

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2.004



1110000562



***"Desenvolvimento de
Procedimentos de Soldagem TIG
Orbital para Aplicações
Aeroespacial"***

JOSÉ AUGUSTO ORLOWSKI DE GARCIA

251



CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

JOSÉ AUGUSTO ORLOWSKI DE GARCIA

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS
DE SOLDAGEM TIG ORBITAL
PARA APLICAÇÕES
AEROESPACIAL

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na
área de Projetos de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Valdir A. Guimarães
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos de Moura Neto

Guaratinguetá
2004

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

562



Garcia, José Augusto Orlowski de
G216d Desenvolvimento de procedimentos de soldagem TIG orbital
para aplicações aeroespacial / José Augusto Orlowski de Garcia.-
Guaratinguetá : [s.n.], 2004
174f.: il.

Bibliografia: f. 143-151
Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2004

Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos de Moura Neto

1.Soldagem TIG orbital, titânio, Satélite CBERS. I. Título

CDU 621.791


**“DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM TIG
ORBITAL PARA APLICAÇÕES AEROSPAÇIAL”**

JOSÉ AUGUSTO ORLOWSKI DE GARCIA

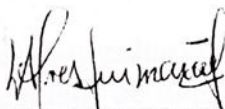
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS E MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. CARLOS KIYAN
Unesp-Feg


Prof. Dr. HERMAN JACOBUS CORNELIS VOORWALD
Unesp-Feg


Prof. Dr. NELSON GUEDES DE ALCÂNTARA
UFSCar


Prof. Dr. AMAURI GARCIA
UNICAMP

Dezembro de 2004

DADOS CURRICULARES

JOSÉ AUGUSTO ORLOWSKI DE GARCIA

NASCIMENTO 07.04.1959 – RIO DE JANEIRO / RJ

FILIAÇÃO José Corbacho Garcia Filho
Stanislawa Orłowska de Garcia

1977/1982 Curso de Graduação
Escola de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFRJ

1993/1994 Master of Science
School of Industrial and Manufacturing Science
Cranfield University

2000/2004 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
nível de Doutorado na Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá da UNESP

À minha Mãe, e

À memória inesquecível de meu Pai



AGRADECIMENTOS

Aos Profs. Drs. Valdir Alves Guimarães (FEG/UNESP) e Carlos de Moura Neto (CTA/ITA) pelas orientações recebidas durante o curso deste projeto.

Ao Dr. Clóvis Solano Pereira (chefe do INPE/LIT) e aos engenheiros Nilton S. Dias e Carlos O. Lino (INPE/LIT) pela oportunidade e confiança dadas a minha pessoa para a realização deste trabalho.

Aos amigos Wilson D. Bocallão Pereira (CTA/IAE) e Gérson Luiz de Lima (INPE/LIT), técnicos extremamente hábeis e competentes com quem trabalhei diretamente durante todas as fases deste projeto.

À querida Rosely pelo seu carinho, paciência, companheirismo, estímulo como também pelas constantes assistências durante as fases de formatação e de edição deste trabalho.

Ao amigo Jaime Camilo de Souza, pelo seu interesse e pelas cobranças constantes em relação ao desenrolar desta pesquisa.

À equipe do Laboratório de Contaminação pelo apoio e colaboração prestados durante as fases de decapagem química e de limpeza final dos componentes.

Aos técnicos Claudemir Patuci, João Batista e Alexandre O. Santos (IAE/AMR) pelo apoio às fases de microscopia óptica e eletrônica.

Aos engenheiros Daniel S. Almeida e Vinícius A. R. Henriques (IAE/AMR) pelo companheirismo e incentivo.

À família Bouzyk (Lelena – irmã, Mark - cunhado e Erik - sobrinho) pelas constantes palavras de estímulo, mesmo que ditas à distância, por meio de longos telefonemas da Inglaterra.

Às presenças de Nossa Senhora e de São Judas Tadeu em minha vida, principalmente nos momentos de recuo e de insegurança.



ORLOWSKI DE GARCIA, J. A. **Desenvolvimento de procedimentos de soldagem TIG orbital para aplicações aeroespacial**. 2004. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

RESUMO

A presente pesquisa visa à obtenção de um procedimento de soldagem capaz de atender às normas de fabricação do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**, constituído de vários componentes, conectores e tubulações em titânio comercialmente puro de pequeno diâmetro para interligá-los. A primeira fase dos trabalhos restringe-se às etapas de infra-estrutura. Primeiramente, procede-se à implantação de um Laboratório de Soldagem em um ambiente de alta pureza provido de um sistema de distribuição de gases de pureza equivalente. A segunda fase constitui-se na aquisição de equipamentos nacionais e importados. Por fim, desenvolvem-se três programas distintos de soldagem a partir do processo **TIG** orbital (corrente pulsada, velocidade crescente - #A; corrente constante - #B; corrente pulsada, amperagem decrescente - #C). Submetem-se as juntas às inspeções visual e radiográfica, aos testes de estanqueidade com hélio, aos ensaios de tração uniaxial e as análises metalográficas para efeitos de qualificação segundo as normas chinesas aplicadas à indústria aeroespacial. Os cordões de solda na sua totalidade apresentam-se em conformidade com os critérios de aceite. As melhores condições apresentadas pelo programa de soldagem #A, indicam ser este o mais apropriado a ser aplicado na união de tubulações de pequeno diâmetro do referido Satélite.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem **TIG** orbital, titânio, Satélite, **CBERS**.

ORLOWSKI DE GARCIA, J. A. **Development of the orbital TIG welding procedures for aerospace applications.** 2004. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

ABSTRACT

The objective of this search is to obtain a welding procedure capable of attending the manufacturing standards for the Propulsion System of the **CBERS** Satellite, composed by several components, connectors and small diameter tubes of commercially pure titanium to connect them. The first phase of the study restricted itself to the stages of the infrastructure. Firstly, it involved the setting up of a Welding Laboratory with a high purity environment and equipped with a distribution system of high purity gases. The second phase consisted of the purchasing our as well and imported equipment. Finally, three different orbital **TIG** welding procedures (pulsed current, increasing speed - #A; constant current - #B; pulsed current, decreasing amperage - #C) were developed and respectively qualified by means of visual examination, x-rays inspection, leak detection, uniaxial tensile tests and metallography analysis of the welds. All welds were found to be adequate for use in the **CBERS** Satellite by means of chinese aerospace standards. The best results were presented by the pulsed current with a gradual increase in travel speed program which indicate that this is the most appropriate method to be used in the joining of small diameter tubes of the above mentioned Satellite.

KEY WORDS: Orbital **TIG** welding; titanium; Satellite, **CBERS**.



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Características do CBERS	18
FIGURA 1.2 - Satélite CBERS durante ensaio de vibração	18
FIGURA 2.1 - Princípio de funcionamento do processo de soldagem TIG orbital	23
FIGURA 2.2 - Detalhe de um tubo em aço inoxidável soldado pelo processo TIG manual	25
FIGURA 2.3 - Aspecto de uma junta inoxidável submetida ao processo TIG orbital .	25
FIGURA 2.4 - Corrente pulsada e os seus efeitos sobre o acabamento do cordão de solda	29
FIGURA 2.5 - Ciclo de soldagem para tubos de pequenos diâmetros	30
FIGURA 2.6 - Exemplo de variação de parâmetros de soldagem com a mudança de nível	31
FIGURA 2.7 - Configuração da junta utilizada em soldagens autógenas	32
FIGURA 2.8 - Fonte de soldagem orbital	32
FIGURA 2.9 - Controle remoto	32
FIGURA 2.10 - Fonte de energia	33
FIGURA 2.11 - Esquema simplificado de uma soldagem orbital com adição de arame	34
FIGURA 2.12 - Cabeçote orbital com câmara fechada	35
FIGURA 2.13 - Cabeçote orbital aberto e seus acessórios	36
FIGURA 2.14 - Soldagem em área limpa	38
FIGURA 2.15- Soldagem de liga Cu-Ni com cabeçote aberto	40
FIGURA 2.16 - Soldagem orbital do Sistema Propulsor do satélite CBERS	42
FIGURA 2.17 - Emprego de cabeçote orbital compacto em substituição à soldagem manual	43
FIGURA 2.18 - Soldagem orbital em tubos de pequenas dimensões (por fusão)	44
FIGURA 2.19 - Soldagem orbital em tubos espessos (com adição de arame)	44
FIGURA 2.20 - Soldagem orbital por fusão em tubulação de aço inoxidável	46
FIGURA 2.21 - Tubos de vários diâmetros	48
FIGURA 2.22 - Soldagem orbital com cabeçote aberto	48



FIGURA 3.1 – Laboratório de soldagem	67
FIGURA 3.2 –Dimensões finais	68
FIGURA 3.3 – Condições de faceamento	68
FIGURA 3.4 – Faceadora de tubos	69
FIGURA 3.5 – Detalhes da janela e do micrômetro	69
FIGURA 3.6 – Faceamento do tubo	69
FIGURA 3.7 – Aspecto do tubo após faceamento	69
FIGURA 3.8 – Equipamento de limpeza final	71
FIGURA 3.9 – Detalhe de uma peça submetida à limpeza final	71
FIGURA 3.10 – Detalhe da braçadeira para alinhamento das peças	72
FIGURA 3.11 - Detalhe do alinhamento de tubos	73
FIGURA 3.12 - Posicionamento da tocha manual em relação à junta	73
FIGURA 3.13 – Esquema simplificado do cabeçote orbital	73
FIGURA 3.14 – Dimensões do eletrodo de tungstênio com adição de cério	74
FIGURA 3.15 – Cabeçote orbital	74
FIGURA 3.16 – Detalhe do cabeçote orbital	74
FIGURA 3.17 – Magnehelic: medidor de pressão do gás de purga	76
FIGURA 3.18 - Dispositivo auxiliar usado na medição da pressão do gás de purga ..	76
FIGURA 3.19 – Arranjo dos equipamentos para a leitura da pressão	77
FIGURA 3.20 – Arranjo dos equipamentos para a execução da soldagem TIG orbital	78
FIGURA 3.21 – Orifício de restrição	78
FIGURA 3.22 – Acessórios empregados no ponteamento manual	80
FIGURA 3.23 – Soldagem TIG orbital dos corpos-de-prova	84
FIGURA 3.24 – Vista lateral da fonte de soldagem	85
FIGURA 3.25 – Dados do programa # B	86
FIGURA 3.26 – Instalação de alojadores no cabeçote orbital	87
FIGURA 3.27 – Exemplos de alojadores para tubos de diferentes diâmetros	87
FIGURA 3.28 – Diferentes configurações para cabeçote orbital	88
FIGURA 3.29 – Prolongador de ângulo fixo	88
FIGURA 3.30 – Prolongador de ângulo ajustável	88

FIGURA 3.31 – Detalhe do conjunto posicionador	89
FIGURA 3.32 – Detalhe do sistema de grampos	89
FIGURA 3.33 – Detalhes da parte interna do cabeçote	89
FIGURA 3.34 – Posicionamento do tubo-eletrodo	90
FIGURA 3.35 – Fixação do tubo	90
FIGURA 3.36 – Conjunto preparado para a soldagem	90
FIGURA 3.37 – Condições de aprovação e rejeição dos cordões de solda	93
FIGURA 3.38 – Boroscópio: instrumento para examinar as superfícies internas	94
FIGURA 3.39 – Inspeção de um corpo-de-prova soldado	95
FIGURA 3.40 – Dimensões do corpo-de-prova de tração	96
FIGURA 3.41 – Fases da etapa de qualificação	98
FIGURA 4.1 – Microestrutura do titânio comercialmente puro grau 2; 500x	99
FIGURA 4.2 – Aspecto da face e da raiz de um cdp referente ao programa #A	103
FIGURA 4.3 – Micrografias representativas das regiões de uma junta soldada	107
FIGURA 4.4 – Microestruturas eletrônicas representativas de uma junta soldada ...	111
FIGURA 4.5 – Análise da superfície de fratura de um cdp soldado (#A)	116
FIGURA 5.1 – Dobradeira de tubos	120
FIGURA 5.2 – Posicionamento do tubo	120
FIGURA 5.3 – Dobramento do tubo	120
FIGURA 5.4 – Remoção do tubo	120
FIGURA 5.5 – Setor de verificação dos tubos dobrados	121
FIGURA 5.6 – Decapagem das extremidades de uma válvula	124
FIGURA 5.7 – Emprego de braçadeiras para o alinhamento das peças	125
FIGURA 5.8 – Utilização de braçadeiras para o posicionamento correto	126
FIGURA 5.9 – Inspeção visual de uma junta antes do ponteamto manual	127
FIGURA 5.10 – Componentes	128
FIGURA 5.11 – Montagem (arruela cônica para vedação)	128
FIGURA 5.12 – Montagem (arruela cilíndrica para vedação)	128
FIGURA 5.13 – Montagem (conexão)	128
FIGURA 5.14 – Montagem (tubo)	129
FIGURA 5.15 – Conjunto concluído	129

FIGURA 5.16 – Verificação da pressão em uma junta próxima aos tanques	130
FIGURA 5.17 – Verificação da pressão em uma junta	130
FIGURA 5.18 – Ponteamento de uma peça sobre a bancada	131
FIGURA 5.19 – Operação de ponteamento no próprio Satélite	132
FIGURA 5.20 – Ponteamento na região dos tanques	132
FIGURA 5.21 – Esquema da distribuição de juntas em parte do Sistema Propulsor.	134
FIGURA 5.22 – Soldagem TIG orbital	137
FIGURA 5.23 – Soldagem TIG orbital	137
FIGURA 5.24 – Principais etapas da confecção do Satélite CBERS	138

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Comparação entre os processos TIG orbital e manual.....	26
TABELA 2.2 - Classificação dos elementos de liga presentes nas ligas de titânio....	53
TABELA 2.3 - Propriedades mecânicas mínimas e teores máximos em massa de elementos intersticiais permitidos nas ligas comercialmente puras de titânio	54
TABELA 2.4 – Exemplos de algumas propriedades mecânicas e físicas para os diferentes grupos de ligas de titânio.....	58
TABELA 2.5 – Regras para aceite de soldas de titânio baseadas na cor do cordão de solda.....	62
TABELA 3.1 - Composição química (porcentagem em massa)	65
TABELA 3.2 – Impurezas (ppm) presentes no gás argônio ultra-puro (99,999%) ...	75
TABELA 3.3 – Parâmetros de ponteamto manual.....	80
TABELA 3.4 - Parâmetros de soldagem utilizados nos diversos programas	83
TABELA 4.1 – Valores das energias de soldagem para os diferentes programas	102
TABELA 4.2 – Medidas das larguras da face e raiz dos cordões soldados segundo os programas em estudo.....	104
TABELA 4.3 - – Medidas do tamanho de grão do metal base e das zonas termicamente afetadas para as diferentes condições de soldagem.....	109
TABELA 4.4 – Resultados dos ensaios mecânicos de tração para o metal base e juntas soldadas.....	112
TABELA 4.5 – Resultados dos perfis de microdureza Vickers	113
TABELA 5.1 – Exemplo da seqüência de medição de pressão adotada para o grupo 2	135
TABELA 5.2 - Dados referentes às juntas do grupo n °2	136
TABELA B1 – Dados da etapa de integração das peças.....	156
TABELA B2 – Dados da etapa de ponteamto manual	156
TABELA B3 – Dados das etapas de soldagem e de qualificação	157



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
AMS	Aerospace Material Specification
AS	Aerospace Standard
ASM	American Society for Metals
ASME	American Society of Mechanical Engineering
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVC	Arc Voltage Control (<i>inglês</i>)
AVC	Controlador Automático de Tensão do Arco Elétrico (<i>português</i>)
AWS	American Welding Society
BPE	Bioprocess Equipment Standard
CAST	Chinese Academy of Space Technology
CBERS	China – Brazil Earth Resources Satellite (<i>inglês</i>)
CBERS	Satélite Sino – Brasileiro de Recursos Terrestres (<i>português</i>)
ELI	Extra Low Interstitial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISS	International Space Station (<i>inglês</i>)
ISS	Estação Espacial Internacional (<i>português</i>)
LIT	Laboratório de Integração e Testes
MB	Metal Base
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MS	Metal de Solda
PEB	Programa Espacial Brasileiro
Projeto MESA	Projeto de Satélites Meteorológicos
Projeto SACI	Projeto de Satélites de Aplicações Científicas
Projeto SERE	Projeto de Sensoriamento Remoto
SLG	Strategic Leaders Group
TIG	Tungsten Inert Gas
TMCA	Titanium Metals Company of America
TWI	The Welding Institute
ZTA	Zona Termicamente Afetada



LISTA DE SÍMBOLOS

#A	programa de soldagem A
#B	programa de soldagem B
#C	programa de soldagem C
cdp	corpo de prova
Cu-Ni	liga Cobre-Níquel
d	diâmetro médio do grão
esp	espessura
Es	energia de soldagem
H	dureza
HP	high purity
HV	microdureza Vickers
I_b	corrente de base
I_p	corrente de pico
k	coeficiente angular
LE	limite de escoamento
LR	limite de resistência
PA	para análise
ppb	parte por bilhão
ppm	parte por milhão
RA	redução de área
TiCP	titânio comercialmente puro
TG_m	tamanho médio de grão
α	liga de titânio alfa
β	liga de titânio beta
\varnothing_{int}	diâmetro interno
\varnothing_{ext}	diâmetro externo
ϵ	alongamento
σ	tensão

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	HISTÓRICO.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	OBJETIVO.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	SOLDAGEM ORBITAL	22
2.1.1	Introdução.....	22
2.1.2	Sistema de soldagem TIG orbital.....	27
2.1.2.1	Fontes de energia	27
2.1.2.2	Cabeçotes orbitais.....	35
2.1.3	Aplicações.....	37
2.1.3.1	Semicondutores.....	37
2.1.3.2	Offshore.....	39
2.1.3.3	Aeroespacial	40
2.1.3.4	Fornos e caldeiras	42
2.1.3.5	Nuclear	43
2.1.3.6	Pecuária leiteira e alimentícia.....	45
2.1.3.7	Farmacêutica.....	47
2.2	TITÂNIO: PROPRIEDADES E SOLDAGEM	49
2.2.1	Introdução.....	49
2.2.2	Principais características.....	52
2.2.3	Elementos de liga	53
2.2.4	Titânio comercialmente puro (TiCP).....	54
2.2.5	Ligas de titânio.....	56
2.2.6	Soldabilidade do titânio e suas ligas.....	59
2.2.7	Soldagem do titânio comercialmente puro.....	61
2.2.8	Precauções necessárias à soldagem do titânio.....	61
2.2.9	Verificação da qualidade das soldas de titânio	62
2.2.10	Defeitos associados à soldagem.....	63
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1	MATERIAL.....	65
3.2	MÉTODOS.....	65
3.2.1	Controle ambiental	66
3.2.2	Preparação do metal base (seleção, corte e faceamento).....	67
3.2.3	Procedimentos de limpeza	70



3.2.4	Alinhamento	72
3.2.5	Eletrodo de tungstênio – tipo, geometria, dimensões e instalação	73
3.2.6	Gases de proteção e de purga – controle da pressão do gás de purga ..	75
3.2.7	Pontamento manual	79
3.2.8	Levantamento de parâmetros de soldagem	81
3.2.9	Qualificação	91
3.2.10	Inspeção visual	94
3.2.11	Análise metalográfica	95
3.2.12	Ensaio de tração	96
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1	METAL BASE	99
4.2	DESENVOLVIMENTO DOS PROGRAMAS DE SOLDAGEM	100
4.3	INSPEÇÕES VISUAL E RADIOGRÁFICA	103
4.4	TESTE DE FUGA	105
4.5	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	105
4.6	PROPRIEDADES MECÂNICAS	112
4.7	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE FRATURA	115
5	SOLDAGEM DO SISTEMA PROPULSOR DO SATÉLITE CBERS	119
6	CONCLUSÕES	140
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	142
	REFERÊNCIAS	143
	ANEXO A – Dados adicionais referentes ao metal base	152
	ANEXO B - Dados referentes às etapas de integração, de pontamento manual, de soldagem e de qualificação	155
	ANEXO C – Resultados das inspeções radiográficas referentes à qualificação dos procedimentos de soldagem	158
	ANEXO D – Resultados dos testes de fuga referentes à qualificação dos procedimentos de soldagem	162
	ANEXO E - Resultados referentes às inspeções das uniões soldadas do Sistema Propulsor do Satélite CBERS	166

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE (2001), o campo das atividades espaciais no País inicia-se a partir da década de sessenta, através da criação de Instituições voltadas aos estudos relacionados ao espaço, à capacitação de recursos humanos e ao intercâmbio técnico-científico com nações de destaque nesta área, particularmente àquelas voltadas à utilização de Satélites. O principal objetivo é suprir as deficiências de um país de dimensões continentais como o Brasil em termos de integração e do próprio conhecimento de seu território. A partir de então, as principais diligências concentram-se em projetos de recepção e integração de imagens de Satélites meteorológicos (Projeto MESA), técnicas de sensoriamento remoto por Satélites e aeronaves para levantamento de recursos terrestres (Projeto SERE) e, finalmente, o Projeto SACI, responsável pela ampliação do sistema educacional do País.

Durante a década de oitenta, o INPE passa a desenvolver programas prioritários, como por exemplo, o Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, (**China – Brazil Earth Resources Satellite - CBERS**), fruto da cooperação entre os governos brasileiro e chinês. O Satélite **CBERS** é composto de dois módulos. O primeiro, denominado de **carga útil**, aloja os sistemas ópticos e os eletrônicos utilizados para a observação da Terra e para a coleta de dados. O módulo **serviço** é o responsável pelo suprimento de energia, pelos controles, pelas telecomunicações e demais funções necessárias à operação do Satélite. Suas principais características são apresentadas na figura 1.1

Massa total	1450 kg
Potência gerada	1100 W
Dimensões do corpo	1,8 x 2,0 x 2,2 m
Dimensões do painel	6,3 x 2,6 m
Altitude de órbita	778 km
Estabilização	3 eixos
Comunicação de serviço	UHF e banda S
Tempo de vida	2 anos

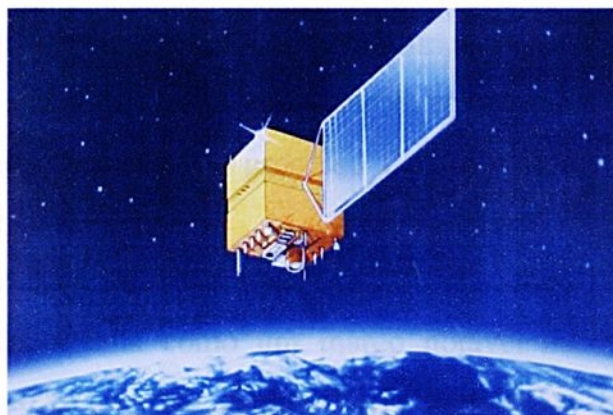


Figura 1.1 - Características do **CBERS**
(cortesia INPE/LIT)

Conforme apresentado na figura 1.1, uma de suas particularidades compreende a estabilização nos três eixos. Este evento ocorre segundo um controle de atitude ativo designado de Sistema Propulsor. É constituído de quatro tanques de armazenamento de combustível (hidrazina), dezesseis micropropulsores de 1 N e dois de 20 N, linhas de distribuição, válvulas, filtros e etc. A manutenção do posicionamento do Satélite em sua vida orbital depende basicamente deste Sistema, no qual uma eventual fuga de combustível nos seus pontos de união comprometeria diretamente a missão como um todo. Assim sendo, os critérios de qualidade no tocante a soldagem de seus componentes são extremamente rigorosos, obedecendo às normas chinesas de fabricação para o setor aeroespacial (NORMAS CHINESAS a e b). Seus requisitos de aprovação e de rejeição estão relacionados no anexo B por meio de tabelas. A título de ilustração, a figura 1.2 apresenta o referido Satélite durante a fase de testes de vibração.



Figura 1.2 – Satélite **CBERS** durante ensaio
de vibração
(cortesia INPE/LIT)

Tendo como meta a integração e testes do Satélite **CBERS – 2** em suas dependências, o INPE/LIT investe aproximadamente 220 mil dólares na implantação de um Laboratório de Soldagem provido de equipamentos para o controle ambiental, para a limpeza final e a união dos componentes, por meio do processo **TIG** orbital, a serem integrados ao corpo do referido Satélite.

O sucesso alcançado com o lançamento do **CBERS-2**, datado de 21 out. 2003 (1h 16min em Brasília) em território chinês, aponta como um marco notável na evolução do Programa Espacial Brasileiro rumo ao domínio da engenharia de Satélites espaciais.

Os benefícios gerados pela cooperação sino-brasileira para a fabricação dos Satélites **CBERS** refletem-se na participação do Brasil, representado pelo INPE, na construção da **ESTAÇÃO ESPACIAL INTERNACIONAL (INTERNATIONAL SPACE STATION – ISS)**, o maior empreendimento mundial no setor, reunindo dezesseis países, sob coordenação dos Estados Unidos da América.

Ao longo dos anos, as inovações tecnológicas oriundas das atividades espaciais têm contribuído de maneira marcante para o desenvolvimento de vários segmentos industriais tendo como exemplo a área de fabricação mecânica. Nesta, a tecnologia de soldagem aponta como um dos destaques devido à crescente demanda pela utilização de estruturas soldadas de alta qualidade em materiais com requisitos especiais de fabricação, como por exemplo o titânio e suas ligas.

Esta série de exigências possibilitou o desenvolvimento de uma nova geração de fontes de energia programáveis. Paralelamente, a criação de cabeçotes orbitais especiais permite o uso desta tecnologia na automatização da soldagem **Tungsten Inert Gas-TIG** de tubos dos mais variados diâmetros e de aplicação direta em diversos segmentos como as indústrias aeroespacial, nuclear, de semicondutores, farmacêutica, dentre outras. Técnicas inovadoras, como o uso de corrente pulsada sincronizada ao sistema de alimentação de arame e de movimentação do cabeçote, ambos pulsados, permitem a execução de soldagens em todas as posições e cujos requisitos de qualidade do produto final enquadram-se em rigorosos padrões normativos como AWS D18.1, AWS D.18.2 e ASME BPE – 97 (EMMERSON, 1997; MANNION, 1999; HENON, 1996).



1.2 JUSTIFICATIVA

Particularmente, o titânio comercialmente puro é empregado sobretudo em condições de elevada resistência à corrosão associada à conformabilidade. Apesar dos aços inoxidáveis recozidos da série 300 apresentarem características similares a custos significativamente mais baixos, a sua utilização no setor aeroespacial é limitada em função de sua maior massa específica. Boyer (1996) aponta reduções de aproximadamente 50% em relação ao peso de estruturas a partir do uso do titânio e suas ligas em substituição as ligas convencionais.

Um outro aspecto interessante do titânio e suas ligas, do ponto de vista de características metalúrgicas, é a manutenção dos índices de resistência à corrosão similares à do metal base nas juntas soldadas. O óxido, que é o responsável pelos altos índices deste parâmetro, forma-se igualmente sobre as regiões soldada e metal base, propiciando desempenhos análogos independente do meio a que estão expostos (SMITH; THREADGILL; GITTOS, 1999).

No caso específico do Satélite **CBERS-2**, a sua utilização restringe-se ao Sistema Propulsor, ou seja, as linhas de ultra-alta pureza do circuito de hidrazina. Basicamente, o conjunto é constituído de vários componentes interligados por meio de tubulações de pequeno diâmetro. Suas juntas são unidas pelo processo de soldagem **TIG** orbital, cuja seleção fundamenta-se nas exigências em termos de qualidade final do produto.

1.3 OBJETIVO

A presente pesquisa consiste no estudo e no desenvolvimento de um procedimento de soldagem, baseado na tecnologia **TIG** orbital e nos critérios de qualidade do setor espacial, de modo a atender a união de tubos e conexões de pequeno diâmetro em titânio comercialmente puro. Essas peças são empregadas para interligar os diversos componentes (tanques de combustível, filtros, válvulas, dentre



outros) do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**, cujas juntas soldadas seguem as normas chinesas vigentes (NORMAS CHINESAS a e b).

No trabalho proposto são estudadas três condições distintas de soldagem (corrente pulsada, velocidade crescente - #A; corrente constante - #B; corrente pulsada, amperagem decrescente - #C), onde são analisados parâmetros como velocidade, corrente (com e sem pulsação) e energia de soldagem em relação à qualidade, morfologia, propriedades mecânicas e microestruturas das juntas soldadas resultantes das operações de união. Dentro deste contexto, pretende-se selecionar a condição que melhor atenda os requisitos de aceite segundo os critérios chineses para o setor aeroespacial e, por conseguinte, implantá-la na soldagem do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**, realizada nas dependências do INPE/LIT.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM ORBITAL

2.1.1 Introdução

Nos primórdios da década de sessenta desenvolve-se a soldagem orbital, a fim de prover a indústria aeroespacial de condições básicas de fabricação de componentes de alta integridade.

A comprovação de falhas em juntas de sistemas hidráulicos expostos a vibrações e a esforços mecânicos durante o vôo de aeronaves, sob velocidades próximas à do som, induz o aperfeiçoamento de técnicas de união (HENON, 1998, 2001a; ORBIMATIC, 2003).

A solução para as dificuldades acima mencionadas restringe-se ao desenvolvimento de um sistema mecanizado a partir do já existente processo de soldagem **TIG**. Neste processo os seguintes pontos são considerados:

- disponibilidade de um dispositivo que garanta o posicionamento dos tubos durante a operação de soldagem;
- criação de um ambiente a ser preenchido com gás inerte, de modo a proteger o eletrodo de tungstênio e a poça de fusão da contaminação atmosférica, particularmente às altas temperaturas;
- desenvolvimento de um mecanismo que permita a movimentação do eletrodo de tungstênio ao redor dos tubos; e
- disponibilidade de uma fonte de energia que possibilite a abertura do arco elétrico através de meios adequados, e igualmente o ajuste e o controle das variáveis de soldagem.

Deste modo cria-se o sistema de soldagem orbital, em que o eletrodo de tungstênio envolto por uma atmosfera protetora de gás inerte, percorre a junta ao longo

de todo o seu perímetro fundindo-a, de modo a produzir um cordão homogêneo com propriedades próximas às do metal base (ARC MACHINES, 2001; HENON, 1996a, 2001a; HENON; MORGAN, 1999). A figura 2.1 apresenta o princípio de funcionamento do processo TIG orbital.

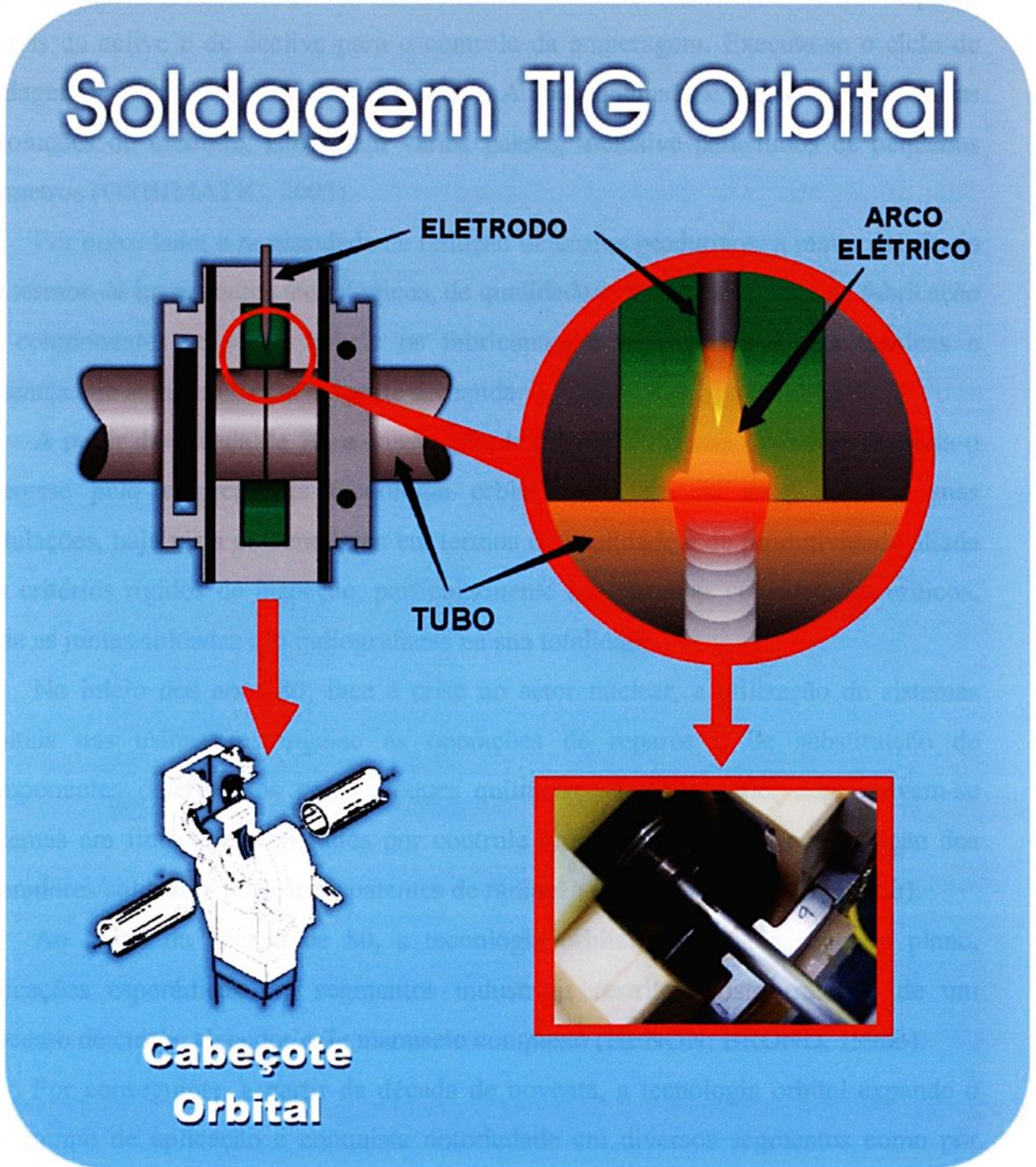


Figura 2.1 –Princípio de funcionamento do processo de soldagem TIG orbital

A título de curiosidade, a aeronave modelo **B-70** é uma das primeiras a servir-se desta tecnologia com sucesso (HENON, 2001a). Atualmente, os jatos **747** e **C-17** têm uma grande participação no mercado da tecnologia **TIG** orbital para a união de seus componentes (HENON, 1998).

As primeiras unidades produzidas limitam-se aos serviços executados em oficinas, dada à grandeza de suas dimensões. De recursos limitados, as fontes dispõem apenas de alicate e de declive para o controle da amperagem. Executa-se o ciclo de soldagem sob uma corrente de valor único. A sua conclusão é efetivada após várias revoluções do eletrodo, isto é, em vários passes, inclusive para tubos de pequenos diâmetros (ORBIMATIC, 2003).

Por outro lado, a necessidade de redução de custos produtivos, a maior exigência em termos de incrementos tecnológicos, de qualidade e de confiabilidade na fabricação de componentes soldados impele os fabricantes a desenvolver novas técnicas e sistemas que atendam a essa exigente demanda.

A partir da década de 70, a construção de plantas de usinas nucleares desperta o interesse pelo emprego da tecnologia orbital, em fase de ascensão, nas suas instalações, haja vista os benefícios em termos de qualidade e de produtividade aliada aos critérios rígidos de inspeção, particularmente nos sistemas considerados críticos, onde as juntas soldadas são radiografadas na sua totalidade.

No início dos anos 80, face à crise no setor nuclear, a utilização de sistemas orbitais nas usinas restringe-se às operações de reparos e de substituição de componentes deteriorados pelos ataques químicos. Neste período, desenvolvem-se sistemas em fibra ótica, operados por controle remoto, para limitar a exposição dos operadores/soldadores nas áreas patentes de radiação (HENON; BROND, 1996b).

Ao longo da década de 80, a tecnologia orbital é legada a segundo plano, aplicações esporádicas em segmentos industriais restritos, visto tratar-se de um processo de custos elevados e de manuseio complexo (HENON; BROND, 1996b).

Por conseguinte, a partir da década de noventa, a tecnologia orbital expande o seu campo de aplicação e conquista notoriedade em diversos segmentos como por exemplo as indústrias biofarmacêuticas, de alimentos e de semicondutores dentre outras (HENON; MORGAN, 1999; HENON, 1996a, 1999, 2001b, 2001c; HENON;

BROND, 2000, 2001). Tal feito deve-se não apenas aos progressos obtidos em termos de qualidade e de integridade das juntas soldadas, mas principalmente por razões de produtividade, de acabamento dos cordões, de elevação nos níveis de resistência à corrosão e de praticidade, sobretudo quando comparada aos processos manuais ou a outros métodos de união (PURNEL, 2002 b; ARC MACHINES, 2001; HENON, 1999, 2001a, 2001d, 2001e; GUSICH, 2001; HENON; BROND, 2000; LITTLEWOOD; HENON, 2000). Outras características inerentes aos avanços deste processo incluem as fontes de energia microprocessadas de dimensões reduzidas e mais acessíveis em termos de custos, a possibilidade de união de tubos de parede fina dada à estabilidade do arco elétrico a baixas amperagens e a disponibilidade de cabeçotes abertos mais simples e com recursos de alimentação de arame, próprios para componentes de grandes espessuras (HENON; BROND, 1996).

A evolução advinda da tecnologia orbital em substituição à costumeira soldagem manual é traduzida através de um exemplo constante nas figuras 2.2 e 2.3. Estas figuras exemplificam duas situações distintas de união de tubos de aços inoxidáveis utilizados na indústria farmacêutica (BROND; HENON, 2001).

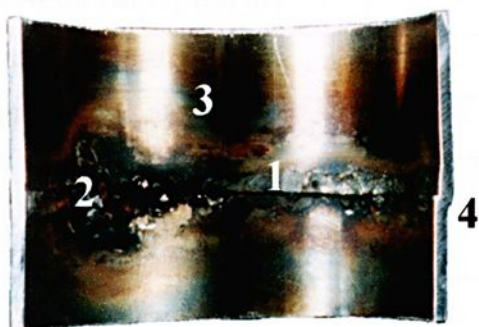


Figura 2.2 – Detalhe de um tubo em aço inoxidável soldado pelo processo TIG manual

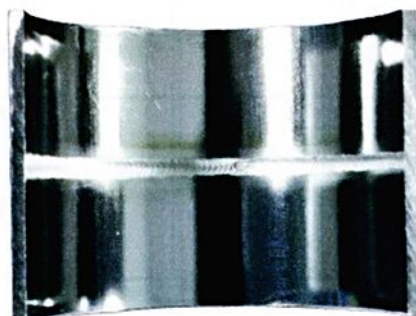


Figura 2.3 – Aspecto de uma junta inoxidável submetida ao processo TIG orbital

A figura 2.2 exibe um cordão de solda rejeitado segundo os padrões de qualidade de diversos usuários de ligas inoxidáveis. Observam-se defeitos como a falta de penetração (1), fissura de grandes proporções (2), oxidação (3) e desalinhamento

(4). A junta soldada da figura 2.3 apresenta-se homogênea em toda a sua extensão, com penetração total, alinhamento perfeito e não há sinais de oxidação na zona termicamente afetada. Este é um produto aceito em quaisquer das indústrias que utilizam aços austeníticos soldados em suas instalações.

A título de informação, a tabela 2.1 apresenta dados fornecidos pela empresa **Carolina Power & Light Company** relativos ao emprego dos processos **TIG** manual e automático na soldagem de tubulações de uma planta de geração de energia elétrica denominada **Roxboro** (HENON, 2001a).

Tabela 2.1 – Comparação entre os processos **TIG** orbital e manual (HENON, 2001a)

Comparação entre os processos TIG orbital e manual		
	Orbital	Manual
Descrição do tubo	AISI 347H & T-22 Ø externo = 50,8 mm e = 10,66 mm	AISI 347H & T-22 Ø externo = 50,8mm e = 10,66 mm
Quantidade de soldas	1500	1500
Número de funcionários	20	75
% de soldas completadas	100%	100%
Índice de rejeição	1,47%	16%
Custo (mão de obra/equipamento)	US\$ 550,000	US\$ 925,000

Observa-se que, para um total de 1500 cordões, a soldagem automática necessita de apenas 26% do total de 75 funcionários requisitados para a execução dos serviços manualmente, a um custo 60% inferior e com índices de rejeição extremamente baixos.

Um segundo exemplo de sucesso no emprego da soldagem **TIG** orbital em substituição a manual é verificada nas indústrias **Rainer Draft Beer** e **Rainer Draft Beer Light**, ambas localizadas no estado americano de **Seattle** (HENON, 2001f). Após as finalizações dos trabalhos de instalação, os resultados notabilizaram ganhos de 20% e de 50% em relação a homem-hora e aos tempos de fabricação

respectivamente, fatos que evidenciam a superioridade do processo automático em relação àquele anteriormente empregado.

2.1.2 Sistema de Soldagem TIG Orbital

O sistema de soldagem **TIG** orbital é utilizado na automatização da união de tubos e dutos de diversos diâmetros e espessuras em circunstâncias onde a qualidade está associada à produtividade. Os níveis de energia de soldagem presentes são extremamente baixos favorecendo o controle de distorções e a manutenção da precisão dimensional (HENON, 1996a, 1998, 1999, 2001a, 2001d; ORBIMATIC, 2003; HENON; MORGAN, 1999; HENON; BROND, 2000; LITTLEWOOD; HENON, 2000).

O sistema de soldagem **TIG** orbital compõe-se de dois itens principais, a fonte de energia e o cabeçote orbital. Sob condições de alta taxa de produção ou de tubos com espessuras superiores a 1,65 mm, conecta-se ao sistema uma unidade refrigeradora para arrefecer os cabos de energia e o próprio cabeçote (HENON; MORGAN, 1999; HENON; BROND, 2002; PURNEL, 2002 a). Casos particulares envolvem ainda o uso de controle remoto para o comando dos parâmetros de soldagem.

2.1.2.1 Fontes de Energia

As fontes de energia consistem de equipamentos programáveis cuja seqüência de soldagem é controlada por meio de um microprocessador, ou seja, a operação é feita sem a intervenção do operador/soldador. Através desta, é possível ajustar os diferentes níveis para as variáveis de soldagem em função do diâmetro, espessura e material a ser soldado.

A fonte de soldagem possibilita a programação de parâmetros como a velocidade de soldagem (velocidade de deslocamento do eletrodo ao longo da junta) e a amperagem, ambas contínuas ou com recursos de pulsação. Na técnica de velocidade pulsada (**step pulse**), sincroniza-se a movimentação do eletrodo com a corrente de base, permanecendo o mesmo em posição durante a corrente de pico. Uma de suas vantagens é auxiliar a penetração durante a execução do passe de raiz em tubulações (HENON, 1999).

A corrente pulsada, figura 2.4, caracteriza-se por variar de amplitude entre um valor mínimo denominado de corrente de base – I_b e um máximo intitulado de corrente de pico – I_p . O período correspondente a I_p representa aquele em que ocorre a fusão e, por conseguinte, a penetração no metal base. A I_b , responsável pela manutenção do arco aberto, deve ser mantida suficientemente baixa de modo a permitir o rápido resfriamento entre os pulsos. Caso a corrente de pico seja mantida durante um intervalo excessivo de tempo, ocorrerá uma penetração excessiva ou até a perfuração do material. Desta forma, o pulso deve ser interrompido após um tempo pré-estabelecido, a fim de que a poça de fusão possa solidificar-se durante o período de corrente de base. A soldagem prossegue em uma sucessão de passos discretos de fusão e solidificação onde o tamanho da poça aumenta e diminui. A frequência de pulsos deve estar relacionada à velocidade de soldagem para que seja obtido um nível adequado de sobreposição dos pontos de solda (TSENG; CHOU, 2002; WU; ZHENG; WU, 1999).

Ambas as amperagens têm as suas amplitudes e tempos de atuação ajustados independentemente além da sua frequência. Apesar do envolvimento de um maior número de variáveis, estudos comprovam as vantagens do uso desta técnica em relação a soldagem convencional, ou seja, aquela em que a união é efetivada sob uma corrente de valor único (HENON, 1996a, 1997).

Dentre os benefícios do emprego da corrente pulsada tem-se o melhor controle da poça fundida, e portanto da penetração, além de menores índices de distorção das peças. Quanto aos aspectos metalúrgicos, verificam-se reduções no aporte de energia o que minimiza a extensão das transformações na zona termicamente afetada, ou seja, produz-se uma zona termicamente afetada de dimensões reduzidas. Outrossim, há a

possibilidade de formação, dependendo da liga e dos parâmetros de soldagem, de uma estrutura de solidificação mais refinada, de reduções da porosidade e, igualmente, da susceptibilidade à formação de trincas a quente (MOHANDAS; REDDY, 1997; TSENG; CHOU, 2002; WU; ZHENG; WU, 1999; KRÜGER; MARYA, 1994). Estas propriedades, como um todo, são de fundamental importância na união de tubulações, particularmente aquelas de diâmetros e paredes reduzidas (HENON, 1997).

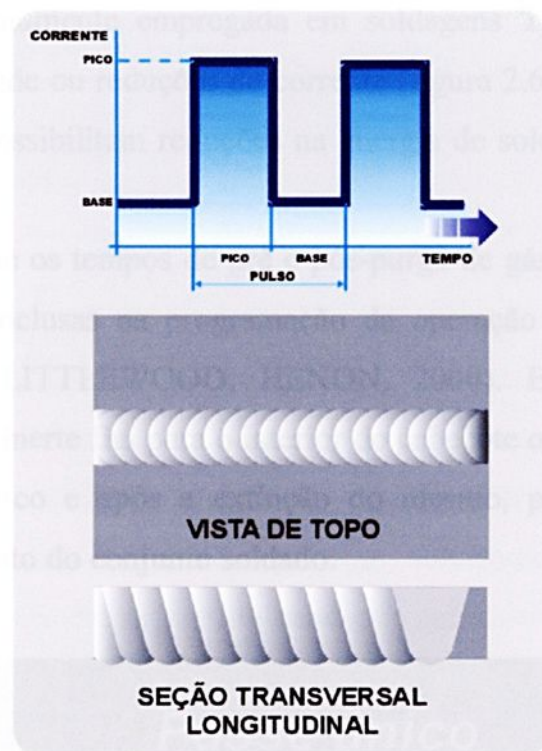


Figura 2.4 – Corrente pulsada e os seus efeitos sobre o acabamento do cordão de solda

Outros exemplos de controle por parte do equipamento são os tempos de retardo de início de movimentação do eletrodo, ou seja, aquele responsável pela formação da poça de fusão no começo do ciclo de soldagem, e os tempos de atuação dos diferentes níveis durante a união de tubos (HENON, 1996a, 1999, 2001a, 2001d; ORBIMATIC, 2003; HENON; MORGAN, 1999; HENON; BROND, 2000; PEDERSEN; LEVESEN; HENON, 2001).

Para tubos de pequenos diâmetros costumam-se empregar quatro níveis para a execução da soldagem, conforme visto na figura 2.5. De acordo com esta figura, o

ciclo de união inicia-se no ponto correspondente à posição 3 horas, prosseguindo pelos quatro quadrantes, cada qual com valores próprios para as variáveis (tempo, velocidade e amperagem). A finalização desta operação corresponde ao ponto em que há a sobreposição do cordão, região a partir da qual há o declínio gradativo nos valores de corrente até a completa extinção do arco elétrico. Sob condições específicas de diâmetro dos dutos e complexidade da operação de soldagem, é possível elevar esse número para 100, procedimento perfeitamente viável para as fontes de última geração.

Uma técnica comumente empregada em soldagens **TIG** orbital refere-se aos acréscimos de velocidade ou reduções de corrente (figura 2.6) quando da mudança de níveis. Tais práticas possibilitam reduções na energia de soldagem ao longo do ciclo de união.

Cabe salientar que os tempos de pré e pós-purga de gás de proteção encerram a relação de variáveis inclusas na programação da operação de soldagem (HENON, 1996a, 1997, 1999, LITTLEWOOD; HENON, 2000). Esses correspondem aos períodos em que o gás inerte flui para o interior do cabeçote orbital momentos antes da abertura do arco elétrico e após a extinção do mesmo, prevenindo a oxidação e auxiliando o resfriamento do conjunto soldado.



Figura 2.5 – Ciclo de soldagem para tubos de pequenos diâmetros

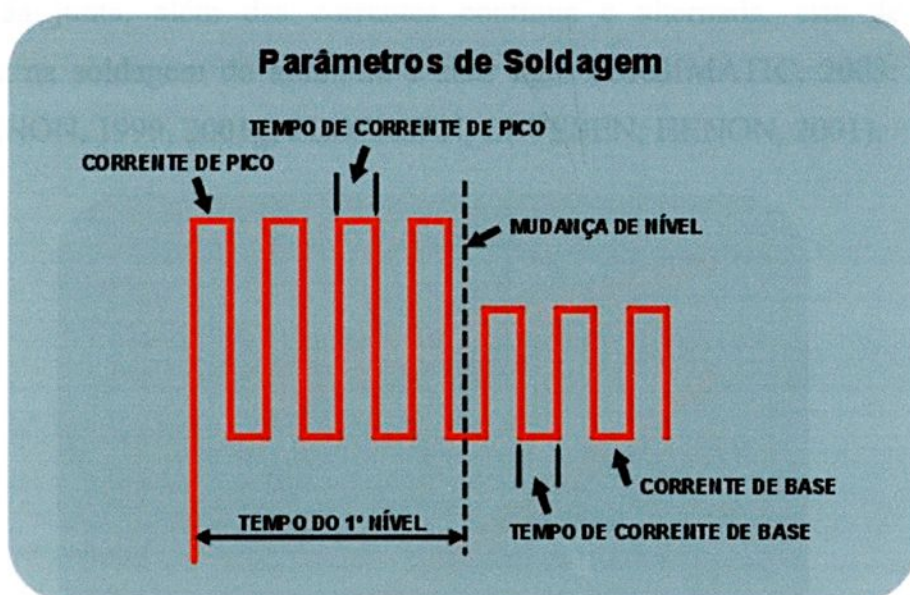


Figura 2.6 – Exemplo de variação de parâmetros de soldagem com a mudança de nível

Os equipamentos oferecem uma precisão em relação aos parâmetros de soldagem da ordem de $\pm 1\%$ (HENON, 2001b, 2001f, 2001g). Sua capacidade varia em função da sua finalidade. Fontes de até 150 A utilizam-se apenas de corrente contínua. Nestas condições são comumente designadas para as soldagens autógenas, ou sejam, dispensam o uso de arames de adição. Em geral, são aplicadas para a união de tubos de pequenos diâmetros externos (3,2 mm a 177,8 mm) e limitadas à espessura máxima de 3,9 mm. As soldagens são efetuadas em um único passe em juntas de topo com chanfro reto, cuja configuração é vista na figura 2.7. As figuras 2.8 e 2.9 exibem um modelo de fonte de energia com as características acima descritas e, ao lado, um acessório opcional, o controle remoto (HENON; MORGAN, 1999; HENON, 1996a, 2001b; HENON; BROND, 1996b).

As indústrias de semicondutores, farmacêutica, aeroespacial e nuclear são alguns exemplos de usuários deste tipo de equipamento, que será descrito em detalhes no próximo capítulo.

Fontes mais potentes atingem níveis de amperagem de até 400 A. Dispõem de recursos extras como controles de alimentação de arame em ambos os sentidos, comandos para a oscilação da tocha e sistema AVC (controle automático de tensão do arco elétrico), responsável pela constância na manutenção da distância eletrodo-tubo

ao longo da junta, além das correntes contínua e alternada, esta de particular importância na soldagem do alumínio e suas ligas (ORBIMATIC, 2003; PURNEL, 2002 a; HENON, 1999, 2001g; PEDERSEN; LEVESEN; HENON, 2001).

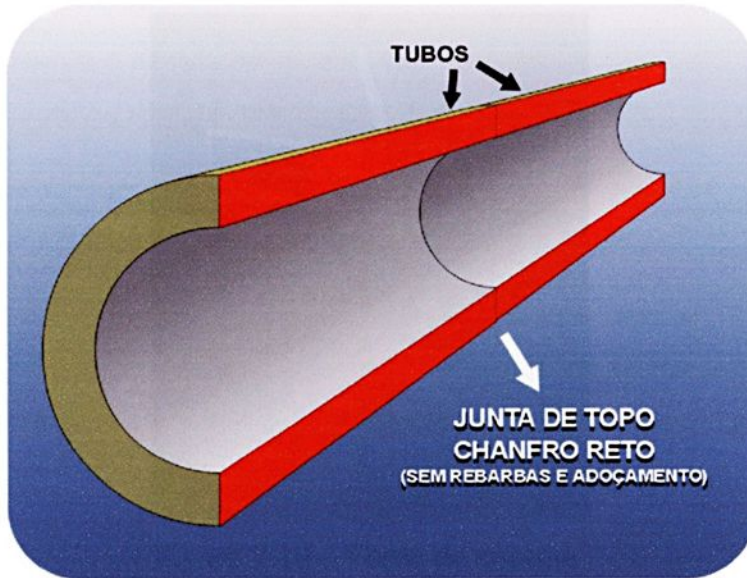


Figura 2.7 – Configuração da junta utilizada em soldagens autógenas



Figura 2.8 – Fonte de soldagem orbital
(cortesia Arc Machines)



Figura 2.9 – Controle remoto
(cortesia Arc Machines)

Por via de regra, as fontes de maior capacidade são empregadas com sucesso em dutos que alcançam os 152,4 mm de espessura (HENON, 2001a). Nestas, as soldagens são executadas em dois ou mais passes, onde as configurações dos chanfros resultam

dos materiais e das dimensões de suas paredes. A figura 2.10 exemplifica uma fonte de energia provida dos recursos mencionados anteriormente. Suas principais aplicações englobam as indústrias da construção naval, petrolíferas e as plataformas marítimas.

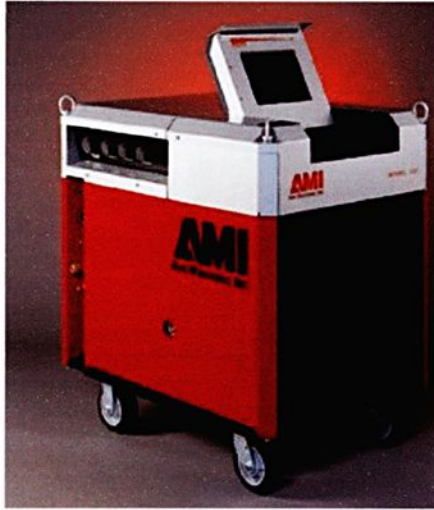


Figura 2.10 – Fonte de energia
(cortesia Arc Machines)

A figura 2.11 (adaptado de MANNION; HEIZMAN, 2001a) esquematiza um programa típico de soldagem TIG orbital desenvolvido sob velocidade constante e corrente pulsada. Começa-se o programa ativando-se os circuitos de refrigeração e de gás de proteção, cujo tempo de pré-gás é determinado segundo o material a ser soldado. Metais mais reativos como por exemplo o titânio, empregam maiores valores para esta variável. Após a abertura do arco elétrico o eletrodo é mantido em posição, a fim de permitir a formação da poça fundida. A partir deste ponto, inicia-se a soldagem propriamente dita, cujas mudanças de níveis são caracterizadas pelas reduções nos valores da corrente de pico, de modo a restringir o aporte de energia ao longo da junta soldada.

A alimentação de arame de adição transcorre sob velocidade constante. Após o término da soldagem (momento em que há a sobreposição do último nível em relação ao primeiro), há uma queda gradual nos níveis de amperagem seguida de pós-purga de gás de proteção. Estes procedimentos são empregados para evitar a formação de trincas de cratera ao término do cordão, evitar a oxidação das partes aquecidas além de auxiliar o resfriamento do conjunto.

Programa Típico de Soldagem Orbital

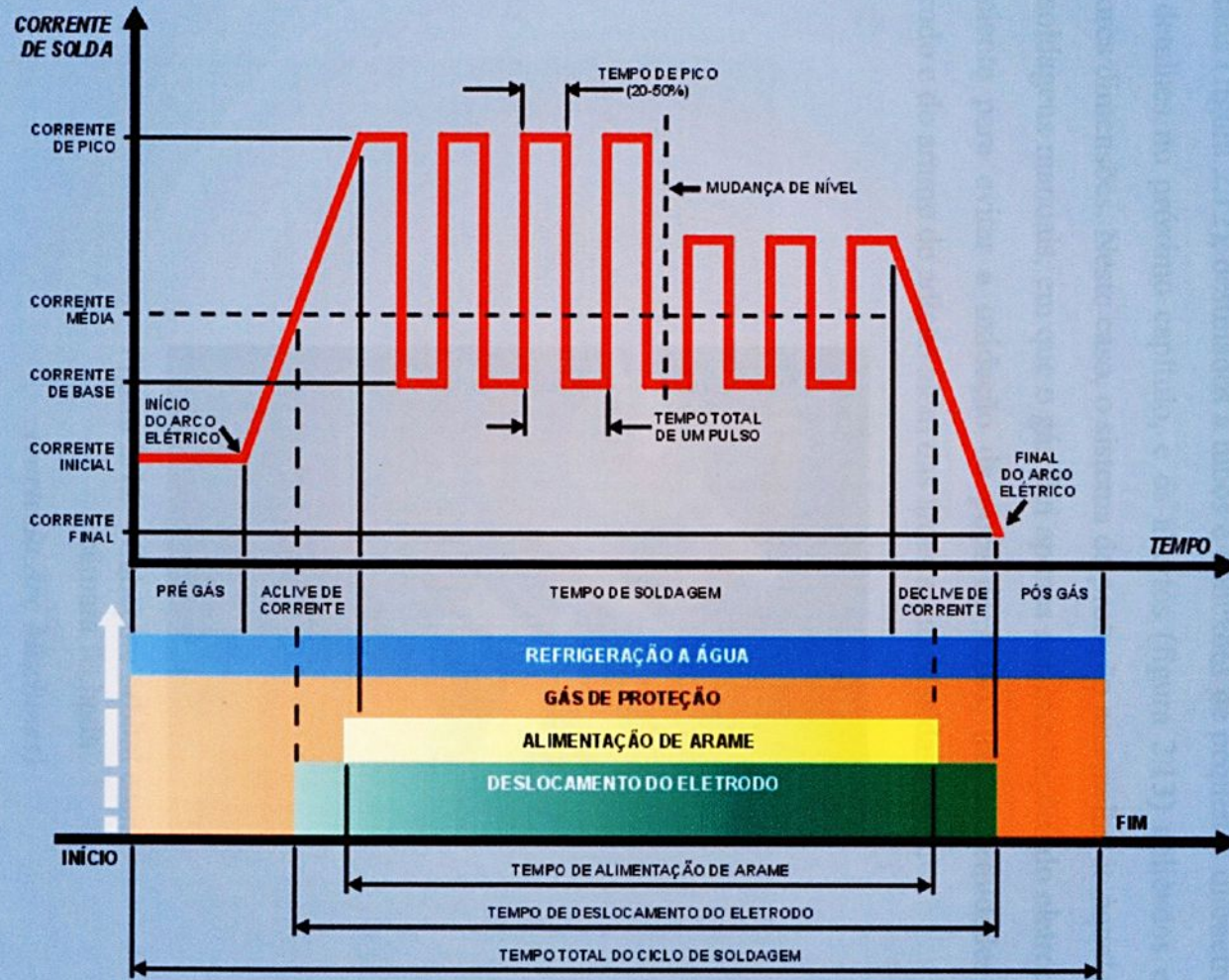


Figura 2.11 - Esquema simplificado de uma soldagem TIG orbital com adição de arame (adaptado de MANNION; HEINZMAN, 2001a)

2.1.2.2 Cabeçotes Orbitais

Basicamente, há dois modelos distintos de cabeçotes orbitais, os de câmara fechada (figura 2.12), destinados a tubos e conexões de pequenos diâmetros, descritos em detalhes no próximo capítulo, e os abertos (figura 2.13) aplicados em dutos de maiores dimensões. Neste caso, o sistema de proteção assemelha-se àquele empregado em soldagens manuais, em que o gás flui apenas nas imediações do eletrodo, condição suficiente para evitar a oxidação da poça de fusão, das extremidades do próprio eletrodo e do arame de adição além das áreas aquecidas das peças.



Figura 2.12 – Cabeçote orbital com câmara fechada

(cortesia Arc Machines)

A sua grande maioria utiliza-se de recursos como por exemplo o sistema de leitura de trajetória a laser, empregado para conservar o posicionamento correto da tocha em relação à junta, o instrumento denominado de controlador automático de tensão de arco, utilizado para manter constante a distância eletrodo-peça. Além destes, cabe ressaltar a unidade de refrigeração, o conjunto alimentador de arame e o oscilador

de tocha, responsáveis pelo preenchimento da junta através de movimentos transversais à direção de deslocamento do cabeçote.

Para tubos de diâmetros intermediários e espessuras próximas ao limite de 3,9 mm, a seleção entre as técnicas de soldagem, se por fusão (cabeçotes com câmara fechada) ou se com adição de arame (cabeçotes abertos), não depende apenas de suas dimensões, mas também do compromisso entre os níveis de resistência mecânica e de resistência à corrosão das juntas soldadas. Exemplos como a ligas inoxidáveis duplex e ligas à base de Cu-Ni, que estão sujeitas ao fenômeno de microsegregação em operações de soldagens autógenas. Esses materiais necessitam de elementos de liga extras em sua composição química para melhorar o seu desempenho durante o ciclo de trabalho (HENON; MORGAN, 1999).

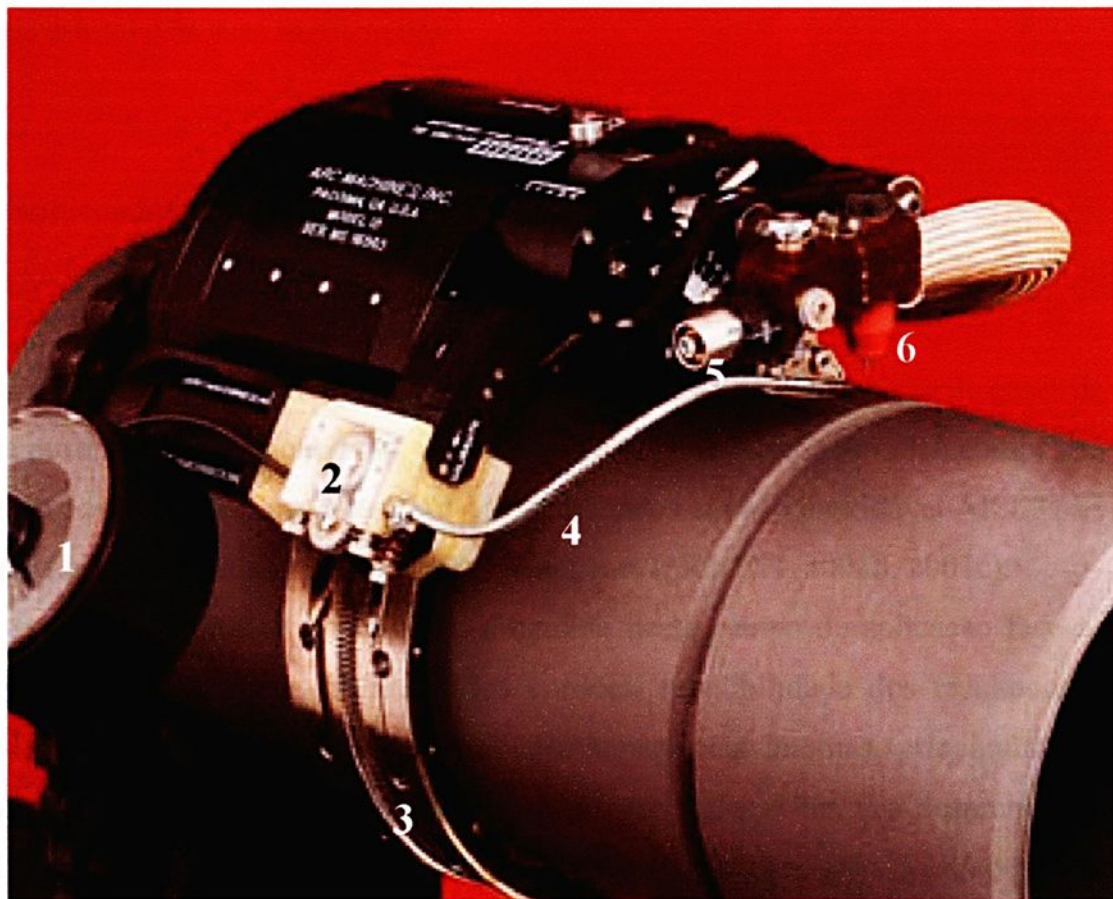


Figura 2.13 – Cabeçote orbital aberto e seus acessórios; protetor de bobina para arame de adição (1), sistema para tracionamento de arame (2), cinta para guiagem do cabeçote (3), cabos para condução do arame (4), rastreador de trajetória (5), tocha TIG (6)

(cortesia Arc Machines)

A título de curiosidade, a soldagem orbital de tubos de pequenos diâmetros é considerada como um processo totalmente automatizado, pois cabe ao operador o acionamento de uma única tecla para a execução da operação de união dos componentes. Para peças de grandes dimensões, esta tecnologia é tida somente como semi-automática, haja vista a necessidade de pequenos ajustes das principais variáveis ao longo do ciclo de soldagem (GALLOWAY; MAAK; McNABB, 1993).

2.1.3 Aplicações

A seguir, são apresentadas de modo conciso, as principais áreas de aplicação da tecnologia orbital e as suas implicações.

2.1.3.1 Semicondutores

Associam-se as indústrias de semicondutores às linhas de distribuição de gases de ultra-alta pureza como, por exemplo, argônio, oxigênio e óxido nitroso. São compostas de tubos, conexões e sistemas **manifold** confeccionados em aço inoxidável AISI 316L. Suas superfícies internas são polidas eletroliticamente (HENON, 2001b, 2001c).

A tecnologia orbital é amplamente difundida neste campo de aplicação face as suas características como a qualidade dos cordões, repetibilidade dos resultados e produtividade. As presenças de irregularidades superficiais internas, principalmente nos locais de união, geram pontos de acúmulo de partículas. Uma vez desprendidas, contaminam e causam turbulências ao longo do processo de produção. Mesmo que de dimensões desprezíveis, da ordem de microns, esses minúsculos fragmentos prejudicam o rendimento do sistema (BROSILOW, 1992; HENON 2001b, 2001g).

As suas áreas de aplicação assemelham-se àquelas utilizadas no campo espacial, haja vista as instalações de equipamentos apropriados para o controle da temperatura,

umidade e de particulados. Outrossim, o uso de vestimentas especiais é de suma importância (HENON, 2001b, 2001c, 2001g). A figura 2.14 exemplifica a execução de uma soldagem em área limpa.



Figura 2.14 – Soldagem em área limpa

(cortesia Arc Machines).

Os componentes limitam-se a tubos de 6,35 mm a 101,6 mm e de espessuras não superiores a 3,0 mm, de modo que a soldagem desenvolve-se segundo a técnica de fusão. Os métodos de preparação das peças são compatíveis aos padrões empregados no setor espacial, porém os critérios de aceite mais brandos, uma vez que não há restrições quanto a largura dos cordões e relatos sobre inspeções por raios x das juntas soldadas (HENON, 2001b, 2001c; HENON; COGHLAN, 1996).

Posteriormente à soldagem, o conjunto é submetido a testes de fuga com hélio para averiguar a sua integridade. Finalizado o ciclo de fabricação, verificam-se através de procedimentos precisos de calibração e sob atmosfera controlada se os limites dos contaminantes condizem com os valores presentes nas normas. Esta é considerada uma

etapa complexa e dispendiosa, em que amostras são coletadas em vários pontos ao longo das linhas de distribuição e enviadas para análise (HENON, 2001b, 2001c).

2.1.3.2 Offshore

O emprego da tecnologia orbital se faz presente na indústria **Offshore** a partir da década de noventa. A necessidade de controle preciso de ambos, aporte de energia e taxa de resfriamento em materiais com requisitos especiais de fabricação, induz a utilização da soldagem **TIG** orbital neste campo de aplicação (HENON, 2004a, HENON; GUISCARDO, 2004).

Linhas de distribuição de óleos e de gases, **manifolds** (tubos e válvulas de distribuição) que operam sob altas pressões e temperaturas, sistemas de drenagem e tubulações de água são alguns exemplos de componentes soldados pelo processo **TIG** orbital empregados neste tipo de indústria (HENON, 2004b; HENON; GUISCARDO, 2004).

Dentre os materiais citam-se as ligas Cu-Ni, os aços inoxidáveis duplex com níveis de resistência mecânica compatíveis com as pressões de trabalho e com excelentes valores de resistência à corrosão em ambientes marinhos (HENON, 2004a, 2004b, 2004c). Sob condições elevada resistência mecânica costuma-se empregar o aço de ultra-alta resistência AISI 4130 (HENON, 2004c).

Em sua grande maioria, a soldagem orbital envolve o uso de cabeçotes abertos e fontes de energia com recursos de alimentação de arame, quer seja para preenchimento de chanfros ou para melhorar as propriedades das juntas soldadas acrescentando elementos de liga à composição química da poça fundida (HENON, 2004a, 2004c; HENON; GUISCARDO, 2004; PEDERSEN; LEVESEN; HENON, 2001). A figura 2.15 exemplifica a união de componentes em liga Cu-Ni.

Em geral, a etapa de qualificação envolve os ensaios de corrosão acelerada, tração, dobramento além dos exames não destrutivos (líquidos penetrantes e raios x) (HENON, 2004a, 2004b, 2004c; PEDERSEN; LEVESEN; HENON, 2001).

O último avanço tecnológico na indústria **Offshore** é a utilização do titânio em vários de seus segmentos. A sua aplicação representa uma grande evolução tecnológica, haja vista os seus elevados índices de resistência à corrosão em comparação às demais ligas comumente empregadas. Esta característica é de grande importância, principalmente em locais onde as inspeções são praticamente impraticáveis. O sucesso nos resultados está relacionado não apenas à tecnologia orbital como também às condições de limpeza, de preparação e a técnica de purga de gás (PEDERSEN; LEVESEN; HENON, 2001).

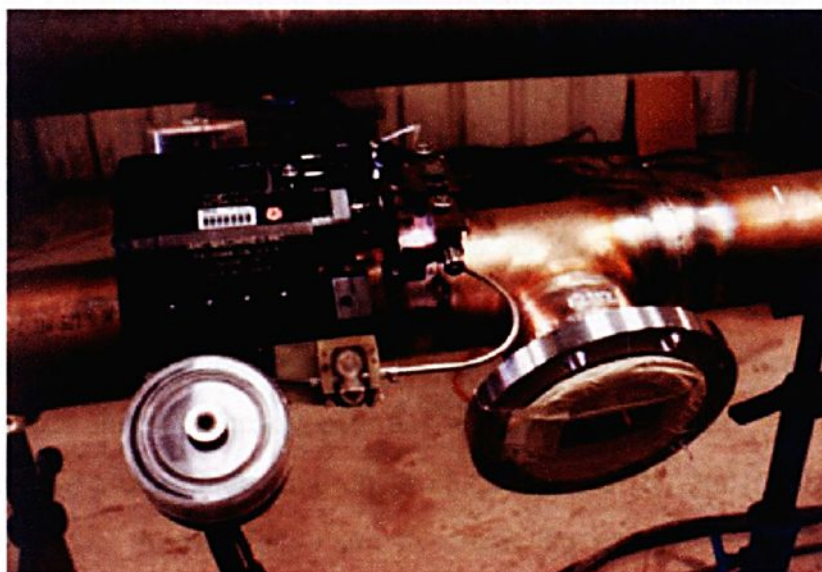


Figura 2.15 – Soldagem de liga Cu-Ni com cabeçote aberto
(cortesia Arc Machines)

2.1.3.3 Aeroespacial

A indústria aeroespacial é a grande responsável pela criação da tecnologia orbital a partir da década de sessenta. Tal particularidade está vinculada às exigências em relação à integridade das juntas soldadas.

Os Sistemas Propulsores de Satélites e de Veículos Lançadores são exemplos do emprego do processo **TIG** orbital na área espacial (SERAFIN, 2001; BROWN; NEUMAN, 2001; ORLOWSKI et al., 2004). Em aeronaves, as linhas de condução de

fluidos sob pressão são citadas em literaturas recentes (HENON, 2002; DAVIDSON, 2003).

Em geral, seus dutos e conexões são confeccionados em aço inoxidável ou, em menor escala, em titânio. Suas espessuras variam de 0,040 mm a 2,28 mm e seus diâmetros diversificados, de 3,2 mm a 38,1 mm (SERAFIN, 2001).

As soldagens são executadas em cabeçotes com câmara fechada, responsáveis pela manutenção dos componentes em posição durante o processo de união. A fonte de energia controla as principais variáveis como as correntes de base e de pico, velocidade de retardo de início de movimentação do eletrodo, sobreposição do cordão, auge e declive da amperagem e pré e pós-gás de proteção. O ciclo de soldagem desenvolve-se sob uma única revolução do eletrodo de tungstênio em juntas de topo com chanfro reto. Os aportes de energia, mantidos sob níveis extremamente baixos, originam juntas com propriedade próximas às do metal base (SERAFIN, 2001; BROWN; NEUMAN, 2001; HENON, 2002).

Não apenas a soldagem, mas as etapas de manuseio e de preparação das peças como o próprio local de execução dos ciclos de soldagem são de fundamental importância para a qualidade final do produto (SERAFIN, 2001; ORLOWSKI et al., 2004). Dados mais aprofundados são descritos em detalhes nos capítulos 3 e 5. A figura 2.16 exemplifica a soldagem em área limpa de um componente do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**.



Figura 2.16 – Soldagem orbital do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**

(Cortesia INPE/LIT)

2.1.3.4 Fornos e Caldeiras

Os altos índices de rejeição na união de componentes de fornos e caldeiras soldados manualmente indicam serem estes de responsabilidade direta de dificuldades de acesso a determinadas juntas, ou mesmo a problemas de restrição de espaço. Em ambas as situações, o soldador recorre a espelhos como recurso à realização dos trabalhos, de modo a visualizar a junta em todo o seu perímetro. Sob certas circunstâncias, trabalha-se com dois soldadores simultaneamente em uma mesma junta, de forma a eliminar as interrupções responsáveis pela elevação dos níveis de tensões nas regiões de união. Geralmente, os cordões são de baixa qualidade e, em sua maioria, sujeitos a retrabalhos com a conseqüente perda de produtividade (ASTRO

ARC POLYSOUDE, 2001; HENON, 2001a; HENON; WINSHIP, 2001; HENON; BROND, 1996b).

As altas temperaturas presentes nestas indústrias são igualmente um obstáculo à execução dos trabalhos manualmente. Provocam desconforto aos soldadores induzindo a queda da produtividade e da qualidade das juntas soldadas.

Recentemente, o TIG orbital vem sendo utilizado neste campo de atividades, nas fases de instalação e reparo de suas tubulações. Tal fato é resultado das inovações tecnológicas dos equipamentos como um todo, ou seja, a disponibilidade de cabeçotes de dimensões reduzidas conectados às fontes de soldagem mais acessíveis em termos de custos e providas de todos os meios para o preenchimento de chanfros (HENON, 2001a, 2001h; HENON; WINSHIP, 2001). A figura 2.17 exemplifica o emprego de cabeçotes orbitais compactos na soldagem de tubulações.



Figura 2.17 – Emprego de cabeçote orbital compacto em substituição à soldagem manual
(cortesia Arc Machines)

2.1.3.5 Nuclear

A indústria nuclear é uma das pioneiras na utilização da soldagem orbital em suas instalações devido à grande necessidade na obtenção de cordões de alta qualidade, haja vista a frequência e a intensidade a que estes são submetidos ao

fenômeno da corrosão, em particular a corrosão sob tensão (HENON, 2001a; HENON; BROND, 1996b).

Atualmente, em função das drásticas reduções na construção de novas usinas, o emprego de sistemas orbitais tem se limitado às operações de reparo ou de substituição de componentes deteriorados pelos ataques químicos (HENON; BROND, 1996b).

O desenvolvimento de cabeçotes especiais, (HENON; BROND, 1996b; HENON, 2004b), e a substituição dos antigos sistemas em fibra ótica pelas atuais câmeras instaladas na própria tocha para a visualização das operações de soldagem, permitem ao operador correções imediatas e precisas tanto dos periféricos quanto dos parâmetros de soldagem. Neste caso, os índices de produtividade são altíssimos (HENON, 2001a; HENON; BROND, 1996b). As figuras 2.18 e 2.19 apresentam duas situações distintas de soldagem orbital, por fusão e com adição de arame.



Figura 2.18 – Soldagem orbital em tubos de pequenas dimensões (por fusão)

(cortesia Arc Machines)

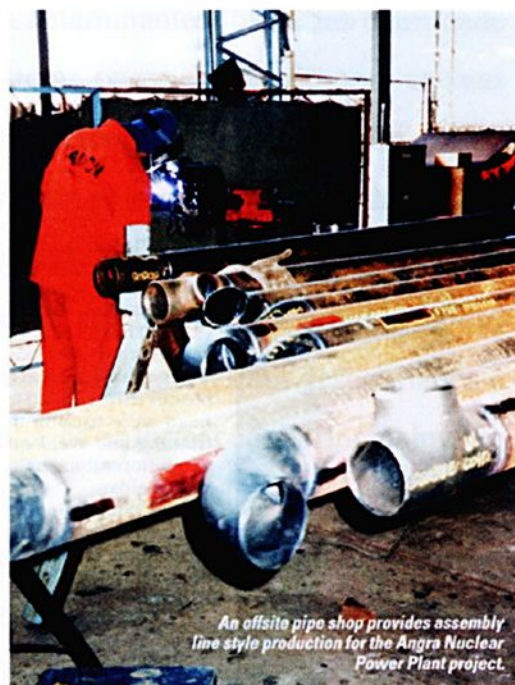


Figura 2.19 – Soldagem orbital em tubos espessos (com adição de arame)

(cortesia Arc Machines)

2.1.3.6 Pecuária Leiteira e Alimentícia

Tanto as indústrias pecuária leiteira como a alimentícia empregam, em sua maioria, os aços inoxidáveis da série 300 (polidos eletroliticamente) nas suas instalações, sendo que a união entre os vários componentes é efetuada através do processo de soldagem **TIG** orbital. As cervejarias (HENON, 2001a, 2001f, ERICKSON, 2003) são as precursoras na utilização desta tecnologia pelo reconhecimento de seus benefícios em termos da obtenção de sistemas com alto grau de pureza. Outros exemplos de usuários são os fabricantes de vinhos, de polpas e de sucos de frutas (HENON, 1999, 2001a).

Em ambas as indústrias assim como naquelas consideradas de alta pureza, como por exemplo a de semicondutores, é indispensável que as suas linhas de distribuição apresentem-se isentas de irregularidades internas, sobretudo nos pontos de união. O principal objetivo desta é o de evitar o acúmulo de contaminantes (bactérias e umidade dentre outros) nestas regiões, permitindo que o sistema opere de acordo com as suas especificações sem a ocorrência de deteriorações provenientes de ataques químicos ou mesmo o desprendimento de particulados responsáveis pela contaminação das linhas de produção (HENON, 1999, 2001a; HENON; BROND, 2001).

Apesar das inegáveis vantagens na aplicação da soldagem **TIG** orbital, muitas indústrias das áreas alimentícia e pecuária leiteira até então manifestam desconfiança e apreensão em relação ao seu emprego devido à falta de informações, principalmente em relação aos custos operacionais do processo.

A consciência em torno desta questão vem se modificando ao longo dos últimos anos, especialmente em função das novas diretrizes traçadas pelas indústrias de bioprocessamento (**ASME Bioprocessing Equipment Standard BPE-97**), que incluem métodos de padronização para as áreas de projeto e de fabricação de seus equipamentos, inclusive no tocante às tubulações. Temas como inspeção, qualificação, procedimentos de limpeza e de esterilização das linhas de produção são igualmente abordados neste documento.

Uma fonte complementar de informações refere-se às recém publicadas **Specification for Welding of Austenitic Stainless Steel Tube and Pipe System in Sanitary (Hygienic) Applications (AWS D18.1, 1999)** e **Weld Discoloration Levels on Inside of Austenitic Stainless Steel Tube (AWS D18.2, 1999)**, que fazem alusão às soldas em tubulações de aços inoxidáveis que estão em contacto permanente com os produtos para consumo humano ou animal. Os assuntos em pauta compreendem a qualificação, a fabricação e os requisitos de inspeção visual, que introduz um guia de comparação visual. Este é aplicado para especificar os critérios de descoloração superficial dos cordões de solda.

A criação de grupos voltados à normalização destes segmentos industriais tem ampliado os seus meios de ação, os quais compreendem os critérios de aceite das soldas bem como questões a ela relacionadas, como por exemplo o teor ideal de enxofre para os aços da série 300 e a porcentagem de descoloração permissível na zona termicamente afetada. Além destes, os próprios procedimentos das operações são postos em discussão, a fim de se aprimorar os quesitos qualidade e produtividade respectivamente. A figura 2.20 exemplifica o emprego da tecnologia orbital em uma tubulação de aço inoxidável. A soldagem emprega um cabeçote com câmara fechada.



Figura 2.20 – Soldagem orbital por fusão em tubulação de aço inox

(cortesia Arc Machines)

Os materiais empregados nas indústrias de bioprocessamento devem apresentar determinadas características que os habilitem para tal finalidade. A princípio, os aços inoxidáveis da série 300 são selecionados por desempenharem com segurança as funções que lhes são atribuídas, ou sejam, a compatibilidade com o meio a qual engloba temperatura, pressão e substâncias químicas, particularmente durante os procedimentos de limpeza e, sobretudo por serem inertes o suficiente para não afetarem a integridade do produto por meio de contaminações. Além destas, os aços austeníticos apresentam bons índices de soldabilidade, de usinabilidade e de conformação mecânica, propriedades importantes sob o ponto de vista de fabricação, pois auxiliam as fases de montagem das instalações.

2.1.3.7 Farmacêutica

A partir da década de noventa, a tecnologia orbital se sobrepôs à soldagem manual na fabricação de linhas de distribuição de água, gases e ar das indústrias farmacêuticas. Segundo dados recentes, o TIG orbital é empregado em 99% das operações de união (HENON; BROND, 1998; HENON; BROND, 2001; HENON; MUEHLBERGER; DE PIERRO, 2004a).

Em sua grande maioria empregam o aço inoxidável AISI 316_L, porém ligas à base de níquel (**Hastelloy**) são utilizadas sob condições de elevada resistência à corrosão. Sua principal desvantagem refere-se às etapas de faceamento, limpeza e montagem por serem mais trabalhosas e, portanto mais demoradas e custosas (HENON, 2001d).

Devido à grande variedade de diâmetros dos tubos (figura 2.21) utilizam-se tanto de cabeçotes com câmara fechada como os abertos para a execução das operações de soldagem, figura 2.22 (LITTLEWOOD; HENON, 2000; HENON, 2001d, 2001e). A fase de qualificação para comprovação da integridade das juntas soldadas engloba os testes de tração e de dobramento para a verificação dos níveis de resistência mecânica e da ductilidade dos cordões (HENON; BROND, 2001; HENON, 1999).



Figura 2.21 – Tubos de vários diâmetros

(cortesia Arc Machines)



Figura 2.22 – Soldagem orbital com cabeçote aberto

(cortesia Arc Machines)

Os trabalhos são desenvolvidos segundo os critérios da **BPE-97** e **AWS D18.1 e D18.2**. A presença de defeitos nas superfícies internas das juntas soldadas favorecem o crescimento de microorganismos, razão pela contaminação do sistema. Outras questões a ela associadas referem-se às dificuldades de execução da limpeza final das linhas (HENON, 1999; HENON; BROND, 2000; HENON; MUEHLBERGER; DE PIERRO, 2004a, 2004b).

Substâncias ácidas e cloretos dentre outros participam da composição de itens produzidos nas indústrias farmacêuticas. Conseqüentemente, a presença de oxidação nas zonas termicamente afetadas é bastante prejudicial ao sistema, uma vez que está vinculada à queda de resistência à corrosão. Em geral, relaciona-se este fenômeno à presença de oxigênio e de umidade e, em menor escala, aos tempos e vazões insuficientes de argônio para a proteção da raiz e ainda a presença de vazamentos ao longo do circuito (HENON, 1999; HENON; BROND, 2000; LITTLEWOOD; HENON, 2000). Adotam-se como medidas corretivas o emprego de fontes criogênicas e também a instalação de purificadores na linha de distribuição de gás. Como

resultado, reduzem-se os índices de contaminantes de ppm para ppb, eliminando-se por completo os pontos de oxidação (HENON; BROND, 2000; HENON; MUEHLBERGER; DE PIERRO, 2004a, 2004b).

A etapa de inspeção consiste apenas de um exame visual das juntas soldadas, sendo que apenas 20% do total dos cordões são observados com auxílio de um boroscópio (HENON; BROND, 1998; HENON; BROND, 2000; HENON, 2001d, 2001e, HENON; MUEHLBERGER; DE PIERRO, 2004b). Uma vez finalizadas e aprovadas, as linhas são pressurizadas com uma vez e meia a pressão de projeto e monitoradas durante um período de tempo pré-determinado, em geral, de quatro horas.

A etapa final consiste em se passivar a estrutura por completo. Esta técnica é empregada de modo a remover pontos passíveis de corrosão como também auxiliar na formação de uma camada superficial mais uniforme. A soldagem provoca rupturas na camada original, especificamente nas zonas fundidas e termicamente afetadas, provocando o comprometimento de todo o conjunto. Esta prática tem como objetivo restaurar as propriedades originais em termos de resistência à corrosão (HENON; BROND, 2000; HENON; MUEHLBERGER; DE PIERRO, 2004b).

2.2 TITÂNIO: PROPRIEDADES E SOLDAGEM

2.2.1 Introdução

O titânio está entre os quatro metais estruturais mais encontrados na crosta terrestre. Em sua grande maioria, as baixas concentrações inviabilizam a sua extração. Porém, a ocorrência de minerais como a ilmenita ($\text{FeO.TiO}_2 - 53\%$ de TiO_2) e o rutilo (TiO_2) favorecem, do ponto de vista econômico, o seu beneficiamento em função dos teores deste metal ali presentes (ASM, 1998).

Descoberto em meados de 1790 por **W. Gregor** (Inglaterra) e **M. H. Klaproth** (Alemanha), a sua utilização como ferro-liga para a siderurgia inicia-se a partir de

1906. O seu emprego como óxido, primeiramente na forma de pigmentos e posteriormente como revestimento para eletrodos em soldas elétricas datam de 1918 e de 1930 respectivamente. A partir de 1948 passa-se a produzir o titânio metálico em escala industrial, cujo pioneirismo é de responsabilidade da **Titanium Metals Company of America – TMCA** (ASM, 1998).

Desde então, a sua produção cresce a uma taxa média anual de aproximadamente 8% com algumas oscilações ao longo desse período, reflexos da natureza cíclica da indústria aeroespacial. O principal impedimento para crescimentos acima deste índice está relacionado aos custos de produção (SLG, 2001).

O processo **Kroll**, empregado para a obtenção de titânio metálico, envolve gastos energéticos altíssimos, da ordem de 40 a 50% do total dos custos envolvidos, ou seja, a energia necessária para a produção de uma tonelada de esponja de titânio é cerca de 16 vezes superior àquela despendida para a fabricação da mesma quantidade de aço (ASM, 1998).

Grande parte da produção de titânio destina-se às indústrias aeroespacial (nas áreas civil e militar), química e de eletricidade, sendo que os Estados Unidos da América e o Japão detêm mais de 70% do consumo total mundial (ASM, 1998; SLG, 2001).

Nos últimos 10 anos houve um aumento significativo em relação à demanda de titânio em diversos segmentos industriais. 50% do seu consumo mundial, aproximadamente 35 a 40 mil toneladas por ano, destinam-se a aplicações não relacionadas ao campo aeroespacial. Como exemplo, citam-se a indústria automotiva, a medicina (instrumentos cirúrgicos, aparelhos ortopédicos e esterilizadores), a construção civil e a indústria de bens de consumo (pulseiras de relógios, tacos de golfe, raquetes de tênis, etc) (BOYER, 1996; SLG, 2001).

Atualmente, desenvolvem-se duas frentes de pesquisas com o objetivo de implementar a utilização do titânio e suas ligas. A primeira delas diz respeito à produção de ligas mais acessíveis em termos de custos, e a segunda, potencialmente mais vantajosa, por meio de melhorias ao longo do ciclo produtivo. O barateamento das ligas de titânio é feito por meio da adição de elementos como o Fe (Ti-6Al-1,7Fe-0,1Si) ou Fe-Mo (Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al) de custos mais baixos quando comparados

ao vanádio, por exemplo. Ambas as ligas estão sendo utilizadas na indústria automotiva, a primeira em substituição à tradicional Ti-6Al-4V. Os custos da segunda são equivalentes aos do titânio comercialmente puro, porém com a seguinte ressalva: os seus níveis de resistência atingem cerca de 1500 MPa após o ciclo de tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento, ao passo que os demais variam de 240 MPa (Ti CP grau 1) a 550 MPa (Ti CP grau 4) (BOYER, 1996; ASM, 1998).

Reduções nos custos operacionais consistem de melhorias ao longo do ciclo de produção, ou seja, aprimoramentos nas propriedades de usinagem, de conformação, de extrusão ou mesmo de união das ligas em desenvolvimento (BOYER, 1996).

Cabe aqui ressaltar o emprego de ligas de titânio em aplicações relacionadas à bioengenharia. Originalmente, as ligas inoxidáveis e as ligas a base de cobalto e de titânio, em particular Ti-6Al-4V-ELI, eram as de maior emprego neste segmento industrial. Aos poucos, a preferência pelas ligas de titânio em relação às demais advém de propriedades como a maior resistência à corrosão, melhores resultados no tocante a biocompatibilidade e menores índices do módulo de elasticidade, ainda que bem superiores aos valores apresentados pelos ossos ($E_{\text{ligas inox}} = 205 \text{ GPa}$; $E_{\text{ligas Co}} = 230 \text{ GPa}$; $E_{\text{Ti-6Al-4V}} = 110 \text{ GPa}$; $E_{\text{ossos}} = 10\text{-}30 \text{ GPa}$).

Recentemente, novas ligas como Ti-6Al-7Nb e Ti-5Al-2,5Fe são desenvolvidas de modo a substituir a tradicional Ti-6Al-4V em resposta a questões relacionadas as reações adversas com tecido humano por parte do vanádio.

Melhorias significativas em termos de biocompatibilidade associada a menores índices do módulo de elasticidade ($E_{\text{segunda geração ligas Ti}} = 74\text{-}85 \text{ GPa}$) são atingidos com a introdução de uma segunda geração de ligas de titânio as quais compreendem Ti-12Mo-6Zr-2Fe, Ti-15Mo-5Zr-3Al, Ti-13Nb-13Zr e finalmente Ti-35Nb-5Ta-7Zr (LONG; RACH, 1998).

2.2.2 Principais características

O titânio é empregado no estado comercialmente puro ou em combinação com outros elementos constituindo as ligas. Apresenta características únicas, responsáveis pelo grande interesse de diversos segmentos industriais, particularmente a indústria aeroespacial, precursora no emprego de componentes de titânio em aeronaves e posteriormente em veículos espaciais.

As ligas de titânio comumente empregadas possuem uma alta relação resistência-peso, uma vez que atingem níveis de resistência mecânica próximos a de alguns aços inoxidáveis, porém com 60% da massa específica dos mesmos. Essas propriedades asseguram ao titânio uma posição de destaque como metal estrutural, em específico na indústria aeroespacial (BOYER, 1996; AMS, 1998).

Uma segunda particularidade é o seu elevado ponto de fusão [1668°C], superior ao dos aços [1490°C] e, em maior escala ao das ligas de alumínio [660°C] assegurando-lhe maior estabilidade em operações sob altas temperaturas, da ordem de 100 a 400°C (AMS, 1998).

A excelente resistência à corrosão do titânio e suas ligas provém da sua grande afinidade química pelo oxigênio. Resulta na formação de uma camada superficial estável, contínua, altamente aderente e protetora de óxido. Sua formação ocorre de maneira espontânea, a partir do contacto entre a superfície exposta do metal com o ar. Esse fenômeno é tão mais intenso quanto maiores os níveis de temperatura. Entretanto, valores da ordem de 426°C ou superiores, a resistência à oxidação decai rapidamente tornando o metal susceptível a fragilização (AWS, 1984; BRINGAS, 1997; LATHABAY; JARVIS; BARTON, 2001).

O comportamento da camada de óxido sob condições de corrosão varia de acordo com a composição química da liga. A presença de elementos como ferro e o enxofre aceleram as taxas de corrosão. De modo adverso, o níquel e o paládio minimizam o ataque químico (AMS, 1998).

As suas propriedades anticorrosivas, superiores às dos aços inoxidáveis, asseguram a sua utilização na indústria química, principalmente no processamento e



no transporte de soluções cloradas. Igualmente, o titânio resiste de modo satisfatório aos cloretos marinhos, fato que favorece a sua utilização nas indústrias naval e petroquímica (AMS, 1998).

2.2.3 Elementos de liga

Os elementos de liga são adicionados intencionalmente para fins de melhoria nas propriedades mecânicas. A estrutura usual de classificação dos elementos de liga do titânio está relacionada à tendência que cada elemento exerce na estabilização das fases α e β . Igualmente, podem ser classificados como elementos de liga substitucionais ou intersticiais conforme o tipo de solução sólida formada com o titânio. Os principais elementos de liga do titânio estão relacionados na tabela 2.2.

Os elementos alfa estabilizadores têm como principal finalidade conferir resistência mecânica à fase α através do endurecimento por solução sólida. Os elementos beta estabilizadores endurecem a fase β também por solução sólida, mas têm como principal finalidade estabilizar a fase β em baixas temperaturas. Os elementos ditos neutros - estanho e zircônio - têm como principal função aumentar a resistência das ligas e, como papel secundário, a estabilização das fases (AWS, 1984; LATHABAI; JARVIS; BARTON, 2001).

Tabela 2.2 – Classificação dos elementos de liga presentes nas ligas de titânio (AWS, 1984)

	Substitucional	Intersticial
Estabilizador da fase alfa (α)	Al	O, N, C
Neutro	Sn, Zr	-
Estabilizador da fase beta (β)	Cr, Nb, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pa, Si, W, Ta, V	H

2.2.4 Titânio comercialmente puro (TiCP)

O titânio comercialmente puro apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta (fase α) abaixo de 883°C. Acima desta temperatura, o titânio apresenta uma transformação alotrópica onde a estrutura estável passa a ser cúbica de corpo centrado (fase β). A temperatura de transformação alotrópica, também conhecida como **beta-transus**, e a cinética de transformação $\beta \rightarrow \alpha$ durante o resfriamento, são igualmente afetadas pela quantidade de impurezas e pela adição de elementos de liga. Esta transformação pode ocorrer de forma difusional ou através de transformação martensítica (AWS, 1984; BRINGAS, 1997).

Caracteriza-se por conter em sua composição de 99% a 99,5% de titânio, ferro e alguns elementos intersticiais ditos impurezas, hidrogênio, nitrogênio, carbono e o mais importante deles o oxigênio, dos quais possui grande afinidade. O TiCP está disponível em vários graus (tabela 2.3) de acordo com os percentuais dos seus constituintes. Embora restritos a pequenas quantidades, esses elementos exercem forte influência nas propriedades mecânicas do titânio; o oxigênio e o nitrogênio de modo incisivo, ao passo que o ferro e o carbono em menor grau (AWS, 1984; BRINGAS, 1997; AMS, 1998; LATHABAI; JARVIS; BARTON, 2001).

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas mínimas e teores máximos em massa de elementos intersticiais permitidos nas ligas comercialmente puras de titânio (ASTM B 338-03)

	N %	C %	O %	H %	Fe %	LR (MPa)	LE 0,2% (MPa)	ϵ %	RA %
Grau 1	0,03	0,10	0,18	0,01	0,20	240	170-310	24	30
Grau 2	0,03	0,10	0,25	0,01	0,30	345	275-450	20	30
Grau 3	0,05	0,10	0,35	0,01	0,30	440	380-550	18	30
Grau 4	0,05	0,10	0,40	0,01	0,50	550	480-655	15	25

Nota-se que, à medida que os teores de oxigênio e nitrogênio aumentam, as tensões limite de escoamento e de resistência mecânica crescem e, em contrapartida, a ductilidade diminui gradativamente. Uma outra característica das ligas comercialmente puras está relacionada ao teor de hidrogênio, limitado a 0,01%. Quantidades acima do especificado conduzem a fragilização através da formação de hidretos, mesmo à temperatura ambiente (BRINGAS, 1997; AMS, 1998).

As propriedades das ligas de TiCP são ditadas pelos baixos níveis de resistência mecânica associados à alta ductilidade. Adições intencionais desses elementos são comumente utilizadas para ganhos nos limites de resistência e de escoamento acompanhados de quedas na ductilidade.

As ligas de titânio comercialmente puras - graus 1 a 4 - caracterizam-se pela boa soldabilidade, uma vez que apresentam baixos coeficientes de condutividade térmica e de expansão térmica linear facilitando as operações de soldagem. São utilizadas em aplicações em que a resistência mecânica não é a principal exigência, e sim a resistência à corrosão associada à alta ductilidade (AWS, 1984; AMS, 1998).

As ligas de titânio puras não são tratáveis termicamente, porém são mais acessíveis em termos de custos e geralmente com maiores níveis de resistência à corrosão que as demais (BRINGAS, 1997). Em sua maioria são empregadas em trocadores de calor, indústrias químicas, válvulas, tanques de armazenamento e em linhas pressurizadas de fluidos especiais, como por exemplo os Sistemas Propulsores de Satélites e de Veículos Lançadores (BOYER, 1996).

A microestrutura do TiCP consiste de grãos de fase alfa, na qual é possível a presença de pequenas quantidades de fase beta como resultado da presença de ferro em sua composição. Grãos de morfologia equiaxial ou acicular são característicos de estruturas recozidas (AWS, 1984; BRINGAS, 1997).

2.2.5 Ligas de titânio

As ligas de titânio são classificadas de acordo com as fases presentes, ou seja, baseadas nas suas microestruturas no estado recozido. Suas variações dependem única e exclusivamente dos teores relativos dos constituintes estabilizadores das fases alfa e/ou beta. Constituem-se de 4 grandes grupos (AWS, 1984; BRINGAS, 1997; AMS, 1998; LATHABAY; JARVIS; BARTON, 2001):

- ligas comercialmente puras,
- ligas alfa,
- ligas beta, e
- ligas alfa-beta.

A seguir são apresentadas, de modo resumido, as suas principais características, exceto das ligas comercialmente puras já descritas anteriormente.

As ligas alfa caracterizam-se por apresentarem em suas composições elementos como o alumínio e, em menores quantidades, o oxigênio, o nitrogênio e o carbono. Não são tratáveis termicamente para ganhos de resistência e, em alguns casos, associam-se trabalhos de deformação a frio com tratamentos de recozimento para controle de tamanho de grãos (AWS, 1984).

Basicamente, sua microestrutura é composta de fase alfa, porém pequenas partículas de fase beta podem estar presentes devido a impurezas, principalmente o ferro, ou então pelas pequenas quantidades (1 a 2%) de molibdênio ou vanádio adicionadas intencionalmente (BRINGAS, 1997; AMS, 1998).

Em função dos baixos índices de resistência aos ataques químicos, algumas ligas apresentam paládio em sua composição, elemento responsável por melhorias em relação a resistência à corrosão. Adições de níquel e molibdênio conferem maiores índices de resistência mecânica e igualmente à corrosão. Cabe ressaltar que as ligas com teores extra-baixos de impurezas, denominadas ligas **ELI – extra low intersticial**, são aplicadas exclusivamente em condições de elevada ductilidade e/ou tenacidade (BRINGAS, 1997).



Apresentam boa soldabilidade, bons níveis de tenacidade mesmo sob temperaturas criogênicas (especialmente as ligas **ELI**), níveis de resistência mecânica superiores às ligas comercialmente puras, porém mais susceptíveis aos ataques químicos, excelente índices de fluência e oxidação sendo indicadas para aplicações sob altas temperaturas (aproximadamente 500°C) (AWS, 1984; BRINGAS, 1997).

Em sua maioria são empregadas como componentes estruturais, palhetas de motores a jato, e numa série de aplicações industriais como quadros de bicicletas e tacos de golfe (BOYER, 1996; AMS, 1998).

As ligas alfa-beta caracterizam-se por conterem elementos estabilizadores alfa e beta, o último em quantidades suficientes que permitam o desenvolvimento de microestruturas com porções desta fase variando de 10 a 50% em temperatura ambiente (BRINGAS, 1997).

Essas ligas desenvolvem uma grande variedade de microestruturas por meio de ciclos de tratamentos térmicos, onde é possível o controle da distribuição e morfologia de ambas as fases. Há duas variedades de ligas alfa-beta cuja classificação depende basicamente da porcentagem de elementos beta estabilizadores presentes. As ligas com baixos teores desses elementos apresentam respostas moderadas aos tratamentos térmicos, porém boa soldabilidade. As ligas Ti-6Al-4V e Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo são exemplos mais comumente empregados. Ao contrário das anteriores, as ligas com altas quantias são de difícil soldabilidade, entretanto com excelentes resultados em relação aos ciclos térmicos de solubilização seguido de envelhecimento. Dentre as suas variantes têm-se as ligas Ti-6Al-6V-2Sn e Ti 6Al-2Sn-4Zr-6Mo (BRINGAS, 1997).

As ligas alfa-beta atingem excelentes níveis de resistência mecânica, de resistência à corrosão e de tenacidade (AWS, 1984; BRINGAS, 1997). Envelopes Motores de Veículos Lançadores, componentes estruturais de aeronaves, peças de turbinas, componentes sujeitos a atmosfera marinha e materiais para implantes cirúrgicos (por serem biocompatíveis) são alguns exemplos de aplicações das ligas alfa-beta (BOYER, 1996; AMS, 1998).

As ligas beta são tratáveis termicamente atingindo níveis elevados de resistência mecânica, principalmente quando associados deformações a frio com ciclos de solubilização, têmpera e envelhecimento. Apresentam altos níveis de conformação



mecânica, valores de tenacidade superiores aos das ligas alfa-beta, embora sob condições de elevada resistência mecânica exibam baixa tenacidade. Em relação às demais, são as ligas de mais altas massas específicas.

Suas aplicações incluem as ligas Ti-10V-2Fe-3Al e Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al dentre outras. Em geral, são empregadas em componentes de alta resistência em aeronaves, tubos, rebites, molas e de uso em odontologia (ortodontia) (AMS, 1998).

A seguir, são apresentadas, a título de ilustração (tabela 2.4) algumas propriedades mecânicas e físicas de diversas ligas de titânio.

Tabela 2.4 – Exemplos de algumas propriedades mecânicas e físicas para os diferentes grupos de ligas titânio (SMITH; THREADGIL; GITTO, 1999a)

Tipo de liga	alfa	alfa-beta (média resistência)	alfa-beta (alta resistência)	beta (altíssima resistência)
Limite escoamento (0,2%) (MPa)	345 - 480	480 - 550	725 - 1000	1100 - 1400
Limite resistência (MPa)	480 - 620	600 - 650	830 - 1100	1200 - 1500
Alongamento (%)	20 - 25	15 - 20	8 - 15	6 - 12
Dureza (HV)	160 - 220	200 - 280	300 - 400	360 - 450
Massa específica (g/cm ³)	4,51	4,48 - 4,51	4,43 - 4,60	4,81 - 4,93
Coefficiente expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	8,9	8,3	8,9	7,2 - 9,5
Condutividade térmica (W/mK)	22	8,0	6,7	6,3 - 7,6
Calor específico (J/kg°C)	525	544	565	490 - 524

Obs. : (100 MPa \simeq 15 ksi)

Finalizando, as ligas de titânio comercialmente puras apresentam boas propriedades de resistência à fluência abaixo dos 315°C. As ligas alfa são em geral estáveis pelo período de 1000 horas a níveis de temperatura de até 540°C, ao passo

que as ligas alfa-beta recozidas permanecem com as suas características inalteradas até os 370°C. Uma vez tratadas termicamente, essas propriedades se estendem até cerca de 425°C (BRINGAS, 1997).

2.2.6 Soldabilidade do titânio e suas ligas

A grande maioria das ligas titânio é soldada por processos de união por fusão. Devido a sua grande reatividade quando aquecido, as contaminações procedentes do ar e de materiais carbonosos conduzem o metal a fragilização. Conseqüentemente, procedimentos de limpeza associados a condições de proteção eficientes produzem cordões de solda de acordo com os padrões mais rigorosos em termos de qualidade (SMITH; THREADGIL; GITTOS, 1999a).

Não faz parte do escopo desta pesquisa descrever os principais processos empregados na união do titânio e suas ligas. Algumas publicações editadas pelo **The Welding Institute – TWI** fazem alusão a estes processos relacionados a seguir (SMITH; THREADGIL; GITTOS, 1999a; 1999b):

- **Tungsten Inert Gas Welding;**
- **Metal Inert Gas Welding;**
- **Plasma Arc Welding;**
- **Laser Welding;**
- **Electron Beam Welding;**
- **Resistance Spot Welding;**
- **Resistance Seam Welding;**
- **Rotary Friction Welding;**
- **Friction Stud Welding;**
- **Radial Friction Welding,**
- **Linear Friction Welding;**
- **Orbital Friction Welding,**
- **Friction Stir Welding;**

- **Third Body Friction Welding;**
- **Friction Taper Plug Welding;**
- **Conventional Diffusion Bonding;**
- **Electron Beam Diffusion Bonding;**
- **Flash Butt Welding;**
- **Homopolar Welding;**
- **Explosive Bonding;**
- **Conventional Brazing;**
- **Transient Liquid Phase Bonding;**
- **Soldering; e**
- **Adhesive Bonding.**

As ligas comercialmente puras e as ligas alfa apresentam características comuns em termos de soldabilidade. Em geral, são unidas no estado recozido, porém aquelas deformadas a frio apresentam queda nos níveis de resistência mecânica na zona termicamente afetada. Tal fato deve-se ao recozimento localizado proveniente dos ciclos térmicos de soldagem. Embora acompanhadas de reduções em determinadas propriedades, as juntas soldadas em sua maioria apresentam níveis aceitáveis de resistência e ductilidade. Casos específicos envolvem o tratamento térmico pós soldagem de alívio de tensões (AWS, 1984; BRINGAS, 1997).

As ligas alfa-beta podem ser soldadas nos estados recozido ou parcialmente envelhecido, sendo o envelhecimento completado durante o tratamento térmico pós soldagem de alívio de tensões. Em geral, seus cordões são caracterizados pela baixa ductilidade, resultado de transformações de fase nas zonas fundida ou termicamente afetada com formação de estrutura martensítica. Empregam-se soldagens autógenas ou com adição de material. A seleção do metal de adição baseia-se no comportamento mecânico das juntas soldadas, quer seja em termos de resistência ou de ductilidade (AWS, 1984; BRINGAS, 1997).

As uniões das ligas beta desenvolvem-se nos estados recozido ou solubilizado. As juntas na condição como soldada apresentam baixos níveis de resistência mecânica, compensados por meio de ciclos de tratamentos térmicos pós soldagem de solubilização seguido de envelhecimento (AWS, 1984; BRINGAS, 1997).

2.2.7 Soldagem do titânio comercialmente puro

O titânio comercialmente puro ao ser soldado exibe uma tendência para o crescimento de grãos. O controle dos parâmetros de soldagem deve ser adequado, pois a tenacidade da junta, especialmente do metal de solda (zona fundida), pode ser prejudicada caso ocorra um crescimento excessivo dos grãos. A maior solubilidade do hidrogênio na fase β minimiza o teor desse elemento na fase α , reduzindo o risco de fragilização. Portanto, a presença de pequenas quantidades de ferro (inferior a 5%) e de alguns outros elementos beta-estabilizadores no metal de solda é benéfica, pois favorece a formação de pequenas quantidades de fase β ; contudo, acima de certos limites, a presença desses elementos beta-estabilizadores pode prejudicar a resistência à corrosão (AWS, 1984).

2.2.8 Precauções necessárias à soldagem do titânio

A qualidade da preparação das juntas, os procedimentos de limpeza e de soldagem exercem um papel decisivo na qualidade final da junta soldada. Após a preparação da junta, recomenda-se remover óleos, graxas, e materiais estranhos que possam contaminar e conseqüentemente fragilizar a junta soldada. O desengraxe é normalmente utilizado empregando solução alcalina, álcool ou acetona (AWS, 1984).

A decapagem química é utilizada para a remoção da camada de óxido, em geral soluções aquosas de ácidos nítricos e fluorídricos. Métodos mecânicos, como por exemplo o jateamento abrasivo, são igualmente empregados, porém os métodos químicos são os mais eficientes (SMITH; THREADGILL; GITTO, 1999a, 1999b).

Devido a sua alta reatividade acima dos 426°C, é necessário suprimento de gás inerte adicional para proteção das partes aquecidas das peças durante o ciclo de soldagem. A proteção da raiz deve ser igualmente rigorosa. Em aplicações onde a contaminação é um fator crítico, a soldagem deve ser efetuada no interior de câmara

previamente purgada e então preenchida com gás inerte de alta pureza ou misturas destes (AWS, 1984).

2.2.9 Verificação da qualidade das soldas de titânio

A dureza do cordão de solda usualmente presta-se como base para as normas de aceitação de soldas de titânio, sendo a coloração do cordão muito utilizada como indicador de contaminação (SMITH; THREADGILL; GITTOS, 1999a, 1999b). Testes destrutivos podem ser usados em corpos de prova; entretanto, em testes de produção, a análise do sucesso da proteção gasosa tem sido a coloração da solda, cujo grau de severidade é apresentado segundo os dados da tabela 2.5.

Tabela 2.5– Regras para aceite de soldas de titânio baseadas na cor do cordão de solda (SMITH; THREADGILL; GITTOS, 1999a, 1999b)

Coloração	Interpretação
Prateada	Proteção adequada; satisfatória
Dourado claro	Pequena contaminação; aceitável
Dourado escuro	Pequena contaminação, aceitável
Azul escuro	Maior contaminação; aceite depende da aplicação
Azul claro	Grande contaminação; geralmente inaceitável
Azul acinzentado	Índices elevados de contaminação; inaceitável
Cinza	Índices elevados de contaminação; inaceitável
Branco	Índices elevados de contaminação; inaceitável

Estudos recentes a respeito da contaminação pelo ar de soldas de titânio comercialmente puro concluíram que este método não é de todo confiável, haja vista as várias alterações na seqüência das cores por parte de diversos órgãos competentes. Um segundo método para avaliação da contaminação em juntas soldadas de titânio refere-se a medições de dureza nas diferentes regiões presentes da junta soldada, uma

vez que se correlacionou um aumento nos valores de dureza com a elevação nos índices de contaminação. Essa técnica mostrou-se ineficiente perante as ligas com adições de elementos, como por exemplo a liga Ti-6Al-4V. Pesquisas concentram-se no desenvolvimento de técnicas alternativas de ensaios não destrutivos cuja principal frente de trabalho baseia-se em aparelhos portáteis de inspeção através de campos eletromagnéticos (SMITH; THREADGILL; GITTO, 1999b).

2.2.10 Defeitos associados à soldagem

Os processos de soldagem por fusão são amplamente empregados na união do titânio e suas ligas. Em geral, a porosidade, a fragilização e as trincas associadas às contaminações são os principais defeitos presentes nas juntas soldadas desses materiais (SMITH; THREADGILL; GITTO, 1999c).

A porosidade é o defeito mais freqüente dentre todos. Sua presença está vinculada ao aprisionamento de gases nas regiões interdendríticas do metal de solda durante a fase de solidificação. No titânio e suas ligas, o hidrogênio é a principal causa da formação da porosidade, cujas principais fontes derivam do óxido superficial (camada higroscópica) do próprio metal base, do metal de adição, do gás de proteção ou mesmo da umidade presente no arco elétrico. Métodos de prevenção incluem a limpeza eficiente das bordas das juntas e dos consumíveis, além do emprego de gases especiais com teores extremamente baixos de impurezas (TWI, 1998; SMITH; THREADGILL; GITTO, 1999c).

As ligas de titânio são também susceptíveis a formação de hidretos, responsáveis pelas trincas na zona termicamente afetada, mesmo sob baixas concentrações de hidrogênio. Outros efeitos ocasionados pelos hidretos são as reduções na ductilidade, na tenacidade e na resistência à fadiga (TWI, 1998; SMITH; THREADGILL; GITTO, 1999c).

A fragilização em ligas de titânio pode ser motivada por meio da absorção de gases (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio) quando expostas a temperaturas superiores a



426°C, ou ainda pela dissolução de contaminantes como as partículas de ferro presentes sob a forma de poeira depositada sobre a superfície dos componentes a soldar. Quando não removidas, essas partículas são dissolvidas durante o ciclo de soldagem reduzindo a resistência à corrosão ou fragilizando o componente soldado (TWI, 1998; SMITH; THREADGILL; GITTOS, 1999c).

As partículas de ferro são igualmente prejudiciais na zona termicamente afetada devido à formação de eutéticos, responsáveis pela presença de microtrincas nessa região, além de atuarem como pontos preferenciais de corrosão (TWI, 1998; SMITH; THREADGILL; GITTOS, 1999c).



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

O metal base empregado nas fases de levantamento de parâmetros, de qualificação e de soldagem do Sistema Propulsor é o titânio comercialmente puro (grau 2), de procedência chinesa, sob a forma de tubos sem costura, de diâmetro e espessura iguais a $6,0 \pm 0,1$ mm e $1,0 \pm 0,05$ mm respectivamente.

Suas paredes interna e externa apresentam-se isentas de irregularidades resultantes de controles inadequados ao longo do ciclo de fabricação (riscos, amassados, trincas, furos, etc) ou inerentes ao próprio material (inclusões não metálicas).

Suas tolerâncias não devem transpor os limites acima especificados, e a sua composição química é apresentada na tabela 3.1. Dados adicionais referentes ao metal base encontram-se no anexo A. As especificações dos tipos de testes e ensaios realizados para o controle de qualidade durante a fabricação dos tubos não são fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1 - Composição química (porcentagem em massa)

Elementos	Fe	S	C	N	H	O	Ti
Porcentagem	0,30	0,15	0,10	0,03	0,015	0,015	restante

3.2 MÉTODOS

O sucesso da tecnologia orbital aplicada ao setor espacial não depende unicamente da programação dos principais parâmetros de soldagem, mas igualmente de uma série de condições de contorno (composição química do material, requisitos de

montagem, tipo e pureza dos gases, tipo e geometria do eletrodo dentre outros) que, em conjunto, proporcionam consistência e qualidade aos resultados. Desta forma, devido ao grande número de variáveis envolvidas nas etapas de preparação do metal base e de soldagem propriamente dita, estabelece-se a seguinte seqüência de tarefas:

- controle ambiental;
- preparação do metal base (seleção, corte e faceamento);
- procedimentos de limpeza;
- alinhamento;
- eletrodo de tungstênio – tipo, geometria, dimensões e instalação;
- gases de proteção e de purga - controle da pressão do gás de purga;
- ponteamento manual;
- levantamento de parâmetros de soldagem; e
- qualificação.

A seguir são apresentadas cada uma das fases, em separado, vinculadas aos seus respectivos equipamentos.

3.2.1 Controle ambiental

O ciclo de fabricação de sistemas de ultra-alta pureza do qual a soldagem é parte fundamental, requer um controle preciso não somente de suas etapas como também do ambiente em que é produzido. Assim sendo, o Laboratório de Soldagem do INPE/LIT dispõe de equipamentos específicos para esse fim, responsáveis pela manutenção de umidade, temperatura e controle de particulados nas faixas de 40 a 50%, de 18 a 22°C e 10000, respectivamente, conforme as especificações chinesas (NORMAS CHINESAS a e b).

As soldagens bem como a limpeza final são realizadas nas dependências deste Laboratório. As operações de corte e de faceamento são desenvolvidas em uma sala contígua à de soldagem, enquanto que a decapagem e a embalagem das peças no Laboratório de Contaminação do próprio Instituto.



Os técnicos envolvidos na soldagem utilizam-se de vestimentas especiais, toucas, pantufas e luvas apropriadas para o manuseio dos tubos de titânio. Além destes cuidados, os equipamentos ali presentes estão envoltos por capas removidas momentos antes da sua utilização. Cabe salientar que as bancadas de trabalho são revestidas por chapas polidas de aço inoxidável, e carpetes especiais posicionados em locais estratégicos auxiliam no controle de particulados ao nível do piso. A figura 3.1 apresenta o Laboratório de Soldagem com os seus respectivos equipamentos.



Figura 3.1 - Laboratório de Soldagem

- 1 – Fonte de soldagem*
- 2 – Equipamento de limpeza final*
- 3 – Equipamentos de contagem de particulados*

3.2.2 Preparação do metal base (seleção, corte e faceamento)

Em função dos rigorosos padrões em termos de qualidade dos cordões de solda, a presença de frestas entre os componentes a soldar é motivo de rejeição segundo os critérios praticados no setor aeroespacial. Igualmente, deformações, ovalizações e variações de espessura ao longo das juntas induzem a resultados inconsistentes (MANNION; HEINZMAN, 1999a; MANION, 1999, 2000). Baseado nestas informações, são necessários controles rígidos nas especificações dos materiais quanto às tolerâncias dimensionais bem como em relação à preparação das juntas, obrigatoriamente faceadas em equipamentos apropriados.

Inicialmente, seleciona-se através de inspeções visuais parte dos tubos para a confecção dos corpos-de-prova. Cortam-se as peças em comprimentos adequados, figura 3.2, seguido de faceamento de ambas as extremidades, respeitando-se as exigências em termos de perpendicularidade ($<0,02\text{mm}$), de circularidade da seção ($<0,05\text{mm}$), ausência de rebarbas e de adoçamentos das bordas, conforme apresenta a figura 3.3. A seguir, injeta-se argônio no interior das mesmas para a remoção completa dos resíduos procedentes destas operações.

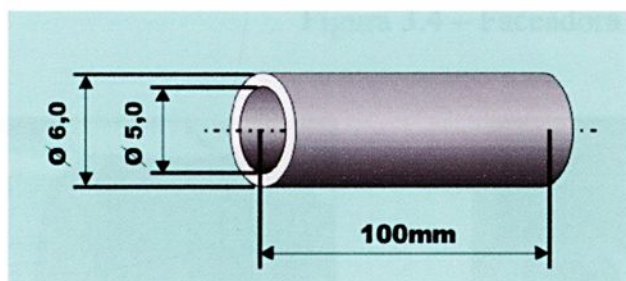


Figura 3.2– Dimensões finais



Figura 3.3 – Condições de faceamento

O equipamento empregado neste segmento consiste de uma faceadora portátil, modelo FSE 1.0 (**E.H. Wachs**), de alta precisão, utilizada em operações de faceamento de tubos cujos diâmetros externos variam de 3,17 mm a 25,4 mm. Em função de suas características, é empregada na fabricação de componentes de sistemas de alta pureza, os quais envolvem o uso de soldagens automáticas.

Dispõe de um sistema único de centralização, fixação e micro-ajustes que permite que as extremidades dos tubos sejam faceadas automaticamente, sem que haja qualquer tipo de comprometimento da peça em termos de deformação. As figuras 3.4, 3.5 e 3.6 mostram detalhes da ferramenta, como por exemplo a abertura de 180° que

facilita a visão por parte do operador e o micrômetro, recurso de grande utilidade em situações de precisão.

Este equipamento é projetado para faixa de espessuras de 0,254 mm até 6,35 mm. A velocidade de rotação atinge o seu máximo a 600 rpm. Uma vez finalizada a operação de faceamento, as bordas dos tubos estão livres de rebarbas e na configuração final para a soldagem, conforme visto na figura 3.7.

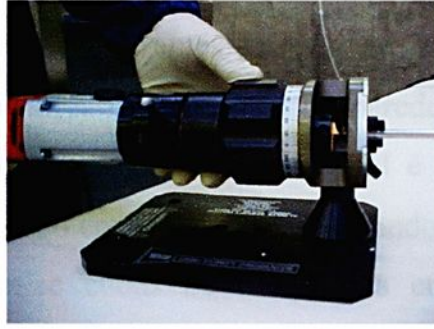


Figura 3.4 – Faceadora de tubos

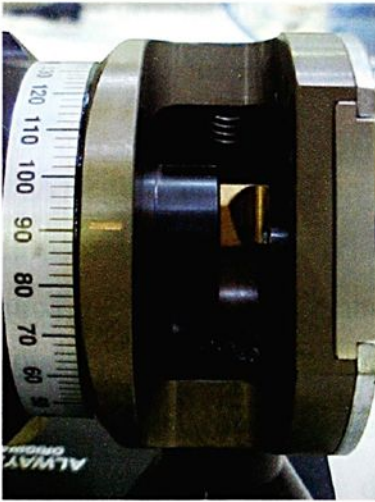


Figura 3.5 – Detalhes da janela e do micrômetro

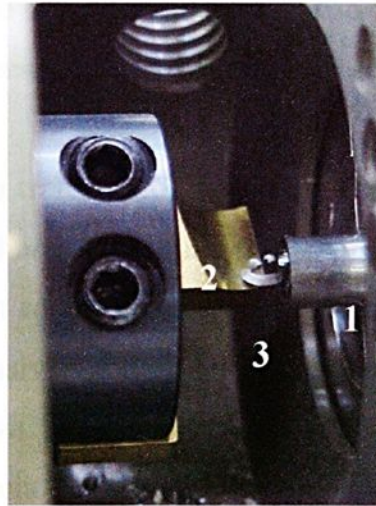


Figura 3.6 – Faceamento do tubo

- 1 - Tubo
- 2 - Ferramenta
- 3 - Cavaco

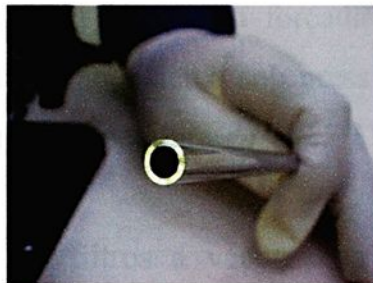


Figura 3.7 – Aspecto do tubo após faceamento

3.2.3 Procedimentos de limpeza

O primeiro consiste na decapagem química, cuja principal finalidade é a remoção do óxido superficial. Testes iniciais delimitam o tempo médio de ataque através de banhos sucessivos dos corpos-de-prova em solução ácida (ácido nítrico 70%, ácido fluorídrico 50% e água com frações distintas de 15, 3 e 82 partes por volume respectivamente). Estipulam-se diferentes tempos de imersão (1, 2 e 3 minutos), efetuando-se leituras dos valores da espessura de parede e dos diâmetros externo e interno após os ataques. O tempo considerado ideal é aquele cujas tolerâncias de projeto são mantidas, neste caso em particular, 90 segundos.

Nesta fase empregam-se cubas ou recipientes em polietileno ou vidro, de dimensões compatíveis com as peças, para a realização do procedimento de limpeza química, descrita com detalhes no capítulo 5 intitulado Soldagem do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**. Cabe aos operadores o uso de luvas nitrílicas, resistentes a ácidos e solventes, e a execução das atividades em capela com sistema de exaustão.

A seguir, os corpos-de-prova são transferidos para uma estufa para a secagem, onde permanecem pelo período de 2 horas sob uma temperatura de 50 a 60°C. Em seguida, os mesmos são embalados em sacos de polietileno preenchidos com argônio (99,999%) impedindo, desta forma, possíveis fontes de contaminação.

Em seqüência, efetua-se a limpeza final (ou limpeza interna) dos componentes para a remoção completa de possíveis fontes de contaminação. Emprega-se um equipamento desenvolvido especificamente para sistemas de alta pureza, modelo ELIT 2 (**Invap**), conforme visto em detalhes na figura 3.8.

O processo consiste na circulação forçada de álcool isopropílico P.A. pelo interior das peças conectadas ao sistema sob pressão de nitrogênio gasoso a $1,5 \pm 0,5$ bar. Este se encontra a uma temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$, e o seu grau de pureza mínima é da ordem de 99,995%.

O aparelho dispõe de filtros a vácuo distribuídos pelo circuito de limpeza permitindo que, ao longo do processo, amostras do líquido sejam coletadas em

membranas filtrantes e analisadas em um microscópio ótico através da técnica de contagem de partículas. Esta operação tem como objetivo a verificação do grau de limpeza. Uma vez atingidos os critérios pré-estabelecidos em termos de dimensões das partículas, o ciclo é interrompido iniciando-se a secagem dos componentes sob uma temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Finalizada esta etapa, os tubos são acondicionados em sacos plásticos apropriados preenchidos com argônio (grau de pureza de 99,999%) e devidamente identificados. A figura 3.9 mostra detalhes de uma peça submetida ao ciclo de limpeza interna.



Figura 3.8 – Equipamento de limpeza final

- 1 – Compartimento para limpeza e secagem das peças
- 2 – Circuito para coleta de amostras para análise
- 3 – Comandos do equipamento
- 4 – Circuito de limpeza das peças

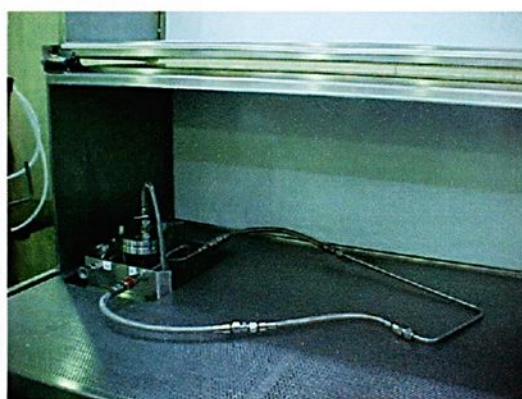


Figura 3.9 – Detalhe de uma peça submetida à limpeza final

3.2.4 Alinhamento

Em sistemas orbitais, a precisão no alinhamento entre as partes a soldar exerce uma parcela de considerável importância na qualidade final dos cordões. Segundo os requisitos de projeto, o desalinhamento máximo permitido entre as peças deve ser inferior a 0,06 mm. Caso contrário, as saliências internas decorrentes de condições inadequadas de ajustagem podem interferir no escoamento do fluido (hidrazina), ou em casos extremos, a situações de retrabalho (MANNION; HEINZMAN, 1999a, 1999b, 1999c).

Deste modo, desenvolve-se um gabarito de alinhamento em aço inoxidável com a finalidade de suprir esta lacuna. O modelo é constituído de duas partes, cada uma delas com um sulco na sua parte interna, de forma a alojar os tubos, conforme visto na figura 3.10.

Os quatro parafusos externos auxiliam a fixação, ao passo que os centrais garantem o posicionamento correto das peças, figura 3.11. As aberturas laterais, dispostas a 180°, facilitam a visualização da junta por parte do operador/soldador e, por conseguinte, a operação de ponteamto manual. A figura 3.12 mostra em detalhes a proximidade da tocha TIG manual em relação a uma determinada junta momentos antes da abertura do arco elétrico.

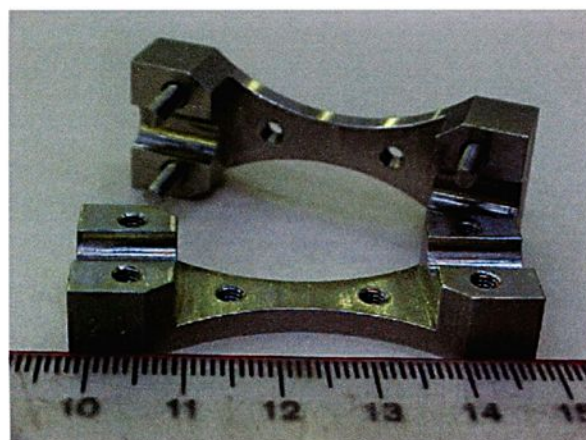


Figura 3.10 – Detalhe da braçadeira para alinhamento das peças

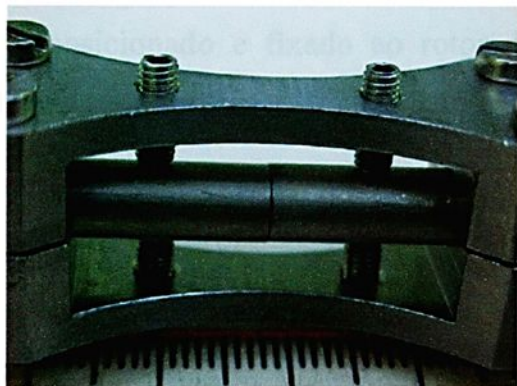


Figura 3.11 – Detalhe do alinhamento dos tubos

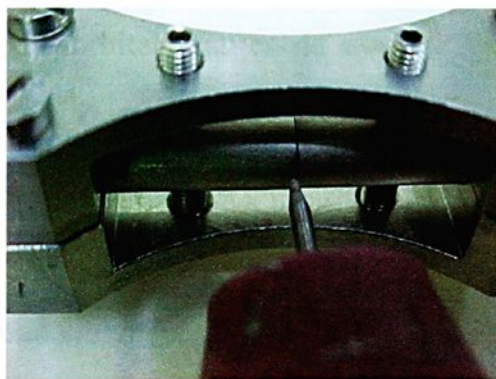


Figura 3.12 – Posicionamento da tocha manual em relação à junta

3.2.5 Eletrodo de tungstênio - tipo, geometria, dimensões, e instalação

A escolha do material, da geometria e das dimensões do eletrodo acompanham as recomendações do próprio fabricante inclusas no catálogo **Operator Training Guidelines** (AMI, 1991), cujos valores são calculados não apenas em função do tubo a ser soldado como também pelo próprio modelo do cabeçote orbital. Como exemplo, o cálculo de seu comprimento baseia-se na seguinte fórmula, e as principais cotas são vistas na figura 3.13.

$$(\varnothing_{\text{ext rotor}} - \varnothing_{\text{ext tubo}})/2 - \text{comp arco elet.} = \text{comp eletrodo} \quad (3.1)$$

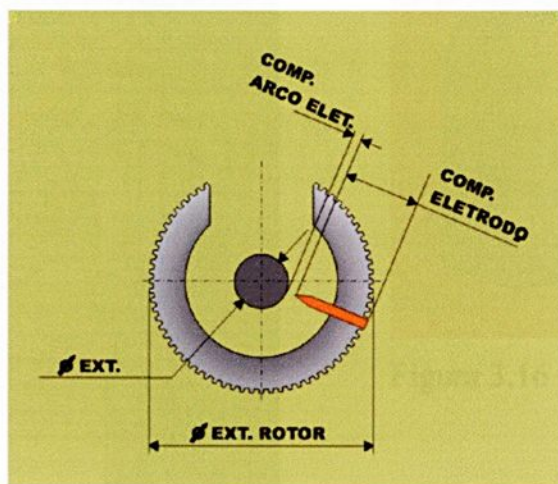


Figura 3.13 – Esquema simplificado do cabeçote orbital

Uma vez definidas as suas medidas, figura 3.14, o eletrodo ligado ao cério (2% Ce) é posicionado e fixado ao rotor do cabeçote orbital através de um parafuso, conforme representam as figuras 3.15 e 3.16.

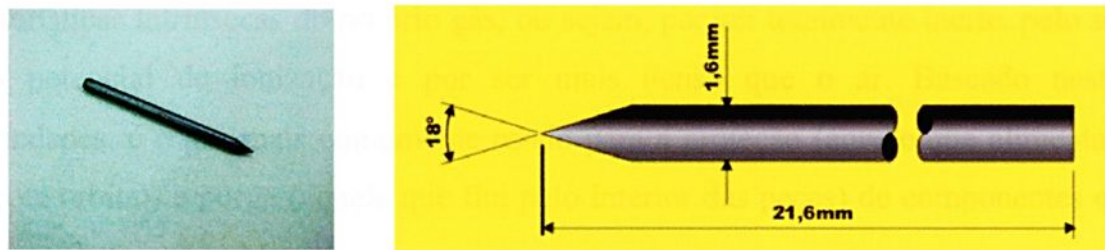


Figura 3.14 – Dimensões do eletrodo de tungstênio com adição de cério

A parte superior do seu corpo deve estar rente ao diâmetro externo do rotor, figura 3.13, de modo a se obter um valor único para a distância eletrodo-tubo ao longo das soldagens.

A substituição do eletrodo após a execução de seis ciclos de soldagem é a solução encontrada para a manutenção da integridade dos resultados em função da sua pequena deterioração, sendo esta uma particularidade do processo de soldagem **TIG**.

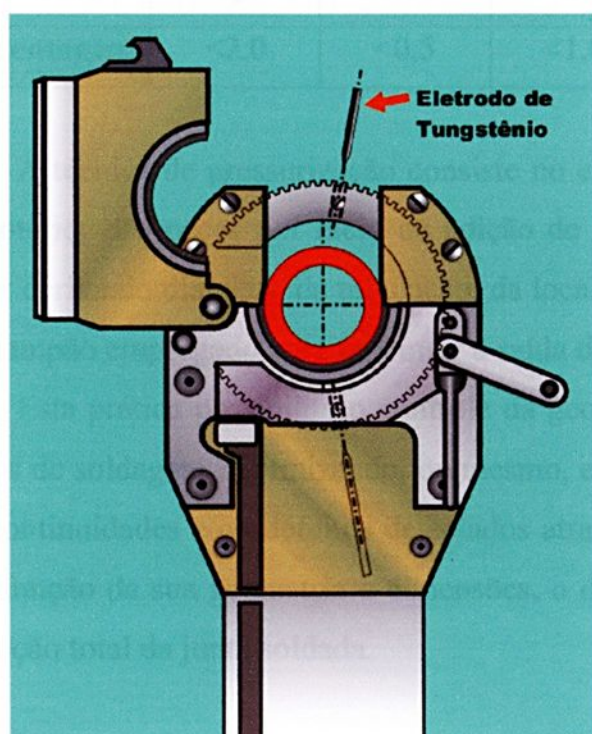


Figura 3.15 – Cabeçote orbital

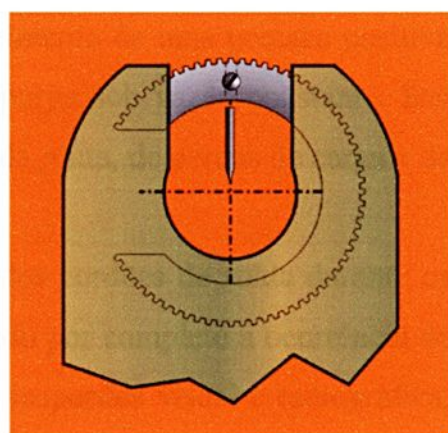


Figura 3.16 – Detalhe do cabeçote orbital

3.2.6 Gases de proteção e de purga – controle da pressão do gás de purga

Emprega-se o argônio para o desenvolvimento deste trabalho em função das características intrínsecas do próprio gás, ou sejam, por ser totalmente inerte, pelo seu baixo potencial de ionização e por ser mais denso que o ar. Baseado nestas propriedades, é o gás mais comumente usado para a proteção (aquele que alimenta o cabeçote orbital) e purga (aquele que flui pelo interior das peças) de componentes em sistemas orbitais de soldagem.

Seu grau de pureza é ditado pelo tipo de aplicação e, neste caso em particular, onde as micro-contaminações são preocupações constantes ao longo de todo o ciclo de fabricação, opta-se pelo emprego de um gás ultra-puro (99,999%), onde o seu controle de qualidade estende-se desde a sua matéria prima ao produto final. As impurezas presentes em sua composição são mantidas sob níveis extremamente baixos, como os apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Impurezas (ppm) presentes no gás argônio ultra-puro (99,999%)

Impurezas	H ₂ O	THC	O ₂	N ₂	CO ₂	CO
Porcentagem	<2,0	<0,5	<1,0	<3,0	<1,0	<1,0

A técnica de pressurização consiste no estabelecimento de uma pressão positiva no interior das peças por meio da adição de gás de purga sob vazão constante. Seu valor deriva do diâmetro da tubulação, da localização da junta, de perdas de carga e de um tampão empregado para restringir a saída do gás.

Esta prática possibilita o controle da geometria dos cordões de solda durante os ciclos de soldagem minimizando, ou mesmo, eliminando por completo a ocorrência de descontinuidades e/ou defeitos detectados através das inspeções visual e radiográfica. Em função da sua geometria e dimensões, o defeito pode conduzir a retrabalhos ou a remoção total da junta soldada.

Os equipamentos empregados nesta fase consistem de um medidor de pressão, **Magnehelic**, modelo série 2000 (**Dwyer**) e de um pequeno dispositivo (tê - **Swagelok**), ambos visualizados nas figuras 3.17 e 3.18.

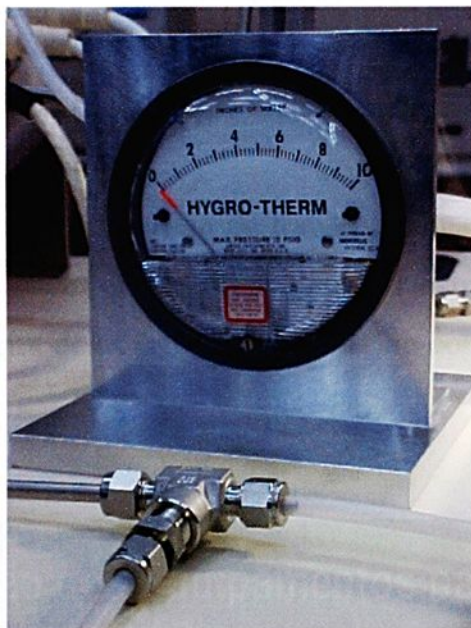
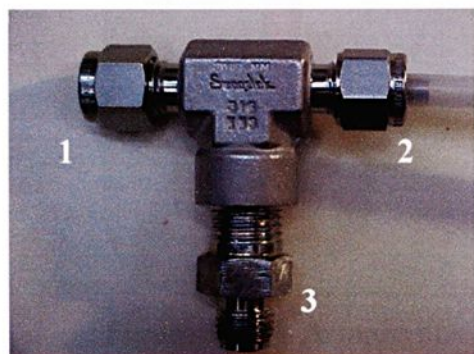


Figura 3.17 – **Magnehelic**:
medidor de pressão
do gás de purga



- 1 – Terminal de entrada de gás
- 2 – Terminal de saída de gás
- 3 – Terminal conectado ao **Magnehelic**

Figura 3.18 – Dispositivo auxiliar usado
na medição da pressão do
gás de purga

O **Magnehelic** é uma unidade portátil e de alta precisão, empregado para indicar a pressão do gás de purga (argônio com pureza igual a 99,999%) nos pontos de união. É projetado para resistir a vibrações, a sobre-pressões e mesmo a choques provenientes de quedas ou pancadas. Seus limites de temperatura se estendem de -67°C a $+60^{\circ}\text{C}$. Uma vez selecionada a posição de trabalho, se vertical ou horizontal, o instrumento deve ser calibrado e mantido nesta posição até a finalização dos trabalhos, a fim de que seja mantida a máxima precisão.

A determinação da pressão correta de trabalho consiste na inserção do pequeno dispositivo (tê) na junta a ser soldada. Duas de suas extremidades são conectadas à rede, ao passo que a terceira delas é fixada ao aparelho conforme visto em detalhes na figura 3.19.



Figura 3.19 – Arranjo dos equipamentos para a leitura da pressão

Uma vez concluída a leitura da pressão, o dispositivo é removido do sistema e substituído pelo cabeçote orbital para dar seqüência à operação de soldagem, figura 3.20.

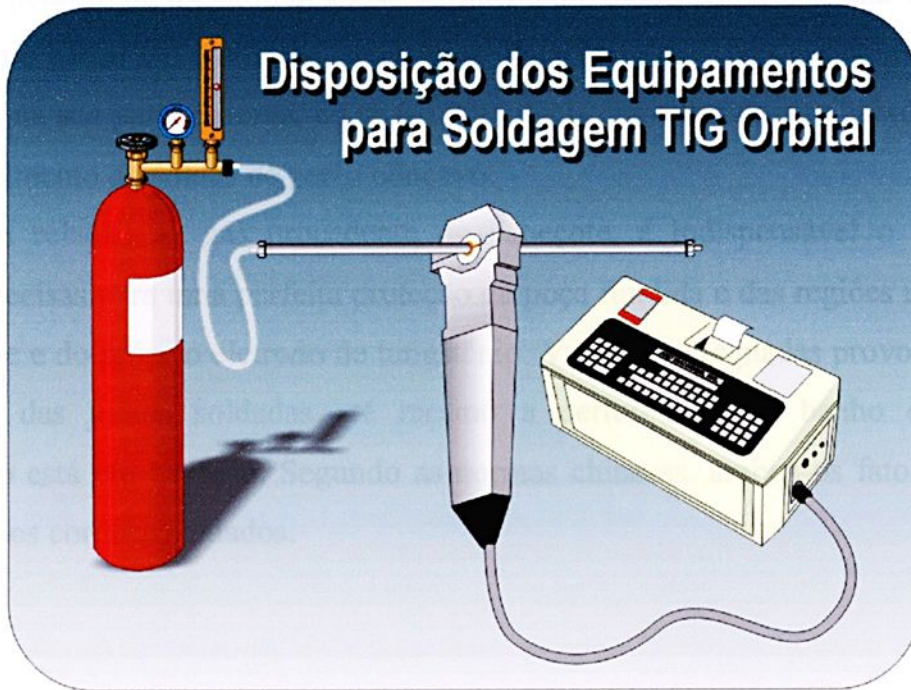


Figura 3.20 – Arranjo dos equipamentos para a execução da soldagem TIG orbital

A pressão é resultado do fluxo de gás de purga introduzido no conjunto em combinação com a dimensão do orifício de restrição empregado no terminal do mesmo, visto em detalhe na figura 3.21. O diâmetro do orifício usado ao longo deste estudo e, conseqüentemente do ciclo de fabricação do Sistema Propulsor do **CBERS** é de 2,0 mm. O ajuste da pressão é feito elevando-se ou reduzindo-se a vazão de gás de purga.

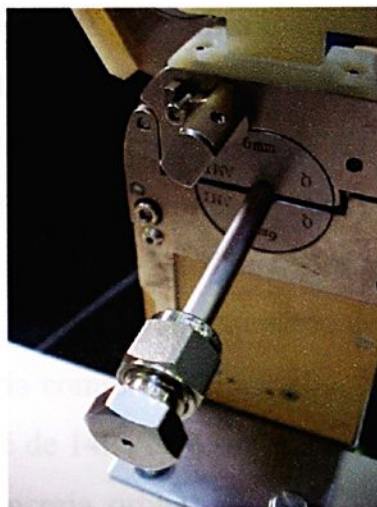


Figura 3.21 – Orifício de restrição

Sua pressão de trabalho deve ser suficiente de modo a proporcionar cordões com acabamento plano em ambas as superfícies. Pressões excessivas resultam em cordões convexos na sua parte externa, ao passo que níveis demasiadamente baixos conduzem ao aparecimento de soldas de perfil côncavo.

Com relação ao gás procedente do cabeçote, é indispensável o emprego de vazões precisas para uma perfeita proteção da poça fundida e das regiões aquecidas do metal base e do próprio eletrodo de tungstênio. Vazões inadequadas provocam desde a oxidação das juntas soldadas até mesmo a perturbação do banho quando este parâmetro está em excesso. Segundo as normas chinesas, ambos os fatos induzem a rejeição dos cordões soldados.

3.2.7 Ponteamento manual

Em geral, sistemas de ultra-alta pureza utilizam-se de ponteamentos como condição indispensável à manutenção das peças em posição. Por via de regra, esta operação é executada manualmente com auxílio de uma tocha **TIG** e sem o uso de metais de adição.

As dimensões dos pontos devem ser mínimas, porém resistentes o suficiente para conservar a junta no seu estado original, isto é, alinhada. Recomenda-se o uso de gás de purga não apenas durante o ciclo de soldagem como também durante a execução do próprio ponteamento, pois além de inibir a oxidação interna dos tubos nas regiões dos pontos, auxilia na sua refrigeração. Analogamente, o seu grau de pureza é semelhante àquele utilizado para a proteção da região soldada.

Os equipamentos utilizados neste estágio compreendem uma tocha manual, modelo SU 9 (**Sumig**) e um pedal. De dimensões reduzidas e peso limitado, a tocha é confeccionada de modo a atender os requisitos de soldagem de peças pequenas, de componentes de geometria complexa ou em situações com restrição de espaço físico. Sua capacidade máxima é de 140 A e a sua refrigeração a ar. Ambos os acessórios são conectados à fonte de energia orbital. A função do pedal limita-se ao controle da amperagem durante a execução dos pontos. O conjunto é visto na figura 3.22.



1 - Pedal

2 - Tocha manual

Figura 3.22 – Acessórios empregados no ponteamto manual

Emprega-se a corrente contínua com polaridade direta para a execução da operação de ponteamto manual. Seus principais parâmetros são apresentados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Parâmetros de ponteamto manual

Programa de ponteamto	# D
Parâmetros de ponteamto	
tempo de pré-purga de gás de proteção (s)	5,0
tempo de pós-purga de gás de proteção (s)	20,0
tempo de aclave de corrente (s)	0,0
tempo de declive de corrente (s)	2,5
pulsção (ligada/desligada)	ligada
corrente de pico (A)	38,0
corrente de base (A)	10,0
tempo de corrente de pico (s)	0,1
tempo de corrente de base (s)	0,1
Outros parâmetros	
distância eletrodo-tubo (mm)	1,0
vazão de gás de proteção (l/min)	6,5
vazão de gás de purga (l/min)	3,2

3.2.8 Levantamento de parâmetros de soldagem

Finalizadas as etapas de preparação, inicia-se a fase de levantamento de parâmetros de soldagem. Esta consiste no ajuste do conjunto de variáveis de modo a produzir cordões em concordância com as especificações chinesas de fabricação (NORMAS CHINESAS a e b).

Desenvolvem-se três programas distintos sob rotação contínua e sentido horário para a união de tubos de titânio comercialmente puro, a saber:

- corrente pulsada com velocidade crescente (#A);
- corrente constante (#B); e
- corrente pulsada com níveis decrescentes de amperagem (#C).

Outros dados em comum aos três programas referem-se aos pontos de início de movimentação do eletrodo, 3 horas, e de finalização do ciclo de soldagem, período em que há a sobreposição do cordão em relação ao seu ponto de partida, neste caso em particular de aproximadamente 30°.

Assim como na etapa de ponteamto manual, a soldagem transcorre sob a aplicação de corrente contínua com polaridade direta (CC⁺). Nesta condição, o eletrodo de tungstênio e o par de tubos são conectados aos terminais negativo e positivo respectivamente. Aproximadamente 70% do calor gerado concentra-se no catodo (-) e os 30% restantes no anodo (+). Tal fato é resultado do intenso bombardeamento do anodo por parte dos elétrons emitidos pelo catodo. A maior eficiência em termos de aquecimento produzido pelos elétrons em comparação com os íons gerados a partir do anodo deriva da maior energia cinética dos primeiros associada aos efeitos da emissão termoiônica, e igualmente pela presença de um campo elétrico nas imediações do catodo.

A seguir, é apresentada uma seqüência de operações comuns aos três programas em estudo.

- seleção de um par de tubos previamente preparado (cortado e faceado e inspecionado);
- montagem do terminal de restrição (conector, tampão e arruelas de nylon);

- introdução e fixação de um dos tubos no terminal de restrição;
- disposição dos tubos no conjunto medidor de pressão (**Magnehelic** e a conexão em tê);
- abertura da válvula do cilindro de gás de purga;
- regulagem da vazão de gás através do fluxômetro, de modo que a pressão de leitura seja igual a 4,5 cw (valor levantado através de testes; responsável pela produção de cordões com acabamento plano em ambas as superfícies);
- leitura e registro do valor da vazão de gás de purga;
- fechamento da válvula do cilindro de gás de purga;
- desmontagem do conjunto;
- alojamento do tubo com o sistema de restrição no cabeçote orbital;
- inspeção do posicionamento do tubo em relação ao eletrodo de tungstênio;
- fixação do tubo através do conjunto posicionador;
- re-inspeção do posicionamento tubo-eletrodo;
- repetição da seqüência das quatro últimas operações para o segundo tubo;
- exame do alinhamento da junta e o seu posicionamento em relação ao eletrodo de tungstênio;
- fechamento do visor localizado na parte superior do cabeçote orbital;
- inspeção dos cabos de energia e dos gases de proteção e de purga;
- abertura das válvulas dos cilindros dos gases de proteção e de purga;
- regulagem dos valores de ambas as vazões por meio dos fluxômetros;
- checagem dos valores das leituras;
- iniciação do ciclo de soldagem;
- finalização do ciclo de soldagem;
- fechamento das válvulas dos cilindros de gás;
- remoção do corpo-de-prova soldado do cabeçote orbital;
- inspeção visual da superfície externa do cordão; e
- exame da superfície interna do cordão com auxílio de um boroscópio;

Repete-se a sucessão de eventos até a obtenção de cordões visualmente aprovados (paquímetro, boroscópio e projetor de perfil), ou sejam, soldas planas, lisas,



de largura homogênea ao longo de todo o seu perímetro, isentas de oxidação e de defeitos em ambas as superfícies. De posse dos parâmetros levantados pelo autor, solda-se um total de nove corpos-de-prova para cada um dos programas em estudo. Seus valores, apresentados na tabela 3.4, são armazenados na memória da fonte de energia para consultas futuras.

Tabela 3.4 - Parâmetros de soldagem utilizados nos diversos programas.

Programas de soldagem	#A <i>(Corrente pulsada velocidade crescente)</i>	#B <i>(Corrente constante)</i>	#C <i>(Corrente pulsada amperagem decrecente)</i>
Seqüência de soldagem			
tempo de pré-purga de gás de proteção (s)	70,0	70,0	70,0
tempo de pós-purga de gás de proteção (s)	90,0	90,0	90,0
tempo de aclave de corrente (s)	0,0	0,0	2,0
tempo de declive de corrente (s)	4,0	4,0	4,5
tempo de retardo de deslocamento (s)	1,0	0,8	0,0
Nível I (1º Quadrante)			
pulsção (ligada/desligada)	ligada	desligada	ligada
velocidade de rotação (rpm)	4,0	8,0	7,4
corrente de pico (A)	28,0	21,0	40,0
corrente de base (A)	8,0	-	12,0
tempo de corrente de pico (s)	0,1	-	0,1
tempo de corrente de base (s)	0,1	-	0,1
Nível II (2º Quadrante)			
pulsção (ligada/desligada)	ligada	desligada	ligada
velocidade de rotação (rpm)	4,0	8,0	7,4
corrente de pico (A)	28,0	21,0	37,4
corrente de base (A)	8,0	-	12,0
tempo de corrente de pico (s)	0,1	-	0,1
tempo de corrente de base (s)	0,1	-	0,1
Nível III (3º Quadrante)			
pulsção (ligada/desligada)	ligada	desligada	ligada
velocidade de rotação (rpm)	4,9	8,0	7,4
corrente de pico (A)	28,0	21,0	34,8
corrente de base (A)	8,0	-	12,0
tempo de corrente de pico (s)	0,1	-	0,1
tempo de corrente de base (s)	0,1	-	0,1
Nível IV (4º Quadrante)			
pulsção (ligada/desligada)	ligada	desligada	ligada
velocidade de rotação (rpm)	4,9	8,0	7,4
corrente de pico (A)	28,0	21,0	32,2
corrente de base (A)	8,0	-	12,0
tempo de corrente de pico (s)	0,1	-	0,1
tempo de corrente de base (s)	0,1	-	0,1

Programas de soldagem	#A <i>(Corrente pulsada velocidade crescente)</i>	#B <i>(Corrente constante)</i>	#C <i>(Corrente pulsada amperagem decrecente)</i>
Parâmetros de soldagem			
Notas			
distância eletrodo-tubo (mm)	1,0	1,0	1,0
vazão de gás de proteção (l/min)	5,2	5,2	5,2
vazão de gás de purga (l/min)	3,2	3,2	3,2

A figura 3.23 representa a soldagem dos corpos-de-prova com os respectivos equipamentos, fonte de energia, cabeçote orbital e medidor de pressão.

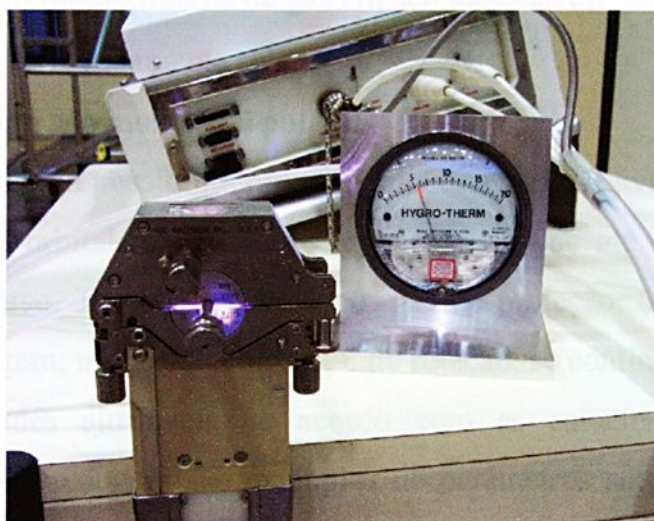


Figura 3.23 – Soldagem TIG orbital dos corpos-de-prova

O sistema de soldagem orbital (**Arc Machines**) aqui empregado compõe-se de uma fonte de energia programável (modelo 207-HP), de um cabeçote orbital (modelo 9AF-750), de cabos de gás e de energia e de acessórios opcionais. Para procedimentos manuais introduzem-se a tocha manual e o pedal em substituição ao cabeçote orbital, aplicado exclusivamente em operações automáticas.

Esse conjunto é empregado em ambas às fases de soldagem, ou sejam, a de levantamento de parâmetros e a de fabricação propriamente dita do Sistema Propulsor, sem quaisquer mudanças em relação aos componentes do conjunto de soldagem acima mencionados.

A fonte de energia consiste de um equipamento de soldagem TIG de projeto compacto, portátil, totalmente programável cuja seqüência de soldagem é controlada mediante um microprocessador. A precisão em relação aos parâmetros de soldagem é da ordem de $\pm 1\%$.

Especialmente idealizada para uso em laboratórios e áreas limpas, nos quais a presença de particulados é uma preocupação constante, seu projeto e construção asseguram reduções significativas em relação à presença de contaminantes quando comparada às fontes convencionais de soldagem. A seguir, são apresentadas algumas de suas características:

- linha de circulação interna de gás em aço inoxidável;
- conexões hermeticamente seladas; e
- estrutura em aço inoxidável polido.

A fonte de energia possibilita programar as diversas variáveis envolvidas em um ciclo de soldagem orbital, cujos valores são passíveis de até 100 modificações ao longo do seu decurso. Tempos de pré e pós-gás de proteção, tempos de aclave e de declive da amperagem; modos de corrente e de rotação, se contínuos ou pulsados, com tempos e amplitudes ajustáveis de acordo com as características de pulsação; diferentes níveis de soldagem são exemplos de parâmetros sujeitos às mudanças. A faixa de controle da rotação situa-se entre um mínimo de 0,1 e um máximo de 20 rpm. Todavia, para as amperagens, esses valores variam de 3 a 100 A com incrementos de 0,1 A. A figura 3.24 apresenta o referido equipamento.

1 - Impressora

2 - Teclas de comando

3 - Cabos de energia

4 - Mangueiras dos gases de proteção e de purga



Figura 3.24 – Vista lateral da fonte de soldagem

Os programas são desenvolvidos em função do material e de suas dimensões, diâmetro externo e espessura. Esses são identificados e armazenados na memória do equipamento, cuja capacidade máxima é igual a 100. Além das variáveis habituais, é possível obter informações referentes ao metal base, quantidade de soldas efetuadas, dados da fonte de energia e também do cabeçote, além do nome do operador, conforme visto na figura 3.25.

```

OPERATOR: GERSON LIMA
WELD ID: _____
WELD HEAD MODEL: 9AF750-HP
WELD HEAD SN: 30351

#   OD     WALL  TYPE  MAT  QTY
022 235.0  1.00  TUBE  TI   0008

PRE-PURGE-POST UP-SLOPE-DOWN ROT--DLY
70      70   2.0   4.0  CW  0.8

LVL PULSE     ROT     PRI--RPM--BCK
1   OFF      CONT    8.00

TIME PRI--AMP--BCK PRI-PULSE-BCK
1   14.0  21.8
  
```

Figura 3.25 – Dados do programa # B

O cabeçote orbital é um componente projetado apenas para soldagens autógenas em tubos, conexões e outros. Este modelo em particular permite a união de peças com diâmetro externo variando entre um mínimo de 2,3 mm e um máximo de 19,05 mm. O seu limite de velocidade é da ordem de 20 rpm.

O modelo 9AF-750 inclui-se na série denominada de cabeçotes com sistema de dupla fixação. Na realidade, cada um dos lados do cabeçote utiliza-se de um mecanismo para assentar e conservar os tubos em posição. Essas peças são de montagem simples, pois são fixadas ao conjunto através de um único parafuso. De modo análogo, são de fácil substituição e suas dimensões dependem do diâmetro externo dos tubos a soldar. Conseqüentemente, emprega-se um mesmo cabeçote para uma grande variedade de diâmetros de dutos. A figura 3.26 exemplifica a instalação de um par de alojadores em um cabeçote orbital com câmara fechada a ser utilizado na soldagem de um tubo de diâmetro coincidente ao do componente. Exemplos de alojadores para tubos de 6,0 mm e de 10,0 mm de diâmetros são vistos na figura 3.27.

Neste modelo convencional, o eletrodo acha-se posicionado coincidentemente à linha de centro do cabeçote, em sua parte interna, conforme visto na figura 3.28 (condição a). A condição básica para a união de peças em cabeçotes desta natureza é que ambas as partes (tubos e/ou conexões) sirvam-se de seções retas que correspondam à distância entre o eletrodo e as paredes externas do próprio cabeçote. Caso contrário, o eletrodo é deslocado de sua posição original para uma de suas laterais de acordo com a figura 3.28 (condição b). Casos especiais como peças em ângulo envolvem até mesmo a remoção de um dos alojadores e a inserção de um novo modelo, de base mais larga em substituição ao segundo, a fim de garantir o posicionamento das peças durante o ciclo de soldagem, figura 3.28 (condição c).

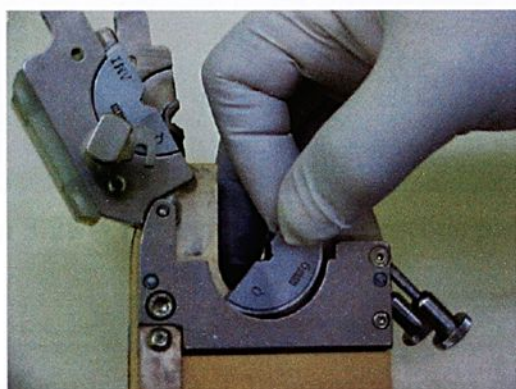


Figura 3.26 – Instalação de alojadores no cabeçote orbital



Figura 3.27 – Exemplos de alojadores para tubos de diferentes diâmetros

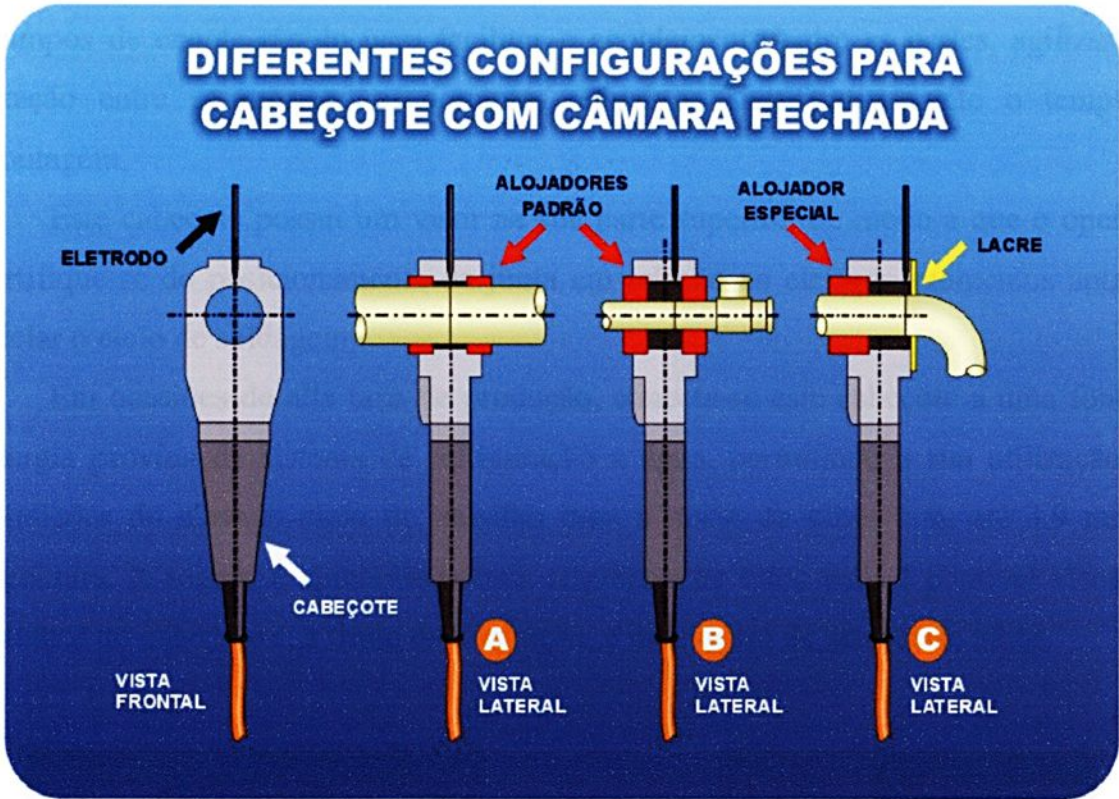


Figura 3.28 – Diferentes configurações para o cabeçote orbital

As figuras 3.29 e 3.30 apresentam os dois modelos de prolongadores de eletrodos tungstênio. São utilizados em soldagens em que há a necessidade de se deslocar o eletrodo da linha de centro do cabeçote orbital em função das configurações das peças; o primeiro deles denominado de ângulo fixo (90°) e o seguinte de ângulo ajustável.

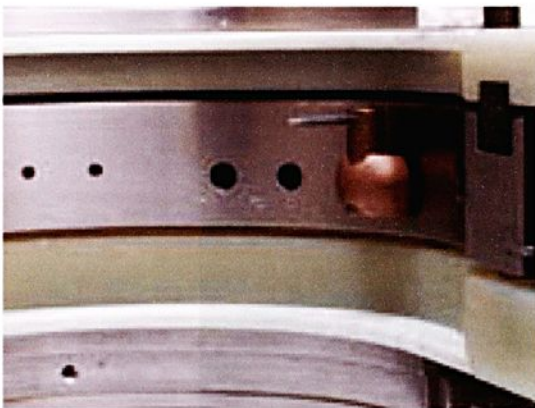


Figura 3.29 – Prolongador de ângulo fixo

(cortesia Arc Machines)

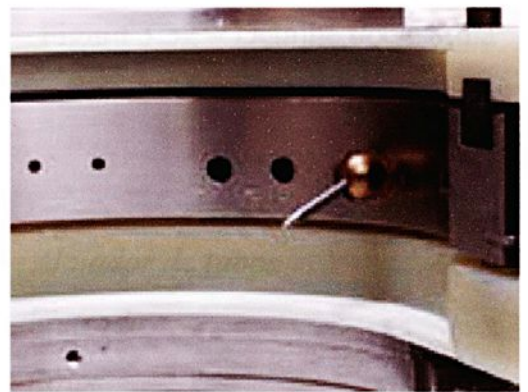


Figura 3.30 – Prolongador de ângulo ajustável

(cortesia Arc Machines)

Assim como nos projetos mais recentes, este cabeçote dispõe de um sistema de grampos de engate rápido para facilitar o acoplamento entre as partes, agilizando a fixação entre as mesmas e, portanto, reduzindo significativamente o tempo de montagem.

Este cabeçote possui um visor na sua parte superior, de modo a que o operador certifique-se do posicionamento da junta em relação ao eletrodo momentos antes de iniciar o ciclo de soldagem.

Em ocasiões de alta taxa de produção, conecta-se este cabeçote a uma fonte de energia provida de sistema de refrigeração a água, permitindo a sua utilização sob condições de elevado ciclo de trabalho para a união de tubos com até 3,9 mm de espessura. A seguir, é apresentada uma seqüência de fotos onde é possível visualizar detalhes do cabeçote e, a título de ilustração, a montagem de um par de tubos.

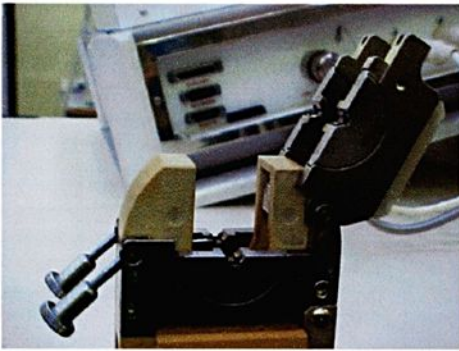


Figura 3.31 – Detalhe do conjunto posicionador

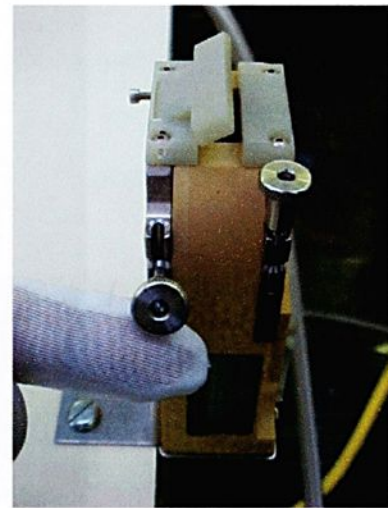


Figura 3.32 – Detalhe do sistema de grampos

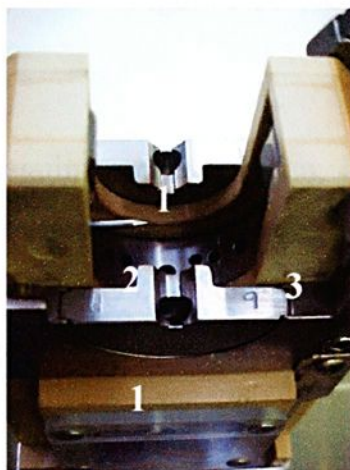


Figura 3.33 – Detalhes da parte interna do cabeçote

- 1 – Alojador de tubos
- 2 – Eletrodo
- 3 – Rotor

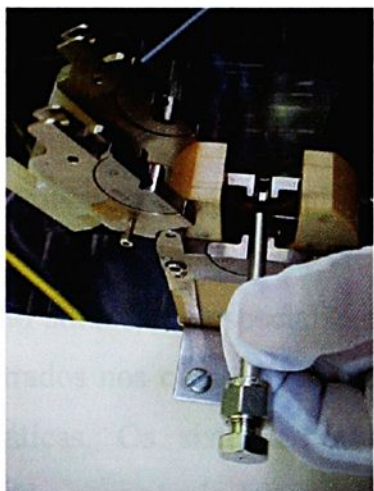


Figura 3.34 – Posicionamento do tubo-eletrodo

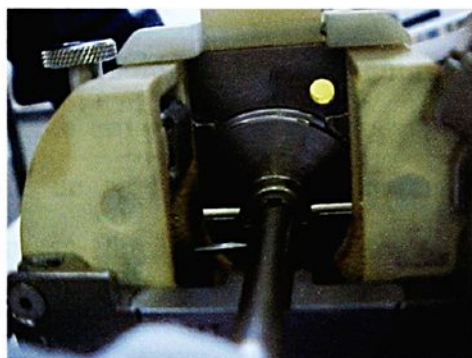
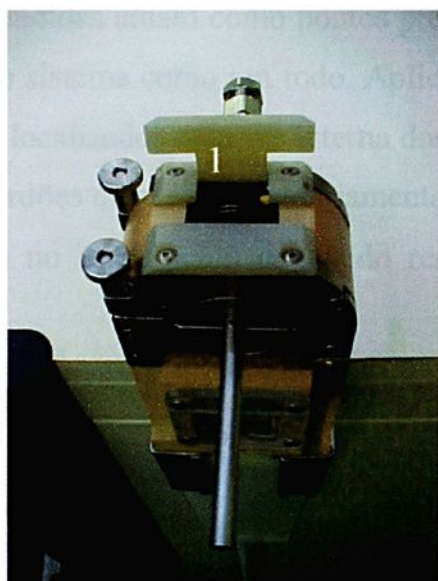


Figura 3.35 – Fixação do tubo



1 - Visor

Figura 3.36 – Conjunto preparado para soldagem

Dando prosseguimento à pesquisa, inicia-se a fase de qualificação das juntas soldadas segundo as normas vigentes (NORMAS CHINESAS a e b). Submetem-se os cordões às inspeções visuais, aos exames radiográficos e aos testes de fuga. Os ensaios destrutivos abrangem os testes mecânicos de tração uniaxial, a análise metalográfica e o exame da superfície de fratura.

3.2.9 Qualificação

A utilização de sistemas orbitais em substituição à soldagem manual em projetos que envolvem a união de tubulações, particularmente em processos de alta pureza, é motivada não apenas pela crescente dificuldade de se encontrar no mercado de trabalho soldadores especializados como também em função dos freqüentes defeitos encontrados nos cordões por eles executados, praticamente eliminados nas soldagens automáticas. Os sistemas orbitais produzem cordões homogêneos, de altíssima qualidade, com níveis de produtividade e de repetibilidade incontestáveis.

Segundo os critérios chineses (NORMAS CHINESAS a e b), é obrigatório que as juntas soldadas apresentem penetração total ao longo de todo o seu perímetro. Caso contrário, as regiões não fundidas atuam como pontos preferenciais de corrosão e, por conseguinte, contaminam o sistema como um todo. Aplica-se o mesmo raciocínio aos poros e trincas superficiais localizados na parte interna dos cordões.

O acabamento dos cordões deve ser necessariamente liso e de geometria plana, a fim de evitar turbulências no escoamento do fluido responsável pela impulsão do Sistema Propulsor.

Admite-se um desalinhamento máximo entre as partes a soldar da ordem de 10% em relação à espessura de parede. Igualmente, atribui-se o mesmo limite para as concavidades externas.

De acordo com os padrões (NORMAS CHINESAS a e b), permite-se que a largura dos cordões varie entre um valor mínimo de 4,0 mm e um máximo de 6,0 mm. A presença de oxidação nesta região é inadmissível. A propósito, sua coloração deve ser prata brilhante.

Os defeitos internos, detectados somente através de raios x, limitam-se a poros. Seu diâmetro máximo admissível quando localizado isoladamente deve estar abaixo de 0,3 mm. Em situações onde há ocorrência de porosidade ao longo do cordão, o somatório de seus diâmetros deve ser inferior a 0,4 mm.

Em relação aos testes de fuga, os índices pré-estabelecidos pelas normas aqui praticadas para as juntas soldadas devem ser inferiores a 1×10^{-7} Pa.m³/s.



Segundo os padrões chineses, os dados levantados nos ensaios mecânicos de tração para os corpos-de-prova soldados devem revelar valores acima de 80% daqueles obtidos para o metal base.

A figura 3.37 apresenta algumas condições de aceite e de rejeição segundo os critérios acima descritos. Os dados apresentados até o momento relativos às etapas de integração, ponteamto manual, soldagem e qualificação são expressos no anexo B sob a forma de tabelas, de modo a facilitar a leitura dos mesmos.



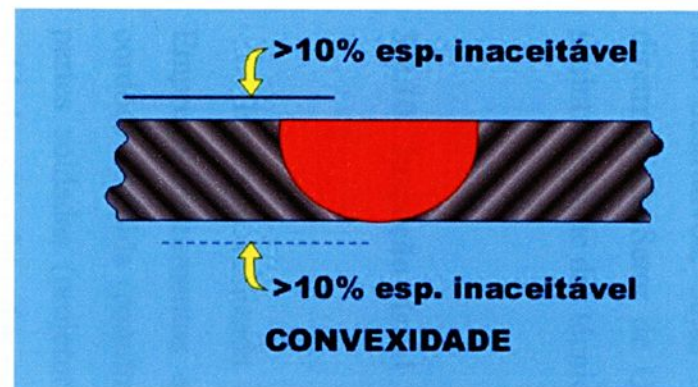


Figura 3.37 – Condições de aprovação e rejeição dos cordões de solda



As fases de qualificação das juntas soldadas englobam os ensaios destrutivos e não destrutivos, cujas metodologias e normas aplicadas são ditadas segundo as diretrizes do Setor de Qualidade do INPE/LIT. Todavia, cabe aqui uma descrição sucinta de parte das técnicas empregadas.

3.2.10 Inspeção visual

Inspeção realizada imediatamente após a finalização dos ciclos de soldagem. Emprega instrumentos e equipamentos auxiliares para a medição da largura dos cordões de solda (paquímetro) bem como para a verificação do alinhamento entre as partes soldadas (projetor de perfil). Os exames das superfícies internas das juntas soldadas são efetuadas mediante o uso de um boroscópio halogen 250 twin, modelo 20 (Storz).

O boroscópio é um instrumento óptico tubular composto de uma unidade de controle, de um cabo flexível e de uma haste rígida, a qual é introduzida nos corpos-de-prova, conforme visto na figura 3.38. Através desta, é feita uma varredura ao longo de toda a superfície da junta soldada seguida de uma avaliação das suas condições. A imagem da região analisada é transmitida através de lentes posicionadas ao longo do seu corpo. Dispõe de uma ocular localizada na sua extremidade, cuja função é ampliar a imagem observada. A figura 3.39 apresenta a inspeção com boroscópio de um corpo-de-prova soldado.



- 1 - unidade de controle*
- 2 - tubo flexível*
- 3 - haste rígida*

Figura 3.38 – Boroscópio; instrumento para examinar as superfícies internas das juntas soldadas

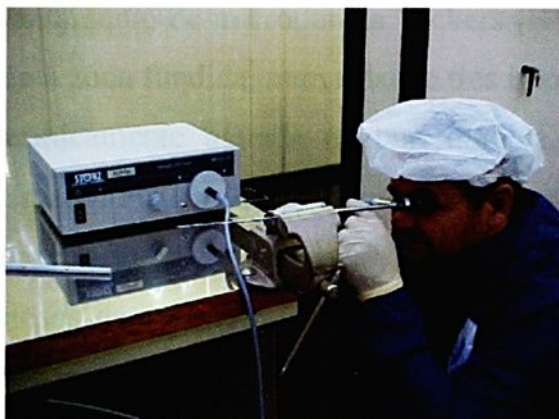


Figura 3.39 – Inspeção de um corpo-de-prova soldado

3.2.11 Análise metalográfica

Três amostras, uma para cada programa de soldagem, são preparadas de modo convencional para observações metalográficas e ensaios de microdureza Vickers. Utiliza-se uma solução de alumina (200 ml), água (20 ml), hidróxido de potássio (2 g) e ácido oxálico (30 g) no polimento mecânico para o preparo das superfícies das amostras.

Emprega-se o reagente **Kroll** para revelar as microestruturas resultantes dos diferentes ciclos térmicos. Sua composição é constituída de água (100 ml), ácido fluorídrico (2 ml) e ácido nítrico (5 ml). A técnica empregada consiste na imersão das amostras na solução durante aproximadamente 10 s.

Os estudos a nível macroscópico (morfologia das zonas fundidas e superfícies de fratura) das juntas soldadas são efetuados em um estereoscópio (marca **Zeiss**, modelo Stemi SV-11).

A identificação das microestruturas consiste de observações em um microscópio óptico (marca **LEICA**, modelo DM RXP) conectado a um microcomputador, cujas imagens são capturadas por meio de um programa de aquisição denominado **DT Acquire**, versão 2.0.

Nos ensaios de tração de tubos de seções reduzidas é prática comum inserir um pino em cada uma das extremidades do corpo-de-prova, a fim de evitar o esmagamento destas regiões ao fixá-las no equipamento. Os pinos também são vistos na figura 3.40, onde é possível verificar tanto as suas dimensões como o seu posicionamento no corpo-de-prova para a realização do ensaio.

A seguir, por meio de um diagrama de blocos (figura 3.41), são apresentadas as principais fases da etapa de qualificação. Esta, por sua vez, presta-se não apenas para a avaliação das juntas soldadas, mas igualmente das fases preliminares às operações de soldagem propriamente ditas.



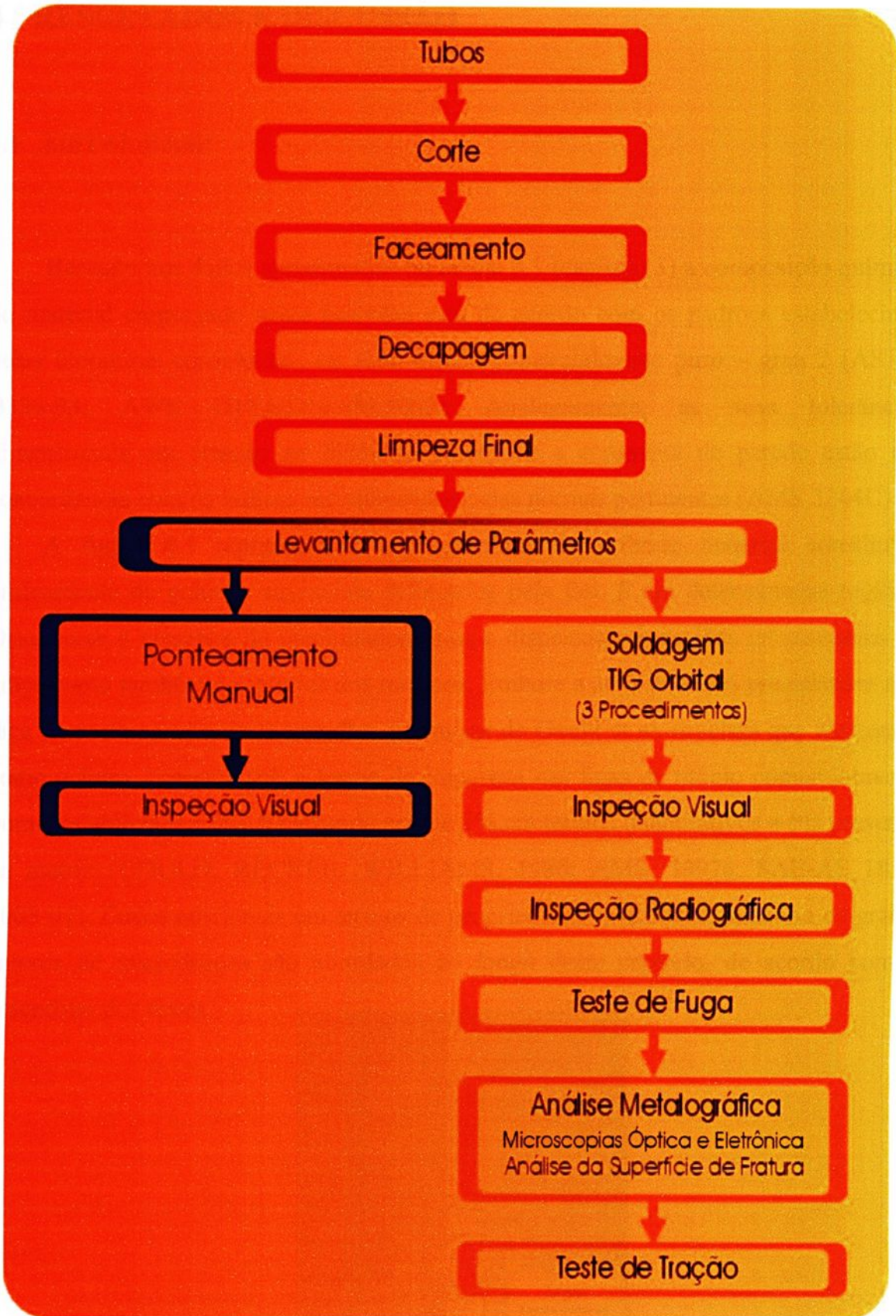


Figura 3.41 – Fases da etapa de qualificação

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 METAL BASE

Baseado nos dados apresentados na tabela 3.1 (capítulo 3) a composição química do material empregado nesta pesquisa está de acordo com os padrões estabelecidos pelas literaturas consultadas, ou seja, titânio comercialmente puro – grau 2 (ASTM B338-03; AWS D10.6/D10.6M:2000). Analogamente, as suas tolerâncias dimensionais em relação ao diâmetro externo e a espessura de parede estão em concordância com os índices recomendados pelas normas pertinentes (AMS 2244C).

A figura 4.1 representa a microestrutura do referido material constituída basicamente de grãos α equiaxiais delineados pela fase β em determinadas regiões. Observa-se a presença de precipitados finos e dispersos nas regiões de contornos de grãos como também no interior dos mesmos. Embora a análise destes precipitados não faça parte do escopo deste trabalho, pesquisas de Gould et al. revelam que elementos como o ferro, presente sob a forma de impureza nas ligas de titânio comercialmente puras, estabilizam a fase β elevando em até 5% em termos quantitativos a sua presença na matriz (GOULD; BECKER; WILLIAMS, 1980; AMS, 1997a; SAE-AS 1814, 2003-04). Dados adicionais em termos de propriedades mecânicas, tamanho de grão e valores de microdureza são abordados ao longo deste capítulo, de acordo com o desenrolar dos testes.

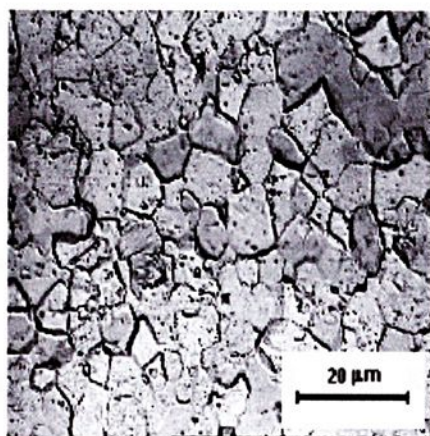


Figura 4.1 – Microestrutura do titânio comercialmente puro grau 2; 500x

4.2 DESENVOLVIMENTO DOS PROGRAMAS DE SOLDAGEM

Desenvolvem-se três programas de soldagem em separado. Todavia, devido ao grande número de parâmetros envolvidos na soldagem TIG orbital, limitam-se em apenas dois o número de variáveis (corrente e velocidade) a serem determinadas para cada um dos ciclos de união, conservando-se as demais constantes. Dados adicionais referentes à operacionalidade do processo e ao próprio material são obtidos por meio de consultas a normas específicas (AWS D10.6/D10.6M:2000; AMS 2689A, 1991).

Na fase de levantamento de parâmetros fixam-se os valores das amperagens (dois conjuntos distintos) unindo os corpos-de-prova sob três diferentes velocidades. Repete-se a seqüência de eventos totalizando seis condições de soldagem para cada uma das situações em estudo. Ao término das soldagens, inspeciona-se visualmente (externa e internamente) cada uma das juntas soldadas respeitando-se os critérios pré-estabelecidos pelas normas chinesas (NORMAS CHINESAS a e b). Do total selecionam-se três cordões, cada qual correspondente a um dos programas, ou sejam, corrente constante (#B), corrente pulsada com velocidade crescente (#A) e finalmente corrente pulsada com amperagem decrescente (#C).

Os programas #A e #C apresentam características em comum, haja vista o emprego de corrente pulsada associada às reduções no aporte de energia por meio de incrementos à velocidade de soldagem (#A) e do declínio da amperagem (#B) ao longo dos respectivos ciclos de soldagem. Ambos os procedimentos são amplamente empregados na união de tubos de pequenos diâmetros de modo a minimizar os efeitos acumulativos da energia de soldagem, particularmente na fase de finalização do processo, ou seja, etapa em que há a sobreposição do cordão de solda (KOU; LE, 1994). Deste modo, restringe-se ou mesmo evita-se a presença de concavidades ou até perfurações nos cordões de solda, defeitos associados, em sua maioria, aos excessos de energia.

Apesar da literatura especializada (HENON, 1998; KOU; LE, 1994) recomendar o uso das técnicas anteriormente mencionadas para a soldagem de dutos de seções reduzidas, o programa #B desenvolve-se segundo um único valor de energia de



soldagem para a união dos corpos-de-prova. Associa-se o sucesso dos seus resultados, similares aos demais programas, à utilização da técnica de pressurização interna das peças com gás de purga. Esta é responsável pelo controle da morfologia da zona fundida, pela proteção da zona fundida e demais regiões aquecidas dos tubos além de promover a refrigeração do conjunto (HENON, 2004e).

A tabela 4.1 apresenta os valores das energias de soldagem empregadas para cada um dos programas em estudo. Define-se esta grandeza como sendo a quantidade de energia fornecida pelo arco elétrico à junta. É função da tensão (V), da corrente (A), da velocidade de soldagem (v) e da eficiência de transferência de calor (f). É calculada por meio da seguinte expressão $E_s = f.(V.I / v)$, sendo V em volts, I em ampères, v em milímetros por segundo e f adimensional. Suas unidades representativas são o J/mm ou kJ/mm. A energia de soldagem atua sobre a taxa de resfriamento da junta, microestrutura, propriedades mecânicas dentre outras (LINNERT, 1994).

Por meio de equações desenvolvidas por Adams (1958) a partir de modelos matemáticos estabelecidos por Rosenthal (1946), é possível avaliar quantitativamente as correlações entre a energia de soldagem e as variáveis taxa de resfriamento e temperatura de pico (temperatura máxima atingida em um determinado ponto distante da linha de fusão). Já as curvas de resfriamento contínuo possibilitam prever a microestrutura resultante e, por conseguinte, as propriedades mecânicas a ela associadas (AWS, 1979; LINNERT, 1994).

Para fins de cálculo, utiliza-se f igual a 0,9 (válido para o processo TIG). As leituras dos valores da tensão são obtidas por meio de um multímetro, conectando-se os seus terminais positivo e negativo ao tubo e ao rotor do cabeçote orbital respectivamente. O valor médio correspondente a um total de cinco medidas efetuadas ao longo de cada um dos programas de soldagem é de 8,37 V. Desta forma, obtêm-se os índices das energias de soldagem para cada um dos níveis (quadrantes) dos programas em estudo. Observam-se valores crescentes na seqüência #B, #C e #A.



Tabela 4.1 – Valores das energias de soldagem para os diferentes programas

Energia de soldagem Programa	Es₁ (J/mm)	Es₂ (J/mm)	Es₃ (J/mm)	Es₄ (J/mm)
#A (corrente pulsada, velocidade crescente)	108	108	88	88
#B (corrente constante)	63	63	63	63
#C (corrente pulsada, amperagem decrescente)	84	80	76	72

Embora os programas #A e #C empreguem corrente pulsada em seus respectivos ciclos de união, justificam-se os mais altos índices de energia de soldagem as baixas velocidades (#A) e as amperagens elevadas (#C).

A técnica de pressurização desenvolve-se em corpos-de-prova sob diferentes vazões de gás de purga em conjunto com tampões com diversos diâmetros de orifício de restrição. Das várias associações, os melhores resultados em termos de geometria de cordão de solda, em concordância com os padrões chineses de qualidade, limitam-se ao uso de 3,2 l/min de argônio e uma seção de 2,0 mm para a saída dos gases, parâmetros comuns aos três programas em estudo. Os demais testes redundam em pressões cujos valores conduzem a ocorrência de defeitos, como por exemplo a concavidade ou convexidade das juntas soldadas.

Testes em corpos-de-prova revelam uma pequena elevação da pressão interna durante a execução dos ciclos de soldagem. Justifica-se tal fato pela fusão gradativa das bordas dos componentes com a progressão do ciclo de soldagem. Desta forma, obstrui-se a passagem de uma pequena porcentagem do gás de purga através da mínima abertura existente entre os tubos momentos após a ignição do arco elétrico. A pressão final é ligeiramente superior àquela estabelecida por meio de experimentos, porém não alta o suficiente de modo a causar modificações nas configurações dos cordões.

4.3 INSPEÇÕES VISUAL E RADIOGRÁFICA

Segundo as inspeções visuais, figura 4.2, os cordões na sua totalidade mostram-se de acordo com os critérios chineses em termos de dimensão, coloração, acabamento e morfologia. Todos os conjuntos soldados, nove unidades para cada um dos programas, apresentam-se alinhados segundo medições efetuadas em um projetor de perfil. Analogamente, avaliações das superfícies internas das juntas soldadas por meio de boroscópio indicam conformidade com os padrões chineses em termos de qualidade (NORMAS CHINESAS a e b).

A figura 4.2 exibe um cordão representativo dos programas em estudo, onde é possível visualizar o aspecto de ambas as superfícies, a face e a raiz. Suas principais características são a homogeneidade na largura, alinhamento perfeito, penetração total, acabamento liso e as regiões aquecidas isentas de oxidação.

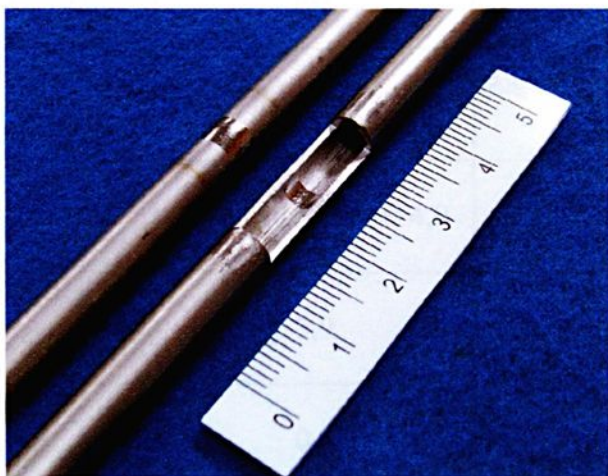


Figura 4.2 – Aspecto da face e da raiz de um corpo-de-prova soldado referente ao programa #A

A tabela 4.2 apresenta os resultados relativos às dimensões das zonas fundidas dos programas em estudo, um total de cinco medidas por condição de soldagem. A partir dos seus dados, notam-se valores médios crescentes das larguras para face e para

raiz dos cordões na seguinte ordem: 5,0; 5,5; 5,7 e 3,0; 3,7; 3,9 respectivamente. Associam-se as maiores extensões destas regiões aos maiores aportes de energia de soldagem.

As inspeções por raios x não revelam a presença de defeitos e/ou discontinuidades nas amostras soldadas. Os seus dados encontram-se listados no anexo C segundo parecer emitido pela empresa **Brasitest** intitulado de **Relatório de Registro de Resultado de Ensaio** para cada um dos programas de soldagem submetidos à pesquisa.

Tabela 4.2 – Medidas das larguras da face e raiz dos cordões soldados segundo os programas em estudo

Programas Grandezas	#A <i>(corrente pulsada e velocidade crescente)</i>	#B <i>(corrente constante)</i>	#C <i>(corrente pulsada e amperagem decrescente)</i>
Largura Face (mm)	5,8; 5,7; 5,7; 5,8; 5,6	4,9; 5,1; 5,1; 4,9; 5,1	5,6; 5,5; 5,4; 5,5; 5,3
Média (mm)	5,7	5,0	5,5
Desvio- Padrão	0,1	0,1	0,1
Largura Raiz (mm)	3,8; 4,0; 3,8; 4,1; 4,0	2,9; 3,2; 2,8; 3,1; 3,1	3,7; 3,6; 3,9; 3,8; 3,8
Média (mm)	3,9	3,0	3,7
Desvio- Padrão	0,1	0,2	0,1

Os resultados concernentes às inspeções visuais e aos exames radiográficos dos corpos-de-prova soldados estão em concordância com as normas chinesas praticadas para o setor espacial, independente dos aportes de energia aqui empregados (NORMAS CHINESAS a e b). A ausência de defeitos (internos e superficiais) associada às larguras máximas inferiores aos 6,0 mm confirmam a qualidade das juntas soldadas.

4.4 TESTE DE FUGA

Segundo dados de projeto, os índices mínimos prescritos para as juntas soldadas são de 1×10^{-7} Pa m³/s. Os resultados dos testes de fuga referentes à qualificação dos programas de soldagem estão relacionados no anexo D. Neste documento elaborado pelo grupo de ensaios do INPE/LIT, **Report of Leak Detection of the Pipelines of the CBERS – FM2 Propulsion System**, é possível conhecer detalhes dos testes bem como a relação dos valores alcançados para cada uma das amostras soldadas durante a execução dos experimentos. Baseado nos resultados, todas as juntas soldadas, sem exceção, estão em concordância com os padrões normativos chineses (NORMAS CHINESAS a e b).

4.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Um dos aspectos importantes da soldagem por fusão é a evolução térmica praticada por cada um dos pontos nas proximidades da solda. Os ciclos térmicos mais severos correspondem aos pontos vizinhos ao cordão, sujeitos aos maiores níveis de temperatura e de taxas elevadas de aquecimento e de resfriamento. Analogamente, os pontos mais afastados da zona fundida experimentam ciclos térmicos mais brandos (AWS, 1979; LINNERT, 1994).

Vários são os fatores que interferem diretamente nos ciclos térmicos, a saber: energia de soldagem, propriedades físicas do material, temperatura inicial, espessura e geometria do componente, configuração da junta, processo e procedimento de soldagem dentre outros. Por conseguinte, a operação de soldagem estabelece uma série de tratamentos térmicos pontuais em função de seus ciclos térmicos, responsáveis pelo crescimento de grãos e/ou modificações microestruturais acompanhadas de alterações nas suas propriedades, eventos localizados na zona termicamente afetada. Na zona



fundida ocorre a grande maioria dos fenômenos metalúrgicos como a fusão, solidificação, reações no estado sólido entre outros (AWS, 1979; LINNERT, 1994).

No caso específico do titânio, a zona fundida caracteriza-se pelas temperaturas superiores à linha **solidus** do material. Na zona termicamente afetada, os níveis de temperatura alcançam valores acima da transformação alotrópica, **β transus**, durante a fase de aquecimento. No resfriamento, o produto formado a partir da fase **β** é resultado da taxa de declínio da temperatura nesta região. Conseqüentemente, os efeitos procedentes dos ciclos térmicos, particularmente das energias de soldagem, são os grandes responsáveis pelas propriedades finais das juntas soldadas mediante transformações microestruturais. Como exemplo, o titânio e suas ligas podem assumir diferentes configurações a começar dos grãos equiaxiais, próprios de estruturas recozidas até as mais complexas como as fases metaestáveis (martensita, bainita, estrutura de Widmanstätten dentre outras) típico das elevadas taxas de resfriamento (LATHABAI et al., 2001; DANIELSON et al., 2003).

Uma segunda particularidade na soldagem do titânio e suas ligas é a possibilidade de contaminação em função da sua alta reatividade pelos gases provenientes da atmosfera, em particular o oxigênio. Tal evento advém de tempos ou vazões insuficientes de gás de proteção, da presença de contaminantes na própria composição do gás ou de vazamentos ao longo da linha de alimentação do gás de proteção. Nestes casos, elementos como o oxigênio ($r_a=0,60 \mu\text{m}$) e nitrogênio ($r_a=0,71 \mu\text{m}$) alojam-se nos interstícios do reticulado cristalino do titânio ($r_a=1,46 \mu\text{m}$) distorcendo-o e impedindo a movimentação das discordâncias. Esse fenômeno é responsável pelos aumentos da dureza e da resistência mecânica da junta soldada e, igualmente pela sua fragilização (DANIELSON, et al., 2003).

A figura 4.3 apresenta as microestruturas características de cada uma das regiões de uma junta soldada em titânio comercialmente puro – grau 2. Em função da similaridade entre as microestruturas, independente da energia de soldagem aplicada, selecionam-se aquelas correspondentes ao programa de soldagem #B de modo a representar as demais, evitando-se assim repetições desnecessárias.

O metal base, região cujos níveis de temperatura são insuficientes para quaisquer alterações microestruturais, consiste de grãos **α** equiaxiais de dimensões reduzidas.

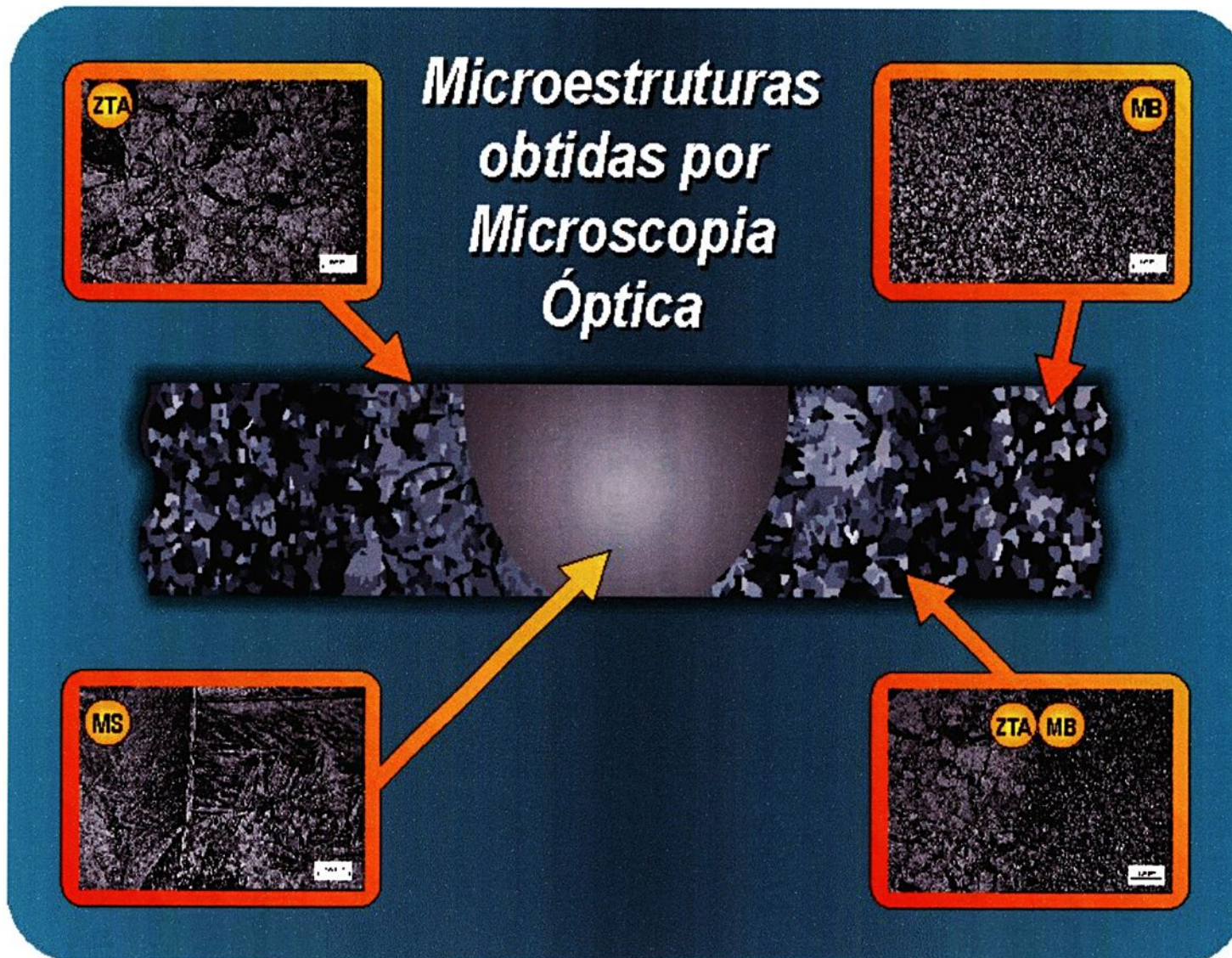


Figura 4.3 – Micrografias representativas das regiões de uma junta soldada; 100x

Detalhes mais precisos a respeito do material são relatados no item 4.1, metal base, uma vez que os baixos aumentos aqui praticados estão relacionados à tentativa de uniformizar as ampliações de modo a enfatizar as alterações procedentes das operações de união.

A zona fronteira entre o metal base e a zona termicamente afetada, representados a direita e a esquerda da foto respectivamente, delimita claramente a região a partir da qual os ciclos térmicos de soldagem atuam de modo incisivo nas modificações microestruturais. No campo correspondente a zona termicamente afetada observam-se grãos equiaxiais de granulação grosseira.

Observações detalhadas da zona termicamente afetada apontam um aumento no tamanho dos grãos com a proximidade da zona fundida, resultado de ciclos térmicos mais intensos. Dados semelhantes são registrados por Lathabai (2001) e Danielson (2003) em suas pesquisas envolvendo juntas soldadas de titânio comercialmente puro.

Um segundo ponto observado diz respeito às energias de soldagem. Os maiores valores praticados pelo programa de soldagem #A resultam em grãos de maiores proporções quando comparados àqueles dos demais ciclos de união (WINCO et al., 1997). A tabela 4.3 apresenta os dados relativos ao tamanho de grão do metal base e das zonas termicamente afetadas para as diferentes condições de soldagem.

As medidas são obtidas por meio de um programa de computador denominado **Image Tool for Windows**, versão 2.0, a partir das imagens capturadas durante as análises por microscopia óptica.

Segundo as informações constantes da tabela 4.3, valores médios crescentes de tamanho de grão acompanham os aumentos gradativos de energia de soldagem na seqüência #B ($TG_m=93 \mu\text{m}$), #C ($TG_m=122 \mu\text{m}$) e #A ($TG_m=193 \mu\text{m}$) confirmando dados de pesquisas recentes (BARREDA et al., 2001; YUNLIAN et al., 2000; SUNDARESAN; RAM; REDDY, 1999).



Tabela 4.3 – Medidas do tamanho de grão do metal base e das zonas termicamente afetadas para as diferentes condições de soldagem

Programa Tamanho de grão	#A <i>(corrente pulsada, velocidade crescente)</i>	#B <i>(corrente constante)</i>	#C <i>(corrente pulsada, amperagem decrescente)</i>
Metal Base (μm)	26; 38; 22; 11; 11; 33; 24; 8; 21; 13; 19; 10; 5; 13; 13; 9; 11; 46; 50; 12;	26; 38; 22; 11; 11; 33; 24; 8; 21; 13; 19; 10; 5; 13; 13; 9; 11; 46; 50; 12;	26; 38; 22; 11; 11; 33; 24; 8; 21; 13; 19; 10; 5; 13; 13; 9; 11; 46; 50; 12;
Média (μm)	20,0	20,0	20,0
Desvio-Padrão	12,8	12,8	12,8
Zona Termicamente Afetada (μm)	200; 141; 121; 110; 242; 194; 251; 178; 166; 270; 211; 191; 151; 241; 270; 206; 180; 170; 141; 231;	99; 107; 57; 67; 134; 53; 137; 85; 112; 73; 124; 58; 76; 112; 94; 105; 88; 98; 117; 64	58; 120; 90; 156; 139; 116; 151; 103; 89; 139; 167; 152; 84; 183; 123; 113; 98; 133; 147; 90;
Média (μm)	193	93	122
Desvio-Padrão	47,4	25,8	32,3

Ao contrário da região limítrofe entre o metal base e a zona termicamente afetada de contornos bem definidos, a zona de ligação (ou de transição) situada entre as zonas fundida e termicamente afetada é difícil de ser definida com precisão em função das similaridades microestruturais de ambas as regiões. Dificuldades semelhantes são descritas por Lathabai (2001) e Danielson (2003) em suas pesquisas. Os grãos alcançam o seu máximo em termos dimensionais na região correspondente à de fusão do metal.

A figura 4.3 exibe a microestrutura típica da zona fundida. Consiste de grãos grosseiros cujo interior apresenta células α paralelas sob diferentes direções circundadas pela fase β . Verifica-se que o espaçamento entre essas células é tanto maior quanto mais elevados os aportes de energia.

A figura 4.4 apresenta as microestruturas das regiões presentes de uma junta soldada segundo análise por microscopia eletrônica de varredura. A amostra em estudo refere-se ao programa de soldagem #A, àquele correspondente aos maiores aportes de energia. As informações aqui levantadas correspondem com aquelas anteriormente apresentadas segundo análises por microscopia óptica.

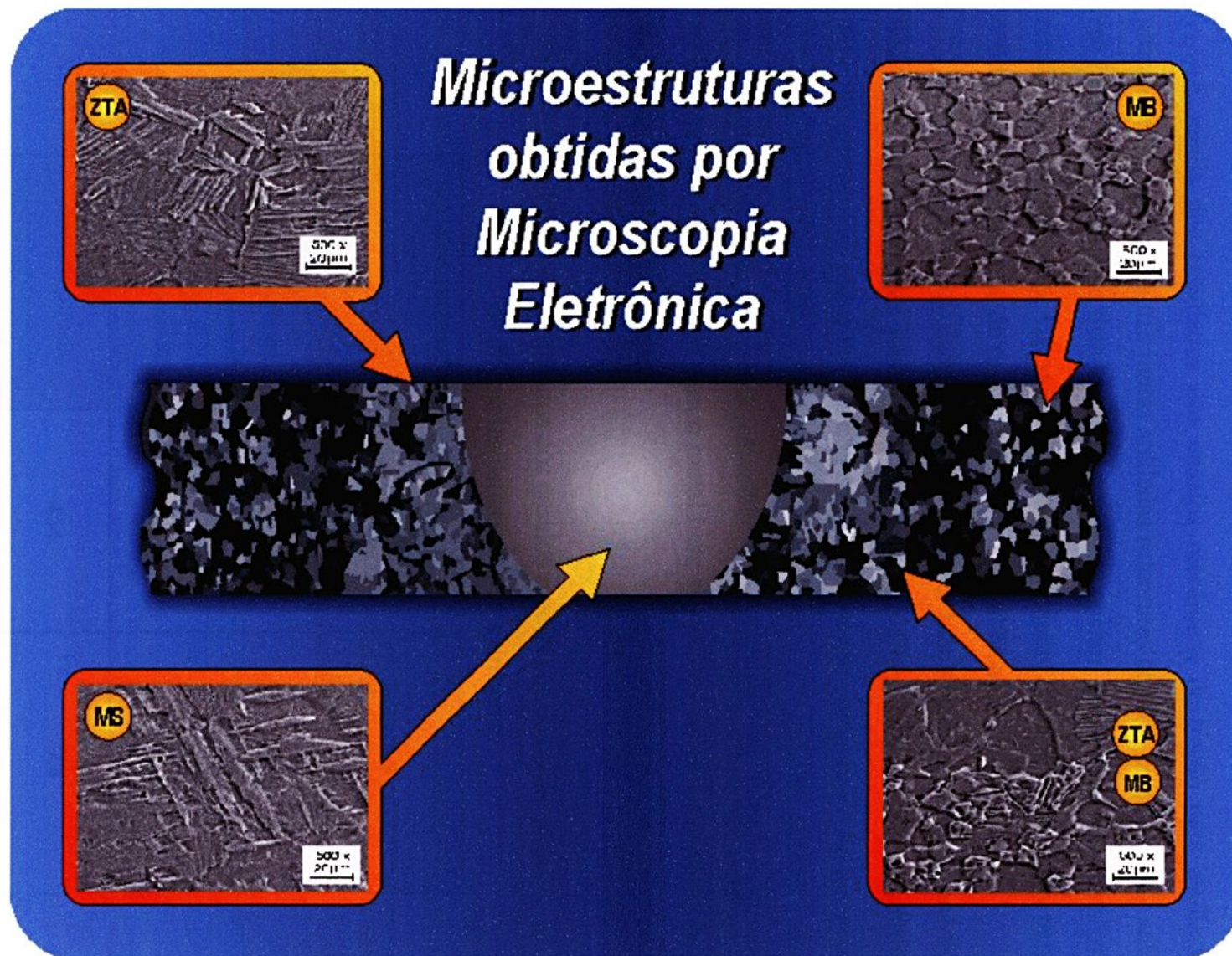


Figura 4.4 – Microestruturas eletrônicas representativas de uma junta soldada; 500x

4.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A média dos resultados dos ensaios mecânicos de tração para avaliação das propriedades mecânicas das juntas soldadas referentes aos três programas de soldagem em estudo encontram-se listados na tabela 4.4. Constam igualmente na tabela os dados relativos ao metal base. Os valores médios correspondem a nove ensaios para cada condição de soldagem, e de apenas três para o metal base.

De acordo com os dados apresentados na tabela 4.4, os valores médios dos limites de resistência das juntas soldadas estão próximos entre si. Os programas #A, #C e #B apresentam reduções desta propriedade quando comparados ao do metal base da ordem de 12,5%, 9,5% e de 8,5% respectivamente. Os maiores índices referem-se ao programa de energias mais elevadas. Por analogia, os índices que mais se aproximam daqueles obtidos para o metal base são atribuídas ao ciclo de soldagem de aportes de energia mais baixos.

Tabela 4.4 -Resultados dos ensaios mecânicos de tração para os diferentes programas de soldagem

Propriedades Programas de Soldagem	Média Limite Resistência (MPa)	Desvio-Padrão
#A (corrente pulsada, velocidade crescente)	439	18,8
#B (corrente constante)	454	22,5
#C (corrente pulsada, amperagem decrescente)	454	9,4
Metal Base	502	8,3



Os valores dos perfis de microdureza das amostras soldadas representativas dos diferentes programas de soldagem são vistos na tabela 4.5. As medidas abrangem o metal base, as zonas termicamente afetadas e as zonas fundidas num total de cinco medidas por região.

As identificações são efetuadas em uma linha mediana entre a superfície e a base das seções transversais de cada uma das amostras correspondentes aos programas de soldagem, partindo-se do metal base em direção à zona fundida.

Tabela 4.5 – Resultados dos perfis de microdureza Vickers

Programa de Soldagem Microdureza Vickers	#A <i>(corrente pulsada, velocidade crescente)</i>	#B <i>(corrente constante)</i>	#C <i>(corrente pulsada, amperagem decrescente)</i>
Metal base (HV)	204,6; 203,3; 203,9 205,1; 204,2;	204,6; 203,3; 203,9 205,1; 204,2;	204,6; 203,3; 203,9 205,1; 204,2;
Média (HV)	204,2	204,2	204,2
Desvio-Padrão	0,7	0,7	0,7
Zona Termicamente Afetada (HV)	173,4; 189,8; 172,8 177,2; 175,5	191,0; 201,3; 197,0 198,1; 198,7	187,4; 184,5; 181,6 187,1; 185,2
Média (HV)	177,7	197,2	185,2
Desvio-Padrão	6,9	3,8	2,3
Metal de Solda (HV)	176,0; 175,0; 177,7 174,3; 173,6	189,2; 180,5; 183,3 187,7; 188,4	178,8; 181,0; 182,8 175,2; 177,3
Média (HV)	175,3	185,8	179,0
Desvio-Padrão	1,6	3,7	2,9

Uma característica comum aos três programas de soldagem é a proximidade nos valores dos resultados. Independente do programa de soldagem associam-se os menores valores de microdureza com as regiões fundidas dos corpos-de-prova. Os maiores índices deste parâmetro são verificados para o metal base. De forma análoga ao limite de resistência, os valores médios crescentes de microdureza são exibidos pelos programas #A, #C e #B, equivalentes à ordem decrescente em termos de energia de soldagem, como já seria esperado.

A fim de facilitar a interpretação dos resultados são feitas correlações das propriedades mecânicas das juntas soldadas com as suas microestruturas equivalentes. As maiores energias de soldagem praticadas pelo programa #A, razão pelo crescimento exagerado dos grãos nas zonas termicamente afetada e fundida, assim como pelo maior espaçamento verificado entre as estruturas aciculares (α) presentes no interior dos grãos (β), apresentam os menores índices de limite de resistência mecânica e de microdureza em comparação aos demais. Os valores médios de microdureza, quase que coincidentes, para as zonas fundida e termicamente afetada, são justificados pelas proximidades nas dimensões dos grãos nestas regiões.

Tradicionalmente, as literaturas clássicas a respeito de materiais apresentam analogias em relação às suas propriedades. Um destes exemplos refere-se à dependência entre o tamanho de grão, dureza e resistência, calculada por meio das equações:

$$H = H_0 + k_h d^{-1/2} \text{ e} \quad (4.1)$$

$$\sigma = \sigma_0 + k.d^{-1/2} \quad (4.2)$$

sendo H a dureza; σ a tensão de escoamento; d o diâmetro médio do grão; k_h e k os coeficientes angulares das retas; H_0 e σ_0 as interseções das retas com o eixo das ordenadas.

De acordo com as expressões acima, as grandezas dureza e tensão são inversamente proporcionais ao tamanho médio de grão confirmando os resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Por analogia, a granulação mais fina obtida segundo o programa #B, correspondente ao de menores energias de soldagem, proporciona os

melhores resultados em termos de propriedades mecânicas, visto apresentar os menores tamanhos de grãos e, por conseguinte os melhores índices para a dureza e limite de resistência (DIETER, 1981; REED-HILL, 1982).

Os resultados dos ensaios mecânicos, independente do programa de soldagem, estão de acordo com os padrões chineses (NORMAS CHINESAS a e b), uma vez que a sua condição de aceite limita em 80% a resistência mínima das juntas soldadas em relação aos valores obtidos para o metal base. Nesta pesquisa, todos os valores levantados, sem exceção, estão acima do mínimo especificado, haja vista os índices médios de 87,5%, 90,5% e 91,5% para os programas em estudo.

4.7 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE FRATURA

De acordo com as ilustrações apresentadas na figura 4.5, o corpo-de-prova em questão apresenta fratura dúctil em tração, uma vez que a sua ruptura é precedida de deformação plástica localizada, caracterizada pela redução no diâmetro. Sua superfície apresenta-se predominantemente irregular e de coloração cinzenta, conforme detalhe de uma das extremidades da amostra ensaiada. Observações em ambas às faces do exemplar confirmam o predomínio da fratura por cisalhamento. Neste tipo de fratura, a trinca se propaga localizadamente em planos cisalhantes orientados a 45° com o eixo longitudinal (ASM, 1999b; WULPI, 1997).

Estudos indicam que a fratura se inicia a partir da região central da seção do corpo-de-prova, em um plano macroscopicamente normal ao eixo de aplicação da tensão de tração. À medida que a deformação progride, a trinca cresce em direção à superfície do corpo-de-prova. Este fenômeno está relacionado à nucleação de pequenas microcavidades (**dimples**), em geral associadas a inclusões, partículas de segunda fase, partículas finas de óxidos e, por fim, em pontos triplos de contornos de grão para metais de alta pureza. A coalescência dessas cavidades, resultado de seu crescimento sob a tensão aplicada, é a responsável pela formação de uma trinca dúctil (DIETER, 1991; WULPI, 1997).

Análise da superfície de fratura

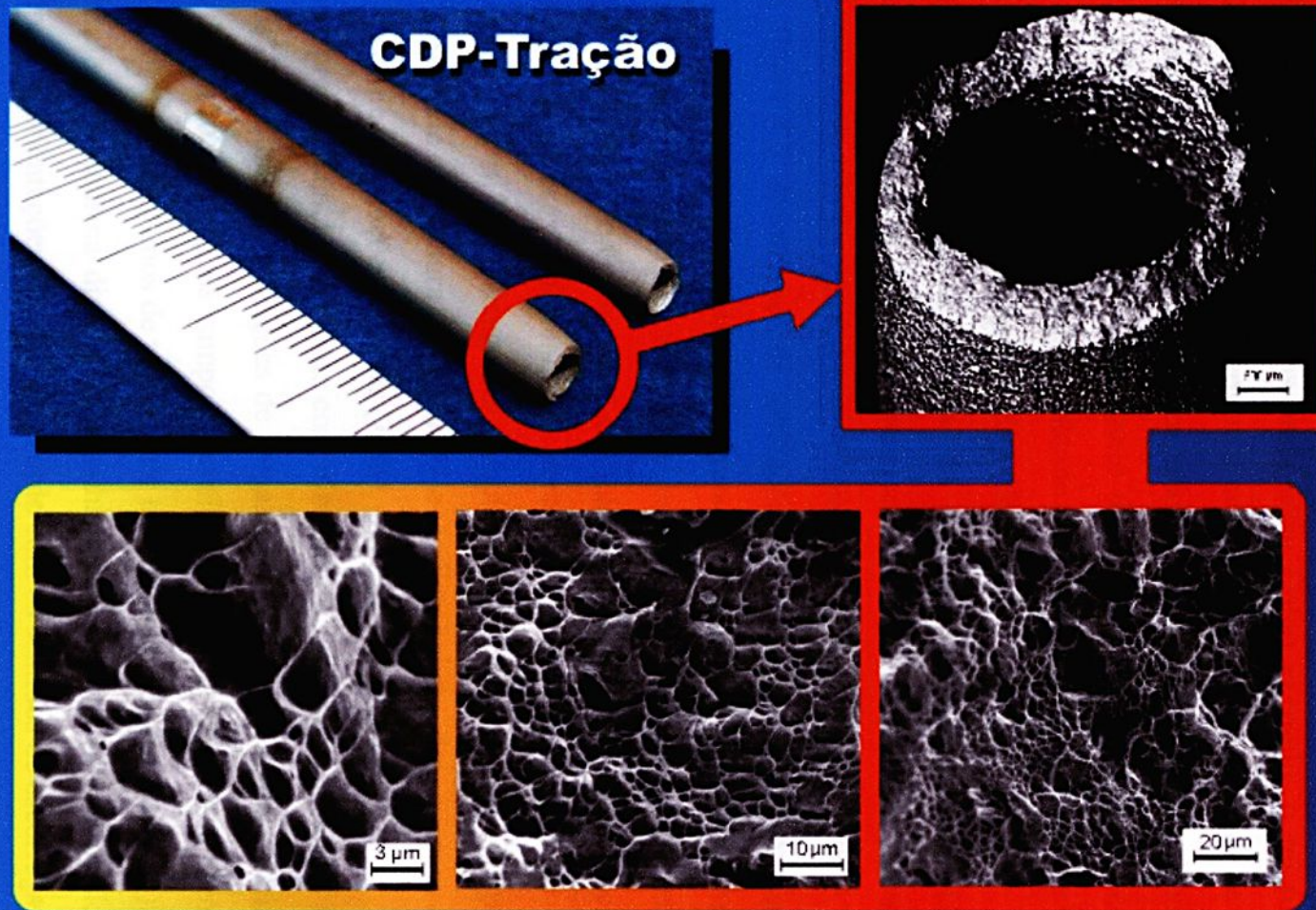


Figura 4.5 – Análise da superfície de fratura de um corpo-de-prova soldado (#A)



Em função da série de limitações envolvendo os exames a olho nu ou mesmo em microscópios ópticos, o microscópio eletrônico se ajusta perfeitamente ao estudo das superfícies de fratura. Suas vantagens compreendem a grande profundidade de campo, o elevado poder de resolução e a larga faixa de ampliações possíveis. O seu emprego é responsável pelos importantes avanços nesta área. Como exemplo, o microscópio eletrônico de varredura (MEV), que permite o exame direto das superfícies de fratura por meio dos elétrons secundários emitidos pelo material quando bombardeados por um feixe de elétrons. Informações a respeito do tipo de carregamento, direção de propagação das trincas bem como da ductilidade do material são perfeitamente viáveis quando do emprego deste equipamento (ASM, 1997c).

A análise da superfície de fratura do referido corpo-de-prova soldado e posteriormente submetido ao ensaio mecânico de tração uniaxial é apresentada mediante seqüência de três fotografias com diferentes ampliações (500, 1000 e 3000x) expostas na figura 4.5 decorrentes de avaliações efetuadas no MEV. A região de ruptura revela a presença de **dimples** de grandezas distintas. Aqueles de maiores dimensões referem-se a pontos de nucleação espaçados e em quantidade reduzida, condições que possibilitam o crescimento das microcavidades antes do coalescimento das mesmas. Os menores são formados a partir de um grande número de pontos próximos uns dos outros. Por conseguinte, relacionam-se o tamanho dos **dimples** e o aspecto da superfície de fratura ao número e a distribuição das microcavidades nucleadas a partir de solicitações externas (ASM, 1997 b; WULPI, 1997).

Nota-se a predominância de regiões com **dimples** de morfologia equiaxial cônica, característicos de fratura sob condições de cargas uniaxiais como aquelas verificadas nos ensaios de tração. Em alguns campos prevalecem os **dimples** rasos e alongados, formados a partir de mecanismos de ruptura por cisalhamento (**shear fracture**). Neste caso, os **dimples** apontam na direção do cisalhamento em ambas as superfícies de fratura, porém com orientações opostas, de acordo com os sentidos de escorregamento. Ao contrário, em situações de fratura sob rasgamento (**tear fracture**), os **dimples** indicam um único sentido, determinado em função do mecanismo de coalescimento das microcavidades (ASM, 1997 b; DIETER, 1981; WULPI, 1997).

Em síntese, a fratura está localizada em uma seção do corpo-de-prova distante aproximadamente 31 mm do centro do cordão de solda. Os níveis de temperatura ali alcançados não são suficientes para eventuais transformações microestruturais. Fratura dúctil por cisalhamento caracterizada pela presença de **dimples**. Não há evidências de trincas, poros ou inclusões nas áreas denotadas para estudos.



5 SOLDAGEM DO SISTEMA PROPULSOR DO SATÉLITE CBERS

O Sistema Propulsor do Satélite **CBERS** consiste de 42 componentes (válvulas, filtros, tanques de armazenamento de propelentes e transdutores dentre outros), vários conectores e tubulações de pequeno diâmetro para interligá-los, de modo a formar as linhas de ultra-alta pureza do circuito de hidrazina. O conjunto como um todo é confeccionado em titânio comercialmente puro - grau 2 - havendo 126 pontos de união. Opta-se pelo processo **TIG** orbital por várias razões como a qualidade, a confiabilidade, a produtividade e a versatilidade por parte deste em relação à soldagem manual e aos demais processos.

Por se tratar de um sistema de ultra-alta pureza onde um erro, por menor que ele seja, pode levar à perda de todo o conjunto, os cuidados iniciam-se no próprio manuseio e estocagem das peças (componentes, tubos e conexões). Em seguida às inspeções detalhadas para a verificação de conformidade com as especificações vigentes, os componentes são segregados em locais denominados áreas de quarentena. Nestas, os níveis de temperatura, de umidade e de particulados são mantidos em concordância com os padrões adotados. De acordo com o desenvolvimento dos trabalhos, as peças são separadas e manuseadas com luvas apropriadas evitando-se a contaminação das mesmas.

De posse do desenho de conjunto do Sistema Propulsor, estuda-se minuciosamente o projeto identificando-se os vários pontos de união, questões relacionadas à restrição de espaço físico para o posicionamento do cabeçote em alguns setores e, de modo análogo, o acesso a determinadas juntas. Em seguida, subdivide-se o Conjunto em grupos a fim de facilitar as operações de soldagem. Prepara-se cada um deles separadamente, obedecendo-se à seqüência de fabricação previamente qualificada, integrando-os ao corpo do Satélite de acordo com o desenvolvimento dos trabalhos.

A primeira etapa dos trabalhos consiste no dobramento dos tubos, baseado nos desenhos de projeto – escala 1:1. Utiliza-se de uma dobradeira de tubos, modelo MS-HTB-4T (**Swagelok**), projetada para a execução de operações manuais em tubos de



diâmetro externo iguais a 6,0 mm e ângulos que variam de 0° a 180° . É constituída de dois braços sendo um deles fixo e o outro articulado, escalas para indicar os graus assim como para medir o comprimento correto das peças. As figuras de 5.1 a 5.4 apresentam pormenores do equipamento como também da operação em si.



- 1 – Braço fixo
- 2 – Braço articulado
- 3 – Base de apoio
- 4 – Matriz de dobramento

Figura 5.1 – Dobradeira de tubos

- 1 - Rolete
- 2 - Trava



Figura 5.2 – Posicionamento do tubo



Figura 5.3 – Dobramento do tubo



Figura 5.4 – Remoção do tubo

As operações subseqüentes consistem do corte e do faceamento das extremidades dos tubos dobrados. A seguir, injeta-se argônio no interior dos mesmos para a remoção completa dos resíduos oriundos destas operações. A precisão nesta fase é imprescindível para a manutenção da qualidade dos cordões e da consistência dos resultados no tocante a morfologia, propriedades mecânicas, requisitos radiográficos e de estanqueidade. Finalizando, inspeciona-se dimensionalmente cada uma das peças, de modo a garantir as medidas de projeto além da configuração das juntas sob condições de perpendicularidade e de circularidade das seções. Na figura 5.5 notam-se algumas peças já dobradas momentos antes da inspeção dimensional.



Figura 5.5 – Setor de verificação dos tubos dobrados

A fase seguinte concentra-se na integração das peças com auxílio de braçadeiras especiais, de modo a garantir precisão no alinhamento das juntas (tubo-tubo; tubo-conexão; tubo-componente) segundo as tolerâncias permitidas. As juntas são inspecionadas individualmente com auxílio de uma lupa e de um espelho, a fim de certificar-se da ausência de frestas e de desalinhamentos em todo o seu perímetro.

Uma vez aprovadas, o conjunto é desmontado e as peças encaminhadas para o Laboratório de Contaminação para dar início aos procedimentos de limpeza. Uma das condições básicas para o sucesso da soldagem do Sistema Propulsor é a inexistência de contaminantes (graxas, óleos, poeiras, etc) nas superfícies externa e interna das peças.

Outrossim, a decapagem química, operação correspondente à fase de remoção do óxido superficial, é desenvolvida segundo procedimentos internos do próprio Instituto. Esta fase compreende o uso de tanques em aço inoxidável e em polipropileno, dispositivos para circulação forçada e aquecimento das soluções como também para a secagem dos tubos, deionizador, termômetros graduados, micrômetro e seladora de embalagens. A seguir, é apresentada a seqüência de decapagem química salientando as suas principais particularidades.

- Tanque n°1 (aço inoxidável)
 - Objetivo: desengordurar
 - Solução: metil-etil cetona (500 l)
 - Temperatura: ambiente
 - 1° estágio: conservar durante 5 s a circulação forçada de solução pelo interior do tubo
 - 2° estágio: mergulhar o tubo por completo no tanque mantendo-o nesta condição pelo período mínimo de 10 min e máximo de 15 min

- Tanque n°2 (aço inoxidável)
 - Objetivo: limpeza alcalina
 - Solução: água deionizada (500 l) e desengraxante (28 kg)
 - Temperatura: $55^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
 - 1° estágio: conservar durante 5 s a circulação forçada de solução pelo interior do tubo
 - 2° estágio: mergulhar o tubo por completo no tanque mantendo-o nesta condição pelo período de 10 min

- Tanque n°3 (polipropileno)
 - Objetivo: lavagem
 - Solução: água corrente (500 l)
 - Temperatura: ambiente
 - 1° estágio: conservar durante 10 min a circulação forçada de água pelo interior do tubo



- 2º estágio: verificar o ph da água presente no interior do tubo; prosseguir com o ciclo caso o seu valor esteja entre 6,5 e 7,0; acima deste, retorná-lo ao tanque
- Tanque nº4 (polipropileno)
 - Objetivo: ataque ácido (decapagem química)
 - Solução: água deionizada (420 l), ácido nítrico (77 l) e ácido fluorídrico (15 l)
 - Temperatura: ambiente
 - 1º estágio: conservar durante 5 s a circulação forçada de solução pelo interior do tubo
 - 2º estágio: mergulhar o tubo por completo no tanque mantendo-o nesta condição pelo período de 90 s
- Tanque nº5 (polipropileno)
 - Objetivo: lavagem
 - Solução: água corrente (500 l)
 - Temperatura: ambiente
 - 1º estágio: conservar durante 10 min a circulação forçada de água pelo interior do tubo
 - 2º estágio: verificar o ph da água presente no interior do tubo; prosseguir com o ciclo caso o seu valor esteja entre 5,5 e 6,5; abaixo deste, retorná-lo ao tanque
- Tanque nº6 (aço inoxidável)
 - Objetivo: lavagem
 - Solução: água deionizada (500 l)
 - Temperatura: $55^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
 - 1º estágio. conservar durante 10 min a circulação forçada de água deionizada pelo interior do tubo
 - 2º estágio: remover o tubo do tanque.

Inspeções diárias do estado dos banhos em termos de volume e ph, operacionalidade da linha – equipamentos – assim como a verificação dimensional de

cada peça de titânio acompanhada de registros fazem parte do contexto da garantia de qualidade.

Cabe ressaltar que as conexões e componentes de dimensões reduzidas limpas em laboratório não são submetidas ao desengraxante alcalino, haja vista a possibilidade de deposição de resíduos no interior dos mesmos em função de suas configurações e uma futura contaminação do Sistema Propulsor.

Todas as peças, independente se tubos, conexões ou componentes decapadas em laboratório, são secas primeiramente com jatos de argônio (99,999%) sob pressão de 600 a 800 kPa e, em seguida, postas em estufa apropriada pelo período de 2 horas sob uma temperatura de 50 a 60°C.

É proibitiva a imersão de certos componentes (filtros, válvulas transdutores dentre outros) em quaisquer dos banhos, sendo permitido apenas a limpeza das extremidades dos tubos a ele conectados, conforme esquematiza a figura 5.6.

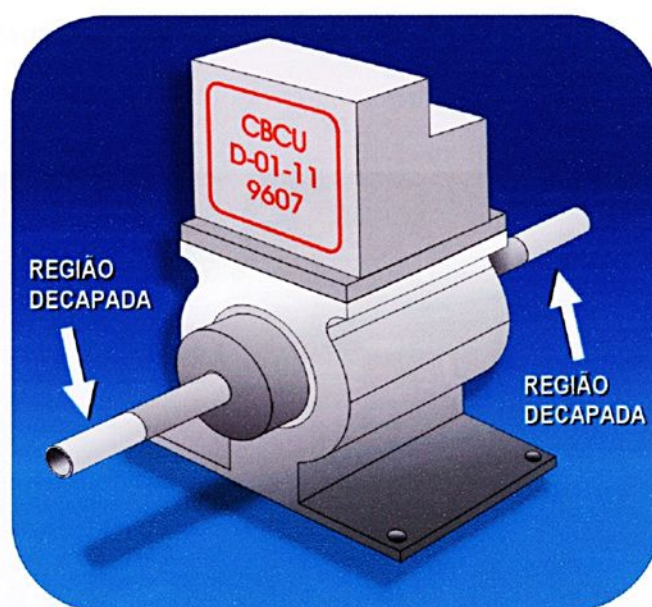


Figura 5.6 – Decapagem das extremidades de uma válvula

Para tubos e conexões de pequenas dimensões, substituem-se os tanques por cubas ou recipientes em polietileno ou vidro como aqueles utilizados nas fases de levantamento de parâmetros de soldagem e de qualificação.

Finalizadas as operações de decapagem química, as peças são acondicionadas em embalagens apropriadas em polietileno previamente purgadas com argônio, seladas, identificadas e preservadas sob uma segunda embalagem, seguindo o mesmo procedimento anterior. Esta prática tem como objetivo eliminar, por completo, a possibilidade de qualquer tipo de contaminação.

Posteriormente, as peças embaladas são enviadas para o Laboratório de Soldagem para a operação de limpeza final. O processo consiste na circulação forçada de álcool isopropílico pelo interior das peças conectadas ao sistema sob temperatura e pressão controladas. Após o seu término, as peças são desconectadas do circuito de limpeza e secas sob temperatura de 50 a 60°C durante 2 horas. Em seguida, são novamente embaladas segundo o mesmo procedimento descrito anteriormente, permanecendo deste modo até a sua integração ao corpo do Satélite.

Na integração final, as peças são posicionadas e mantidas alinhadas com auxílio de braçadeiras especiais (figuras 5.7 e 5.8), seguida de um reexame minucioso das juntas (inspeção visual com auxílio de lupa e de espelho).

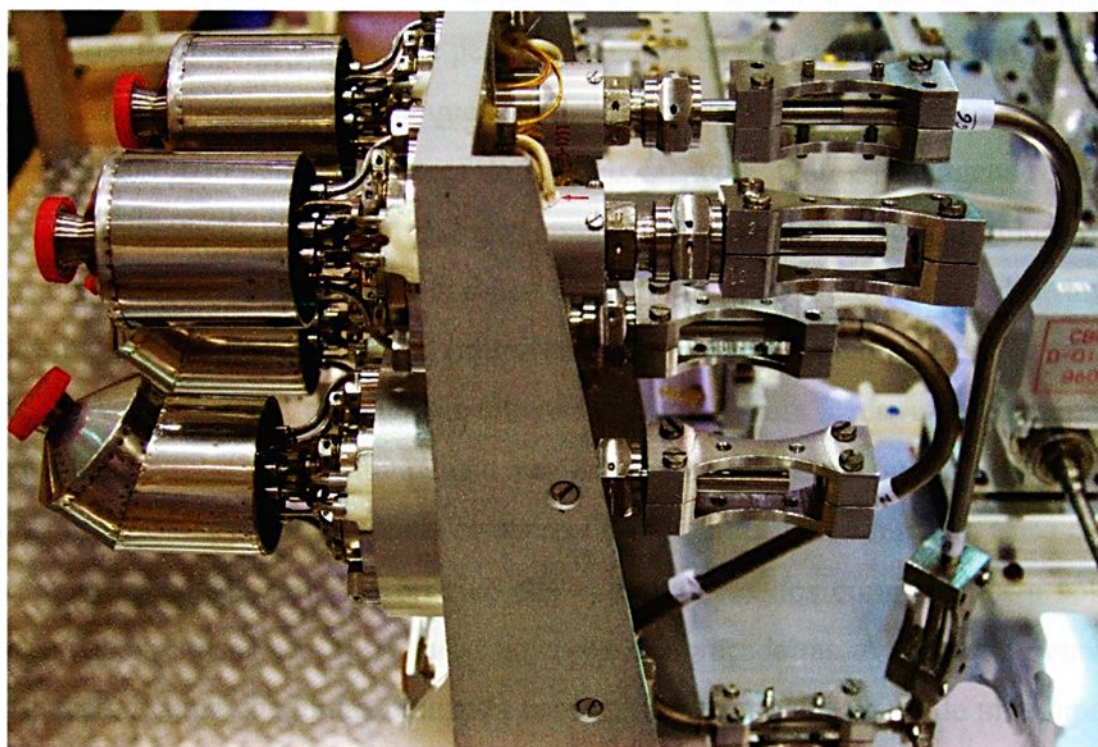


Figura 5.7 – Emprego de braçadeiras para o alinhamento das peças

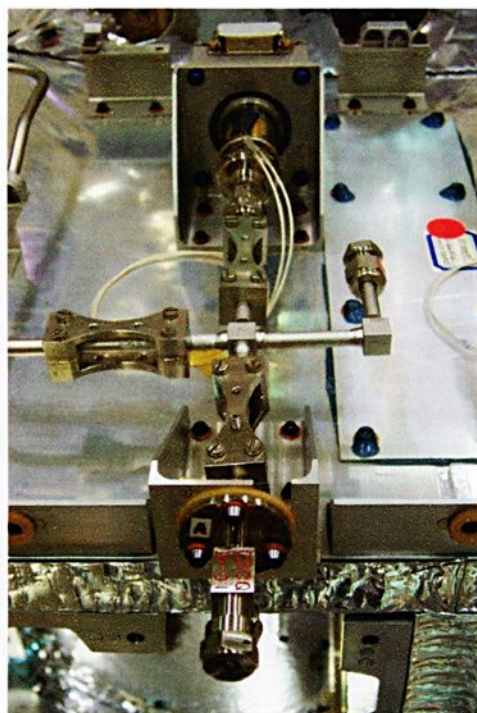


Figura 5.8 – Utilização de braçadeiras para o posicionamento correto

Vale a pena frisar mais uma vez a importância do uso de braçadeiras no alinhamento de componentes de pequenos diâmetros para a soldagem TIG orbital. Por meio desta técnica, impede-se que o posicionamento correto entre as partes seja feito de modo forçado pelos alojadores do próprio cabeçote. Outras vantagens referem-se à impossibilidade de movimentação dos componentes durante o ciclo de soldagem, além de evitar uma sucessão de defeitos (desalinhamentos) ao longo das linhas de distribuição. Ambas as questões promovem a rejeição de todo o Sistema.

A verificação do alinhamento é conduzida para cada uma das juntas em separado, processo lento, minucioso, realizado por não menos que dois técnicos. Uma vez aprovadas, é dada seqüência às operações de ponteamto manual. Caso contrário, repara-se o posicionamento relativo das extremidades dos componentes a soldar por meio dos parafusos centrais fixados ao corpo das braçadeiras. A figura 5.9 representa a inspeção de uma das juntas realizada com auxílio de um espelho e de uma lupa para a varredura de todo o seu perímetro.



Figura 5.9 – Inspeção visual de uma junta momentos antes do ponteamento manual

Uma das principais particularidades de um sistema de ultra-alta pureza é a necessidade de purga de gás inerte para o seu interior em ambas as operações, de ponteamento e de soldagem. Através desta técnica, associada ao uso de um terminal com orifício de restrição, cria-se uma pressão positiva no interior do Conjunto, de modo que os cordões soldados nivelem-se com as paredes das peças, tanto interna quanto externamente. Em outras palavras, juntas soldadas de morfologia plana e acabamento liso, a fim de que não ocorram interferências no escoamento do fluido (hidrazina) pelo interior do Sistema. Igualmente, outros benefícios a ela associados estão relacionados ao resfriamento e ao impedimento de oxidação interna da região soldada durante a operação de união.

Técnicas de ultra-alta pureza demandam por emprego de gases especiais (99,999%) com características condizentes com as condições de trabalho. Porém, não apenas o gás é capaz de atender as necessidades em termos de eficiência da proteção.

Agrega-se o uso de filtro 2 μ m conectado ao regulador de pressão/vazão para argônio bem como o emprego de diafragma em aço inoxidável. Outros procedimentos compreendem o emprego de mangueiras especiais - de baixa permeabilidade e sem desprendimento de particulados - e arruelas em nylon, as quais admitem apertos e desapertos repetidas vezes. Deste modo, assegura-se que as linhas de distribuição de argônio ao longo do Sistema Propulsor são estanques em relação à penetração de substâncias nocivas ao meio, como por exemplo oxigênio e umidade dentre outros.

A seguir, a título de ilustração, é apresentada uma série de figuras onde é possível acompanhar os principais passos da montagem do terminal com furo de restrição usado nas etapas de levantamento de parâmetros de soldagem, de qualificação e, presentemente, na soldagem do Sistema Propulsor.



Figura 5.10 – Componentes

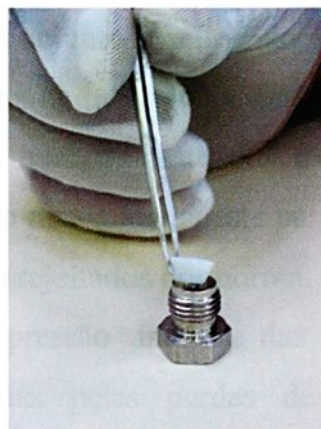


Figura 5.11 – Montagem
(arruela cônica
para vedação)

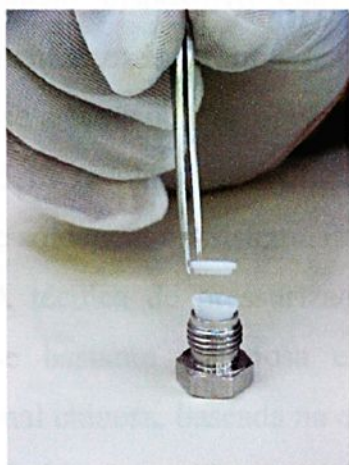


Figura 5.12 – Montagem
(arruela cilíndrica
para vedação)



Figura 5.13 – Montagem
(conexão)

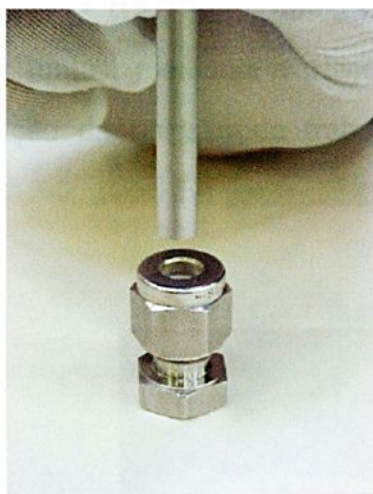


Figura 5.14 – Montagem
(tubo)

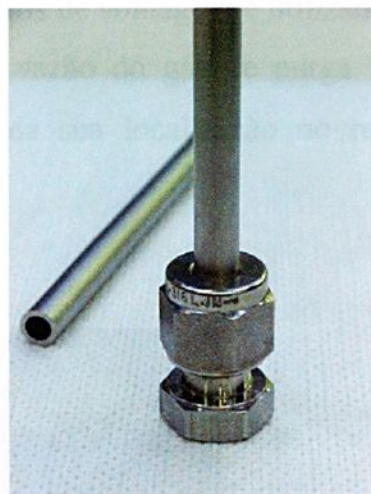


Figura 5.15 – Conjunto
concluído

Verifica-se freqüentemente o estado geral do conjunto empregado para o controle da pressão interna do Sistema e, por conseguinte, da morfologia dos cordões de solda. A presença de folgas entre os componentes e/ou desgaste dos mesmos, particularmente das arruelas em nylon, conduzem a queda nos valores deste parâmetro resultando em cordões côncavos que, em sua maioria, são rejeitados por norma.

A fase subsequente consiste na leitura da pressão interna das juntas individualmente, em virtude de variações ocasionadas pelas perdas de carga resultantes de suas localizações bem como da presença de conexões e de componentes ao longo das linhas de distribuição. Primeiramente, remove-se a braçadeira e insere-se um pequeno dispositivo entre as partes a soldar. Detalhes da disposição dos equipamentos e da própria leitura em si são descritos no capítulo 3 (item 3.2.6). Repete-se a seqüência de operações para cada uma das juntas em separado. As figuras 5.16 e 5.17 revelam duas situações distintas de leitura de pressão interna durante a etapa de soldagem do Sistema Propulsor.

A técnica de pressurização para o controle da morfologia da zona fundida revela-se bastante vantajosa e de grande praticidade comparada à metodologia tradicional chinesa, baseada na experiência prática dos seus operadores. Neste caso, os técnicos chineses utilizam-se de vários programas de soldagem para a união de componentes de um mesmo diâmetro, haja vista as alterações nos valores da corrente

de soldagem em função da localização da junta a ser soldada. Na soldagem do Sistema Propulsor do **CBERS**, um único conjunto de parâmetros de soldagem é utilizado para todas as juntas, mediante variações nos valores da vazão do gás de purga para a manutenção da pressão de trabalho, independente da sua localização no referido Sistema.



Figura 5.16 – Verificação da pressão em uma junta próxima aos tanques de hidrazina

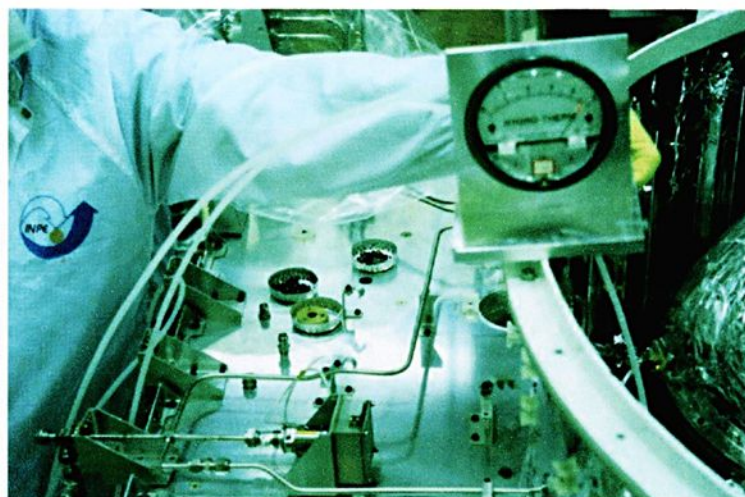


Figura 5.17 – Verificação da pressão em uma junta

Testes realizados em corpos-de-prova indicam como pressão ideal o valor de 4,5 cw. Este resulta em cordões planos em ambas as superfícies para amostras com

200 mm de comprimento, 6,0 mm de diâmetro externo, espessura de parede igual a 1,0 mm e terminal com orifício de restrição de 2,0 mm.

Finalizada a leitura, remove-se o dispositivo (tê) e reposiciona-se cuidadosamente a braçadeira no seu local de origem. A seguir, a junta é ponteadada manualmente por meio de um tocha TIG e de um pedal para o controle da amperagem, ambos conectados à fonte de soldagem orbital. Dois pontos espaçados de 180° são suficientes para manter as peças em posição. Cabe ressaltar que a execução de pontos em peças do **CBERS** é, de praxe, precedida de testes em corpos-de-prova. A operação de ponteamto desenvolve-se sob vazão constante de gás de purga pelo interior do Sistema.

Imediatamente após o seu término, examinam-se os pontos visualmente (superfície externa) para fins de comparação com os padrões adotados. Em sistemas de ultra-alta pureza não é permitido o uso de boroscópio para verificação do nível de qualidade, quer de pontos ou mesmo de cordões de solda, haja vista a possibilidade de contaminação por meio de toques da haste rígida do instrumento com as paredes internas dos tubos. Esta prática é comum apenas nas fases de levantamento de parâmetros de soldagem e de qualificação. As figuras 5.18, 5.19 e 5.20 exemplificam condições distintas de ponteamto, a primeira executada sobre uma bancada devido a restrições de espaço físico, e as demais no próprio corpo do Satélite.



Figura 5.18 – Ponteamto de uma peça sobre a bancada



Figura 5.19 – Operação de ponteamento no próprio Satélite



Figura 5.20 – Ponteamento na região dos tanques

Finalizados os pontos, remove-se a braçadeira. A tocha manual e o pedal são substituídos pelo cabeçote orbital, observando-se criteriosamente os alojadores e o eletrodo, seu estado geral e condições de instalação. A seguir, disponibiliza-se o programa de calibração da velocidade de deslocamento do eletrodo, de modo a assegurar precisão deste parâmetro durante os ciclos de união das peças.

De posse do programa pré-estabelecido na fase de qualificação inicia-se a soldagem. Solda-se primeiramente um corpo-de-prova, inspecionado de imediato. Esta metodologia tem como principal objetivo fornecer informações a respeito do estado e do funcionamento do sistema de soldagem orbital (fonte de energia e cabeçote), das condições de purga e de limpeza, se adequadas ou não, bem como do próprio operador no tocante ao manuseio dos equipamentos.

Testes de soldagem em corpos-de-prova são práticas habituais quando da substituição da tocha manual pelo cabeçote orbital. Os experimentos desenvolvem-se segundo as condições reais de soldagem, ou seja, a união de um par de tubos ao contrário de um simples cordão sobre o duto. Uma vez aprovado, prepara-se para a soldagem dos componentes do **CBERS**. Limitam-se em seis (um para o teste em corpo-de-prova) o número de operações de soldagem realizadas com um mesmo eletrodo. Após o sexto ciclo o componente desgastado é substituído. Todavia, cuidados em relação ao material, geometria, dimensões e instalação são preocupações constantes ao longo de todo período de fabricação. De modo análogo ao ponteamto, a purga de gás inerte é igualmente empregada nas operações de união das peças, independente se realizadas sobre bancadas ou na própria estrutura do Satélite.

A técnica de purga é extremamente crítica para todas as soldas, não apenas pelas características do gás, mas em conjunto com a pressão positiva interna, ser capaz de criar condições precisas de distribuição de argônio, de modo a proteger e a controlar a morfologia dos cordões. Os valores de vazão de gás necessários a obtenção de uma pressão ideal variam de acordo com o diâmetro da tubulação, com a localização das juntas em relação ao ponto de entrada de gás, com a presença de componentes (válvulas, filtros, etc) ao longo das linhas de distribuição e com o diâmetro do orifício de restrição.



A fim de elucidar possíveis dúvidas em relação à metodologia utilizada no Satélite **CBERS**, são apresentados os principais parâmetros empregados em algumas juntas de um grupo selecionado de modo aleatório. Baseado no posicionamento das mesmas escolhem-se dois pontos, um para a introdução de gás de purga para o interior do conjunto e um segundo para a saída dos gases, local onde é instalado o tampão com orifício de restrição. Os demais pontos permanecem vedados de modo a evitar quedas de pressão ao longo do Conjunto. A figura 5.21 esquematiza a disposição das juntas em relação ao Sistema Propulsor. Os dados com a seqüência de medição de pressão e com os demais parâmetros de soldagem são fornecidos sob a forma de tabelas.

De acordo com a figura, seleciona-se a junta 30 como o terminal de injeção de gás de purga comum a todo o conjunto. Estabelece-se a seguinte seqüência de medição: 26, 29, 27, 31 e 28, sendo que as juntas 26 e 29 dispõem de um ponto em comum para a saída dos gases. Analogamente, o ponto 25 é o mesmo utilizado para as juntas 28 e 31. Para a junta 27 resta apenas a extremidade 24. A tabela 5.1 é auto-explicativa.

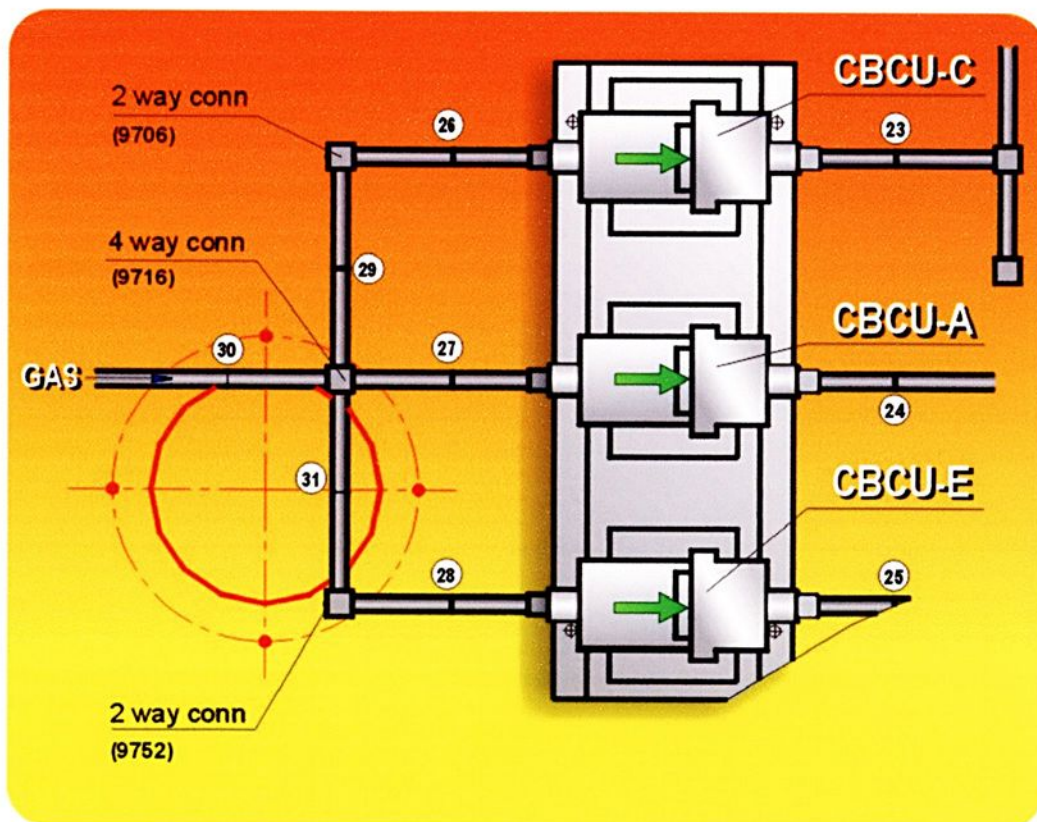


Figura 5.21 – Esquema da distribuição de juntas em parte do Sistema Propulsor

Tabela 5.1 Exemplo da seqüência de medição de pressão adotada para o grupo 2

PARÂMETROS \ JUNTAS	JUNTAS				
	26	29	27	28	31
Terminal de entrada	30	30	30	30	30
Terminal de saída	23	23	24	25	25
Extremidades vedadas	24,25	24,25	23,25	23,24	23,24
Pressão de entrada (cw)	$P_{30}=4,5$	$P_{30}=4,5$	$P_{30}=4,5$	$P_{30}=4,5$	$P_{30}=4,5$
Pressão na junta (cw)	$P_{26}=4,5$	$P_{29}=4,5$	$P_{27}=4,5$	$P_{28}=4,5$	$P_{31}=4,5$

Os valores coincidentes da pressão de entrada com aqueles para cada uma das juntas indicam não haver perdas ao longo desta seção em função de suas dimensões reduzidas. Finalizadas as leituras, iniciam-se as operações de soldagem segundo os parâmetros do programa #A mantendo-se uma pressão de entrada de gás de 4,5 cw, valor suficiente para a produção de cordões de acordo com os critérios chineses (NORMAS CHINESAS a e b). Dados adicionais para cada uma das juntas são fornecidos pela tabela 5.2.



Tabela 5.2 Dados referentes às juntas do grupo n °2

GRUPO NÚMERO 2						
PROJETO		CBERS-2	CBERS-2	CBERS-2	CBERS-2	CBERS-2
DATA		-	-	-	-	-
JUNTA N°		26	29	27	28	31
MATERIAL		Ti (grau 2)	Ti (grau 2)	Ti (grau 2)	Ti (grau 2)	Ti (grau 2)
DIÂMETRO EXTERNO (mm)		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
ESPESSURA (mm)		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
JUNTA: TOPO, CHANFRO RETO		conector	conector	conector	conector	conector
		(9706)	(9706)	(9716)	(9716)	(9752)
		válvula	conector	válvula	conector	conector
		(CBCU-C)	(9716)	(CBCU-A)	(9752)	(9752)
ELETRODO.	TIPO		2% Ce	2% Ce	2% Ce	2% Ce
	DIÂMETRO (mm)		1,6	1,6	1,6	1,6
	ÂNGULO (grau)		18	18	18	18
	COMPRIMENTO (mm)		21,6	21,6	21,6	21,6
GÁS	PROTEÇÃO (l/min)		Ar (99,999%)	Ar (99,999%)	Ar (99,999%)	Ar (99,999%)
			5,7	5,7	5,7	5,7
	PURGA (l/min)		Ar (99,999%)	Ar (99,999%)	Ar (99,999%)	Ar (99,999%)
			3,2	3,2	3,2	3,2
OPERADORES		Gérson	Gérson	Gérson	Gérson	Gérson
		Wilson	Wilson	Wilson	Wilson	Wilson
LOCAL		Laboratório Solda	Laboratório Solda	Laboratório Solda	Laboratório Solda	Laboratório Solda
FONTE ENERGIA	MODELO	207 A-HP	207 A-HP	207 A-HP	207 A-HP	207 A-HP
	SÉRIE	28877	28877	28877	28877	28877
CABEÇOTE	MODELO	9AF-750	9AF-750	9AF-750	9AF-750	9AF-750
	SÉRIE	30350	30350	30350	30350	30350
COMPRIMENTO DE ARCO (mm)		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
PRESSÃO INTERNA (cw)		4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
DIÂMETRO DO ORIFÍCIO (mm)		2,0	2,0	2,0	2,0	2,0



As figuras 5.22 e 5.23 ilustram duas condições distintas de soldagem. Após a conclusão de cada grupo realizam-se inspeções radiográficas dos cordões de solda. Ao término destas, efetuam-se as montagens das conexões roscadas seguida dos testes de fuga local e global do Sistema Propulsor como um todo.

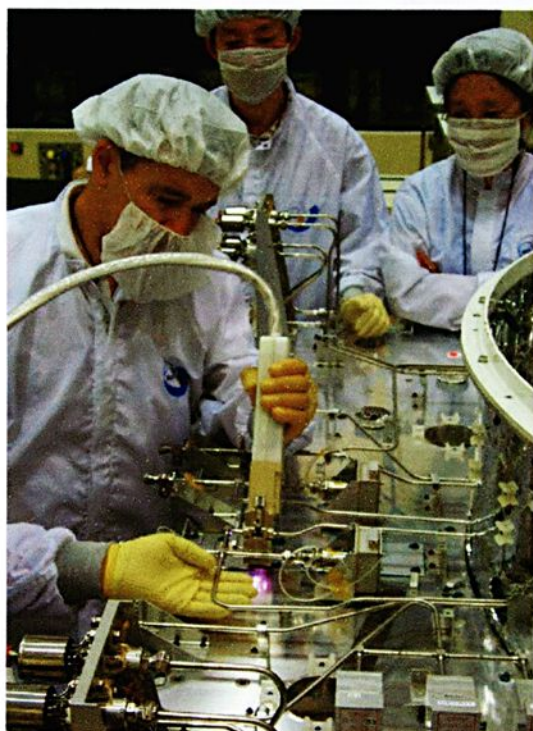


Figura 5.22 – Soldagem TIG orbital



Figura 5.23 – Soldagem TIG orbital

A seguir, é apresentado sob a forma de diagrama de blocos as principais operações que compõem a soldagem do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**.

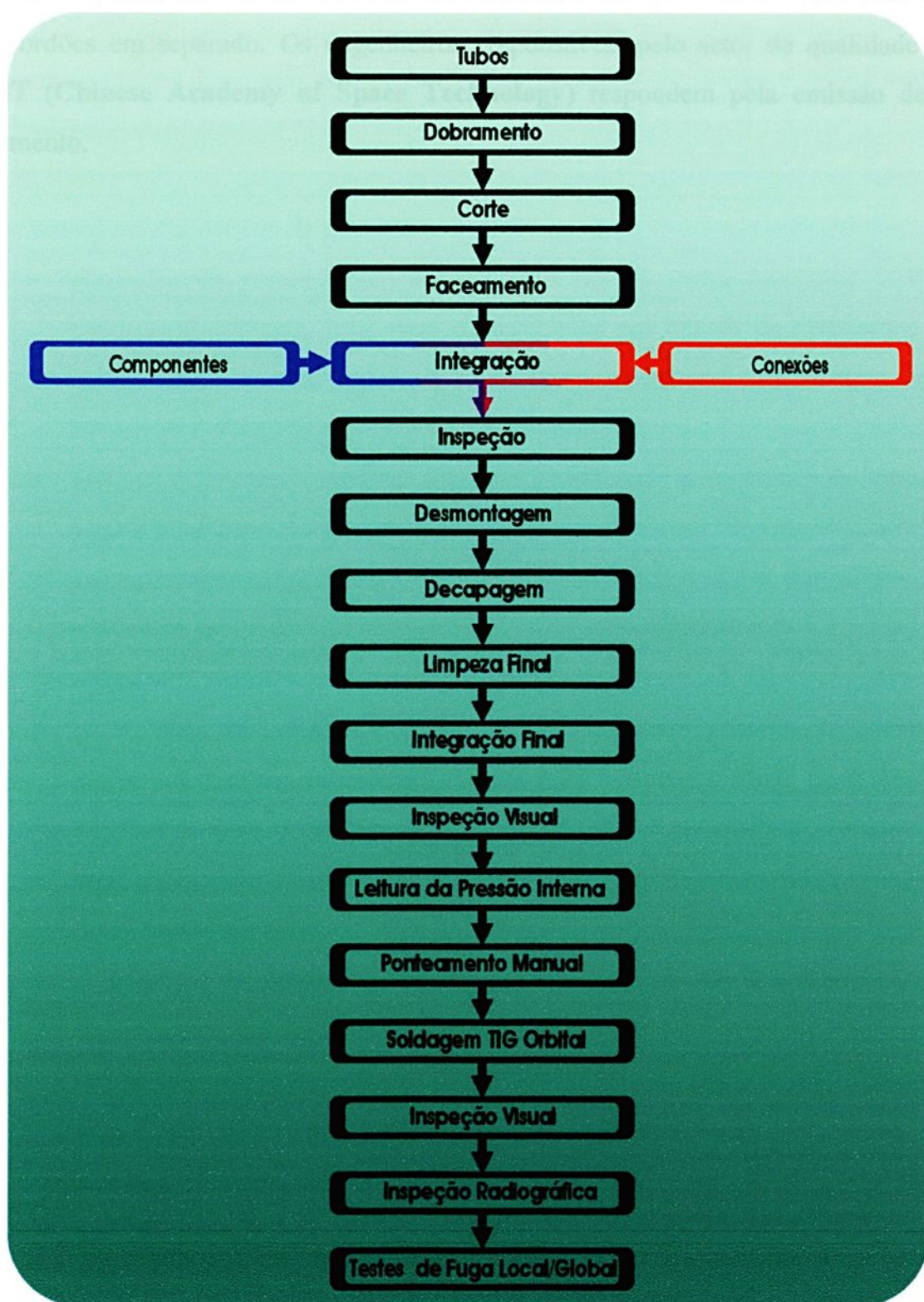


Figura 5.24 – Principais etapas da confecção do Satélite **CBERS**

Para finalizar, é apresentado no anexo E um histórico contendo os principais dados referentes às qualificações efetuadas ao longo de todo o ciclo de fabricação do Sistema Propulsor do Satélite **CBERS**. Os resultados são apresentados para cada um dos cordões em separado. Os engenheiros responsáveis pelo setor de qualidade da **CAST (Chinese Academy of Space Technology)** respondem pela emissão deste documento.



6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de procedimentos de soldagem TIG orbital, bem como a sua aplicação na união dos componentes do Sistema Propulsor do Satélite CBERS conduz às seguintes conclusões:

Soldagem dos corpos-de-prova

- a técnica de pressurização interna com gás de purga mostra-se bastante oportuna e eficiente, haja vista os resultados em termos de morfologia das uniões soldadas dos corpos-de-prova para efeitos de qualificação, todos isentos de defeitos (concavidade, convexidade); e
- embora a literatura especializada não recomende a soldagem de tubos de seções reduzidas sob um único aporte de energia (como àquele utilizado pelo programa #B) o seu emprego é perfeitamente viável desde que associado à técnica de pressurização interna segundo registros desta pesquisa.

Qualificação

- os cordões de solda do programa #A (corrente pulsada e velocidade crescente) revelam os menores valores para a dureza e limite de resistência. Tal fato deve-se às maiores dimensões dos grãos e aos maiores espaçamentos verificados para as estruturas aciculares alfa, ambos traduzidos pelas baixas taxas de resfriamento; e
- o programa #B (corrente constante) correspondente ao de menores energias de soldagem, proporciona os melhores resultados em termos de propriedades mecânicas, visto apresentar os menores tamanhos de grãos e, por conseguinte, os melhores índices para a dureza e limite de resistência.

Soldagem do Sistema Propulsor do Satélite CBERS

- segundo os dados do programa #A (corrente pulsada e velocidade crescente), a técnica de pressurização interna possibilita a união de tubos de pequenos diâmetros sob aportes de energia elevados. Por conseguinte, verificam-se maiores valores para a relação largura/penetração, reduzindo drasticamente a

presença de defeitos como a falta de penetração, em geral associado a procedimentos com baixas energias de soldagem. A partir do exposto, seleciona-se o programa #A para a soldagem do **CBERS**;

- a técnica de pressurização para o controle da morfologia da zona fundida revela-se bastante vantajosa e de grande praticidade comparada à metodologia tradicional chinesa, baseada na experiência prática dos seus operadores, onde os valores de corrente são alterados de acordo com a localização da junta como também das perdas de carga verificadas ao longo das linhas do Sistema Propulsor; os índices chineses de rejeição (defeitos detectados por meio de inspeção radiográfica) atingem os 5%;
- na soldagem do Sistema Propulsor do **CBERS**, um único conjunto de parâmetros é utilizado para todas juntas mediante variações nos valores da vazão do gás de purga para a manutenção da pressão de trabalho; o índice de rejeição é de apenas 0,79%; e
- o sucesso nos resultados obtidos após o término das soldagens, onde apenas um único defeito é detectado pela inspeção radiográfica, é atribuído aos procedimentos de fabricação desenvolvidos para as etapas de manuseio, corte, faceamento, decapagem, ponteamento, soldagem, purga interna, uso de eletrodos padronizados e o emprego de corpos-de-prova, sobretudo durante a operação de soldagem. Simultaneamente, o emprego de gases com características especiais associados a filtros, controle ambiental rigoroso, testes de estanqueidade também auxiliam decisivamente na qualidade do produto final. Progressos verificados na tecnologia de soldagem, materiais e processos de fabricação em conjunto, possibilitam o êxito deste trabalho.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em face aos resultados obtidos e também ao fato de que as pesquisas espaciais assumem um fator de soberania nacional, o autor sugere as seguintes propostas de trabalhos a serem perseguidos no prosseguimento desta pesquisa:

- estudo microestrutural mais aprofundado de forma a identificar, por exemplo, a presença de estruturas martensíticas e associá-las às propriedades mecânicas, uma vez que as juntas soldadas trabalham em regimes não ortodoxos;
- prosseguimento das atividades de soldagem para aplicações em novos dispositivos/componentes que deverão ser desenvolvidos pelo INPE, em associação com entidades brasileiras, e a serem empregados em satélites em acordos internacionais do Brasil com outros países, como é o exemplo clássico do acordo com a República Popular da China.



REFERÊNCIAS

- ADAM, C. M., Cooling rates and peak temperatures in fusion welding. **Welding Journal**, Miami, p.210s-215s, maio.1958.
- AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION. AMS 2244C. **Tolerances titanium and titanium alloy tubing**. 2003.
- AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION. AMS 2689A. **Fusion welding titanium and titanium alloys**. 1991.
- AEROSPACE STANDARD. AS 1814B. **Terminology for titanium microstructures**. 2003-04.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Materials properties handbook – titanium alloys**. 2nd ed. Ohio: R. Boyer, G. Welsh, E. W. Collings, 1998. 1176p.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metallography and microstructures**. 9th. ed. ASM, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Fractography**. 9th. ed. ASM, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Materials characterization**. 9th. ed. ASM, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM B338-03. **Specification for seamless and welded titanium and titanium alloy tubes for condensers and heat exchangers**. 2003.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Introductory welding metallurgy**. 3rd. ed. Miami: AWS, 1979. 152p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Metals and their weldability**. 7th ed. Miami: W. H. Kearns, 1984. 582p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS B4.0M:2000. **Standard methods for mechanical testing of welds**. 2000.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D10.6/D10.6M:2000. **Recommended practices for gas tungsten arc welding of titanium pipping and tubing**. 2000.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D18.1. **Specification for welding of austenitic stainless steel tube and pipe systems in sanitary (hygienic) applications**. Miami 1999.



AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D18.2. **Guide to weld discoloration levels on inside of austenitic stainless steel tube.** Miami, 1999.

ARC MACHINES, INC. **Model 207A power supply – operator training guidelines.** 2. ed. Pacoima: 1991. 89p.

ARC MACHINES, INC. Orbital welding delivers treatment plant on time. **Welding Journal**, p. 51-52, mar. 2001.

ASTROARC POLYSOUDE. Orbital welding overcomes tight schedule and work space. **Welding Journal**, p. 35-36, may. 2001.

BARREDA, J. L. et al. Electron beam welded high thickness Ti6Al4V plates using filler metal of similar and different composition to the basic plate. **Vacuum**, 62, p. 143-150, 2001.

BOYER, R. R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. **Material Science Engineering A**, 213, p.103-114, 1996.

BRINGAS, J. E. **The metals red book – nonferrous metals.** 3rd ed. Edmonton: CASTI Publishing Inc., 1997. v.2, 476p.

BROND, A.; HENON, B. K. **Latest development in welding specifications for sanitary process piping.** Disponível em : <http://www.arcmachines.com/appPages/weldspec02.html>. Acesso em : 24 out. 2001.

BROND, A.; HENON, B. K. **Orbital welding technology for pharmaceutical piping systems.** Trabalho apresentado no Latin American Pharmaceutical Show, Centro Costa Salguero, Buenos Aires, Argentina, 29-30 de Março de 2000. Disponível em : <http://www.arcmachines.com/appPages/atw02.html>. Acesso em 24 out. 2001.

BROND, A.; HENON, B. K. Orbital pipe welding technology for the power generation and offshore industries. In: XXII National Meeting on Welding Technology, X Latin American Welding Congress, 1996, Blumenau.

BROND, A.; HENON, B. K. Orbital TIG provides right connection for vaccine plant. **Welding & Metal Fabrication**, p. 20-24, abr. 1998.

BROND, A.; HENON, B. K. **Orbital welding passes inspection tests in powdered milk plant.** Trabalho publicado em *Welding Design & Fabrication*, Outubro, 2002. Disponível em : <http://www.arcmachines.com/appPages/milk02.html>. Acesso em 31 mar. 2004.

BROSILOW, R. Automated orbital welding assures purity of tube joints. **Welding Design & Fabrication**, p. 36-40, oct. 1992.



BROWN, D.; NEUMAN, J. Orbital welding helps NASA's X-34 Rocket Soar. **Welding Journal**, Miami, p.33-36, março. 2001.

COGHLAN, E.; HENON, B. K. **Installing IBM semiconductor process tools at Sandia National Laboratories**. Reimpressão de MICRO, setembro de 1995. Disponível em : <http://www.arcmachines.com/appPages/sandia02.html> . Acesso em 22 out. 2001.

DANIELSON, P.; WILSON, R.; ALMAN, D. Microstructure of titanium welds. **Advanced Material & Processes**. p. 39-42, fev. 2003.

DAVIDSON, N. C. Orbital welding in the friendly skies. **Welding Journal**, Miami, p.36-37, maio. 2003.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1981, 653p.

EMMERSON, J. Recent Developments in orbital welding equipment. **Welding Design and Fabrication**, p.32-36, abr. 1997.

ERICKSON, G. **Brewing up copper one brewery, two projects, no rework**. Reimpressão de The Fabricator, agosto, 2003. Disponível em: http://www.arcmachines.com/appPages/fabri_0803_02.html. Acesso de 31 mar. 2004.

GALLOWAY, J.G.; MAAK, P.Y.; Mc NABB. Computer-aided orbital welding reaches a new level of performance. **Welding Journal**, p. 23-28, fev. 1993.

GOULD, J. E. ; BECKER, D. ; WILLIAMS, J. C.; **Microstructural characterization of titanium weldments**, in: KOSSOWSKI, R.; GLICKSMAN, M. E. (Eds), Physical Metallurgy of Metal Joining, The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, USA, 1980, p. 199-221.

GUISCARDO, A.; HENON, B. K. **Orbital pipe welding used on Hondo's firewater system**. Reimpressão de Offshore/Oilmen. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/exxon02.html>. Acesso de 30 jul. 2004.

GUSICH, T. Orbital welding meets the deadline. **Water Engineering & Management**, p. 18-20, sept. 2001.

HENON, B. K. **Practical application of orbital tube and pipe welding**. Reimpressão de Practical Welding Today. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/pract02.html>. Acesso em 17 nov. 2001.

HENON, B. K. **Fabrication techniques for successful orbital tube welding – Examining high-purity requirements for various industries**. Reimpressão de The Tube & Pipe Quarterly – Part One – jan / fev 1996 e Part Two – mar / apr 1996.

Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/tpq2.html>. Acesso em 22 out. 2001.

HENON, B. K. **Orbital Welding of small diameter tubing**. Reimpressão de Tube International, março de 1998. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/smalldia02.html>. Acesso em 24 out. 2001.

HENON, B. K. **Orbital welding of stainless steel tubing for biopharmaceutical, food and dairy applications**. Trabalho apresentado no Octavo Congreso Argentino de Farmácia y Bioquímica Industrial, 16 de junho 1999. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/tubein02.html>. Acesso em 15 out. 2001.

HENON, B. K. **Matsushita completes ultra high purity nitrogen system reducing contaminants to ppb levels**. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/masca02.html>. Acesso em 22 out. 2001.

HENON, B. K. **Highly successful semiconductor clean room fabrication operation in UK features orbital welding**. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/cambr02.html>. Acesso em 22 out. 2001.

HENON, B. K. **Orbital welding of 316L stainless steel tubing**. Reimpressão de The Fabricator, maio de 1997. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/fabri02.html>. Acesso em 22 out. 2001.

HENON, B. K. **Welding of WDI and WFI piping systems for a bioprocess application**. Reimpressão de Pharmaceutical Engineering. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/immun02.html>. Acesso em 24 out. 2001.

HENON, B. K. **High technology orbital tube and pipe welding equipment used on pharmaceutical high purity piping installation**. Disponível em:
<http://209.35.63.149/appPages/bmw02.html>. Acesso em 24 out. 2001.

HENON, B. K. **Welds assure sanitary piping for draft beer**. Reimpressão de Food Engineering. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/rainier.html>. Acesso em 15 out. 2001.

HENON, B. K. **Ultra high purity stainless steel pipework system used orbital welding technology**. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/mcalpn2.html>. Acesso em 22 out. 2001.

HENON, B. K. **Orbital GTA welding replaces nickel convection tubes**. Reimpressão de The Welding Journal. Disponível em:
<http://www.arcmachines.com/appPages/dow02.html>. Acesso em 15 out. 2001.

HENON, B. K. **Welds safeguard plutonium-bearing containers**. Reimpressão de Welding Journal, julho de 2002. Disponível em :

http://www.arcmachines.com/appPages/wj_july2002_02.html. Acesso em 31 mar. 2004.

HENON, B. K. **Automation allows production of long-length tubing**. Reimpressão de *Welding Design and Fabrication*, maio de 2001. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/wdf0501auto02.html>. Acesso em 30 jul. 2004.

HENON, B. K. **Orbital welding of super duplex header**. Reimpressão de *Stainless Steel Europe*. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/cooper02.html>. Acesso em 30 jul. 2004.

HENON, B. K. **Orbital welding technology speeds riser construction of offshore platforms**. Reimpressão de *Welding Journal*, maio de 1994. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/hmv02.html>. Acesso em 30 jul. 2004.

HENON, B. K. **An overview of the effects of sulfur on the orbital GTA welding of AISI type 316L stainless steel tubing and pipe**. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/sulfur02.html>. Acesso em 22 may 2004.

HENON, B. K. Orbital welding in record time. *Welding Journal*, Miami, p. 51-55, mar. 1999.

HENON, B. K. Choose orbital welding. *Welding Design & Fabrication*, p. 17-22, jul. 2001.

HENON, B. K. Orbital welds take flight. *Welding Journal*, Miami, p. 40-43, jun. 2002.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em:

http://www.inpe.br/sobre_o_inpe/historia.html. Acesso em 18 set. 2001.

<http://www.inpe.br/programas/cbers/portugues/index.html>. Acesso em 18 set. 2001.

<http://www.inpe.br/programas/cbers/portugues/satelite.html>. Acesso em 18 set. 2001.

JOINING OF ADVANCED AND SPECIALTY MATERIAL, 1998, Rosemont. **Evolution of the fusion zone microstructure during autogenous gas tungsten arc welding of gamma titanium aluminide**. p. 101-105.

KOU, S.; LE, Y. Heat flow during the autogenous GTA welding of pipes. *Metallurgical Transactions A*, 15A, p. 1165-1171, 1994.

KRÜGER, J.; MARYA, S. K. On recent trends in orbital TIG welding of tubes. *International Journal for the Joining of Materials*, p. 27-37, oct. 1994.

LATHABAI, S.; JARVIS, B. L.; BARTON, K. J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering A*, 299, p.81-93, 2001.

LI, Z. et al. Laser welding techniques for titanium alloy sheet. **Journal of Materials Processing Technology**, 65, p.203-208, 1997.

LINNERT, G.M. **Welding metallurgy**. 4th. ed. Miami: AWS, 1984. 940p.

LITTLEWOOD, G.; HENON, B. K. **A case study of the installation of an orbitally welded higienic piping system**. Reimpressão de Pharmaceutical Technology Europe, março de 2000. Disponível em:

<http://www.arcmachines.com/appPages/pharmeo02.html>. Acesso em 24 out. 2001.

LONG, M.; RACK, H. J. Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective. **Biomaterials**, 19, p.1621 – 1639, 1998.

MANNION, B. **Arc welding on a stainless steel tube mil**. Reimpressão de The Tube & Pipe Journal, março de 2002. Disponível em:

<http://www.pro-fusiononline.com/feedback/articles.htm>. Acesso em 24 set. 2001.

MANNION, B. The fundamentals of orbital welding. **Welding Design and Fabrication**, p.22-27, feb. 1999.

MANNION, B.; HEINZMAN, J. **Orbital tube welding**. Disponível em:

<http://www.pro-fusiononline.com/feedback/fc-dec99.htm>. Acesso em 24 set. 2001.

MANNION, B.; HEINZMAN, J. **Setting up and determining parameters for orbital tube welding**. Reimpressão de The Fabricator, maio de 1999. Disponível em:

<http://www.pro-fusiononline.com/feedback/articles.htm>. Acesso em 24 set. 2001.

MANNION, B.; HEINZMAN, J. **Determining parameters for GTAW – starting points for success**. Reimpressão de Practical Welding Today, julho / agosto de 1999. Disponível em :

<http://www.pro-fusiononline.com/feedback/pwt-aug99.htm>. Acesso em 24 set. 2001.

MANNION, B.; HEINZMAN, J. **Orbital welding**. Reimpressão de Flow Control, dezembro de 1999. Disponível em:

<http://www.pro-fusiononline.com/feedback/articles.htm>. Acesso em 21 nov. 2001.

MANNION, B.; O' MANNIN, L. **Trends in the welding industry**. Reimpressão de Flow Control, março de 1999. Disponível em:

<http://www.pro-fusiononline.com/feedback/articles.htm>. Acesso em 21 nov. 2001.

MANNION, B.; O' MANNIN, L. **Igniting advances in weld quality and consistency**. Reimpressão de Job Shop Technology, janeiro de 1999. Disponível em:

<http://www.pro-fusiononline.com/feedback/articles.htm>. Acesso em 21 nov. 2001.

MOHANDAS, T.; REDDY, G. M. A comparison of continuous and pulse current gas tungsten arc welds of on an ultra high strength steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 69, p.222-226, 1997.

MORGAN, J.; HENON, B. K. **Discovering applications for orbital fusion welding**. Reimpressão de The Tube & Pipe Journal, março de 1999. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/tpj02.html>. Acesso em 24 out. 2001.

MUEHLBERGER, S. E.; DE PIERRO, G.; HENON, B. K. **Installation of pharmaceutical process piping – A case study (part 1 – planning and preparation)**. Disponível em: http://www.arcmachines.com/appPages/pharmeng_02.html. Acesso em 22 maio 2004.

MUEHLBERGER, S. E.; DE PIERRO, G.; HENON, B. K. **Installation of pharmaceutical process piping – A case study (part 2 – orbital welding, weld inspection, weld documentation, passivation)**. Disponível em: http://www.arcmachines.com/appPages/pharmeng_02b.html. Acesso em 31 julho 2004.

NORMA CHINESA CBERS **propulsion subsystem pipe integrating and welding requirement (specification)**. Dados fornecidos pelo CAST, sem referência de data.

NORMA CHINESA CBERS **propulsion subsystem pipe leakage check requirement (specification)**. Dados fornecidos pelo CAST, sem referência de data.

ORBIMATIC. **Origins and development of orbital welding**. Disponível em: <http://www.subcontractingtalk.com/news/orb/orb131.html>. Acesso em 4 nov. 2003.

ORLOWSKI, J. A. G. et al. **The orbital TIG welding of the CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) Propulsion System**. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/cbers02.html>. Acesso em 30 jul. 2004.

PEDERSEN, J.; LEVESEN, J.; HENON, B. K. **Orbital welding of titanium pipe for offshore production platforms**. Disponível em: <http://www.arcmachines.com/appPages/troll02.html>. Acesso em 24 out. 2001.

PURNELL, S. **Orbital welding of aluminium & its alloys**. Disponível em: <http://www.orbimatic.co.uk/AC%20Tech%20Art.pdf>. Acesso em 23 set. 2003.

PURNELL, S. **Assessing developments in orbital welding-part 1: taking the monotony out of tube welding**. Disponível em: http://www2.thefabricator.com/Articles/Tube_and_Pipe_Article.cfm?ID=59. Acesso em 31 mar. 2004.

PURNELL, S. **Assessing developments in orbital welding-part 2: improvements in software, hardware, documentation**. Disponível em:

http://www2.thefabricator.com/Articles/Tube_and_Pipe_Article.cfm?ID=279. Acesso em 31 mar. 2004.

REED-HILL, R. **Princípios de metalurgia física**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982. 776p.

ROSENTHAL, D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatment. **Transactions ASME** 68. p.819-866.

SERAFIN, M. **Orbital welding for space program applications**. Disponível em: http://www2.thefabricator.com/Articles/Tube_and_Pipe_Article.cfm?ID=443. Acesso em 31 mar. 2004.

SMITH, L. S.; THREADGILL, P.; GITTOS, M. **Welding titanium – A designers and users handbook**. Cambridge, David Peacock Titanium Metals Corporation, 1999. 33p.

SMITH, L. S.; THREADGILL, P.; GITTOS, M. **High quality and productivity joining processes and procedures for titanium risers and flowlines**. Disponível em: http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_8/splssfeb1999.html. Acesso em 22 maio 2004.

SMITH, L. S.; THREADGILL, P.; GITTOS, M. **Weldability of materials – titanium and titanium alloys**. Disponível em: http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk24.html. Acesso em 25 março 2003.

STRATEGIC LEADERS GROUP. **Light metals action agenda – working paper nº3 – titanium**. 2001. 10p.

SUNDARESAN, S. et al. Microstructural refinement of weld fusion zones in α - β titanium alloys using pulsed current weld. **Materials Science & Engineering A**, 262, p. 88-100, 1999.

TSENG, K. H.; CHOU, C. P. The effect of pulsed GTA welding on the residual stress of stainless steel weldment. **Journal of Materials Processing Technology**, 123, p.346-353, 2002.

THE WELDING INSTITUTE. **A review of weld metal porosity and hydride cracking in titanium and its alloys**. TWI, 1998. Members report nº 7321.02/98.

YUNLIAN, Q. et al. Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet. **Materials Science & Engineering A**, 280, p. 177-181, 2000.

WINSHIP, B.; HENON, B. K. Orbital welding tackles the tight spots. **Welding Journal**, Miami, p.49-52, sep. 1996.

WINCO, K.C. et al. An investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds. **Journal of Materials Processing Technology**, 63, p. 759-764, 1997.

WU, C. S.; ZHENG, W.; WU, L. Modelling the transient behaviour of pulse current tungsten inert gas weldpools. **Modelling Simul. Materials Science Engineering**, 7, p. 15-23, 1999.



ANEXO A – Dados adicionais referentes ao metal base.



P.R.C(YB-1)	C.C.C.P(JOCT)	U.S.A(ASTM)	Brit(BS)	Jap(jis)
TA2	BT1-1	Ti-50A	IMI25	KS60

Allowed deviation of pipe material (YB767-70)

outer diameter $\phi 6$ allowed deviation $\pm 0.10\text{mm}$

partition thickness 1mm allowed deviation $\pm 0.05\text{mm}$

Chemical ingredients(YB-767-70)

brand	chemical ingredient series	chemical ingredients(%)						
		main ingredient	impurity(not less than)					
TA2	pure industrial Ti	Ti	Fe	S	C	N	H	O
		radical	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.015

Mechanical performance(YB767-70)

alloy brand	tensile strength σ not less than(kg/mm ²)	stretching ratio δ (%) not less than $L=11.3\sqrt{F_0}$
TA2	45-60	20

FORM 1

PHONE NO. 010 68378268

Feb. 16 1999 04:24PM P1

年 月 日 第 页

Corresponding List of Tai and Tar Alloy

中外几种钛及钛合金对照(牌号)

China	Russia	USA	UK	France	Japan	Germany
中国	苏联	美国	英国	法国	日本	西德

YB, HB	ГОСТ	AA, ASTM	IMI	NF	JIS	DIN
--------	------	----------	-----	----	-----	-----

TA1	BT1-00	Ti-55A	125	T-60	KS50TPa5	3.7034
-----	--------	--------	-----	------	----------	--------

TA2	BT1-0	Ti-65A	130	T-50	KS50TPa5	3.7055
-----	-------	--------	-----	------	----------	--------

TCA	BT6	Ti-6Al-4V	318	TA-6V	KS50AV	3.7164
-----	-----	-----------	-----	-------	--------	--------

Wang
Yang Wenyuan

中国有色金属进出口总公司
北京



ANEXO B – Dados referentes às etapas de integração, de ponteamento manual, de soldagem e de qualificação.



Tabela B1 – Dados da etapa de integração das peças

Operação	Integração	
Inspeção/teste	(critérios)	
Visual	Perpendicularidade	<0,02 mm
	Circularidade	<0,05 mm
	Rebarbas	inadmissível
	Adoçamento	inadmissível
	Fresta	inadmissível
	Desalinhamento	<0,1 mm

Tabela B2 – Dados da etapa de ponteamento manual

Operação	Ponteamento manual	
Inspeção/teste	(critérios)	
Visual	Nº pontos	2 (dois) dispostos a 180°
	Coloração	Prata brilhante

Tabela B3 – Dados das etapas de soldagem e de qualificação

Operação	Soldagem/Qualificação	
Inspeções/testes	(critérios)	
Visual	Coloração	Prata brilhante
	Acabamento	Plano e liso
	Largura (L)	4,0 mm <L< 6,0 mm
	Concavidade	<0,1 mm
	Convexidade	<0,1 mm
Teste de fuga	$\geq 1 \times 10^{-7} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$	
Inspeção radiográfica	Poros (isolados)	<0,3 mm
	Poros (somatório)	<0,4 mm
	Trinca	inadmissível
	Falta de penetração	inadmissível
Teste de tração	$LR_{\text{solda}} \geq 80\% LR_{\text{m.base}}$	
Observação	Nº reparos admitidos em uma mesma junta – 2 (dois)	

ANEXO C – Resultados das inspeções radiográficas referentes à qualificação dos programas de soldagem.

Observações:

- O #A da tese corresponde ao #2 do relatório de inspeção radiográfica
- O #B da tese corresponde ao #22 do relatório de inspeção radiográfica
- O #C da tese corresponde ao #31 do relatório de inspeção radiográfica





RELATÓRIO DE REGISTRO DE RESULTADO DE ENSAIO

REL. N.º 40954

DATA 16/10/00

FOLHA: 01 de 01

RADIOGRAFIA

Cliente MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECN	O.S. 564/00	Procedimento de Ensaio / Revisão DO CLIENTE
Obra / Local INPE. S.J. CAMPOS	Fabricante / Montadora INPE	Norma de Referência / Critério de Aceitação ASTM
Identificação do Equipamento PROGRAMA 2	Componente CORPO PROVA	
Material / Classe / Grupo TITANIO	Técnica Radiográfica <input type="checkbox"/> PS-VS <input type="checkbox"/> PS-VS (PAN) <input type="checkbox"/> PD-VS <input checked="" type="checkbox"/> PD.VD <input type="checkbox"/> PD.VD (SOBR.)	
Tipo de Fonte <input checked="" type="checkbox"/> RAI0-X <input type="checkbox"/> IR-192 <input type="checkbox"/> CO-60	N.º Fonte DFF 540 ^m T: 2 MIN	Atividade (Ci) / KVxmA KV 80 MA 8

Nº Filme	Equipamento/Componente	Junta	Posição	Espessura (mm)	Diâmetro M/M	Soldador	Descontinuidade	Laudo		Observação
								Apr.	Rep.	
1	P9 2	C1	A	1,0	60	-	-	X		
2		↓	B				-	X		
3		C2	A				-	X		
4		↓	B				-	X		
5		C3	A				-	X		
6		↓	B				-	X		
7		C4	A				-	X		
8		↓	B				-	X		
9		C5	A				-	X		
10		↓	B				-	X		
11		C6	A				-	X		
12		↓	B				-	X		
13		C7	A				-	X		
14		↓	B				-	X		
15										
16										
17										
18										
19										
20										

Notas FOI UTILIZADO IQI COM FUXOS Ø 0,25, 0,35 E 0,45 MM

FOI UTILIZADO FILME CLASSE I

Códigos: T - Trinca P - Porosidade M - Mordedura
 RB - Repetir o Filme FF - Falta de Fusão E - Inclusão de Escória CO - Concavidade
 EC - Exame Complementar FP - Falta de Penetração OX - Inclusão de Óxido CR - Cratera
 - - Sem Descontinuidade EP - Penetração Excessiva IM - Inclusão Metálica PO - Passe Oco

BRASITEST	CLIENTE	FISCALIZAÇÃO
Nome _____	Nome _____	Nome _____
Nº IDENTIF. <u>Francisco O. L. Filho</u>	Assinatura: <u>[Signature]</u>	Assinatura: _____
Assinatura: <u>ER. N.º 1153</u>	DATA: <u>16/10/2000</u>	DATA: ____/____/____
RIA-002215107		



RELATÓRIO DE REGISTRO DE RESULTADO DE ENSAIO

REL. Nº 40955

DATA 16/10/00

FOLHA: 01 de 01

RADIOGRAFIA

Cliente MINISTERIO DA CIENCIA E TECN	O.S. 564/00	Procedimento de Ensaio / Revisão DO CLIENTE
Obra / Local INPE. S. J. CAMPOS	Fabricante / Montadora INPE	Norma de Referência / Critério de Aceitação ASTM
Identificação do Equipamento PROGRAMA 22	Componente CORPO PROVA	
Material / Classe / Grupo TITANIO	Técnica Radiográfica <input type="checkbox"/> PS-VS <input type="checkbox"/> PS-VS (PAN) <input type="checkbox"/> PD-VS <input checked="" type="checkbox"/> PD.VD <input type="checkbox"/> PD.VD (SOBR.)	
Tipo de Fonte <input checked="" type="checkbox"/> RAI0-X <input type="checkbox"/> IR-192 <input type="checkbox"/> CO-60	N.º Fonte DFF: 540 T = 2 MIN	Atividade (Ci) / KVxmA 80 KV 8 MA

Nº Filme	Equipamento/Componente	Junta	Posição	Espessura (mm)	Diâmetro MØ	Soldador	Descontinuidade	Laudo		Observação
								Apr.	Rep.	
1	Pq 22	C1	A	1.0	6.0	-	-	X		
2			B				-	X		
3		C2	A				-	X		
4			B				-	X		
5		C3	A				-	X		
6			B				-	X		
7		C4	A				-	X		
8			B				-	X		
9		C5	A				-	X		
10			B				-	X		
11		C6	A				-	X		
12			B				-	X		
13		C7	A				-	X		
14			B				-	X		
15		C8	A				-	X		
16			B				-	X		
17		C9	A				-	X		
18			B				-	X		
19										
20										

Notas FOI UTILIZADO IQF COM FUROS Ø 0,25, 0,35 E 0,45MM

FOI UTILIZADO FILME CLASSE I

Códigos:	T - Trinca	P - Porosidade	M - Mordedura
RB - Repetir o Filme	FF - Falta de Fusão	E - Inclusão de Escória	CO - Concavidade
EC - Exame Complementar	FP - Falta de Penetração	OX - Inclusão de Óxido	CR - Cratera
- - Sem Descontinuidade	EP - Penetração Excessiva	IM - Inclusão Metálica	PO - Passe Oco

BRASITEST	CLIENTE	FISCALIZAÇÃO
Nome _____	Nome _____	Nome _____
Nº IDENTIF: <u>Francisco G. L. Silve</u>	Assinatura: <u>[Assinatura]</u>	Assinatura: _____
Assinatura: <u>ER-N2/SRG-SNOC-1163</u> <u>RFA-002210/07</u>	DATA: <u>16/10/2000</u>	DATA: <u>1/1/</u>



RELATÓRIO DE REGISTRO DE RESULTADO DE ENSAIO

RADIOGRAFIA

REL. N.º 40956

DATA 16/10/00

FOLHA: 01 de 01

Cliente MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECN		O.S. 564/00	Procedimento de Ensaio / Revisão DA CLIENTE
Obra / Local INPE. S.J. CAMPOS	Fabricante / Montadora INPE	Norma de Referência / Critério de Aceitação ASTM	
Identificação do Equipamento PROGRAMA 31		Componente CORPO PROVA	
Material / Classe / Grupo TITÂNIO	Técnica Radiográfica <input type="checkbox"/> PS-VS <input type="checkbox"/> PS-VS (PAN) <input type="checkbox"/> PD-VS <input checked="" type="checkbox"/> PD.VD <input type="checkbox"/> PD.VD (SOBR.)		
Tipo de Fonte <input checked="" type="checkbox"/> RAIO-X <input type="checkbox"/> IR-192 <input type="checkbox"/> CO-60	N.º Fonte DFF: 540 ^M T: 2 MIN	Atividade (Ci) / KVxmA 80KV 8MA	

Nº Filme	Equipamento / Componente	Junta	Posição	Espessura (mm)	Diâmetro M x M	Soldador	Descontinuidade	Laudo		Observação
								Apr.	Rep.	
1	PG 31	C1	A	1,0	6,0	-	-	X		
2		↓	B				-	X		
3		C2	A				-	X		
4		↓	B				-	X		
5		C3	A				-	X		
6		↓	B				-	X		
7		C4	A				-	X		
8		↓	B				-	X		
9		C5	A				-	X		
10		↓	B				-	X		
11		C6	A				-	X		
12		↓	B				-	X		
13		C7	A				-	X		
14		↓	B				-	X		
15		C8	A				-	OBS:		
16		↓	B				-			
17		C9	A				-			
18		↓	B				-			
19										
20										

Notas FOI UTILIZADO IQI COM FUXOS Ø 0,25, 0,35 E 0,5MM
OBS: DESCONSIDERAR CORPO 8 E CORPO 9
FOI UTILIZADO FILME CLASSE I

Códigos:	T - Trinca	P - Porosidade	M - Mordedura
RB - Repetir o Filme	FF - Falta de Fusão	E - Inclusão de Escória	CO - Concavidade
EC - Exame Complementar	FP - Falta de Penetração	OX - Inclusão de Óxido	CR - Cratera
- - Sem Descontinuidade	EP - Penetração Excessiva	IM - Inclusão Metálica	PO - Passe Oco

BRASITEST	CLIENTE	FISCALIZAÇÃO
Nome _____	Nome _____	Nome _____
Nº IDENTIF: <u>Francisco G. L. Filho</u>	Assinatura: <u>[Assinatura]</u>	Assinatura: _____
Assinatura: <u>RIA 009215/97</u>	DATA: <u>16/10/2000</u>	DATA: <u> / /</u>

ANEXO D - Resultados dos testes de fuga referentes à qualificação dos programas de soldagem.

Observações:

- O #A da tese corresponde ao #2 do relatório do teste de fuga
- O #B da tese corresponde ao #22 do relatório do teste de fuga
- O #C da tese corresponde ao #31 do relatório do teste de fuga



REPORT

TITLE: Report of Leak Detection of the Pipelines of the Cbers Fm2 Propulsion System	SPECIMENS: Segments of the pipeline
Version: 01	Date: Oct./18/2000

DISTRIBUTION LIST		
NAME:	DEPARTMENT:	COPIES:
Nilton Souza Dias	LIT	1
Ezio Castejon Garcia		

Prepared By:

Approved by

Ass. Carlos H. Sarandy Oct 18/00
 Name Carlos H. Sarandy Date

[Signature] Oct 18, 00
 Carlos de Oliveira Lino Date

Ass. Ezio Castejon Garcia Oct 18/00
 Name Ezio Castejon Garcia Date

[Signature] OCT 18/00
 Clovis Sofano Pereira Date

Ass. Marcus V.C. Ferreira Oct 18/00
 Name Marcus Venicus C. Ferreira Date



PROGRAMA PROGRAM	DOCUMENTO / DOCUMENT NO.	
	LIT01-CBCP-TR-001	
CBERS	PÁGINA/PAGE	VERSÃO/ISSUE
	2	1

1. INTRODUCTION

These measurements had the objective to verify the leak rates in the welding of parts of the pipelines of the CBERS FM2 propulsion system. These were performed on Oct./4-5/2000 at LIT.

2. REFERENCE

- Edwards Spectron 3000 Manual

3. EQUIPMENT:

The following leak detector has been used to perform these activities:

- Edwards Leak Detector
- Model: Spectrum 3000
- Type of Detection: conventional
- Specification:
 - ✓ Sensitivity: 10^{-10} Pascal.m³/sec (air equivalent)
 - ✓ Noise: 2.5 %
 - ✓ Response Time: 1 sec
 - ✓ Auto Calibration: quartz reference leak with temperature compensation (value: 3.1×10^{-9} Pa.m³/sec.)



4. RESULT

The next table presents the results. All measurements were below then 10^{-8} Pa.m³/sec.

Program Number	Tube Number	Leak Rate (Pa.m ³ /sec)
02	01	2.00×10^{-9}
02	02	1.58×10^{-9}
02	03	2.40×10^{-9}
02	04	9.09×10^{-10}
02	05	3.20×10^{-9}
02	06	2.50×10^{-9}
02	07	3.50×10^{-9}
**	**	**
22	01	2.12×10^{-9}
22	02	2.02×10^{-9}
22	03	1.48×10^{-9}
22	04	2.40×10^{-9}
22	05	1.75×10^{-9}
22	06	9.00×10^{-10}
22	07	8.70×10^{-10}
22	08	7.90×10^{-10}
22	09	1.40×10^{-10}
**	**	**
31	01	2.05×10^{-10}
31	02	1.0×10^{-10}
31	03	0.25×10^{-10}
31	04	1.0×10^{-10}
31	05	1.9×10^{-10}
31	06	1.22×10^{-9}
31	07	8.90×10^{-10}
31	08	4.70×10^{-10}
31	09	9.05×10^{-10}




ANEXO E - Resultados referentes às inspeções das uniões soldadas do Sistema Propulsor do Satélite CBERS.

(Faint, illegible table content)

焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X 光检测 (X- ray check)			
1	26	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无 <i>NO</i>		20001127
2	27	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
3	28	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
4	29	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
5	31	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
6	88	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
7	89	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
8	90	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
9	92	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
10	93	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001127
11	97	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
12	96	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
13	1	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
14	101	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
15	98	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.01	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
16	99	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
17	100	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201

巴方检验员 (Brazilian Inspector) : 
 中方专家 (Chinese Expert) : *MZGG SANG Chen xiang dong*


Brazilian PA: _____
 Chinese PA: *Zhang Yinyu*



焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X光检测 (X-ray check)			
18	2	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
19	18	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001201
20	19	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
21	87	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.02	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
22	24	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
23	95	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
24	25	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
25	83	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
26	82	合格(Qualified)	Qualified	穿孔(重新填丝 点固焊) (tack weld again with filler metal)	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
27	76	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
28	81	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
29	84	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
30	85	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.02	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
31	86	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
32	94	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212

巴方检验员 (Brazilian Inspector):
中方专家 (Chinese Expert):


MING SONG, Chen xiang dong

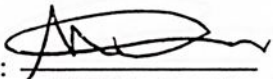
Brazilian PA: _____
Chinese PA: Zhang Yin yu



焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X 光检测 (X- ray check)			
33	20	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
34	23	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
35	21	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
36	22	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
37	57	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
38	56	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
39	58	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
40	62	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
41	61	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
42	63	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
43	30	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
44	91	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001207-1212
45	44	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
46	46	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
47	45	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
48	47	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
49	40	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213

巴方检验员 (Brazilian Inspector) :



中方专家 (Chinese Expert) :

MENG SONG, Chen xiang dong

Brazilian PA: _____

Chinese PA: _____

Zhang Yin yu




焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X 光检测 (X- ray check)			
50	41	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
51	42	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
52	38	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
53	43	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
54	49	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	第一次焊接过程中管件由于自重绕焊缝轴线转动, 对焊缝重熔 (during welding tube rotates around the axis of the tube , weld re weld)		20001213
55	33	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
56	36	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
57	35	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
58	37	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
59	52	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
60	53	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
61	50	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
62	48	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213

巴方检验员 (Brazilian Inspector) :

中方专家 (Chinese Expert) :


MENG SONG, chen xiang dong

Brazilian PA: _____

Chinese PA: _____

Zhang Yingyu



焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X光检测 (X-ray check)			
63	34	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
64	51	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001213
65	66	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
66	68	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
67	67	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
68	72	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
69	71	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
70	70	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
71	73	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
72	74	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
73	79	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001214
74	11	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
75	14	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
76	12	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
77	13	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
78	75	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
79	77	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215

巴方检验员 (Brazilian Inspector):



中方专家 (Chinese Expert):

MENG SONG, Chen xiang dong

Brazilian PA:

Chinese PA:

Zhang Yinyu



焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X 光检测 (X- ray check)			
80	6	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
81	9	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
82	8	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
83	10	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
84	3	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
85	78	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
86	4	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
87	7	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
88	69	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
89	5	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
90	32	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
91	16	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001215
92	39	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001218
93	80	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001218
94	15	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001218
95	17	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001218
96	114	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001221

巴方检验员 (Brazilian Inspector) : 
 中方专家 (Chinese Expert) : MENG SONG, Chen xiang dong

Brazilian PA: _____
 Chinese PA: Zhang Yiyu



焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X 光检测 (X- ray check)			
97	110	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001221
98	116	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001221
99	112	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001221
100	115	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
101	121	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
102	123	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
103	111	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	5.8	Qualified	Qualified	X 光检测第一次焊未焊透, 重熔补焊后合格 (no penetration, reweld)		20001222
104	118	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
105	117	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
106	119	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
107	122	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
108	113	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
109	120	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001222
110	C112	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001228
111	C110	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001228
112	55	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001228

巴方检验员 (Brazilian Inspector) :
中方专家 (Chinese Expert) :



MENG Song, Chen xiang dong

Brazilian PA: _____
Chinese PA: Zhang Yingyu



焊接质量记录表(Record of Welding Quality)

序号 (No.)	焊缝 编号 (Welds No.)	焊前准备 (Preparation)		焊缝质量(Welds quality)					补焊情况 (Repairing welding)	操作者 (Operator)	日期 (Date)
		清洗质量 (Cleaning quality)	装配质量 (Assembly quality)	点焊质量 (Tack quality)	凹陷(mm) (Concavity)	宽度 (mm) (Width)	颜色 (Color)	X 光检测 (X- ray check)			
113	64	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001228
114	C59	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
115	59	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
116	C60	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
117	60	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
118	54	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
119	C114	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
120	65	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
121	C116	合格(Qualified)	Qualified	Qualified	<0.005	3.5~4.0	Qualified	Qualified	无		20001229
122											
123											
124											
125											
126											
127											
128											
129											

巴方检验员 (Brazilian Inspector) : 
 中方专家 (Chinese Expert) : MENG SONG, Chen xiang dong

Brazilian PA: _____
 Chinese PA: Zhang Yin yu



