáveis capazes de fragilizar a junção.

Como pode ser visto na Figura 22, na soldagem da liga AA 1050 com o aço inoxidável AISI 304, a temperatura inicial é maior na periferia devido à maior velocidade tangencial, e depois se estende para a região central da interface da solda à medida que aumenta o tempo de aquecimento (t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9). Após um determinado tempo, a diferença entre as temperaturas passa a ser muito pequena, principalmente no lado do Al, que possui uma alta difusividade térmica [30].

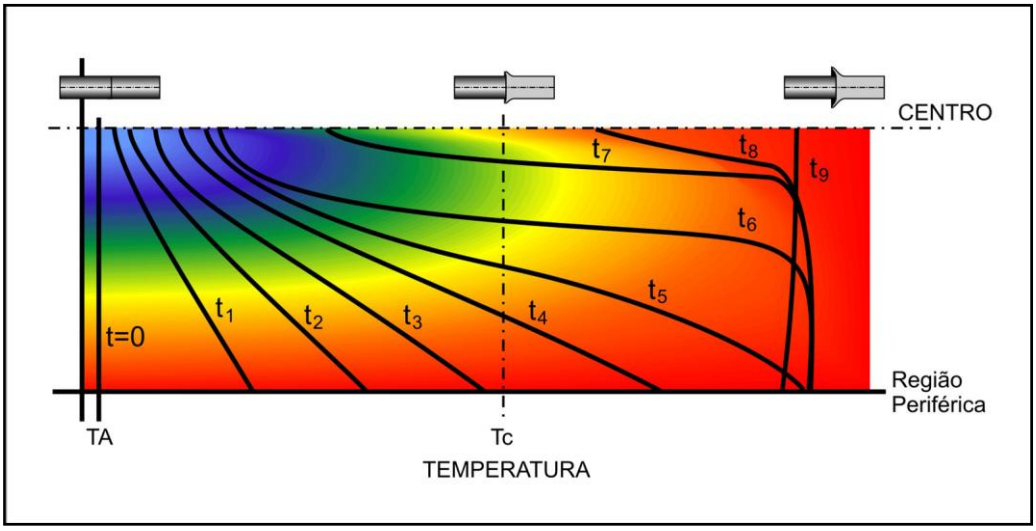


Figura 3.19 – Distribuição da temperatura na interface de ligação em diferentes tempos de aquecimento: TA – Temperatura Ambiente; Tc – Temperatura crítica.

Fonte: Adaptado de [38].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram a liga AA 1050 (99,5% de pureza) e o aço inoxidável austenítico AISI 304 em forma de barras cilíndricas com 19,0 mm de diâmetro e 6000 mm de comprimento, cujas características básicas estão descritas nos itens 3.2.1 (página 15) e 3.3.4(página 39). As barras da liga AA 1050 foram fornecidas pela ALCOA Alumínio S.A., e as barras de aço inoxidável AISI 304 pela COPPERMETAL Com. de Aços e Metais Ltd.

4.1.1 Composição química

As composições químicas nominais dos fabricantes estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 4.1 – Composições químicas nominais dos materiais, (%).

Alumínio AA1050	**ELEMENTOS, %**							
	Si	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Cr**	**Zn**	**Ti**
	0,15	0,27	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Aço Inoxidável AISI 304	**Si**	**S**	**P**	**Mn**	**C**	**Cr**	**Ni**	**Cu**
	0,40	0,01	0,03	1,80	0,05	18,05	8,59	0,41

4.1.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais nominais dos fabricantes estão apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas nominais dos materiais.

MATERIAL	**PROPRIEDADES MECÂNICAS**		
	Tensão σt (MPa)		**Deformação ε (%)**
	Escoamento	**Máxima**	**Máxima**
Alumínio AA 1050	54,71	99,66	24,00
Aço Inoxidável AISI 304	358	665	54

4.2 Métodos

4.2.1 Verificação da conformidade dos materiais quanto a sua composição química e propriedades mecânicas

Tendo como objetivo a verificação da conformidade dos materiais quanto à composição química e propriedades mecânicas para a realização desse trabalho, foram realizadas análises químicas e ensaios mecânicos de tração nos materiais antes do início dos testes de soldagem.

Para análise química da liga AA 1050 foram utilizadas as técnicas de gravimetria (Si) e espectrometria de absorção atômica (demais elementos). Na análise química do aço inoxidável AISI 304 foram utilizadas as técnicas de combustão direta (C e S), gravimetria (Si e Ni), fotometria (P), volumetria (Cr) e espectroscopia de absorção atômica (Mn e Mo).

4.2.2 Confecção dos pinos cilíndricos para a realização dos testes de soldagem

Ambas as barras foram usinadas em torno mecânico convencional no diâmetro de 14,8 mm e comprimento de 100 mm (aço inoxidável) e 110 mm (liga AA 1050), com acabamento superficial 3,2µm. Esse valor de rugosidade superficial é obtido com o uso de ferramentas comuns durante o processo de usinagem em máquinas operatrizes como tornos mecânicos e fresadoras.

Os pinos AA 1050 tiveram o seu comprimento acrescido de 10,0 mm em relação aos pinos de aço inoxidável AISI 304, para compensar a redução do seu comprimento durante o processo de soldagem.

4.2.3 Limpeza e preparação das superfícies

As superfícies dos pinos cilíndricos foram limpas com acetona pura e secas com um pano de algodão momentos antes da soldagem para eliminar possíveis elementos contaminantes, como óleos, graxas, fluidos decorrentes da usinagem, etc., que pudessem interferir nos resultados dos testes de soldagem. Para a manipulação dos pinos durante a realização da limpeza, preparação das superfícies, fixação e posicionamento no equipamento de soldagem foram utilizadas luvas de silicone.

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

A soldagem foi realizada utilizando-se um equipamento de soldagem por fricção rotativa convencional, marca GATWICK, com velocidade relativa (RPM) fixa de 3200 RPM, parâmetros de pressão (P1, P2), tempo (t1, t2), e velocidade de deslocamento do pistão variáveis. Na Figura 4.1 pode ser visto um equipamento semelhante ao utilizado para a realização dos testes de soldagem.

Figura 4.1 – Máquina de soldagem por fricção rotativa convencional GATWICK. Fonte: [52].

Inicialmente utilizaram-se como referência os parâmetros de pressão P1 = 50 MPa e P2 = 150 MPa, definidos por Fukumoto *et al*. [38]; Entretanto, após diversas análises do equipamento que seria usado para os testes, verificou-se da impossibilidade de utilização desses parâmetros, pois seriam valores de pressão muito elevados, e que poderiam até mesmo danificar o equipamento disponibilizado para a realização dos testes. Essas diferenças de parâmetros devem-se ao fato de serem equipamentos fabricados com características diferentes e provavelmente por fabricantes diferentes.

Em função disso, realizou-se uma série de testes de soldagem para obtenção dos novos parâmetros de referência, que foram mais tarde tomados como base para elaboração desse trabalho, otimização do processo e obtenção de junções com resistência mecânica superior à da liga AA 1050. Para definição desses parâmetros foram realizados cerca de 60 testes de soldagem no período de um ano, sob as mais diferentes condições de pressão, tempo, velocidade de deslocamento, condições de limpeza e preparação das superfícies.

A elaboração deste trabalho tomou como base os parâmetros de referência de pressão de fricção P1 = 2,1 MPa (300 psi), tempo de fricção t1 variável (7s, 17s, 27s, 32s), pressão de soldagem P2 variável de 0,7 MPa (100 psi), 1, 4 MPa (200 psi), 2,1 MPa (300 psi) e 2,8 MPa (400 psi), com tempo de soldagem t2 variável (1s, 2s). O pino cilíndrico de aço inoxidável AISI 304 foi rotacionado, enquanto o pino cilíndrico de liga AA 1050 foi deslocado e pressionado sobre o pino de aço inoxidável AISI 304. Uma ilustração esquemática do processo de soldagem por fricção e geometria dos pinos cilíndricos é mostrada na Figura 4.2.

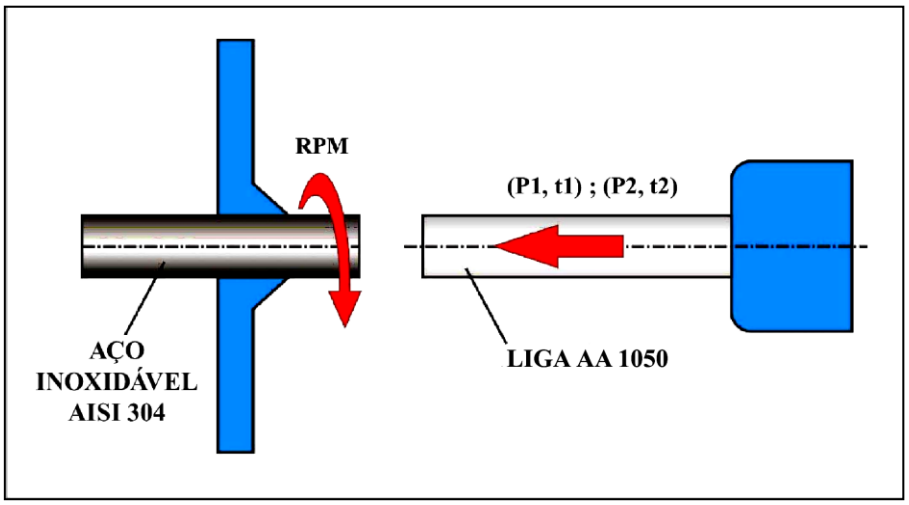


Figura 4.2 – Ilustração esquemática do processo de soldagem.

4.2.5 – Ensaios de Tração

Os corpos-de-prova soldados foram usinados de acordo com a Norma ASTM – E 8M [54], e submetidos a ensaios de tração em uma máquina da marca ZWICK 1474 com uma célula de carga de 100 kN, a temperatura ambiente de 25ºC, e com uma velocidade de ensaio de 3 mm/min. As Figuras 4.3 e 4.4**,** mostram, respectivamente**,** as dimensões dos corpos de prova e a máquina de ensaios.

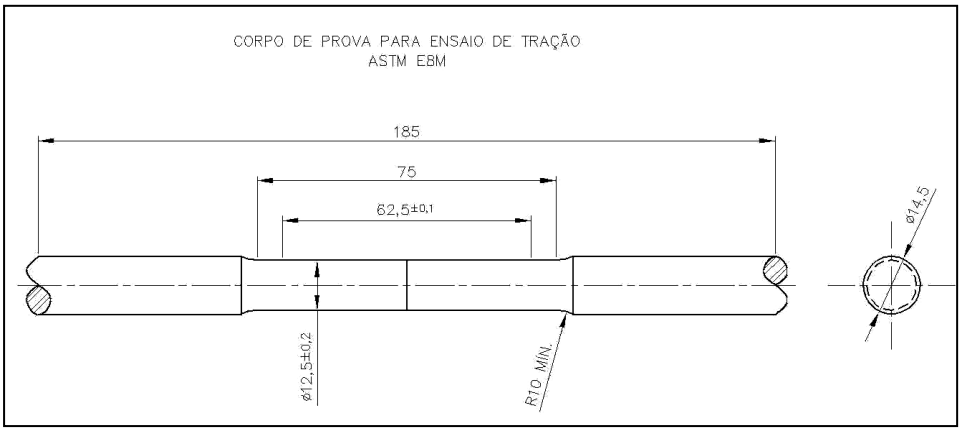


Figura 4.3 – Dimensões dos corpos-de-prova especificados pela Norma ASTM E 8M (dimensões em milímetros).
Fonte: [53].

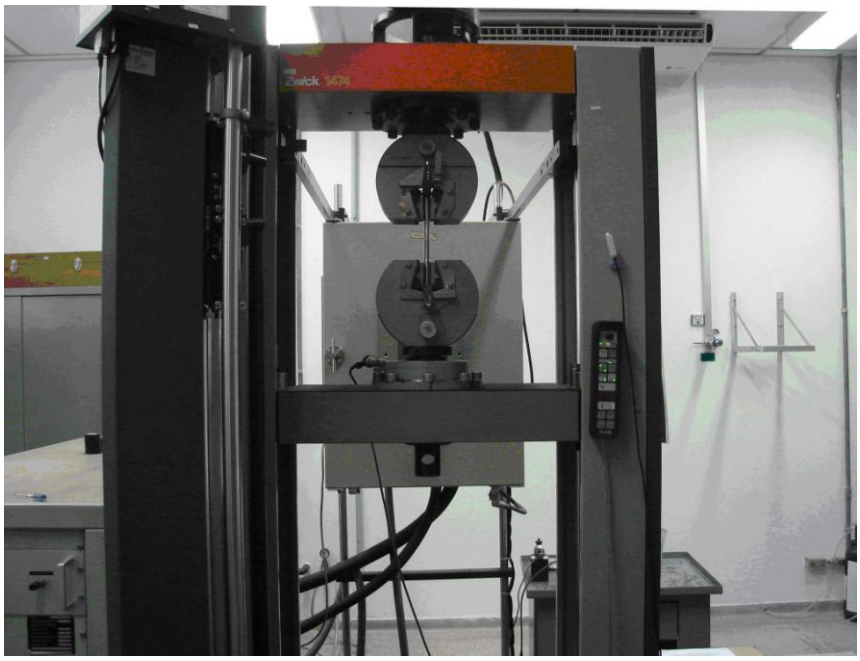


Figura 4.4 – Foto da máquina de ensaios de tração utilizada para os ensaios de tração, pertencente à Divisão de Química – Instituto de Aeronáutica e Espaço – DCTA.

4.2.6 – Ensaio de microdureza Vickers

Uma amostra com os mesmos parâmetros da junção que apresentou 100% de eficiência foi analisada por meio de ensaios de microdureza Vickers utilizando-se um microdurômetro digital Future -Tech Corporation (Japão) com uma carga 300 gf (aço inoxidável) e 100 gf (Alumínio) por um tempo de 10 segundos. A microdureza foi realizada na interface da solda e nas regiões próximas tanto no lado do alumínio quanto no lado do aço inoxidável AISI 304.

4.2.7 – Análise Metalográfica

As juntas foram cortadas no sentido transversal da solda, embutidas numa matriz de baquelite, mostrada na Figura 4.5, polidas e examinadas na

região da interface, no lado do alumínio e no lado aço inoxidável AISI 304 de acordo com a norma ASTM-E3. Primeiro o alumínio foi atacado com reagente Keller e analisado, depois o aço inoxidável foi atacado com reagente eletrolítico ácido oxiálico a 10% e analisado em um microscópio óptico da marca LEICA DMRXP.

Figura 4.5 – Amostra utilizada para realização de ensaios metalográficos e análise por EDX.

4.2.8 Análise da interface de ligação por MEV- EDX

Foi realizada uma análise pelas técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDX), na interface da solda, região central e extremidades para se verificar o mecanismo de ligação por fricção, a difusão, e a espessura da camada intermetálica formada por ela entre os materiais envolvidos no processo. Utilizou-se para essa finalidade um microscópio eletrônico marca JEOL – Mod. JSM 5310 (Figura 4.6), alocado no LAS – INPE.

Figura 4.6 – Fotografia do microscópio eletrônico de varredura (MEV com EDX) – Laboratório Associado de Materiais e Sensores.
Fonte: [54].

4.2.9 Monitoramento da temperatura durante a soldagem

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.

Para aquisição dos dados utilizou-se um sistema Termopar / Data Logger, denominado aqui de sistema TDL, acoplado ao notebook que forneceu em tempo real o gráfico da variação da temperatura durante o processo. Foi utilizado um termopar do tipo K (cromel-alumel) aferido e calibrado, da marca

ECIL, posicionado no lado do pino de aço inoxidável AISI 304 a uma distância de 0,12 mm da interface do pino de alumínio AA 1050, e um Data Logger da marca NOVUS com 16 k de capacidade de armazenamento.

O Data Logger é um registrador eletrônico, aplicado tipicamente no monitoramento de temperatura. Também foi utilizada pasta térmica da marca IMPLASTEC para melhorar a área de contato entre a ponta do termopar e a superfície do pino de aço inoxidável. Foram realizadas cinco medições durante o processo de soldagem. Neste trabalho é apresentado o gráfico que resultou nos maiores valores de temperatura. A Figura 4.7 mostra de forma ilustrativa o sistema TDL utilizado para monitoramento da temperatura em tempo real.

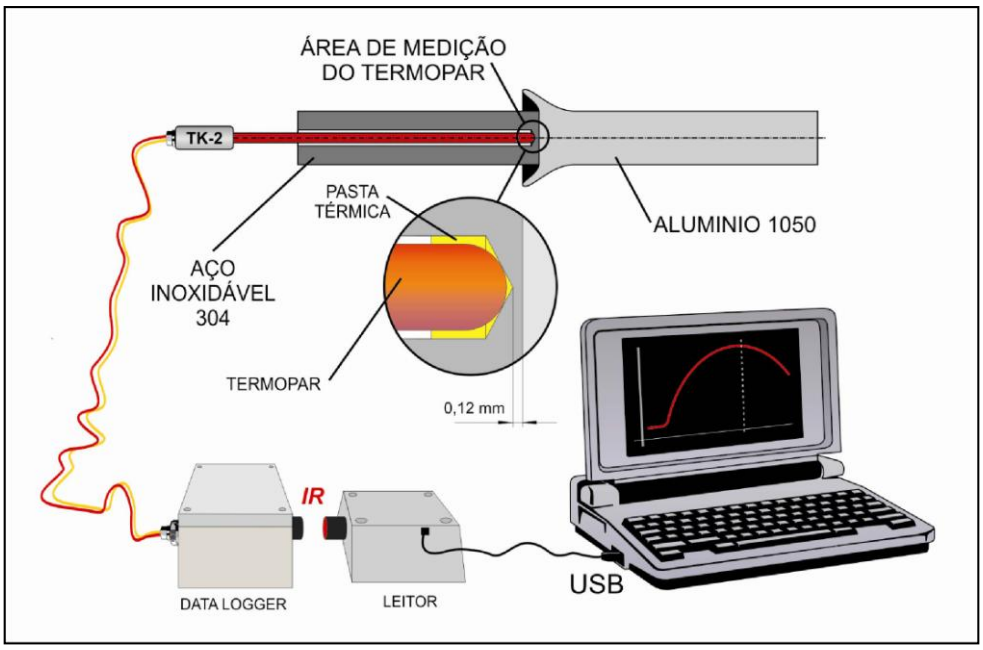


Figura 4.7 – Sistema TDL composto de termopar tipo K, Data Logger, leitor IR (infravermelho) e notebook para monitoramento da temperatura.

O sistema TDL é configurado por um software em ambiente Windows e que oferece recursos para coleta, plotagem, análise e exportação dos registros. A comunicação entre o Data Logger e o notebook é realizada em poucos segundos por meio óptico infravermelho sem contato. A medição da temperatura pode ser realizada em intervalos de 0,5 segundos, transmitida e registrada pelo sistema.

4.2.10 Produção das conexões dissimilares – alumínio AA 1050 e aço inoxidável AISI 304

Após a caracterização microestrutural e realização dos ensaios de tração para a qualificação estrutural da junção, foram produzidas as conexões a partir dos corpos de prova soldados. As dimensões dessas conexões foram definidas em função do diâmetro da tubulação existente no Sistema de Controle de Rolamento (SCR) - Baia de Controle do Veículo Lançador de Satélites – VLS.

As conexões foram usinadas em um torno mecânico convencional existente na Divisão de Mecânica – AME, no Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE – DCTA.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados

5.1.1 Análise da composição química e propriedades mecânicas

5.1.1.1 Análise química

As análises das composições químicas da liga de alumínio AA 1050 e do aço inoxidável AISI 304 foram realizadas no Laboratório Químico de Caracterização de Metais da Divisão de Materiais, pertencente ao IAE-DCTA. Os teores dos elementos encontrados estão de acordo com o especificado para a liga AA 1050 pela *Aluminum Association,* e de acordo com o especificado para o aço inoxidável austenítico Cr - Ni AISI 304. Na Tabela 5.1 são mostrados os resultados dessas análises.

Tabela 5.1 – Composições químicas dos materiais utilizados no estudo atual, (%).

Alumínio 1050	**ELEMENTOS, %**							
	Si	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Cr**	**Zn**	**Ti**
	0,07	0,26	<0,001	ND	<0,001	-	<0,002	<0,007
Aço Inoxidável 304	**Si**	**S**	**P**	**Mn**	**C**	**Cr**	**Ni**	**-**
	0,38	0,024	0,036	1,67	0,054	18,2	8,0	-

5.1.1.2 Ensaios mecânicos de tração

Os ensaios mecânicos de tração para verificação da resistência mecânica 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 [55]. Na Tabela 5.2 são mostrados os resultados dos ensaios mecânicos de tração.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no estudo atual.

MATERIAL	PROPRIEDADES MECÂNICAS				
	Tensão σ_t (MPa)		Deformação ε (%)		Módulo de Elasticidade E (GPa)
	Escoamento	Máxima	Máxima	Ruptura	
Alumínio 1050	44,70	78,48	21	43	59,12
Aço Inoxidável 304	354,69	643,79	48	63	177,10

Nos resultados dos ensaios de tração os valores obtidos diferem um pouco dos valores tido como “nominais do fabricante”, mas atendem as especificações tanto da liga AA 1050 quanto do aço inoxidável AISI 304, de acordo com a *Aluminum Association* e o *Metals Handbook*, 10th Ed., vol. 1, ASM, 1990 AWS, respectivamente.

5.1.2 Macroestrutura

Em nível macroestrutural observa-se na soldagem por fricção rotativa convencional a formação de uma rebarba com simetria circular, com diferentes formatos, e também reduções significativas no comprimento do pino cilíndrico da liga AA1050 de acordo com os parâmetros adotados. A Figura 5.1 mostra as interfaces que foram unidas (Figura 5.1(a)), a rebarba gerada pela soldagem (Figura 5.1 (b)), e o corpo-de-prova para ensaio de tração após a usinagem (Figura 5.1 (c)).

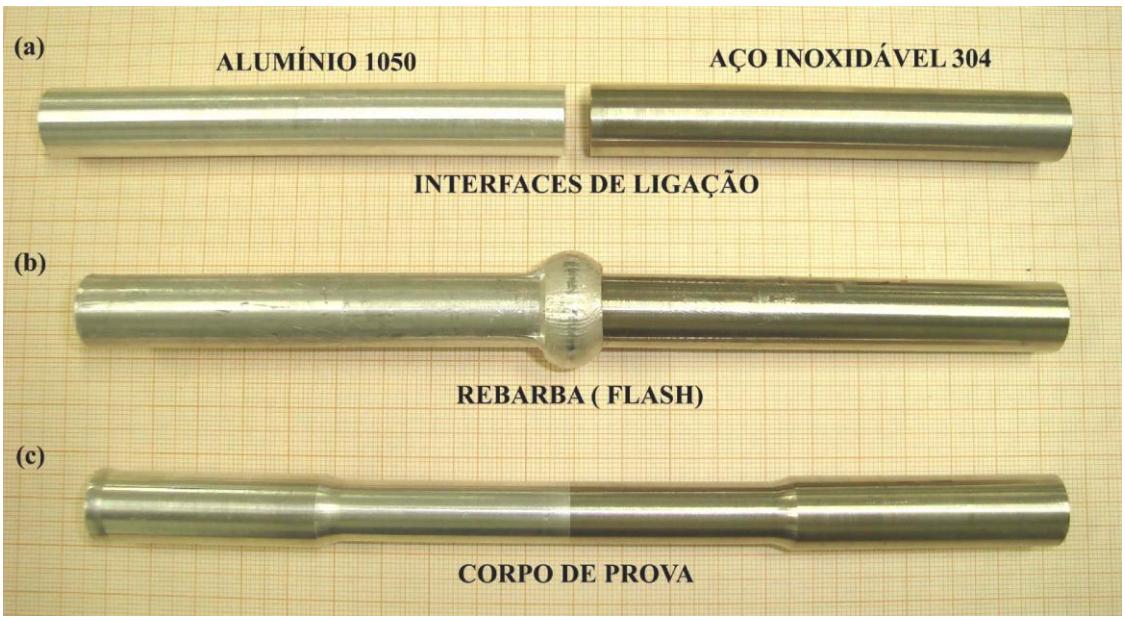


Figura 5.1 (a) – Interfaces dos pinos que foram unidas; (b) rebarba gerada pelo processo; (c) corpo-de-prova para ensaio de tração; (Amostras sobre papel milimetrado).

5.1.3 Resistência da Junta Soldada por Fricção

Os resultados dos ensaios de tração para os diferentes parâmetros de soldagem t1, P2 e t2 utilizados são mostrados na Tabela 5.3. A junção que apresenta melhor resistência mecânica (σ_t Máx.) refere-se ao corpo de prova número 8, com resistência mecânica superior ao material de menor resistência mecânica, a liga AA 1050. O tempo de fricção t1 e a pressão de soldagem P2 foram os parâmetros que mais influenciaram na resistência da junta. Na soldagem de materiais dissimilares como a liga AA 1050 (comercialmente puro – 99,5%) e o aço inoxidável AISI 304, o tempo de fricção t1 = 32s permitiu a elevação da temperatura na interface a valores suficientes para que ocorresse a soldagem. A pressão de soldagem P2 = 1,4 MPa (200psi), aplicada no tempo t2 = 2s na interface aquecida, fez com que a solda fosse finalizada e apresentasse a resistência mecânica desejada. Os resultados também mostram que à medida que é aumentada a pressão de soldagem P2, a resistência da junta também aumenta até atingir o seu limite e depois começa a

diminuir novamente. A pressão P2 é responsável pela maior ou menor redução do comprimento RC (ver Tabela 5.3) do pino da liga AA 1050 e pela formação de diferentes rebarbas. O tempo de soldagem t2 também evidencia ser um parâmetro importante: se for inferior ou superior ao tempo necessário provoca perda da resistência mecânica da junção. A interação de todos os parâmetros de soldagem de forma otimizada é responsável pela boa qualidade da junção formada pelos dois materiais em estudo. A velocidade relativa (RPM), a pressão P1 e o tempo t1 são fundamentais para que ocorra a elevação da temperatura na interface e a difusão dos materiais envolvidos, enquanto que a P2 e t2 são as responsáveis pela finalização da soldagem. Quando não ocorre a interação entre esses diversos parâmetros envolvidos no processo, a junção perde em qualidade e resistência mecânica. Também se mostrou de grande importância para a obtenção de junções com boa resistência estrutural, o uso de procedimentos de limpeza adequados antes da soldagem.

Tabela 5.3 **–** Resultados obtidos nos ensaios de tração.

ESTUDO DE PARÂMETROS							
Nº	**P1 (MPa/psi)**	**t1 (s)**	**P2 (MPa/psi)**	**t2 (s)**	***RC (mm)**	****DFC (mm)**	**σ_t Max (MPa)**
1	2,1/300	7	2,1/300	2	18,0	3,5	72,0
2	2,1/300	17	1,4/200	1	11,0	5,0	64,12
3	2,1/300	17	2,1/300	1	19,0	9,0	69,63
4	2,1/300	27	1,4/200	1	11,6	8,0	62,94
5	2,1/300	32	0,7/100	1	4,0	6,5	47,45
6	2,1/300	32	0,7/100	2	4,0	7,0	53,37
7	2,1/300	32	1,4/200	1	13,5	8,0	70,63
8	2,1/300	32	1,4/200	2	21,0	9,0	80,08
9	2,1/300	32	2,1/300	1	12,5	8,0	74,23
10	2,1/300	32	2,8/400	1	14,0	9,5	76,54

*** RC** – Redução do comprimento do pino cilíndrico de Al;

**** DFC** – Deslocamento do fluxo de calor.

Na Figura 5.2 é mostrado o corpo de prova Nº 5, fixado na máquina de ensaio de tração com ruptura na interface de soldagem após o término do ensaio. Na Figura 5.3 é mostrado o corpo de prova Nº 8 momentos antes de ocorrer à ruptura, longe da interface da solda.

Figura 5.2 – Corpo de prova Nº 5 com ruptura na interface de ligação.

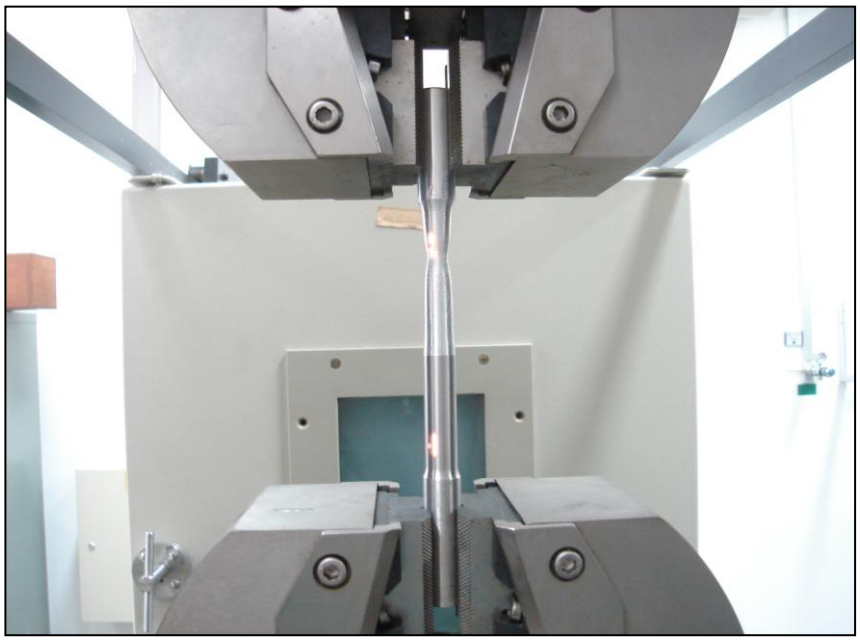


Figura 5.3 – Corpo de prova Nº 8 momentos antes da ruptura, longe da interface de ligação.

A Figura 5.4 mostra os corpos de prova de Nº 5 e Nº 8, depois que foram retirados da máquina de ensaio de tração após a realização dos ensaios. O corpo-de-prova Nº 8 que apresentou o melhor resultado teve seus parâmetros repetidos na soldagem de novos corpos de prova, e apresentou resultados semelhantes com a ruptura ocorrendo longe da interface de solda conforme pode ser visto na Figura 5.5.

Figura 5.4 – Corpo-de-prova Nº 5 (a) – ruptura na interface; corpo de prova Nº 8 (b) – ruptura longe da interface de ligação.

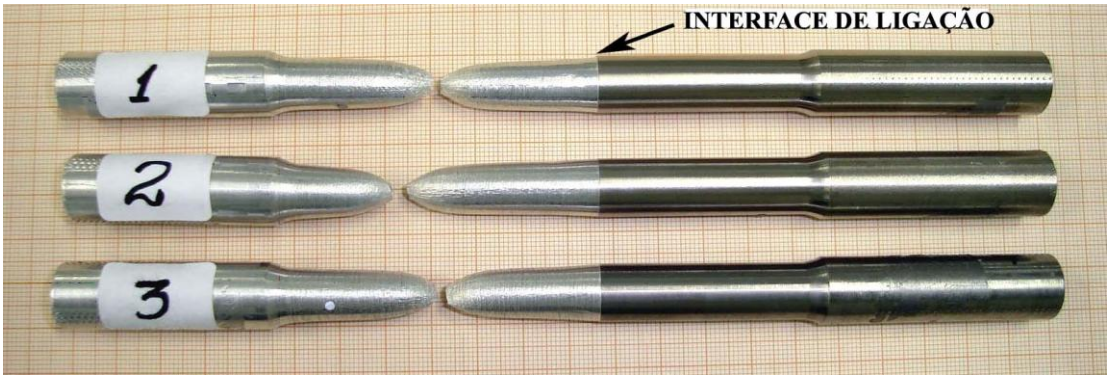


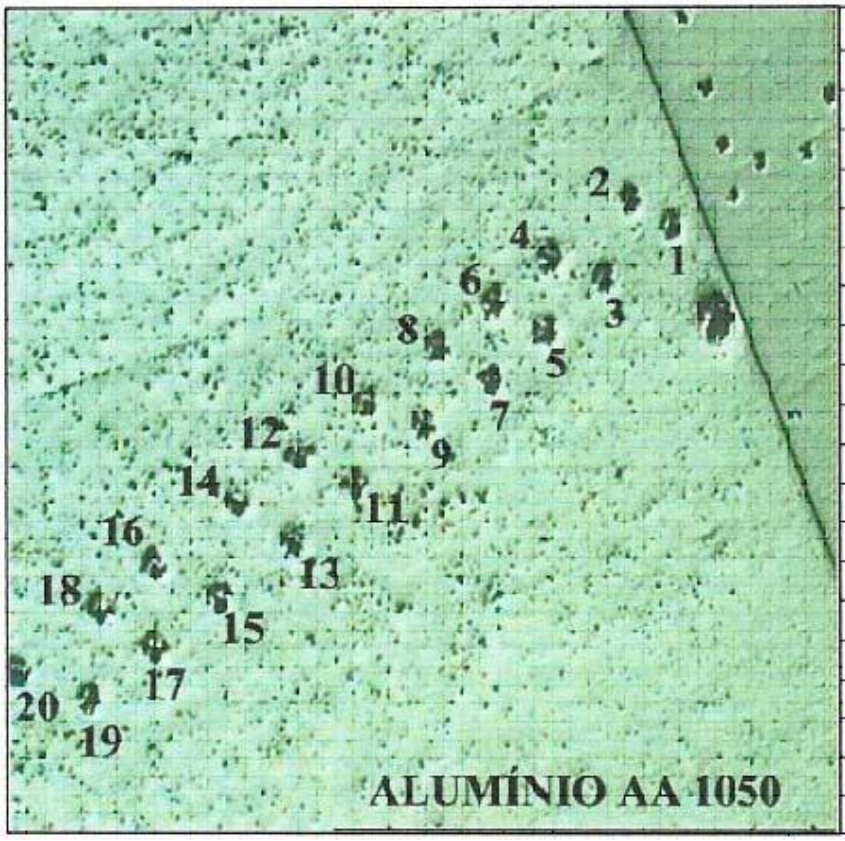
Figura 5.5 – Corpos de prova Nº 1, 2, e 3, da liga AA 1050 / aço inoxidável AISI 304 após a realização dos ensaios de tração.

5.1.4 Ensaio de Microdureza Vickers (HV)

Os testes de microdureza Vickers foram realizados da interface da solda para a liga AA 1050 e também da interface da solda para o aço inoxidável AISI

304, região central. A Figura 5.6 mostra um ligeiro aumento da microdureza Vickers no alumínio 1050 à medida que se aproxima da interface da solda (pontos 1, 2, 3 e 4). Do ponto 5 ao ponto 20, o valor médio das medidas obtidas (30,9 HV) representa a microdureza típica da liga de alumínio AA 1050 (30,0 HV) [56] utilizada neste trabalho.

O aumento dos valores de microdureza Vickers próximos à interface de ligação deve-se a grande deformação plástica sofrida pelo alumínio AA 1050 e a elevação da temperatura nessa região, por ser um material macio, e também devido à combinação de parâmetros utilizados no processo.



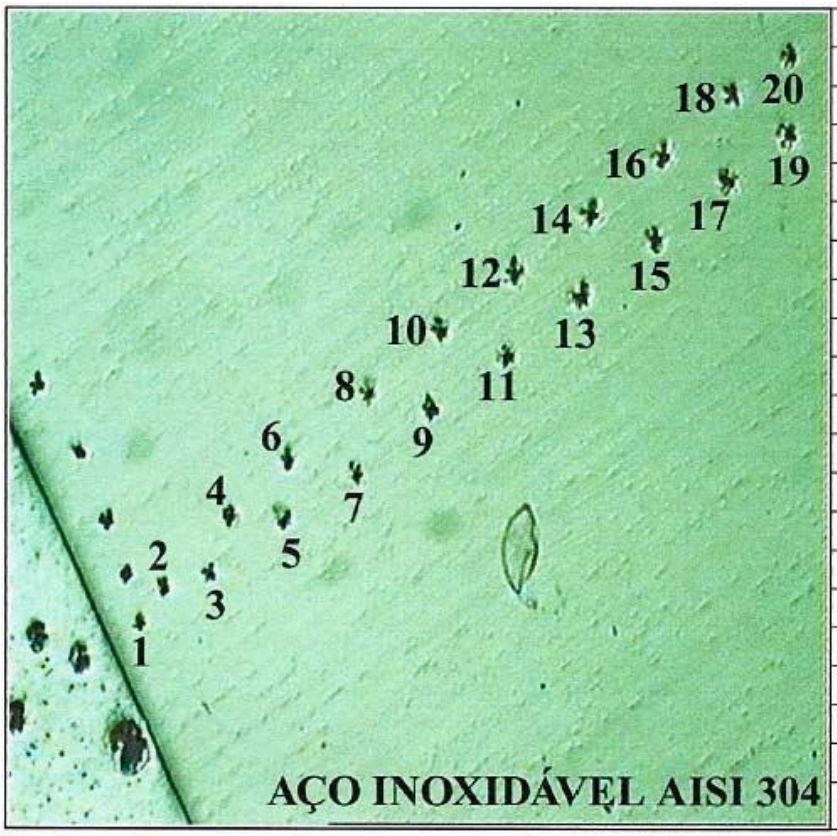
PONTO	HV (100gf)
1	37,2
2	36,6
3	32,4
4	31,3
5	31,2
6	28,4
7	30,6
8	31,3
9	30,3
10	28,6
11	28,9
12	30,3
13	28,8
14	29,7
15	28,6
16	31,2
17	30,1
18	30,7
19	31,8
20	30,5

Figura 5.6 – Fotomicrografia da liga de alumínio AA 1050, próxima à interface de ligação com a localização dos pontos de medição e seus valores de dureza Vickers (HV).

A Figura 5.7 mostra a interface de ligação e os pontos de medição de microdureza Vickers realizados no lado do aço inoxidável AISI 304. Os

resultados também evidenciam um aumento dos valores de microdureza a medida que os pontos se aproximam da interface de ligação. Essa variação nos valores de microdureza ocorre do ponto 1 (maior valor), até o ponto 12. Do ponto 13 ao ponto 20, o valor médio das medidas obtidas (198,8 HV) refere-se ao valor de microdureza tipica do aço inoxidável AISI 304 utilizado neste trabalho.

Tudo indica que o aumento dos valores de microdureza Vickers nas regiões próximas da interface de ligação seja decorrente da elevação da temperatura e do deslocamento do fluxo de calor nessas regiões, visto que o aço inoxidável AISI 304 não sofre deformações plásticas consideráveis durante a soldagem, como acontece com a liga AA 1050.



PONTO	HV (300gf)
1	328,5
2	298,0
3	303,6
4	278,4
5	269,9
6	236,5
7	246,0
8	231,2
9	231,7
10	229,8
11	208,9
12	210,1
13	195,8
14	194,7
15	201,8
16	203,7
17	197,3
18	195,8
19	203,7
20	197,3

Figura 5.7 – Fotomicrografia aço inoxidável AISI 304, próximo à interface de ligação com a localização dos pontos de medição e seus valores de dureza Vickers (HV).

Na Figura 5.8 observa-se que do lado da liga AA 1050, a região que apresenta variação de microdureza Vickers em função da deformação plástica (pontos 1, 2, 3), atinge uma distância máxima da interface de ligação de aproximadamente 0,7 mm.

Do lado do aço inoxidável AISI 304, a região que apresenta variação de microdureza Vickers, provavelmente em função da temperatura e do deslocamento do fluxo térmico (pontos 1 a 12), atinge uma distância máxima da interface de ligação de aproximadamente 3,2 mm.

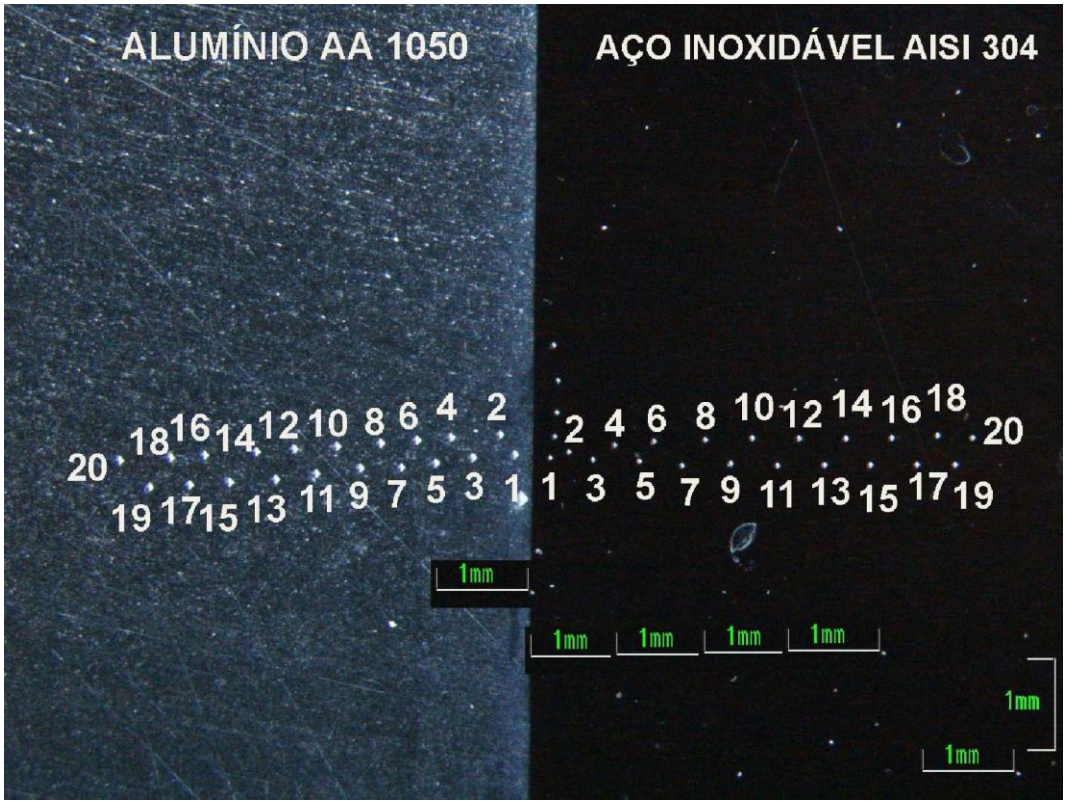


Figura 5.8 – Fotomicrografia da interface de ligação entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, mostrando os pontos de medição e a distância aproximada, em escala, das regiões que apresentaram variação da microdureza Vickers.

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram a variação dos valores de microdureza Vickers por meio dos gráficos Microdureza HV x Distância da Interface de Ligação, para a liga AA 1050 e para o aço inoxidável AISI 304,

respectivamente. As linhas pontilhadas expressam os valores de Microdureza HV dos materiais utilizados neste trabalho.

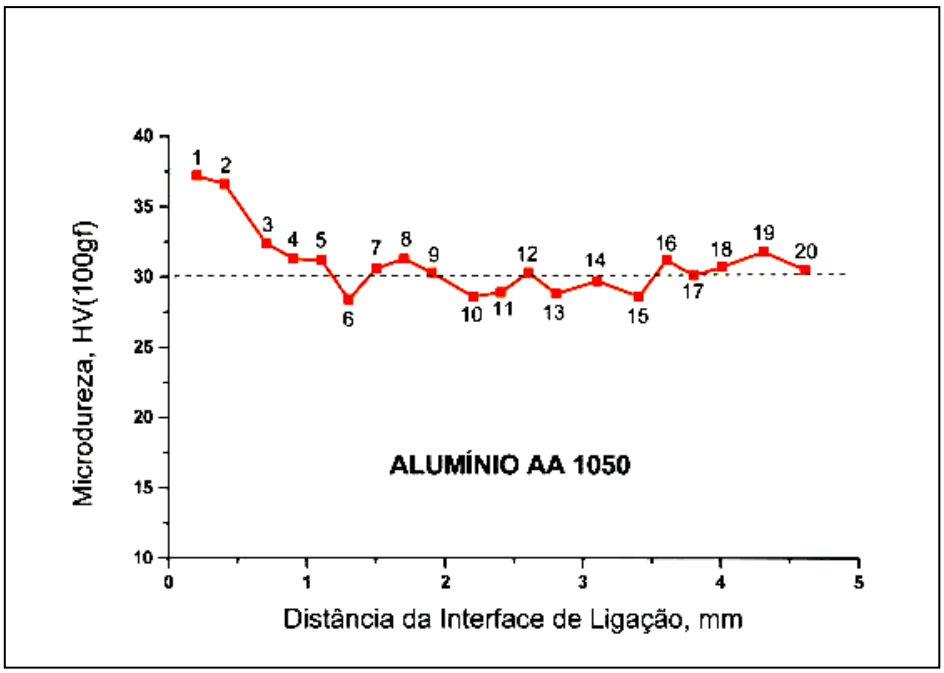


Figura 5.9 – Gráfico Microdureza HV x Distância da Interface de Ligação – liga AA 1050.

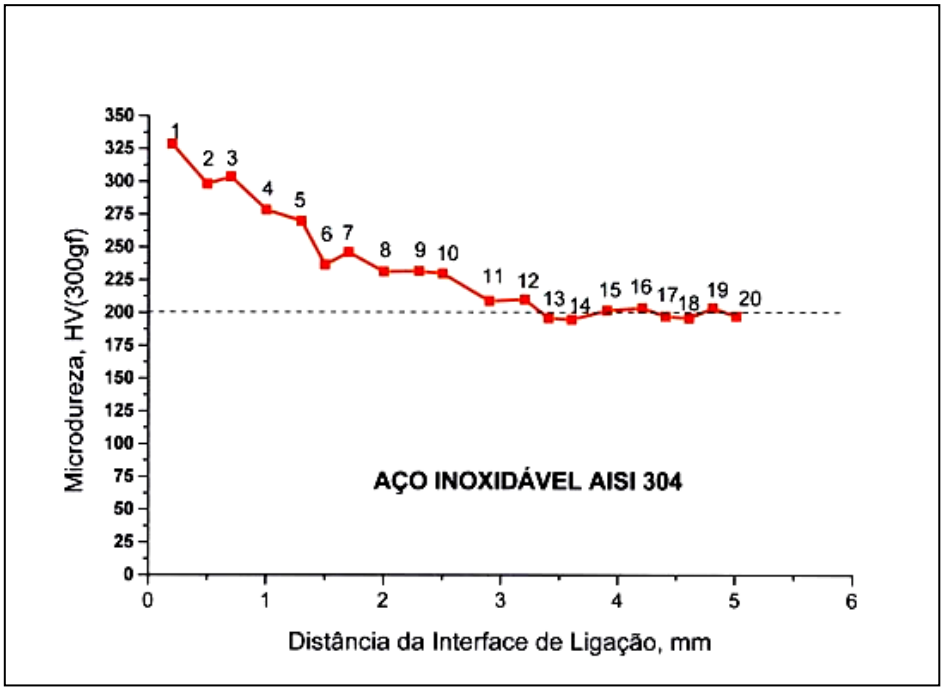


Figura 5.10 – Gráfico Microdureza HV x Distância da Interface de Ligação – aço inoxidável AISI 304.

5.1.5 Análise metalográfica da interface de ligação

Na Figura 5.11 apresenta-se como uma fotomicrografia da junção entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, tirada na região central da amostra com aumento de 100 X. A ZTA é muito pequena, não perceptível pela técnica de microscopia óptica. A região de interface é caracterizada por uma linha reta com algumas imperfeições de forma decorrentes do processo de soldagem por fricção. Tanto no lado do alumínio quanto do aço inoxidável não são observadas mudanças microestruturais próximas da região de interface, como ocorre nos processos de soldagem por fusão. Toda deformação plástica decorrente dos parâmetros utilizados no processo, ocorreu na liga AA 1050 devido ao fato desse material apresentar menor resistência mecânica e menor temperatura de forjamento a quente.

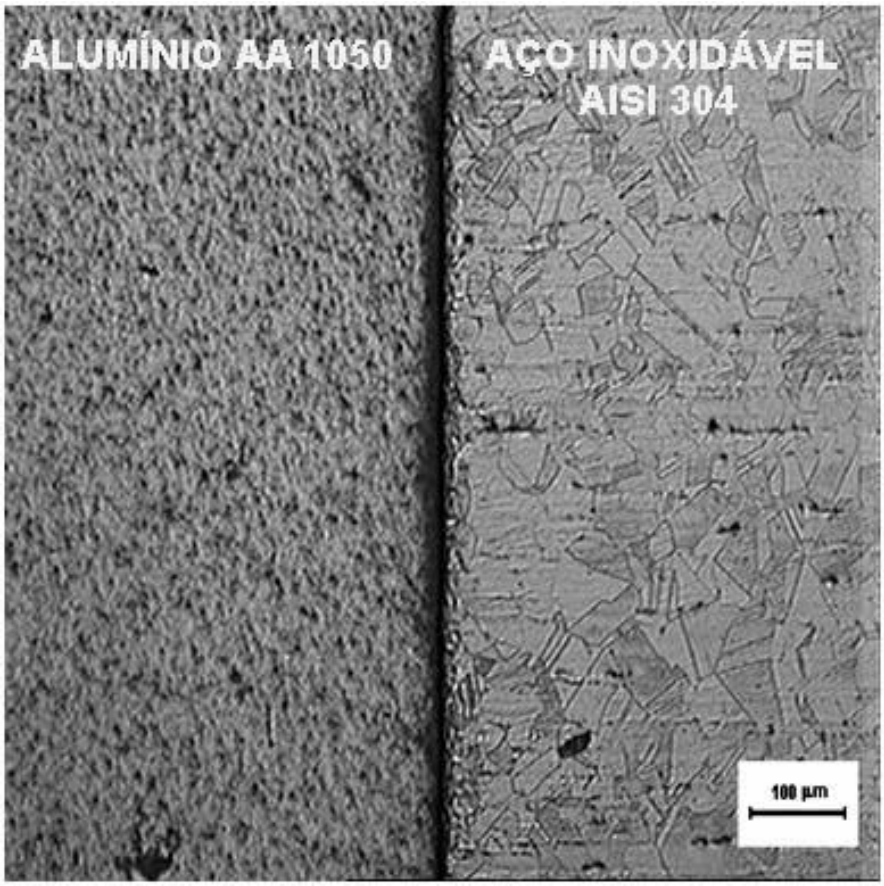


Figura 5.11 – Fotomicrografia da interface de soldagem entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 com aumento de 100 X.

Fotomicrografias da liga AA 1050 e do aço inoxidável AISI 304, tiradas próximas à interface de ligação são vistas nas Figuras 5.12 e 5.13.

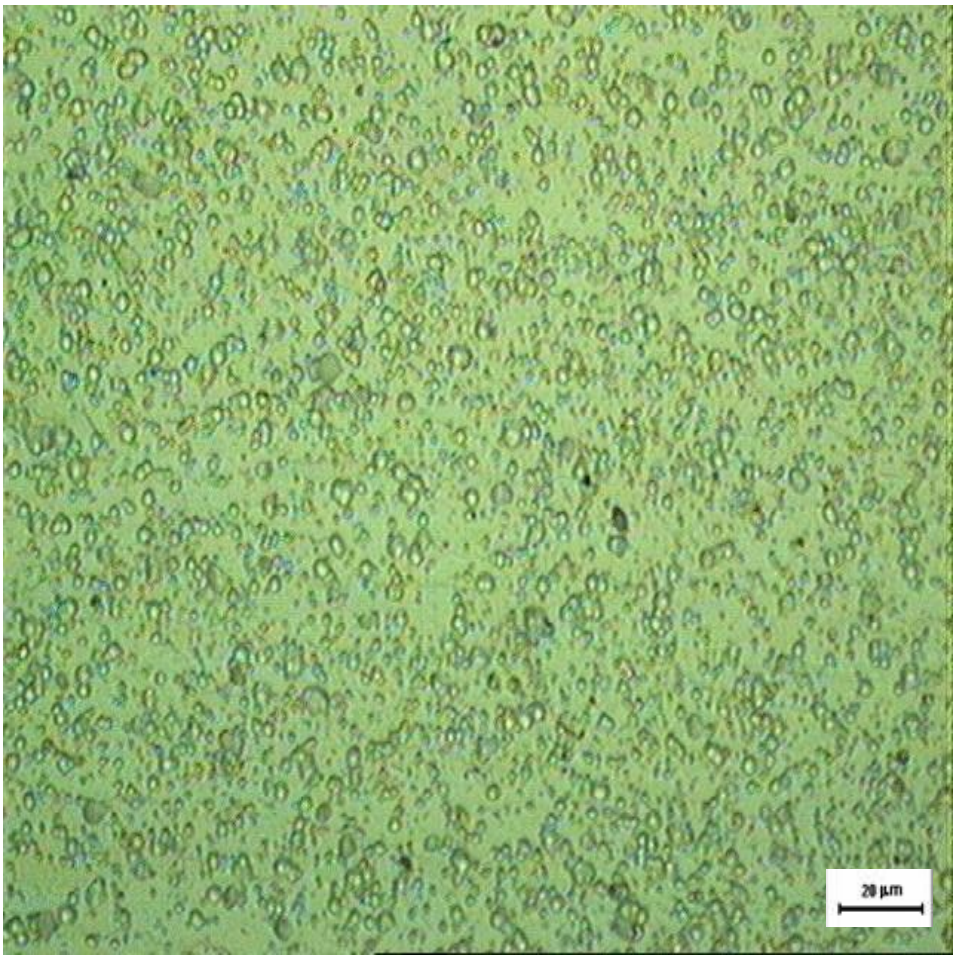


Figura 5.12 – Fotomicrografia da liga AA 1050 com aumento de 500 X.

Na liga 1050, região próxima da interface, Figura 5.12, é mostrada uma microestrutura característica dessa liga, sem modificações na sua microestrutura. Durante a soldagem por fricção rotativa convencional, a temperatura gerada pelo atrito entre as superfícies é inferior a sua temperatura de fusão (de 50% a 80% da temperatura de fusão), e concentrada na interface de ligação, e parte desse calor se dissipa através da rebarba, e dos próprios materiais envolvidos em um período de tempo relativamente pequeno.

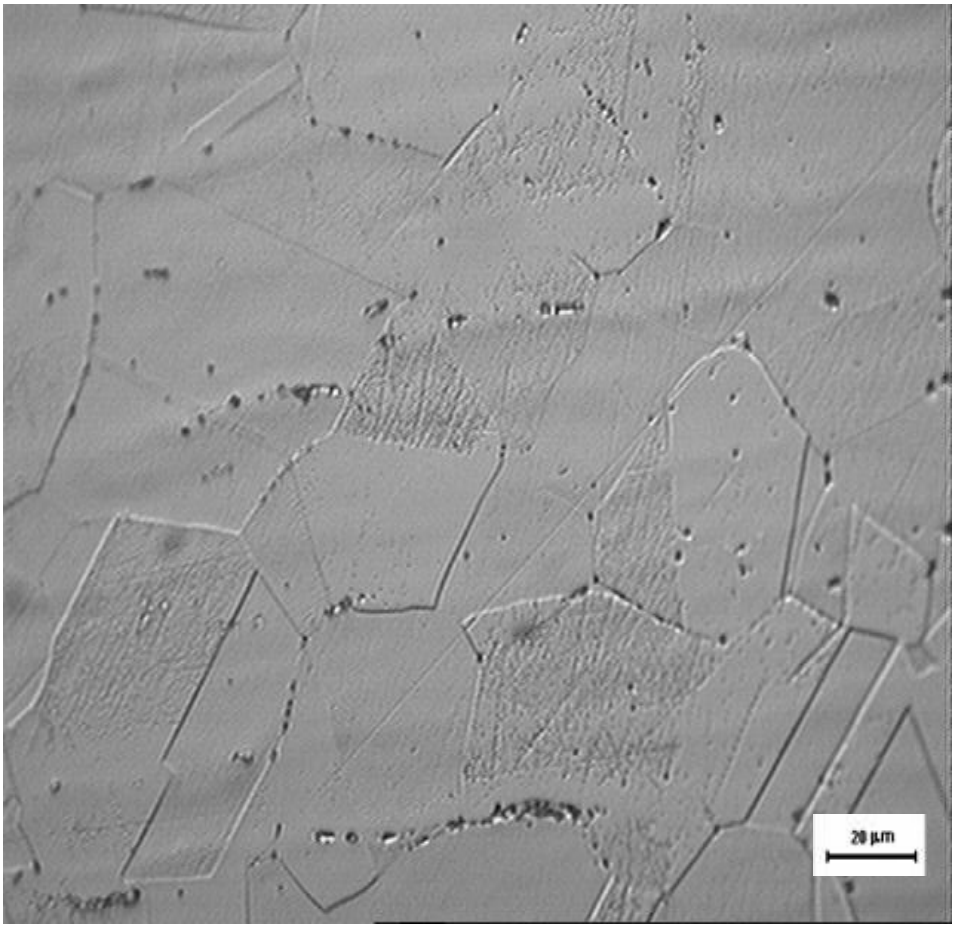


Figura 5.13 – Fotomicrografia do aço inoxidável AISI 304. Aumento: 500 X.

Na Figura 5.13, também podemos observar uma microestrutura típica do aço inoxidável AISI 304 próxima da interface de ligação sem modificações estruturais. A temperatura na interface depende em grande parte da liga AA 1050, que ao atingir a sua temperatura de forjamento, deforma-se plasticamente em forma de rebarba. Essa temperatura baixa, se considerada a temperatura de fusão do aço inoxidável AISI 304, não provoca mudanças microestruturais na liga em regiões próximas da interface.

A fotomacrografia representada pela Figura 5.14 mostra uma grande deformação plástica da liga AA 1050 na região “P” próxima da interface. As linhas de escoamento do material ocorrem do centro para a periferia. Esse escoamento do material deformado é decorrente da ação simultânea da deformação plástica e elevação da temperatura na interface de ligação e

regiões próximas, resultando na formação de rebarba e redução de comprimento do pino de liga AA 1050.

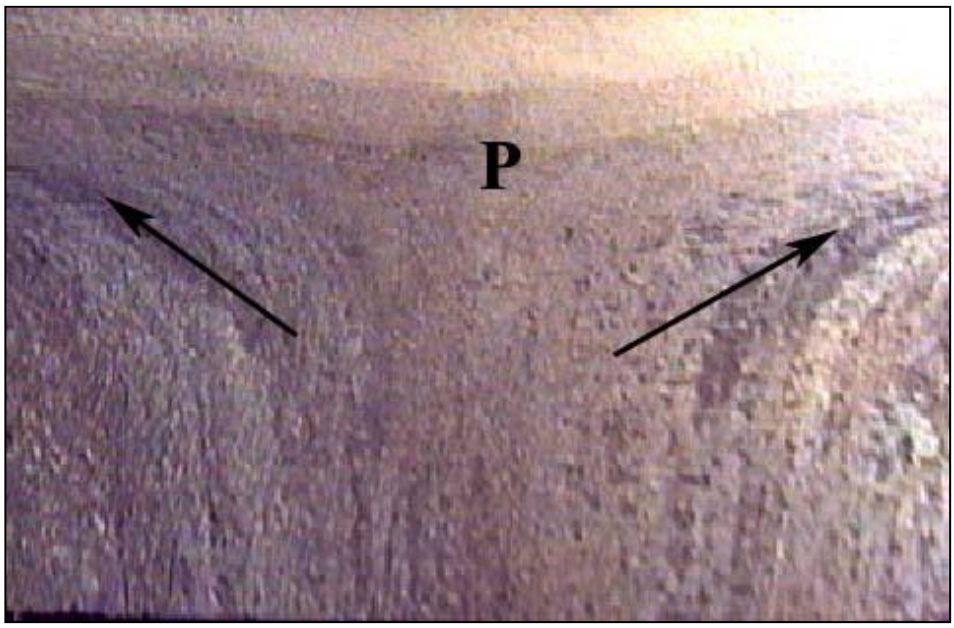


Figura 5.14 – Fotomacrografia da seção transversal de liga AA 1050.
Aumento: 8X.

5.1.6 Análise da Interface de ligação por EDX

A análise semiquantitativa por varredura de linescan – EDX foi realizada na região central da interface de ligação e também nas periferias. Os resultados foram muito parecidos, com pouca variação da camada de difusão entre os principais elementos químicos que compõem a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, como o Fe e o Al. Pode ser visto na Figura 5.15 que ocorre interdifusão entre o Fe e o Al, o que caracteriza o mecanismo de ligação no processo de soldagem por fricção, a difusão. O Al difundiu-se menos no Fe do que o Fe no Al, sendo que uma das razões para isso é o menor diâmetro do átomo de Fe (0,124nm) [7] em relação ao átomo de Al (0,143 nm) [7]. Outra razão para as diferentes distâncias da zona de difusão e raio são as diferentes concentrações entre o Fe e o Al contidas em cada material.

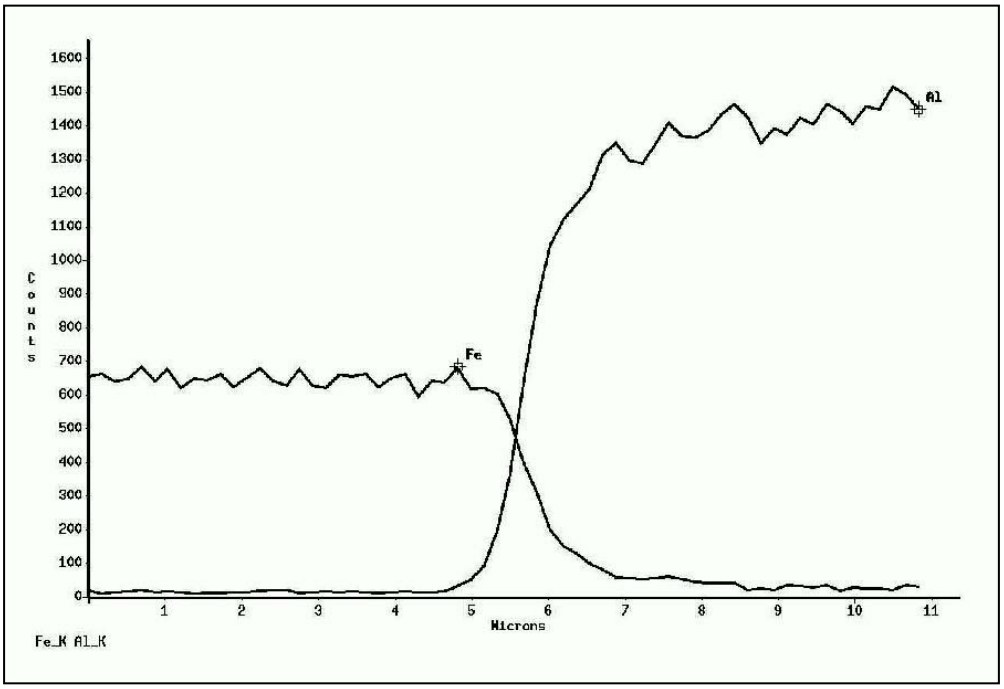


Figura 5.15 – Análise semiquantitativa por EDX mostrando a interdifusão entre os principais elementos da liga AA 1050 (Al) e do aço inoxidável AISI 304 (Fe).

Na Figura 5.16 podem ser vistas difusões de outros elementos químicos do aço inoxidável AISI 304, como o Cr e o Ni no Al**.** A análise semiquantitativa desses elementos mostra que eles se difundiram em menor proporção que o Fe. Isso ocorreu principalmente devido às baixas concentrações desses elementos contidos no aço AISI 304.

Também foram realizadas medições de espessura da camada intermetálica formada na interface de ligação por difusão. A análise foi realizada nas extremidades e na região central da interface de ligação e apresentou valores homogêneos. Na Figura 5.17 pode ser vista a espessura da camada intermetálica medida na região central da amostra.

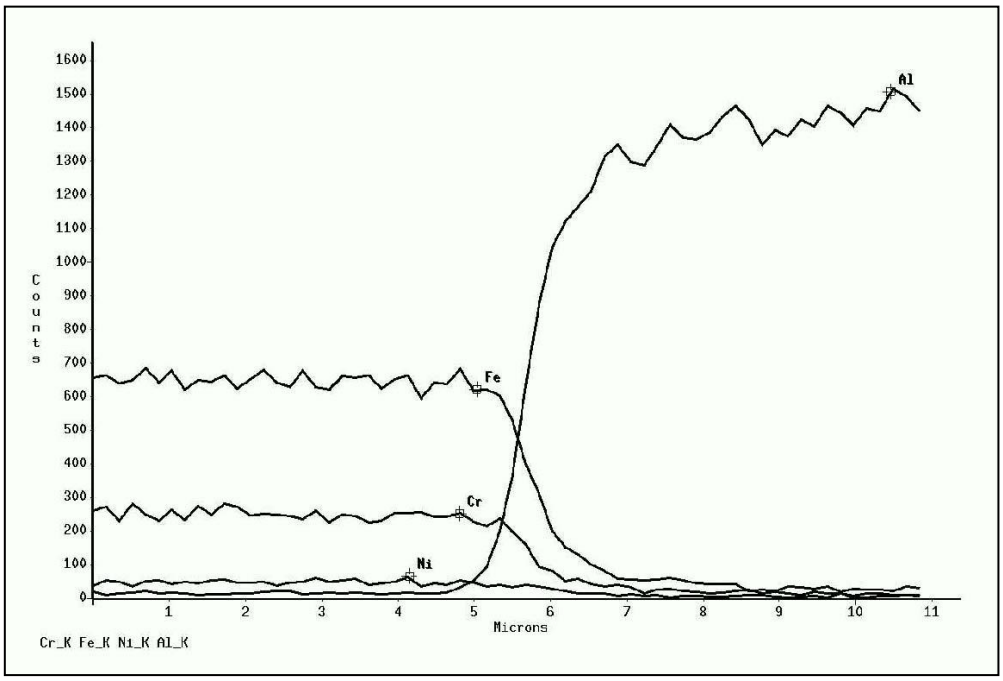


Figura 5.16 **–** Análise semiquantitativa por EDX mostrando a interdifusão entre os elementos Fe, Cr e Ni (aço inoxidável AISI 304), e o Al (liga AA 1050).

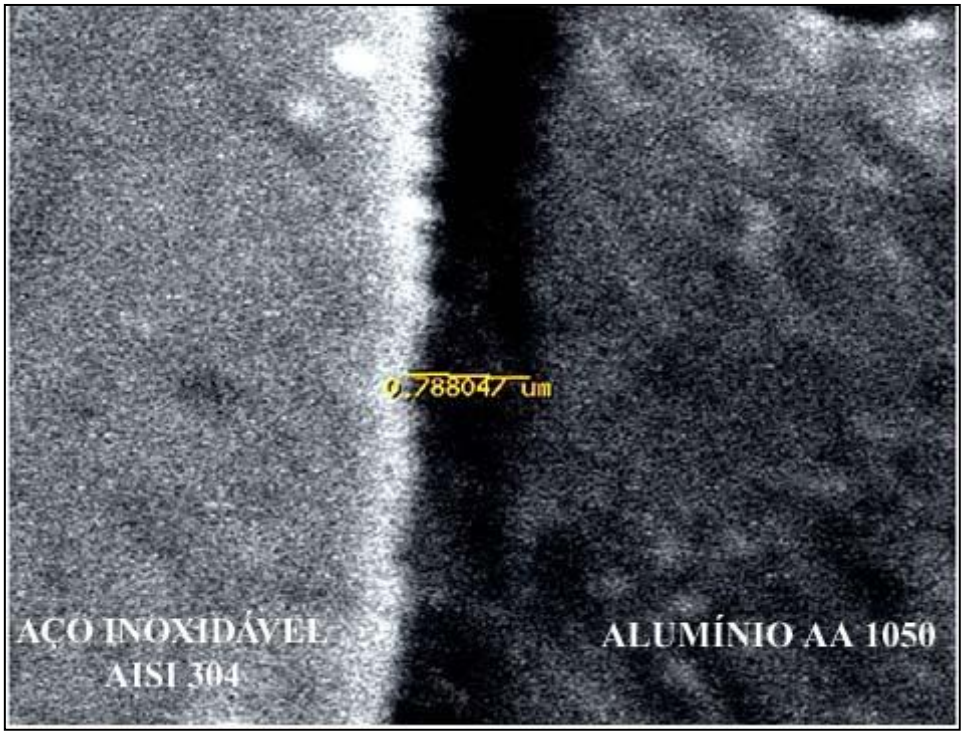


Figura 5.17 – Espessura da camada intermetálica medida na interface de ligação entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304. Aumento de 20.000 X.

5.1.7 Medidas de temperatura obtidas na interface de ligação

A temperatura é o parâmetro mais importante de uma junção no estado sólido, por controlar a cinética dos processos termicamente ativados envolvidos em junções difusas. Nas junções que ocorrem em altas temperaturas, a mobilidade atômica aumenta e auxilia os movimentos de deslocamento dos átomos através da interface de ligação [57].

O termopar fixado na região central do pino cilíndrico de aço inoxidável AISI 304, a uma espessura de parede igual 0,12 mm da interface do pino cilíndrico da liga AA 1050 (Figura 29), registrou a temperatura máxima de 376°C durante o processo de soldagem em tempo real de 32 segundos (Aproximação + t1). O tempo total de soldagem foi de 34 segundos (Aproximação +t1+t2), como pode ser visto na Figura 5.18.

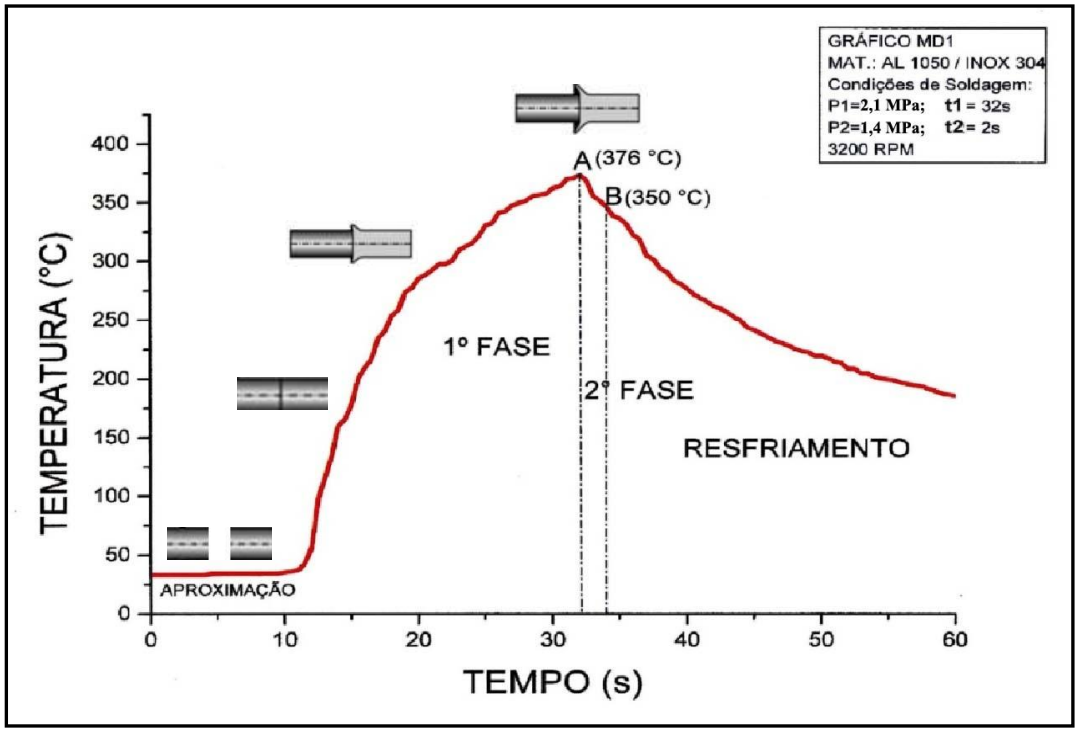


Figura 5.18 – Gráfico Tempo X Temperatura – Liga AA 1050 e Aço inoxidável AISI 304 com tempo total de 34 segundos.

Neste gráfico obtido (Figura 5.18), foram caracterizadas todas as etapas do processo de soldagem por fricção: a aproximação, a 1º fase, a 2º fase, o término da soldagem, e permitiu analisar as taxas de aquecimento e resfriamento que ocorrem durante todo o processo.

A aproximação compreende o momento em que as interfaces dos diferentes materiais estão se aproximando para iniciar a fricção. O início da 1º fase de soldagem ocorre no momento em que ocorre o contato entre as interfaces dos dois materiais (início da fricção, elevação da temperatura) e termina com a aplicação da pressão P1=2,1 MPa (300 psi), no tempo t1 (32s), quando a máquina de soldagem a fricção é frenada atingindo a rotação igual a zero. Nesse exato momento a temperatura na interface de ligação medida foi 376°C no ponto “A”, e iniciou-se a 2ª fase de soldagem com a aplicação da pressão P2= 1,4 MPa (200 psi) no tempo t2 (2s). O ponto “B” marca o término da aplicação do tempo t2 e o fim da soldagem, momento em que foi registrada a temperatura de 350°C.

Os testes de soldagem realizados para se medir a temperatura do processo com o tempo real estendido para 62 segundos (Aproximação + t1 + t2) utilizando os mesmos parâmetros de soldagem P1, P2 e t2, mostraram que a elevação da temperatura na interface da solda foi se estabilizando até atingir a temperatura de 410°C, ponto “A”, que marca o término da 1ª fase de soldagem, também conhecida como fase de aquecimento. Após aplicação da pressão P2 e do tempo t2, a solda foi finalizada com a temperatura de 392°C, ponto “B”. O resfriamento realizado ao ar à temperatura ambiente (30ºC) apresentou taxas de resfriamento semelhantes ao exemplo anterior (tempo total de 32 segundos).

Na Figura 5.19 são mostradas todas as etapas do processo e temperaturas monitoradas durante a soldagem da liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304.

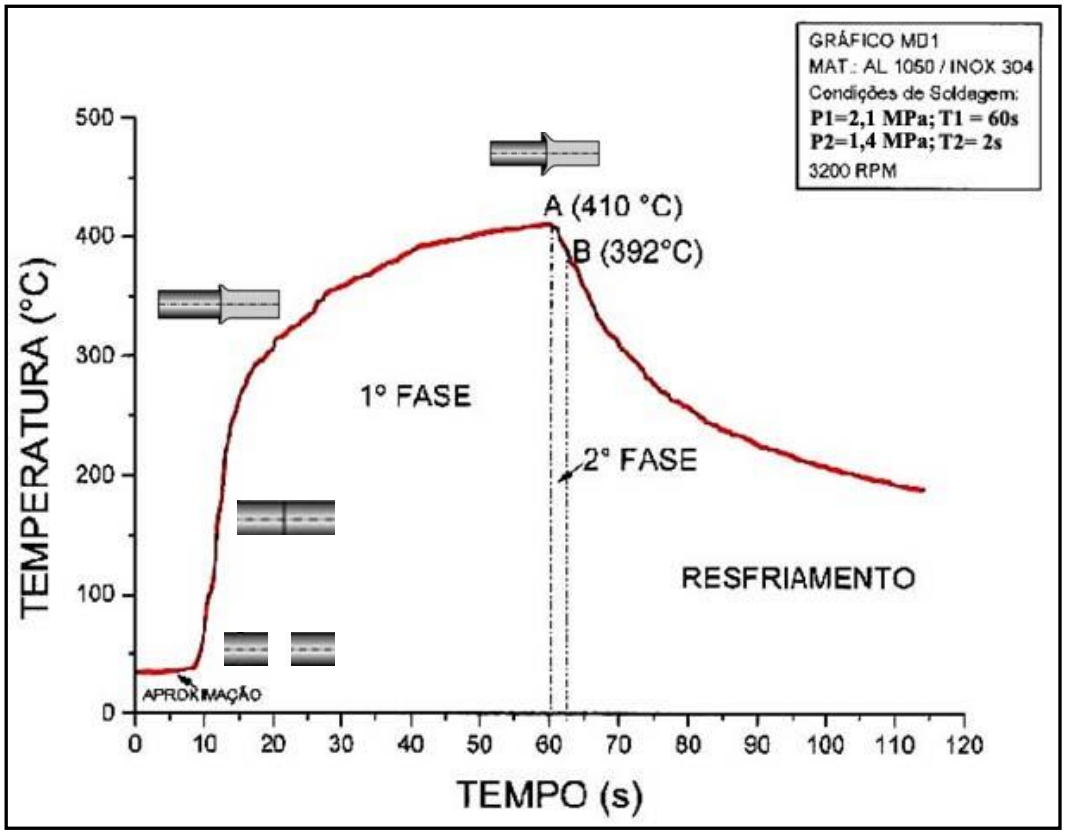


Figura 5.19 – Gráfico Tempo X Temperatura – liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304 com tempo total de 62 segundos.

Outro resultado importante das análises realizadas é à observação da coerência dos dados das temperaturas máximas monitoradas com a temperatura de forjamento à quente da liga AA 1050, compreendida entre 315°C a 430°C [55]. Esse conhecimento permite a pré-definição dos parâmetros de soldagem por fricção para um determinado diâmetro pelos dados fornecidos pelo gráfico, o que possibilita eliminar uma série de fases preliminares na obtenção de parâmetros para a soldagem de materiais dissimilares.

Na Figura 5.20, logo abaixo da linha de interface entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, foram medidos e analisados os deslocamentos dos fluxos de calor (DFC), resultados da utilização de diferentes parâmetros de pressão e tempo. A medida realizada da linha de interface até o término da

diferente coloração no aço inoxidável apresenta valores que variam de 3,5 mm a 9,5 mm.

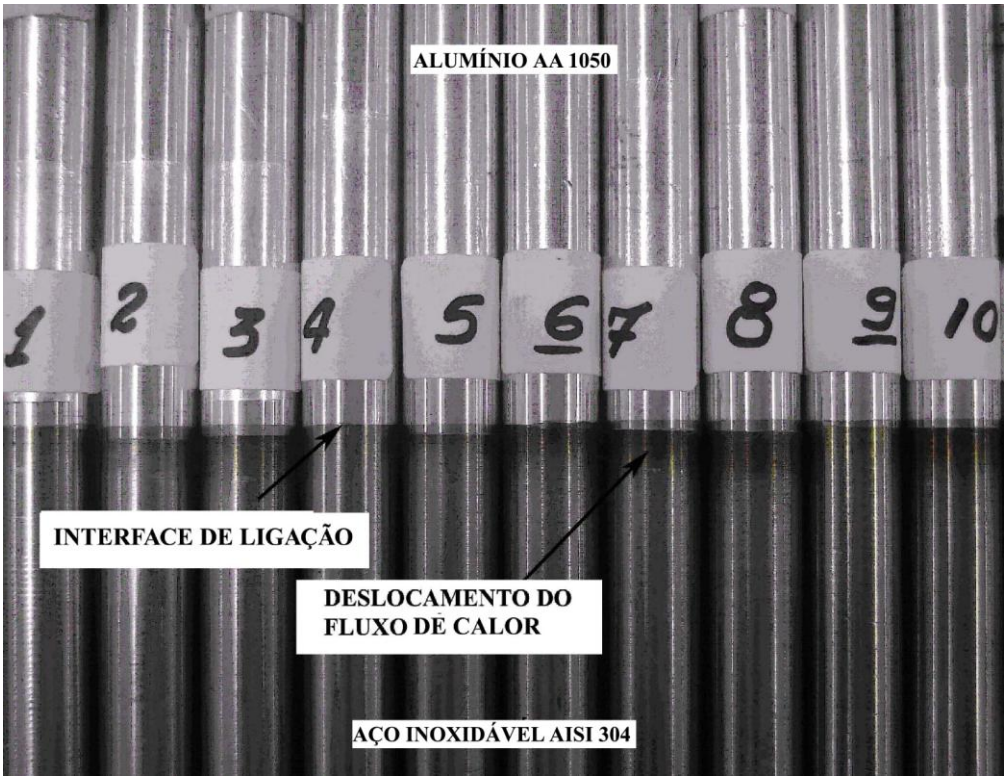


Figura 5.20 - Corpos de prova soldados de AL 1050 e Aço inoxidável 304 com diferentes medidas de deslocamentos de fluxos térmicos (DFC – Tabela 5.3).

Na Figura 5.21 podem ser observados os DFC dos corpos de prova números 5, 6, 7, e 8. O corpo de prova número 5 apresenta menor valor de DFC (6,5 mm) e menor resistência mecânica da junção (47,45 MPa). Já o corpo de prova número 8 apresenta um maior valor de DFC (9,0 mm) e o maior valor de resistência mecânica da junção (80,08 MPa). Esses dados comparativos são mostrados na Tabela 5.3.

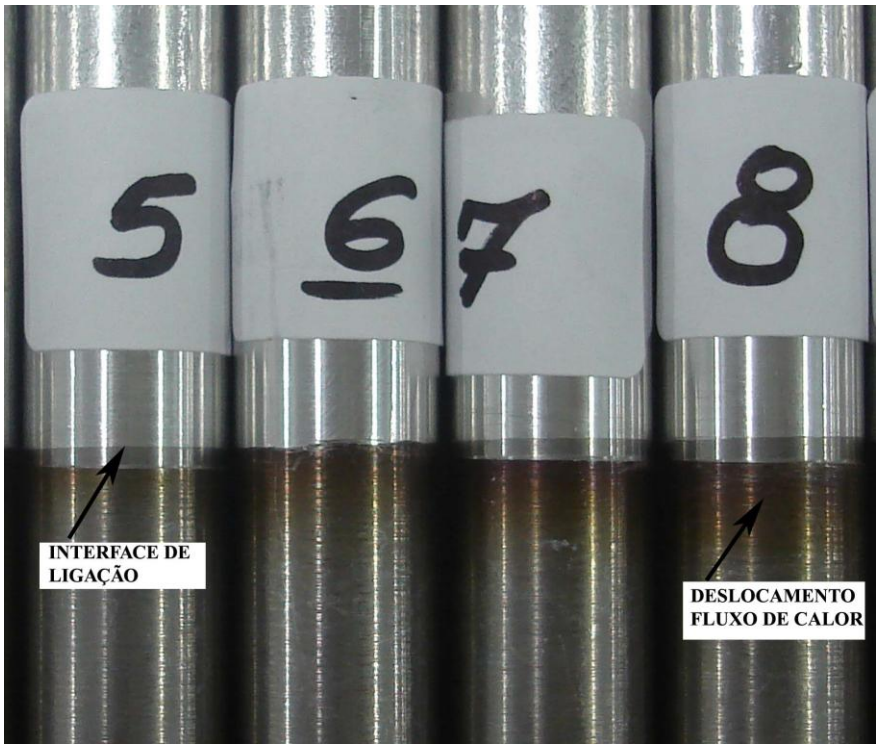


Figura 5.21 – DFC dos corpos de prova 5, 6, 7, e 8, após soldagem e remoção da rebarba.

Os dados plotados no gráfico, utilizando a equivalência dos pontos com cada coleta de dados, realizado pelo termopar acoplado ao sistema Data Logger, possibilita a verificação das diferentes taxas de aquecimento e resfriamento ocorridas durante a soldagem seguindo os mesmos procedimentos e parâmetros otimizados que apresentaram resistência mecânica superior à da liga AA 1050.

Nas Figuras 5.22 e 5.23 pode ser visto que a maior variação de temperatura ocorre nos primeiros 10 segundos de contato entre as superfícies dos dois materiais (t=10s a t=20s), na 1ª fase de aquecimento, onde se observam grandes taxas de aquecimento tomadas como referência às distâncias entre os pontos. Já as taxas de resfriamento analisadas visualmente pelo distanciamento dos pontos foram normais e não apresentaram grandes variações.

Esse tipo de resfriamento não interfere nas características da ZTA e nas propriedades mecânicas da junção entre os materiais envolvidos, principalmente pelo fato da liga AA 1050 não ser tratável termicamente e possuir alto grau de pureza (mínimo de 99,50% de Al), fato comprovado pelos resultados das análises e testes realizados neste trabalho. Entretanto, no caso da soldagem do aço inoxidável AISI 304 com ligas tratáveis termicamente (séries 2XXX, 6XXX e 7XXX), o resfriamento lento poderá alterar as características da ZTA, visto a proximidade dos valores de temperatura obtidos na interface de ligação com os valores utilizados para o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento dessas ligas. Isto poderá tornar o uso do gráfico uma ferramenta importante no sentido de auxiliar na análise do comportamento estrutural desse tipo de junção sob diferentes condições de resfriamento.

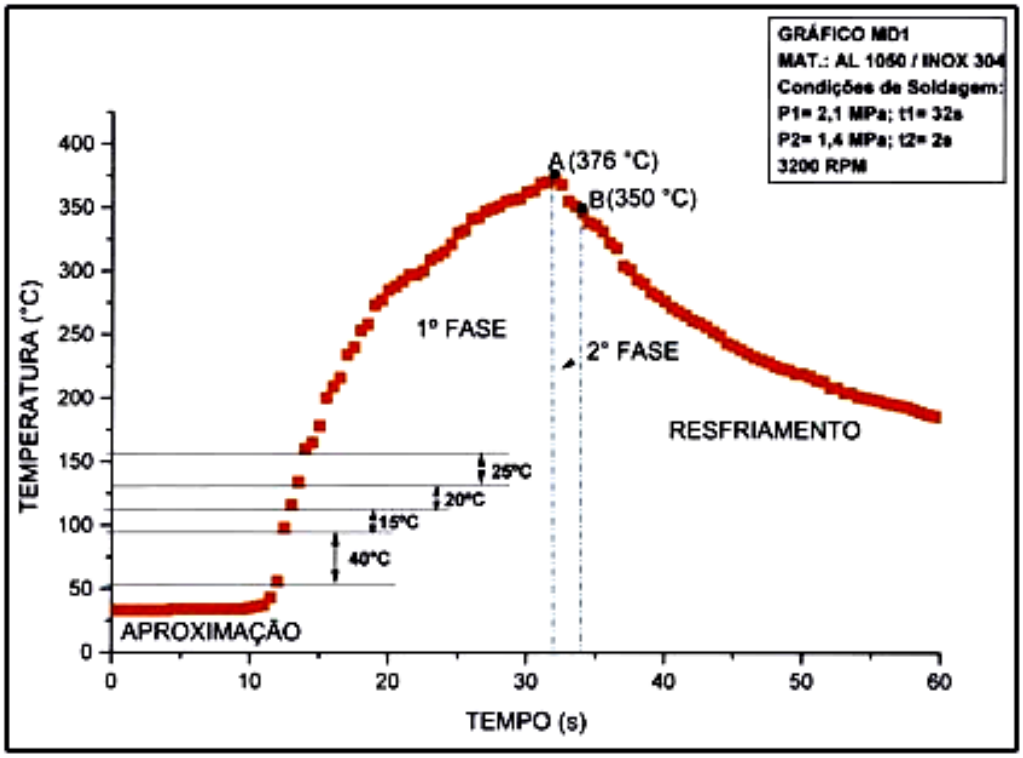


Figura 5.22 – Gráfico Tempo X Temperatura – liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304, com tempo real de 34s, apresentado anteriormente (Figura 5.18), mostrando diferentes taxas de aquecimento e resfriamento pelo espaçamento entre os pontos.

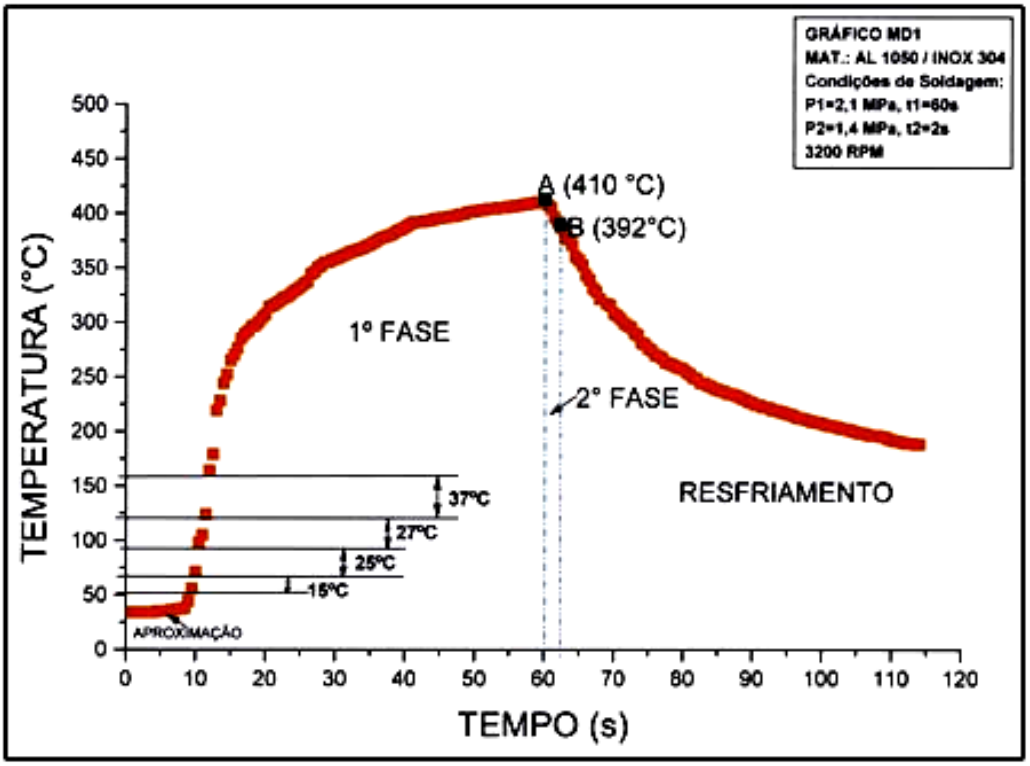


Figura 5.23 – Gráfico Tempo X Temperatura – liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304, apresentado anteriormente (Figura 5.19) com tempo real 62s, mostrando diferentes taxas de aquecimento e resfriamento pelo espaçamento entre os pontos.

5.1.8 Conexões produzidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional

A produção de conexões dissimilares geradas por este processo de soldagem representa o objetivo principal deste trabalho, pois visa atender as necessidades iniciais de projeto no desenvolvimento e fabricação do Módulo Baia de Controle, pertencente ao VLS, com tecnologia nacional.

O ótimo acabamento das conexões na região que foi soldada e a ausência de defeitos superficiais, tão comuns às junções soldadas por fusão, mostram a eficiência desse processo na soldagem de materiais altamente dissimilares, como é o caso da liga AA 1050 com o aço inoxidável AISI 304.

As conexões foram confeccionadas de forma que o lado referente à liga AA 1050 possa ser soldada por fusão na tubulação de alumínio, e o lado referente ao aço inoxidável AISI 304 possa ser soldado na tubulação de aço inoxidável, pertencentes ao SCR da Baia de Controle – VLS. Na Figura 5.24 são mostradas as conexões produzidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional após a realização dos serviços de usinagem.

Figura 5.24 – Conexões produzidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional (parte mais escura – aço inoxidável 304; parte mais clara – liga AA 1050).

Para qualificação final e aplicação dessas junções, ainda serão necessários testes hidrostáticos e testes operacionais realizados em ambientes reais de operação. Esses testes compreendem outra etapa de estudos a ser realizada em trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

A liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 unidas usando uma máquina de soldagem por fricção rotativa convencional tiveram as suas propriedades mecânicas e metalúrgicas estudadas e analisadas por meio de ensaios mecânicos de tração, ensaios de microdureza Vickers, análise por microscopia óptica, análise por EDX. Também foram monitoradas as temperaturas na interface de ligação e comparadas com os resultados dos ensaios mecânicos. As conclusões deste trabalho são sumariamente descritas:

1. O processo de soldagem por fricção demonstra ser bastante eficiente na soldagem de materiais dissimilares como a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, visto pelos resultados dos ensaios mecânicos de tração que apresentam propriedades mecânicas não possíveis de se obter por meio dos processos de soldagem por fusão, até o momento.

2. Dentre os parâmetros utilizados para realização dos testes de soldagem, aquele que apresentou os melhores resultados nos ensaios de tração, com valores de resistência mecânica superiores a liga AA 1050, foi o de N° 8 (Tab. 5.3), onde se tem P1= 2,1 MPa (300 psi); t1=32s; P2= 1,4 MPa (200 psi); t2=2s.

3. A análise semiquantitativa por varredura de linescan – EDX que foi realizada mostra que ocorre interdifusão entre os principais elementos químicos que compõem a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 como o Al e o Fe, caracterizando a difusão como mecanismo de ligação no processo de soldagem por fricção, como relatado por Fukumoto *et al* [38,39], Fuji *et al* [40], Kimura *et al* [41], Yilbas *et al* [42], Monteiro [43] e Zepeda [28].

4. Para a obtenção de junções da liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304 que atendam aos requisitos de qualidade e propriedades mecânicas, é fundamental que a interface dos dois materiais apresentem bom acabamento

de usinagem e sejam limpas conforme procedimentos adequados descritos neste trabalho.

5. Durante a realização da soldagem ocorre grande deformação da liga AA 1050 e não ocorre deformação do aço inoxidável AISI 304. Essa deformação determina a formação da rebarba e redução no comprimento dos pinos do alumínio AA 1050 relativas aos parâmetros utilizados.

6. Os valores de microdureza Vickers medidos na liga AA 1050 e no aço inoxidável 304, medidos próximo à interface de ligação, região central, são mais altos do que nos metais bases. À medida que os pontos de medição se afastam da interface, eles diminuem até atingir os valores de referência de microdureza para cada material.

7. Macroscopicamente, têm-se corpos de prova soldados com diferentes formações de rebarba e reduções de comprimento. No pino de aço inoxidável, logo abaixo da linha que demarca a ligação entre os dois materiais, pode-se avaliar os deslocamentos do fluxo de calor (DFC) pela medição da parte com diferente coloração e relacioná-los com os resultados obtidos nos ensaios de tração (Tabela 5.3). Isso mostra que a temperatura na interface de ligação é um elemento muito importante e influencia diretamente a resistência mecânica das junções obtidas pelo processo de soldagem por fricção.

8. O monitoramento da temperatura durante a realização dos testes de soldagem da junção que apresentou resistência mecânica superior ao da liga AA 1050 registrou a temperatura máxima de 376°C. Isso confirmou que a temperatura na interface de ligação durante a soldagem coincide com a faixa de forjamento a quente da liga AA 1050 (315°C - 430°C) [13].

9. É possível monitorar a temperatura durante o processo de soldagem por fricção de materiais dissimilares como a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304 em tempo real, e pela análise dos pontos gerados pelo gráfico Tempo x

Temperatura, pode-se definir cada etapa do processo de acordo com parâmetros pré-estabelecidos ou, estabelecer parâmetros de P1, t1, P2, t2, a partir dos dados obtidos em um gráfico com tempo estendido, na soldagem de materiais dissimilares. Com esse conhecimento e a utilização do sistema TDL, é possível identificar os parâmetros ditos ideais de forma mais rápida em equipamentos com características e fabricantes diferentes.

10. As maiores taxas de aquecimento ocorrem nos primeiros 10 segundos da 1ª Fase de soldagem (aquecimento) e depois se estabilizam em função deformação e do escoamento plástico da liga AA 1050.

11. Uma comparação dos parâmetros utilizados para a obtenção de junções entre o alumínio 1050 e o aço inoxidável AISI 304 neste trabalho com outros trabalhos produzidos internacionalmente, levam a concluir que os parâmetros de soldagem dependem, em grande parte, do equipamento de soldagem empregado (fabricante, tipo, etc..).

12. Os resultados obtidos neste trabalho são de fundamental importância para o entendimento e compreensão das principais características do processo de soldagem por fricção, dos mecanismos de ligação entre materiais dissimilares, e da viabilidade da aplicação deste processo na produção de junções estruturais que venham a ser utilizadas nos setores aeronáutico e aeroespacial.

7. TRABALHOS FUTUROS

O processo de soldagem por fricção rotativa convencional demonstrou grande eficiência na produção de junções entre os materiais dissimilares liga AA 1050 e aço inoxidável AISI 304, conforme metodologias de análises e caracterização empregadas na realização deste trabalho.

Embora esse processo de soldagem seja bastante conhecido em paises como Estados Unidos, Alemanha, França, Inglaterra, Rússia, Índia, Japão, China na produção de peças e componentes para a indústria automobilística, nuclear, naval, bélica, aeronáutica e aeroespacial, com inúmeros livros e trabalhos científicos publicados, no Brasil ainda se resume a poucas aplicações ligadas à indústria automobilística.

Como trabalhos futuros no desenvolvimento de junções entre materiais dissimilares Alumínio e Aço inoxidável, são sugeridos os seguintes tópicos:

1- projetar e desenvolver equipamentos de soldagem por fricção rotativa convencional que possam ser utilizados em laboratórios de pesquisa;

2- projetar e desenvolver modelos matemáticos computacionais que permitam o cálculo da temperatura na interface de ligação a partir da inserção de dados de parâmetros de soldagem;

3- analisar com mais detalhes o principal mecanismo de ligação entre materiais dissimilares (difusão), que ocorre na fase de aquecimento das interfaces de ligação entre o alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304;

4- estudar e caracterizar os mecanismos de ligação na 2ª fase de soldagem, conhecida como fase de forjamento entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304;

5- estudar as camadas intermetálicas que podem se formar na interface de ligação entre o alumínio AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304;

6- estudar e desenvolver métodos de inspeção não destrutivos que possam ser utilizados para verificação da qualidade das junções produzidas pelo processo de soldagem por fricção rotativa convencional;

7- estudar parâmetros para a fabricação de junções entre a liga AA 1050 e o aço inoxidável AISI 304, fornecidos diretamente em formato de tubos que atendam aos requisitos de qualidade especificados;

8- Analisar e estudar as diferentes taxas de aquecimento e resfriamento que ocorrem durante a realização da soldagem considerando a sua influência na resistência final da junção;

9- Desenvolver um modelo a partir dos gráficos de temperatura obtidos experimentalmente, que permita otimizar toda a sistemática utilizada atualmente para a definição dos parâmetros ditos ideais, minimizando o fator tempo por meio da diminuição do número de corpos-de-prova necessários para sua definição;

10- Analisar a evolução da temperatura gerada na interface ligação durante a soldagem de diferentes materiais dissimilares, caracterização e relação com as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

11- Estudar os mecanismos responsáveis pelas variações dos valores de microdureza Vickers próximos da interface de ligação entre a liga AA 1050 e o aço AISI 304.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] JOINING DISSIMILAR METALS. **Bimetal welding of aluminum using inertia welding**. THE FABRICATOR Article, November, 1991. Disponível em: www.mtiwelding.com. Acesso em 20/09/2009.

[2] UZUN, H.; DONNE, C. D.; ARGAGNOTTO, A.; GHIDINI, T.; GAMBARO, C. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel. **Materials and Design,** v. 26, p. 41-46, 2005. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em 28/09/2009.

[3] SAHIN, Mumin. Joining with friction welding of high-speed steel and medium carbon steel. **Journal of Materials Processing Technology,** v. 168, p. 202-210, 2004. Disponível em: www.elsevier.com/locate/jmatprotec. Acesso em: 30/08/2009.

[4] GUIDA, B. R. Uma análise da estampagem de aços inoxidáveis. **Corte e Conformação,** n. 10, p. 32, 2006.

[5] BANKER, J; NOBILI, A. Aluminum-steel electric transition joints, effects of temperature and time upon mechanical properties. In: DRAFT 131ST ANNUAL MEETING, February 17-21, 2002, Seattle, WA, USA. **Proceedings…** Seattle: [s.n.], 2002.

[6] DONACHIE, M. J.; DONACHIE, S. J. **Superalloys** – a technical guide. joining technology and practice. [S.l.]: ASM INTERNATIONAL, March 2002. p. 173. Disponível em: http:// books.google.com/books?rd=vjCJ5pI1QpkC&pg=PA1+4&dq=mechanisms+of+bonding+-+friction+welding. Acesso em: 1010/2009.

[7] CALLISTER, W. D. J. **Materials science and engineering**: an introduction. London: John Wiley & Sons Inc., 2002. p. 589

[8] TYLECOTE, R. F. **The solid phase welding of metals.** London: Edward Arnold Ltd. 1968.

[9] LOW, M. **determinação do estágio inicial da recristalização em ligas de alumínio por difração de raios-x. 2000**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – USP, São Paulo.

[10] MANDAL; N. R.. **Aluminum welding**-general characteristics of aluminum. India: Woodhead Publishing Limited, 2002. p.01.

[11] Alumínio - Tipos de alumínio e suas ligas. São Paulo: SBRT – USP. Disponível em: www.sbrt.ibict.br. Acesso em 15/07/2009.

[12] ALCAN ALUMÍNIO BRASIL LTDA**. Manual de Soldagem** – alumínio e suas ligas. São Paulo: ALCAN. Disponível em: www.infosolda.com.br/download/50dde.pdf.

[13] ASM. **Metals handbook**. v.2. Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials, Metals Park, Ohio, USA, 2006. p. 141

[14] BARRA, S. R. **Aspectos de metalurgia de soldagem do Al e suas ligas**. Florianópolis – SC: Universidade Federal de Santa Catarina , junho, 2003. Disponível em: www.scribb.com/doc/8501227.

[15] ASM. **Specialty handbook**: aluminum and aluminum alloys. fabrication and finishing of aluminum alloys – welding. Ohio, USA: ASM International, Metals Park, 1993. p. 376.

[16] MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Maio de 2008.

[17] MATHERS, G. **The welding of aluminum and its alloys**. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2002.

[18] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. Villani. **Soldagem I** - introdução aos processos de soldagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica, fevereiro de 2006. Disponível em: WWW.ebah.com.br/processo-de-soldagem-pdf-a4238.html. Acesso em: 20/11/2009.

[19] COSTA, W. B.; De AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Como a tensão residual influencia a propagação de trincas em ligas de alumínio. **Corte e Conformação** n. 10, p. 50, 2006.

[20] CHALMERS, R. E. **The friction welding advantage**, p. 64-70, May, 2001. Disponível em: www.sme.org/manufacturingengineering. Acesso em: 20/10/09.

[21] 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 da REDEMAT) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

[22] TEBECHERANI, C. T. P. **Aços inoxidáveis**. Disponível em: WWW.pipesystem.com.br/Artigos_Técnicos/Aço_Inox/Artigo_para _pipesystem sobre_inox1.pdf>. Acesso em: 04 de Agosto de 2009.

[23] ASM . **Metals handbook – v.1**. 10 ed. Properties and Selection Irons: Irons, Steels, and High Performance Alloys. Metals Park, Ohio, USA, 1993.

[24] PRISCO, M. **Curso solda de manutenção** - soldagem das ligas de alumínio. São Paulo: MP Solda e Consultoria, 2001.

[25] THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. The procedure handbook of arc welding. 12 ed.. **Welding stainless steel**. Seven Section. Ohio, 1973.

[26] LEFFLER, B. **Stainless steels and their properties**. AVESTA Sheffield AB Research Fundation, 2sd, Revision Edition, 1998. Disponível em: www.outokumpu.com/files/Group/HR/Documents/STAINLESS20.pdf. Acesso em: 04/08/09.

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

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

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

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

[31] FARIA, P. E.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem por fricção** – Disponível em: www.infosolda.com.br. Acesso em 22/04/2009.

[32] AWS. **Welding handbook** – v.2, Chapter 23, Friction Welding – July 1997.

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

[34] BRAU, P. J. **Friction science and technology**. Friction Welding. Marcel Dekker, Inc., U.S.A, p. 321-330, 1996. Disponível em: http//books.google.com/id=jWkfqW6SHaKC7&pg=PA321&dq=friction+welding&lr=&as_brr=3&hl=pt-BR#v=onepage&q=friction welding. Acesso em: 20/10/2009.

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

[36] HOWES, T.; TREADGILL, P. **Rotary friction welding** – a guide to best practice. TWI world centre for materials joining technology. Disponível em: www.twi.co.uk/j32/protected/band_8/bprfws01.html.

[37] MAALEKIAN, M; KOZESCHNIK, E; BRANTNER, H.P.; CERJAK, H. **Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars.** Kopernikusgasse, Austria: Institute for Materials Science, Welding and Forming, Graz University of Technology, 2008. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em 05/07/09.

[38] FUKUMOTO, S. *et al*. Evaluation of Friction Weld Interface of Aluminum to Austenitic Stainless Steel Joint. **Materials Science and Technology**, v.13, n. 8, p. 686, Aug. 1997.

[39] 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, Sept. 1999.

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

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

[42] 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, April 1994.

[43] MONTEIRO, W. R. **Junção de materiais dissimilares** – aço inoxidável AISI 304 – ligas de alumínio para aplicações espaciais. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado profissionalizante em Engenharia Aeroespacial) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006

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

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

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

[47] FIGUEIREDO, Kleber Mendes**. Soldagem por fricção –** tecnologia de Soldagem. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, Departamento de Mecânica e Materiais. p. 50, São Luís, 2005.

[48] VAIRIS, A. Superplasticity effects and strain rate dependency in a material joining process. **Journal of Engineering Science and Technology** Review 1. v. 1, n. 1, p. 28-32, 2008. Disponível em: www.jestr.org. Acesso em: 15/09/ 2009.

[49] BURAKOWISKI, T.; WIERZCHON, T. **Surface engineering of metals –** principles, equipment, technologies. Thermal Effects of Friction, 1998. Disponível em; http://books.geogle.com/books?Id=dMyMn8VFwROC&printsec=frontcover&dq=friction+welding-+dissimilar. Acesso em: 09/10/09.

[50] ISSHIKI, Y; YAMAGUSHI, H ; KAWAY, G; SAWAI, T; OGAWA, K. Measurement of Quantity of Heat in Friction Welding. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 15., 2005, Seoul, Korea, June 19-24, **Proceedings…** Seoul: [s.n], 2005.

[51] SAHIN, A.Z.; YILBAS, B. S.; AL-GARNI, A. Z. Friction Welding of Al-Al, Al-Steel, and Steel-Steel Samples. **Journal of Materials Engineering and Performance ,** v. 5, n. 1, Feb. 1996-89.

[52] FPE.GATWICK. **Joining technologies** – advanced engineering solutions. Company Presentation. Disponível em: www.fpe.co.uk/_images/_content/FPE Company Presentation.pdf. Acesso em: 13/09/09.

[53] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) **E 8M – 04** – standard test methods for tension testing of metallic materials [Metric]. May, 2004.

[54] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS.LABORATÓRIO ASSOCIADO DE SENSORES E MATERIAIS (INPE/LAS). **Fotografia do microscópio de varredura (MEV com EDX)** São José dos Campos, 2009.

[55] ASM. **Metals handbook**: forming and forging. v.14, 9.ed. Ohio, USA: Metals Park, 1993. Processing of aluminum alloy forgings

[56] AALCO**. Aluminium alloys -** aluminium 1050 proprierties, fabrication and applications. typical mechanical properties for aluminum alloy 1050. Catálogo eletrônico. Disponível em: www.azom.com/details.asp?ArticleID=2798#_Alloy_Designations. Acesso em: 20/01/2010.

[57] BAGNATO, O. R. **Propriedades mecânicas de juntas $AlSi_{12}$ / Al_2O_3 soldadas por difusão**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2002.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo