



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SOLDAGEM A LASER ND:YAG  
PARA PRODUÇÃO DE SEMENTES DE IODO-125 UTILIZADAS EM BRAQUITERAPIA**

**Anselmo Feher**

**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia  
Nuclear - Aplicações**

**Orientador:  
Prof. Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo**

**São Paulo  
2014**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SOLDAGEM A LASER ND:YAG  
PARA PRODUÇÃO DE SEMENTES DE IODO-125 UTILIZADAS EM BRAQUITERAPIA**

**Anselmo Feher**

**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia  
Nuclear - Aplicações**

**Orientador:  
Prof. Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo**

**Versão Corrigida  
Versão Original disponível no IPEN**

**São Paulo  
2014**

## DEDICATÓRIA

*À minha esposa Ana Cláudia e às  
minhas filhas Giovanna e Pietra pelo  
amor, carinho, compreensão e  
incentivo ao longo deste trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo pela orientação, incentivo e valiosa ajuda durante a elaboração e execução deste trabalho de pesquisa.

À Dra. Maria Elisa Chuery Martins Rostelato pela amizade, apoio e possibilitar a produção deste trabalho.

Ao Eng. Francisco Sprenger pela amizade e elaboração dos projetos mecânicos.

Aos colegas Dr. Carlos Alberto Zeituni, MSc. João Augusto Moura, MSc. Osvaldo Luiz da Costa pelo incentivo, colaboração indispensável e amizade.

Ao Dr. Maurício David Martins das Neves pela colaboração nas análises metalográficas.

À MSc. Ana Claudia Martinelli Feher pela mais que amizade, sugestões e grande colaboração durante a produção do trabalho.

Aos amigos MSc. Samir Luiz Somessari, Dra. Maria da Conceição Costa Pereira, Vagner Fernandes e Eduardo Pavão Araujo pela ajuda na execução deste trabalho.

Aos amigos do Centro de Tecnologia das Radiações - CTR que de algum modo contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Denise Maria Zezell do Centro de Lasers e Aplicações – CLA pela colaboração com as análises em MEV.

Aos Colegas do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais – CCTM, MSc. Edson Pereira Soares, MSc. Glauson Aparecido Ferreira Machado e Dra. Marilene Morelli Serna pelo suporte e cooperação nos ensaios mecânicos.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro no projeto de pesquisa.

# **ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SOLDAGEM A LASER ND:YAG PARA PRODUÇÃO DE SEMENTES DE IODO-125 UTILIZADAS EM BRAQUITERAPIA**

**Anselmo Feher**

## **RESUMO**

O tratamento do câncer de próstata com o implante permanente das sementes de iodo-125 cresceu expressivamente nos Estados Unidos da América nos últimos anos. A técnica também vem sendo utilizada por hospitais e clínicas particulares no Brasil. As sementes utilizadas são importadas a custos elevados, o que as tornam proibitivas para uso em hospitais públicos, pois um implante requer, pelos menos, 80 sementes. Para minimizar custos financeiros e possibilitar a distribuição para entidades de saúde pública, iniciou-se o desenvolvimento da técnica de produção das sementes no País. A soldagem a laser é uma das técnicas de selagem da semente de iodo-125, que é feita nas duas extremidades do tubo de titânio, de modo a permitir a classificação da semente como fonte selada, atendendo aos rigorosos testes estabelecidos nas normas ISO 2919 e ISO 9978. O objetivo deste trabalho foi estudar e desenvolver um sistema alternativo de soldagem a laser Nd:YAG para sementes de iodo-125, com o propósito de fornecer dados de projeto e parâmetros operacionais para implantação de uma produção rotineira automatizada no IPEN-CNEN/SP. O desenvolvimento do trabalho apresentou as seguintes fases: corte e limpeza do material (tubo de titânio), projeto, fabricação e montagem de um sistema completo automatizado para a soldagem dos tubos de titânio, determinação dos parâmetros de soldagem (feixe de laser, gás de assistência e focalização), ensaios dos corpos de prova soldados e avaliação da repetibilidade e eficiência do sistema. O sistema de soldagem a laser desenvolvido mostrou-se eficaz em virtude do eficiente processo de automação utilizado, capaz de produzir sementes de iodo-125 com soldas de qualidade que atendem aos critérios dos severos ensaios determinados nas normas ISO 2919 e ISO 9978.

# **STUDY AND DEVELOPMENT OF AN ND:YAG LASER WELDING SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF IODINE-125 SEEDS USED IN BRACHYTHERAPY**

**Anselmo Feher**

## ***ABSTRACT***

The treatment for prostate cancer by permanent implant of iodine-125 seeds has increased significantly in the United States of America in recent years. This technique has also been used by hospitals and private clinics in Brazil. The seeds used are imported at a high cost, which makes them prohibitive for use in public hospitals, since an implant requires, at least, 80 seeds. In order to reduce the financial costs and enable the distribution to public health institutions, the technique for the seeds production in the country has been developed. The laser welding is one of the possible procedures to seal the iodine-125 seeds and it will be performed in both ends of the titanium tube: this will allow the seed classification as a sealed source, meeting the rigorous assays established by the ISO 2919 and the ISO 9978 standards. The objective of this research was to study and develop an alternative Nd:YAG laser welding system for iodine-125 seeds, with the purpose of providing project data and operational parameters for the implementation of an automated routine production at IPEN-CNEN/SP. The development of this work presented the following phases: the material (titanium tube) cutting and cleaning, the project, manufacture and assembly of a complete automated system to weld the titanium tubes. The determination of the welding parameters (laser beam, shield gas and focus), the assays of the welded specimens and the evaluation of repeatability and system efficiency have, also, been carried out. The laser welding system developed showed to be efficient for the automation process used and capable of producing seeds of iodine-125 with high quality weldings, meeting the criteria for the severe assays determined by the ISO 2919 and the ISO 9978.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	23
2.1 Objetivos específicos.....	23
2.2 Originalidade do trabalho.....	23
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	25
3.1 Braquiterapia de próstata .....	25
3.2 Sementes de iodo-125.....	27
3.3 Titânio.....	30
3.4 Soldagem .....	36
3.5 Breve histórico sobre laser .....	39
3.5.1 Princípio da geração do laser.....	40
3.5.2 Cavidade laser .....	42
3.5.3 Técnicas de soldagem a laser.....	42
3.5.4 Comparação com outras técnicas de soldagem.....	46
3.5.5 Parâmetros de processo de soldagem a laser .....	50
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	55
4.1 Material utilizado.....	57
4.2 Preparação das amostras.....	58
4.3 Equipamento de soldagem .....	59
4.4 Dispositivo dinâmico.....	60
4.5 Dispositivo estático.....	61
4.6 Ensaios de soldagem .....	63
4.6.1 Ensaios com o dispositivo dinâmico .....	63
4.6.1.1 Procedimento do ensaio com o dispositivo dinâmico .....	64
4.6.2 Ensaios com o dispositivo estático .....	65
4.6.2.1 Procedimento do ensaio com o dispositivo estático .....	65
4.7 Projeto, confecção e montagem do sistema de soldagem a laser.....	66
4.7.1 Seletor de cânulas.....	67
4.7.2 Alimentador de cânulas .....	68
4.7.3 Seletor de fontes .....	69
4.7.4 Alimentador de fontes.....	69
4.7.5 Suporte para sensor em fibra óptica.....	69

4.7.6	Receptor de fontes seladas.....	70
4.7.7	Distribuidor inversor.....	71
4.7.8	Bocal do gás de proteção.....	72
4.7.9	Dispositivo de soldagem.....	74
4.8	Requisitos para aceitação das soldas .....	76
4.9	Ensaio com sistema de soldagem a laser.....	80
4.10	Classificação, identificação e ensaios para validação das fontes seladas de iodo-125 segundo a norma ISO 2919.....	84
4.11	Ensaio para validação das fontes seladas.....	88
4.11.1	Ensaio de temperatura .....	88
4.11.1.1	Ensaio a alta temperatura.....	88
4.11.1.2	Ensaio a baixa temperatura.....	89
4.11.2	Ensaio de pressão externa.....	89
4.11.2.1	Ensaio de pressão.....	89
4.11.2.2	Ensaio a vácuo.....	91
4.11.3	Ensaio de impacto.....	92
4.12	Ensaio de estanqueidade .....	93
4.13	Análise das soldas.....	96
4.13.1	Ensaio metalográfico.....	97
4.14	Ensaio de microdureza.....	98
5	RESULTADOS.....	100
5.1	Material utilizado.....	100
5.2	Corte e limpeza do material.....	100
5.3	Determinação dos parâmetros de soldagem.....	101
5.4	Ensaio de soldagem utilizando dispositivo dinâmico.....	103
5.5	Ensaio de soldagem utilizando dispositivo estático.....	105
5.5.1	Escolha do modelo de dispositivo para uso em projeto.....	107
5.6	Projeto, confecção e montagem do sistema de soldagem a laser.....	108
5.6.1	Seletor de cânulas.....	108
5.6.2	Alimentador de cânulas.....	109
5.6.3	Seletor de fontes .....	112
5.6.4	Alimentador de fontes.....	112
5.6.5	Suporte para sensor em fibra óptica.....	112
5.6.6	Receptor de fontes seladas.....	113
5.6.7	Distribuidor inversor.....	116



5.6.8	Bocal do gás de proteção .....	117
5.6.9	Dispositivo de soldagem.....	119
5.7	Ensaio com sistema de soldagem a laser.....	122
5.8	Determinação dos parâmetros de soldagem com sistema de soldagem a laser.....	126
5.9	Ensaio realizado para avaliar procedimento de selagem e sistema de soldagem a laser das sementes quanto aos requisitos estabelecidos para sua utilização.....	135
5.9.1	Ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125.....	136
5.9.2	Ensaio de validação das sementes de iodo-125 .....	142
5.10	Ensaio metalográfico .....	145
5.11	Ensaio de microdureza.....	148
5.12	Repetitividade do sistema de soldagem .....	152
5.13	Eficiência do sistema de soldagem .....	154
6	CONCLUSÃO .....	156
	TRABALHOS FUTUROS .....	158
	ANEXOS .....	159
	ANEXO A Tabelas transcritas da norma ISO 2919 .....	159
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	161

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Estimativas para o ano de 2014 do número de casos novos de câncer para o sexo masculino .	17
TABELA 2 - Composição química do titânio medicinal	36
TABELA 3 - Comparação dos processos de soldagem	48
TABELA 4 - Composição química do titânio	58
TABELA 5 - Parâmetros variados nos ensaios de soldagem com o dispositivo dinâmico	63
TABELA 6 - Parâmetros variados nos ensaios de soldagem com o dispositivo estático	65
TABELA 7 - Classificação de fontes seladas de acordo com o desempenho requerido para a sua aplicação	85
TABELA 8 - Classificação de desempenho de fonte selada	86
TABELA 9 - Nível de atividade específica de acordo com o grupo de radionuclídeo	87
TABELA 10 - Seleção dos métodos de testes de vazamento relacionados com a tecnologia de fabricação	95
TABELA 11 - Composição química do titânio	100
TABELA 12 - Valores dos parâmetros finais de soldagem utilizados no dispositivo dinâmico	102
TABELA 13 - Valores dos parâmetros finais de soldagem utilizados no dispositivo estático	103
TABELA 14 - Parâmetros variados nos ensaios de soldagem com o sistema de soldagem a laser	126
TABELA 15 - Valores dos parâmetros finais de soldagem utilizados com o sistema de soldagem a laser	135
TABELA 16 - Ensaio de estanqueidade após a primeira lavagem das sementes de iodo-125	136
TABELA 17 - Ensaio de estanqueidade após a segunda lavagem das sementes de iodo-125	138
TABELA 18 - Ensaio de estanqueidade após a terceira lavagem das sementes de iodo-125	139
TABELA 19 - Ensaio de estanqueidade após a quarta lavagem das sementes de iodo-125	141
TABELA 20 - Ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125 após serem submetidas aos ensaios de validação	143
TABELA 21 - Médias de microdureza Vickers (HV) das séries 1 e 2 e média geral na primeira e segunda solda	150
TABELA 22 - Variação do comprimento das sementes	153

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Sistema urinário e detalhe da próstata no homem .....	15
FIGURA 2 - Imagem de células cancerosas .....	16
FIGURA 3 - Desenho da semente de iodo-125 a ser produzida no IPEN-CNEN/SP.....	20
FIGURA 4 - Ilustração mostrando a parte interna dos modelos das sementes de iodo-125 .....	28
FIGURA 5 - Transformações alotrópicas do titânio puro .....	34
FIGURA 6 - Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo .....	38
FIGURA 7 - Representação da geração de laser.....	41
FIGURA 8 - Esquema de funcionamento de uma cavidade geradora de laser ...	42
FIGURA 9 - Elementos de um sistema típico para soldagem a laser .....	43
FIGURA 10 - Esquema de solda por penetração profunda ( <i>keyhole</i> ) .....	45
FIGURA 11 - Comparação das técnicas de soldagem a laser por: condução e penetração .....	46
FIGURA 12 - Diagrama de parâmetros que afetam a qualidade da solda com laser pulsado .....	50
FIGURA 13 - Importantes parâmetros do pulso laser .....	52
FIGURA 14 - Máquina de solda laser Nd:YAG utilizada nos experimentos .....	59
FIGURA 15 - Cabo de fibra óptica .....	60
FIGURA 16 - Cabeçote de focalização .....	60
FIGURA 17 - Dispositivo de soldagem dinâmico .....	61
FIGURA 18 - Dispositivo de soldagem estático .....	62
FIGURA 19 - Dispositivo de soldagem estático em detalhe.....	62
FIGURA 20 - Seletor de cânulas.....	68
FIGURA 21 - Alimentador de cânulas .....	69
FIGURA 22 - Suporte para sensor em fibra óptica.....	70
FIGURA 23 - Receptor de fontes seladas.....	71
FIGURA 24 - Distribuidor inversor.....	72
FIGURA 25 - Bocal de gás de proteção com tubos flexíveis .....	73
FIGURA 26 - Bocal de gás de proteção com tubos de cobre trefilados fixos.....	73
FIGURA 27 - Bocal de gás de proteção com tubo de aço inoxidável AISI 304 ....	74
FIGURA 28 - Corte frontal do dispositivo de soldagem.....	75
FIGURA 29 - Corte lateral do dispositivo de soldagem.....	76
FIGURA 30 - Referência da primeira solda aprovada no tubo de titânio .....	77
FIGURA 31 - Referência da segunda solda aprovada no tubo de titânio.....	77
FIGURA 32 - Região da solda oxidada no tubo de titânio.....	78
FIGURA 33 - Falha de selagem no tubo de titânio.....	78
FIGURA 34 - Consumo excessivo de material no tubo de titânio .....	79

FIGURA 35 - Solda assimétrica no tubo de titânio.....	79
FIGURA 36 - Solda com diâmetro maior que o diâmetro do tubo de titânio .....	80
FIGURA 37 - Sistema de soldagem a laser .....	83
FIGURA 38 - Ensaio de baixa temperatura em uma semente de iodo-125 .....	89
FIGURA 39 - Dispositivo utilizado no ensaio de pressão das sementes de iodo-125 .....	90
FIGURA 40 - Dispositivo utilizado no ensaio a vácuo das sementes de iodo-125 .....	92
FIGURA 41 - Dispositivo de impacto e martelo utilizado no ensaio das sementes de iodo-125 .....	93
FIGURA 42 - Ensaio de microdureza - marcações .....	99
FIGURA 43 - Corte do tubo de titânio apresentando rebarbas .....	101
FIGURA 44 - Tubo de titânio após ser desbastado com lixa grana 400 .....	101
FIGURA 45 - Micrografia da região soldada com variação na espessura.....	105
FIGURA 46 - Imagem do acabamento irregular da solda no tubo de titânio.....	105
FIGURA 47 - Micrografia da região soldada com espessura simétrica e ausente de falhas.....	106
FIGURA 48 - Imagem do acabamento da solda no tubo de titânio satisfatório..	107
FIGURA 49 - Seletor de cânulas.....	109
FIGURA 50 - Alimentador de cânulas (perspectiva) .....	110
FIGURA 51 - Alimentador de cânulas (vista superior) .....	111
FIGURA 52 - Suporte para sensor em fibra óptica.....	113
FIGURA 53 - Receptor de fontes seladas.....	115
FIGURA 54 - Receptor de fontes seladas readequado .....	115
FIGURA 55 - Distribuidor inversor.....	116
FIGURA 56 - Arranjo do bocal do gás de proteção utilizado no sistema de soldagem a laser .....	118
FIGURA 57 - Dispositivo de soldagem a laser .....	120
FIGURA 58 - Dispositivo de soldagem a laser com mecanismo de transferência dos tubos selados rejeitados .....	121
FIGURA 59 - <i>Hardware</i> do sistema de soldagem a laser .....	122
FIGURA 60 - Sistema de soldagem a laser modificado .....	123
FIGURA 61 - Fluxograma do processo de soldagem utilizado no sistema de soldagem a laser .....	124
FIGURA 62 - Sistema de soldagem a laser .....	125
FIGURA 63 - Suportes de fixação em: (a) baquelite e (b) cerâmica .....	126
FIGURA 64 - Solda com vazão de gás insuficiente apresentando oxidação na superfície.....	127
FIGURA 65 - Solda com vazão de gás adequada sem oxidação na superfície. 128	

FIGURA 66 - Solda com vazão de gás em excesso apresentando oxidação na superfície.....	128
FIGURA 67 - Imagem do acabamento da solda no tubo de titânio apresentando vazão de contração de metal.....	129
FIGURA 68 - Falha na selagem.....	130
FIGURA 69 - Tubo de titânio apresentando falha na selagem em razão da potência de pulso de laser insuficiente .....	131
FIGURA 70 - Tubo de titânio soldado apresentando consumo elevado de material em razão do excesso de potência de pulso .....	131
FIGURA 71 - Tubo de titânio soldado com potência de pulso de laser adequada apresentando região da solda simétrica e esférica .....	132
FIGURA 72 - Região soldada apresentando fissuração .....	133
FIGURA 73 - Conformação do pulso ( <i>annealing pulse</i> ).....	133
FIGURA 74 - Tubo de titânio utilizando parâmetros otimizados.....	134
FIGURA 75 - Semente de iodo-125 produzida no IPEN-CNEN/SP .....	134
FIGURA 76 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a primeira lavagem das sementes de iodo-125.....	137
FIGURA 77 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a segunda lavagem das sementes de iodo-125.....	139
FIGURA 78 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a terceira lavagem das sementes de iodo-125.....	140
FIGURA 79 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a quarta lavagem das sementes de iodo-125 .....	142
FIGURA 80 - Ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125 após serem submetidas aos ensaios de validação.....	143
FIGURA 81 - Ensaio de impacto: (a) vista frontal e (b) vista lateral .....	144
FIGURA 82 - Ensaio de pressão.....	144
FIGURA 83 - Ensaio de temperatura .....	144
FIGURA 84 - Microscopia óptica da seção longitudinal da primeira solda no tubo de titânio.....	146
FIGURA 85 - Microscopia óptica da seção longitudinal da segunda solda no tubo de titânio.....	146
FIGURA 86 - MEV da microestrutura do metal de base (grãos equiaxiais) .....	147
FIGURA 87 - MEV da microestrutura da zona de fusão (estrutura martensítica) .....	147
FIGURA 88 - Ensaio de microdureza Vickers (HV) nas regiões da ZF, MB e ZTA do tubo de titânio soldado pelo processo a laser Nd:YAG .....	148
FIGURA 89 - Perfis de microdureza Vickers (HV) da zona de fusão (ZF) da primeira solda no tubo de titânio .....	149
FIGURA 90 - Perfis de microdureza Vickers (HV) da zona de fusão (ZF) da segunda solda no tubo de titânio.....	150

FIGURA 91 - Perfis de microdureza Vickers (HV) do metal de base até a zona de fusão (primeira solda).....	151
FIGURA 92 - Perfis de microdureza Vickers (HV) do metal de base até a zona de fusão (segunda solda).....	152
FIGURA 93 - Comprimento final das sementes .....	154
FIGURA 94 - Eficiência do sistema de soldagem .....	155

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C. -	Antes de Cristo;
AISI -	<i>American Iron and Steel Institute</i> ;
ASM -	<i>American Society for Metals</i> ;
ASTM -	<i>American Society for Testing and Materials</i> ;
AWS -	<i>American Welding Society</i> ;
CCC -	Cúbica de Corpo Centrado;
CLP -	Controlador Lógico Programável;
CNC -	Controle Numérico Computadorizado;
CNEN -	Comissão Nacional de Energia Nuclear;
E -	Energia do pulso;
EBW -	<i>Electron Beam Welding</i> ;
FAPESP -	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo;
FeTiO <sub>3</sub> -	Ilmenita ou óxido natural de ferro e titânio;
g/cm <sup>3</sup> -	Densidade ou massa específica;
GPa -	Gigapascal;
HCP -	Hexagonal Compacta;
HV -	<i>Hardness Vickers</i> ;
Hz -	Hertz;
INCA -	Instituto Nacional de Câncer;
IPEN -	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares;
ISO -	<i>International Organization for Standardization</i> ;
J -	Joule;
keV -	Quilo elétrons-volt;
kPa -	Quilopascal;
LASER -	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> ;
LBW -	<i>Laser Beam Welding</i> ;
MB -	Metal de Base;
MBq -	Megabequerel;
MEV -	Microscopia Eletrônica de Varredura;
mm -	Milímetro;
ms -	Milissegundo;
NBR -	Norma Brasileira;
Nd:YAG -	Granada de Ítrio e Alumínio dopado com Neodímio;
nm -	Nanometro;
pps -	Pulso Por Segundo;
Pp -	Potência pico;
PSA -	<i>Prostate Specific Antigen</i> ou Antígeno Prostático Específico;
PTFE -	Politetrafluoretileno;
Q -	Vazão do gás de assistência
t -	Largura do pulso ou duração do pulso laser;
Ti CP -	Titânio comercialmente puro;
TiCl <sub>4</sub> -	Tetracloroeto de titânio;
TIG -	<i>Tungsten Inert Gas</i> ;
TiO <sub>2</sub> -	Dióxido de titânio;
UNIFESP -	Universidade Federal de São Paulo;
W -	Watt;
W/m <sup>2</sup> -	Densidade de potência ou fluxo térmico superficial;
ZF -	Zona de Fusão;
ZTA -	Zona Termicamente Afetada.

## 1 INTRODUÇÃO

A próstata é uma glândula que só o homem possui e que se localiza na parte baixa do abdômen. Ela é um órgão muito pequeno, tem a forma de maçã e situa-se logo abaixo da bexiga e à frente do reto (FIG. 1). A próstata envolve a porção inicial da uretra, tubo pelo qual a urina armazenada na bexiga é eliminada. A próstata produz parte do sêmen, líquido espesso que contém os espermatozoides, liberado durante o ato sexual <sup>1</sup>.

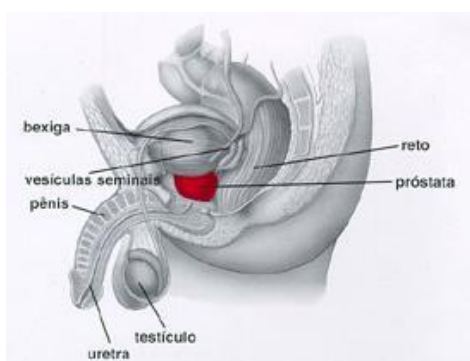


FIGURA 1 - Sistema urinário e detalhe da próstata no homem <sup>1</sup>

A palavra câncer vem do grego karkínos, que quer dizer caranguejo e foi utilizada pela primeira vez por Hipócrates, o pai da medicina, que viveu entre 460 e 377 a.C..

O câncer não é uma doença nova. O fato de ter sido detectado em múmias egípcias comprova que ele já comprometia o homem há mais de 3 mil anos antes de Cristo.

Atualmente, câncer é o nome geral dado a um conjunto de mais de 100 doenças, que têm em comum o crescimento desordenado (maligno) de células, mostrado na FIG. 2, que tendem a invadir tecidos e órgãos vizinhos, podendo espalhar-se (metástase) para outras regiões do corpo <sup>2</sup>.



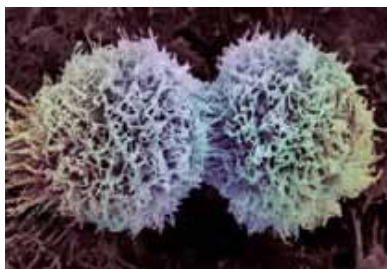


FIGURA 2 - Imagem de células cancerosas <sup>2</sup>

No Brasil, o câncer de próstata é o segundo mais frequente entre os homens, atrás apenas do câncer de pele não melanoma. Em valores absolutos, é o sexto tipo mais comum no mundo e o mais prevalente em homens, representando cerca de 10% do total de cânceres. Sua taxa de incidência é cerca de seis vezes maior nos países desenvolvidos, em comparação aos países em desenvolvimento.

A taxa de incidência mundial cresceu cerca de vinte e cinco vezes, sendo as mais altas observadas na Austrália, Nova Zelândia, Europa Ocidental e América do Norte. Parte desse aumento pode ser reflexo das práticas de rastreamento por meio do teste Antígeno Prostático Específico (PSA).

Mais do que qualquer outro tipo, é considerado um câncer da terceira idade, já que cerca de três quartos dos casos no mundo ocorrem a partir dos 65 anos. O único fator de risco bem estabelecido para o desenvolvimento do câncer da próstata é a idade. O aumento observado nas taxas de incidência no Brasil pode ser parcialmente justificado pela evolução dos métodos diagnósticos (exames), pela melhoria na qualidade dos sistemas de informação do país e pelo aumento na expectativa de vida.

Alguns desses tumores podem crescer de forma rápida, espalhando-se para outros órgãos e podendo levar à morte. A grande maioria, porém, cresce de forma tão lenta (leva cerca de 15 anos para atingir 1 cm<sup>3</sup>) que não chega a dar sinais durante a vida e nem a ameaçar a saúde do homem <sup>1</sup>.

O câncer de próstata representa um sério problema de saúde pública no Brasil, por causa de suas altas taxas de incidência e mortalidade. Segundo as Estimativas de Incidência de Câncer no Brasil (TAB. 1), do Instituto Nacional de

Câncer (INCA), estimam-se 68.800 novos casos de câncer de próstata em 2014. Esses valores correspondem a um risco estimado de 70 casos novos a cada 100.000 homens.

A mortalidade por esse tipo de neoplasia apresenta um perfil ascendente semelhante ao da incidência no Brasil, embora sua magnitude seja mais baixa. Pode ser considerado um câncer de bom prognóstico se diagnosticado e tratado oportunamente <sup>3</sup>.

TABELA 1 - Estimativas para o ano de 2014 do número de casos novos por câncer, por localização primária e distribuição proporcional para o sexo masculino <sup>3</sup>.

Localização Primária Neoplasia Maligna	Estados		Capitais	
	Casos	Proporção (%)	Casos	Proporção (%)
Próstata	68.800	22,8	17.540	24,8
Traqueia, brônquio e pulmão	16.400	5,4	4.000	5,6
Cólon e reto	15.070	5,0	4.860	6,9
Estômago	12.870	4,3	2.770	3,9
Cavidade oral	11.280	3,7	2.220	3,1
Laringe	6.870	2,3	1.460	2,1
Bexiga	6.750	2,2	1.910	2,7
Esôfago	8.010	2,6	1.460	2,1
Linfoma de Hodgkin	1.300	0,4	410	0,6
Linfoma não Hodgkin	4.940	1,6	1.490	2,1
Glândula Tireoide	1.150	0,4	470	0,7
Sistema nervoso central	4.960	1,6	1.240	1,7
Leucemia	5.050	1,7	1.250	1,8
Pele melanoma	2.960	1,0	950	1,3
Outras localizações	37.520	12,4	9.070	12,8
Pele não Melanoma	98.420	32,6	19.650	27,8
<b>Total</b>	<b>302.350</b>	<b>100,0</b>	<b>70.750</b>	<b>100,0</b>

Fonte – INCA, Estimativas 2014: Incidência de câncer no Brasil

Enquanto a incidência está ligada às características demográficas da população, a mortalidade alta é causada pelo retardo do diagnóstico, que favorece a ocorrência de tumores com alta capacidade biológica de invasão local

e de disseminação para outros órgãos. Tais tumores são incuráveis quando tratados em fase metastásica.

O câncer de próstata atinge principalmente os homens acima de 50 anos de idade. O aumento de sua incidência na população é também uma decorrência do aumento da expectativa de vida do brasileiro verificada ao longo deste século, cuja tendência é ultrapassar os 70 anos no ano 2020 <sup>4</sup>.

Existem muitas formas de tratamento para o câncer de próstata. Para determinar qual a melhor opção, vários fatores devem ser considerados: tamanho e extensão do tumor (estadiamento), agressividade aparente (características patológicas), PSA (Antígeno Prostático Específico), idade, saúde e preferências do paciente <sup>5,6</sup>.

Entre as opções de tratamento estão a cirurgia e a radioterapia (teleterapia ou braquiterapia).

Na braquiterapia, pequenas sementes contendo iodo-125, um material radioativo, são implantadas na próstata <sup>7</sup>. Em consequência dos efeitos colaterais serem menores, cerca de 85% dos pacientes até 70 anos de idade, que são potentes sexualmente antes do procedimento, permanecem assim após o implante e a incontinência urinária raramente os acomete <sup>8</sup>.

As vantagens dos implantes com sementes radioativas são: a preservação dos tecidos saudáveis e órgãos próximos à próstata, a baixa taxa de impotência e incontinência urinária comparada aos tratamentos convencionais, tais como, a prostatectomia radical e o feixe de radiação externo.

Os implantes com sementes são procedimentos de baixo impacto e não cirúrgico. O paciente pode retornar à atividade normal dentro de um a três dias, com pequena ou nenhuma dor.

As sementes são implantadas durante um procedimento não cirúrgico. Pequenas sementes são injetadas diretamente na próstata com a ajuda de uma agulha fina através da pele, entre o reto e o escroto<sup>9</sup>. Uma grande dose de radiação é liberada apenas no tumor, pois o iodo-125 tem uma radiação de baixa energia (29 keV) que é pouco penetrante, preservando assim os tecidos circunvizinhos<sup>10,11</sup>.

O tratamento do câncer de próstata, com o implante permanente das sementes de iodo-125 cresceu expressivamente nos Estados Unidos da América nos últimos anos<sup>12</sup>.

A técnica também vem sendo utilizada por hospitais e clínicas particulares no Brasil. As sementes utilizadas são importadas e distribuídas ao preço de R\$ 80,62 a R\$ 97,16 por semente, valores que as tornam proibitivas para uso em hospitais públicos, pois um implante requer pelos menos 80 sementes.

As sementes de iodo-125 também estão sendo utilizadas para tratamento de câncer em outros órgãos, como Retinoblastoma (câncer na retina) e Gliomas (tumor no sistema nervoso central). Existem estudos para uso dessas sementes no tratamento de câncer de mama, pulmão e no trato digestório<sup>13,14</sup>.

Para minimizar custos financeiros e possibilitar a distribuição para entidades de saúde pública, discutiu-se a hipótese do desenvolvimento da técnica de produção das sementes no País.

As sementes de iodo-125 apresentam dimensões milimétricas e são compostas por uma cápsula de titânio, material inerte ao tecido humano<sup>15,16,17</sup>, de 0,8 mm de diâmetro externo, 0,05 mm de espessura de parede e 4,5 mm de comprimento. A estrutura interna varia significativamente de modelo para modelo. Algumas sementes emitem radiação por meio de pequenas esferas de resina ou matriz cerâmica. Outras têm o material radioativo depositado em um substrato

radiopaco <sup>18</sup>. A atividade típica das sementes é de 18,5 MBq (0,5 mCi) de iodo-125, com variação máxima de  $\pm 5\%$ , num mesmo lote de sementes <sup>19</sup>.

Para o estudo e desenvolvimento deste trabalho de doutorado escolheu-se o modelo cujo interior da cápsula acomoda um fio de prata contendo o iodo-125 adsorvido, considerando-se a opção de material radioativo depositado em substrato radiopaco, conforme mostrado na FIG. 3. A escolha desse tipo de semente deve-se ao fato de ser o modelo mais utilizado no mundo e o único em uso nas clínicas e nos hospitais brasileiros.

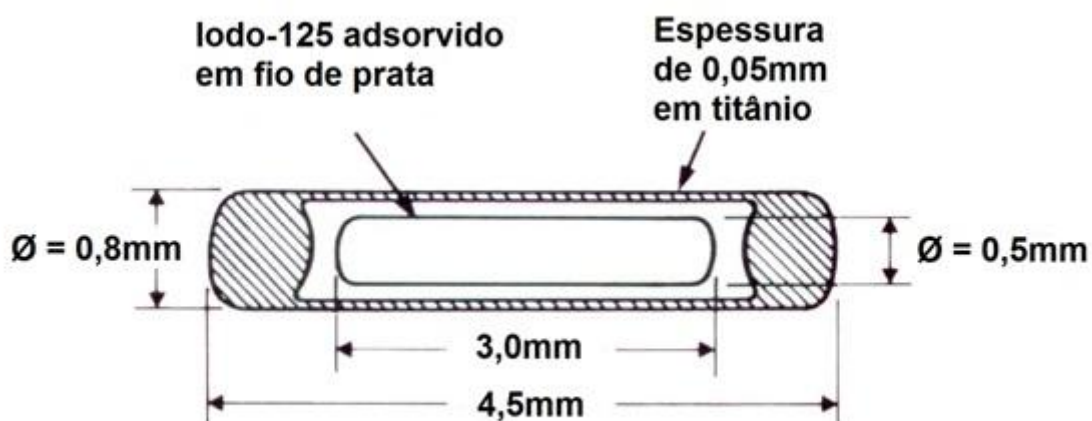


FIGURA 3 - Desenho da semente de iodo-125 a ser produzida no IPEN-CNEN/SP

Uma fase da produção da semente de iodo-125 é a selagem do tubo de titânio, que deve ser feita nas duas extremidades, de modo a permitir a classificação da semente como fonte selada e estanque. A selagem deve atender aos rigorosos testes estabelecidos em padronizações pertinentes, obedecendo-se à norma internacional ISO 2919 - *Radiological protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification* e a estanqueidade da semente deve atender aos procedimentos da norma ISO 9978 - *Radiation protection - Sealed radioactive sources – Leakage test methods* <sup>20,21</sup>.

Esta selagem deve ser estanque, não podendo haver trincas, poros ou vazios na região soldada, de modo que o iodo-125 adsorvido no fio de prata não saia e se espalhe pelo corpo humano.

Os aplicadores de sementes demandam que o acabamento da solda, em ambas as extremidades, seja o mais esférico possível, a fim de evitar um bloqueio durante o seu carregamento. Uma técnica de soldagem que pode ser utilizada na selagem das sementes é a solda laser.

Quase todas as sementes de iodo-125 utilizadas para braquiterapia são produzidas nas dimensões: 0,8 mm de diâmetro externo, 0,05 mm de espessura de parede e 4,5 mm de comprimento. Os dispositivos aplicadores para o implante das sementes existentes no mercado são apropriados para essas dimensões.

Todas as sementes são encapsuladas em titânio, porque esse elemento é um material inerte, que não causa rejeição quando em contato direto com o tecido humano, sendo classificado como material biocompatível.

Os fabricantes de sementes existentes no mundo concentram-se na Inglaterra, Bélgica, Estados Unidos da América, Alemanha e Canadá. As sementes por eles produzidas diferem quanto ao processo utilizado na produção, sendo exclusivos e protegidos por patentes, tornando a sua reprodução proibida ou bastante onerosa face aos *royalties* da propriedade industrial, inviabilizando comercialmente a sua industrialização em outros países.

Com relação às publicações sobre as técnicas de soldagem utilizadas na confecção das sementes, elas são escassas ou, quando disponíveis, fazem parte de catálogos comerciais com descrições sumárias visando à proteção do segredo industrial.

A necessidade de produção das sementes de iodo-125 no Brasil foi transmitida ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP)

pela classe médica, representada por médicos e físicos médicos da área de radioterapia dos Hospitais Albert Einstein, Sírio-Libanês, A. C. Camargo, Santa Casa de Misericórdia de São Paulo, Clínica Ivo Roesler de Recife, Instituto do Radium de Campinas e Escola Paulista de Medicina (UNIFESP). A estimativa de demanda das sementes de iodo-125 é de 8.000 sementes/mês no País <sup>22</sup>.

Uma vez que as técnicas utilizadas pelos fabricantes atuais das sementes de iodo-125 são protegidas por patentes, impossibilitando sua reprodução e/ou tornando inviáveis economicamente, e que a demanda estimada do País para esse tipo de produto terapêutico é de 8.000 sementes/mês, tendendo a aumentar nos próximos anos, faz-se necessária à produção nacional das sementes de modo a ser obtida pela pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas <sup>23</sup>.

Para atender a solicitação da classe médica, o IPEN-CNEN/SP constituiu um projeto para viabilizar a produção local das sementes de iodo-125. O presente trabalho de doutorado insere-se nesse projeto, que foi financiado pela FAPESP, e tem o propósito específico de estudar e desenvolver um sistema de soldagem utilizando a solda laser para confecção das sementes de iodo-125.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver um novo sistema de soldagem a laser Nd:YAG para sementes de iodo-125, com o propósito de fornecer dados de projeto e parâmetros operacionais para implantação de uma produção rotineira automatizada no IPEN-CNEN/SP, a qual atenda ao mercado nacional.

Este trabalho concentra os estudos de viabilidade técnica e científica no desenvolvimento da metodologia de selagem das sementes, utilizando-se o processo de soldagem a laser, de modo a permitir a classificação das sementes como fontes radioativas seladas, atendendo aos rigorosos testes estabelecidos em padronizações pertinentes à norma ISO 2919<sup>20</sup>.

### 2.1 Objetivos específicos

- a) Preparar as amostras (tubos de titânio);
- b) Desenvolver, confeccionar e montar o dispositivo de soldagem a laser Nd:YAG;
- c) Determinar os parâmetros de soldagem (feixe de laser, material, gás de proteção e focalização);
- d) Ensaiar as amostras soldadas a laser (ensaio metalográfico, ensaio microdureza, estanqueidade ou vazamento e qualificação);
- e) Avaliar os resultados obtidos por meio das amostras ensaiadas; e
- f) Avaliar a repetitividade e eficiência do sistema.

### 2.2 Originalidade do trabalho

Durante a revisão bibliográfica deste trabalho, verificou-se a existência de vários artigos sobre dosimetria e aplicações das sementes de iodo-125. No entanto, foram identificados somente dois trabalhos sobre selagem do tubo de titânio para sementes de iodo-125 usando método dinâmico e nenhum utilizando método estático<sup>24, 25</sup>. Na literatura encontram-se patentes que descrevem modelos de sementes com um desenho esquemático, sem quaisquer detalhes,



sugerindo materiais que podem ser utilizados na sua confecção e em alguns casos, somente citando os processos de soldagem<sup>26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37</sup>.

As sementes que vêm sendo produzidas no exterior não têm referências publicadas do seu método de preparação nem da selagem, possivelmente por se tratar de segredo industrial.

A originalidade deste trabalho, superando a questão do segredo industrial, consiste no desenvolvimento de um novo método automatizado de selagem das sementes de iodo-125 para braquiterapia.

A principal proposição a ser solucionada durante a execução deste trabalho e que constitui inovação tecnológica é o estudo, desenvolvimento e montagem de um sistema estático de soldagem a laser Nd:YAG, para a selagem das sementes de iodo-125 utilizadas no tratamento do câncer de próstata.

Sendo uma tecnologia alternativa, não está sujeita aos mecanismos de proteção industrial dos fabricantes que produzem sementes de iodo-125 para braquiterapia, isentando o País do pagamento de *royalties*.

Em relação à originalidade, a proposta de desenvolvimento de um sistema de soldagem, além de apresentar-se como alternativa tecnicamente viável, mostra-se uma solução bastante vantajosa do ponto de vista econômico, uma vez que alguns equipamentos necessários são nacionalizados, quando possíveis, e outros estão disponíveis no IPEN-CNEN/SP.

Do ponto de vista social, o domínio tecnológico permite que as sementes produzidas no País tenham menor custo, possibilitando que as camadas mais carentes da população Brasileira tenham acesso à terapia com o implante permanente das sementes de iodo-125, que apresenta sensíveis vantagens em relação aos métodos de tratamento tradicionais.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Braquiterapia de próstata

A braquiterapia é uma ferramenta eficaz e segura para o tratamento do câncer. A palavra braquiterapia tem origem grega (*brachys* = curto; *terapia* = tratamento) e define uma forma de tratamento desenvolvida pela colocação de materiais radioativos junto ao tumor. Os materiais determinam a liberação de altas doses de radiação apenas nas proximidades da área de implantação, sem que um grande número de células normais seja atingido. Os implantes podem ser temporários ou permanentes <sup>38</sup>.

Após a descoberta do elemento químico rádio-226 por Marie Curie e Pierre Curie, em 1898, diversos tipos de cápsulas contendo esse elemento começaram a ser utilizadas de forma empírica na terapia de tumores malignos. Denominou-se braquiterapia a área da radioterapia na qual a dose é administrada ao paciente por meio de métodos de inserção de fontes radioativas encapsuladas. A fonte irradia o volume alvo, onde se encontra o tumor indesejável, a uma distância de poucos centímetros. Distinguem-se, basicamente, quatro tipos de aplicações: superficial, intracavitária, intersticial e intraluminal. Nos casos mais comuns, os tumores podem estar localizados no cérebro, no pescoço, nos pulmões, no colo de útero, na mama ou na próstata. O crescente desenvolvimento das novas técnicas de braquiterapia e de novos radioisótopos, associado ao aperfeiçoamento dos equipamentos de pós-carregamento remoto, reestimulou o interesse pela braquiterapia <sup>39</sup>.

No passado, a braquiterapia foi realizada principalmente com as fontes de rádio ou radônio. Atualmente, faz-se o uso de radionuclídeos produzidos em reatores nucleares de pesquisa, tais como céσιο-137, irídio-192, ouro-198, iodo-125 e paládio-103 <sup>40</sup>.

Na braquiterapia intersticial, pequenas fontes seladas (sementes) ou finos fios de material radioativo são posicionados cirurgicamente no interior do tecido a ser tratado, tal como, próstata, língua, cérebro ou mama. Esse implante

das fontes pode ser temporário ou permanente. Implantes permanentes tem se tornado bastante comuns no tratamento do câncer de próstata. A braquiterapia intersticial pode ser usada também em tumores superficiais, como na pele e em problemas oculares, onde se revelou uma grande aliada da medicina <sup>41</sup>.

Pacientes com câncer de próstata podem ter de escolher entre uma série de diferentes tratamentos, cada uma com riscos, efeitos colaterais e consequências diversas para a sua vida. É preciso ter calma, assimilar bem as informações do médico, tirar dúvidas que dá mais segurança quanto às escolhas terapêuticas.

O melhor tratamento para cada caso depende de uma série de fatores, como idade, estado geral de saúde, seus sentimentos em relação aos efeitos colaterais de cada terapia, o estadiamento da doença e a chance de cada tratamento de curar o câncer.

Cirurgia, radioterapia e terapia hormonal são as opções mais comuns. A quimioterapia pode ser usada em alguns casos e, em outros, médico e paciente podem optar por apenas acompanhar a evolução da doença, sem nenhuma forma ativa de tratamento.

Como alguns tipos de câncer de próstata crescem devagar, certos pacientes podem nunca precisar de tratamento, especialmente quando eles são idosos ou têm outros problemas de saúde.

O especialista vai acompanhar a doença por meio do teste de PSA e toque retal, sem recomendar cirurgia ou radioterapia, especialmente se o câncer não causa sintomas, tem crescimento lento e está restrito a uma área da próstata. Se o crescimento do tumor se acelerar, médico e paciente discutem a forma de tratamento. Essa não é opção para homens jovens, com boa saúde e câncer de crescimento rápido <sup>42</sup>.

A braquiterapia por implante permanente para tratamento do câncer de próstata no estilo contemporâneo foi introduzida na década de 1980. Com o excelente resultado, o método prevaleceu rapidamente nos Estados Unidos na década de 1990, e tornou-se atualmente uma opção de tratamento padrão, pelo menos, para câncer de próstata de baixo risco. A meta da braquiterapia de próstata é entregar uma dose letal ao tumor, minimizando-se a dose nos órgãos de risco <sup>40</sup>.

### 3.2 Sementes de iodo-125

As primeiras fontes radioativas contendo o isótopo iodo-125 foram investigadas inicialmente na década de 60 por Lawrence *et al.*, estudadas clinicamente por Hillaris *et al.* com implantes em vários órgãos, inclusive em cânceres pulmonares, implantes de próstata e linfadenectomia pélvica <sup>43,44,45</sup>.

Além do isótopo iodo-125 dentro do invólucro da semente de iodo-125, dentre outros radioisótopos utilizados, há sempre outro material com alto número atômico. Esse material tem a função de aumentar o grau de visualização das sementes de iodo-125 em imagens de raios X durante o procedimento de implante. Esses materiais são denominados marcadores radiopacos e o tipo de material a ser utilizado depende de cada modelo de semente de iodo-125 <sup>46</sup>. A FIG. 4 mostra algumas das sementes de iodo-125, com a representação interna do invólucro de titânio. Os modelos das sementes mostradas na FIG. 4 são:

- a) OncoSeed <sup>125</sup>I, modelo 6711 <sup>47</sup>;
- b) ThinSeed <sup>125</sup>I, modelo 9011 <sup>48</sup>;
- c) IsoSeed <sup>125</sup>I, modelo I25.S06 <sup>49</sup>;
- d) International Brachytherapy Intersource – 125 <sup>50</sup>;
- e) <sup>125</sup>I Model I125-SL <sup>51</sup>; e
- f) NASI, modelo MED3631-A/M <sup>52</sup>.

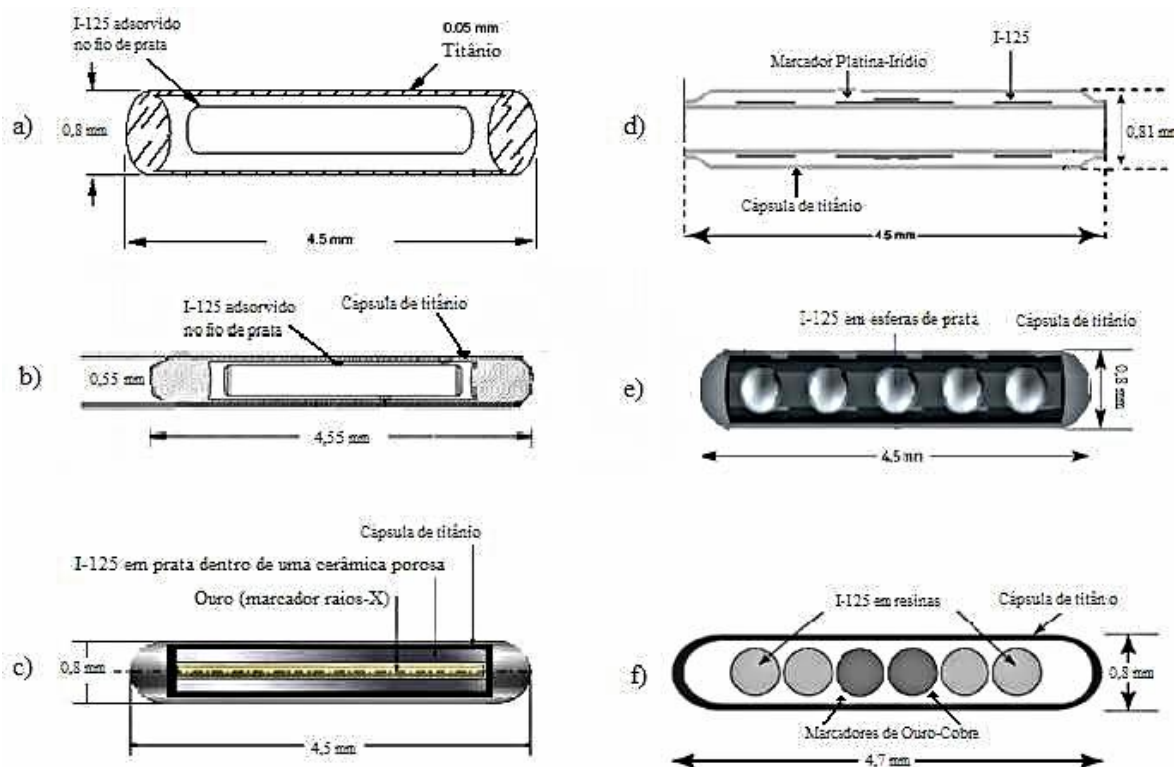


FIGURA 4 - Ilustração mostrando a parte interna dos modelos das sementes de iodo-125 <sup>47-52</sup>

Conforme se observa na FIG. 4, algumas sementes de iodo-125 podem apresentar marcadores de diferentes materiais como prata, ouro, platina-irídio e cobre, dentre outros.

A literatura sobre as técnicas utilizadas nas confecções das sementes de iodo-125 é encontrada em artigos, na forma de patentes ou ainda em catálogos comerciais com descrições sumárias, visando à proteção do segredo industrial.

Destacam-se alguns fabricantes de sementes, os modelos e as respectivas técnicas de selagem utilizadas na produção das sementes radioativas:

- a) UroMed Corporation – Bebig GmbH - Alemanha  
Symmetra I-125.S06 – fio de ouro radiopaco como marcador, iodo-125 depositado em matriz cerâmica e selagem a laser;

- b) Best Medical International – EUA  
Model 2301 – fio de tungstênio radiopaco como marcador, iodo-125 depositado em matriz orgânica, duplamente encapsulado em titânio e selagem a laser;
- c) BARD – Source Tech Medical – EUA  
BrachySource STM I<sup>125</sup> – fio de ouro radiopaco como marcador, uma camada de alumínio sobre o marcador e uma cobertura de cobre, iodo-125 depositado sobre o cobre e selagem a laser;
- d) GE – Oncura - EUA  
OncoSeed 6711 – fio de prata radiopaco como marcador, iodo-125 depositado sobre a prata e selagem a plasma ou laser;
- OncoSeed 6702 – iodo-125 adsorvido por troca iônica em esferas de resina e selagem a plasma ou laser;
- e) Mentor Corporation – North American Scientific – EUA  
IoGold MED3631-A/M – duas esferas de ouro como marcador, iodo-125 depositado em quatro esferas de resina e selagem a laser;
- f) Syncor – China  
PharmaSeed BT <sup>125</sup>I – fio de paládio radiopaco como marcador, iodo-125 adsorvido no fio de paládio e selagem a laser;
- g) Med-Tec – Implant Sciences – EUA  
I-Plant 3500 – fio de prata radiopaco como marcador, iodo-125 depositado em núcleo de cerâmica e selagem a laser;
- h) International Brachytherapy – Bélgica  
Intersource<sup>125</sup> 125IL - marcador de irídio-platina, iodo-125 fixado em anéis de matriz orgânica no centro e nas pontas e selagem a laser;

- i) UroCor – Mills Biopharmaceuticals – EUA  
ProstaSeed <sup>125</sup>I-SL – cinco esferas de prata radiopaco como marcador, iodo-125 adsorvido por troca iônica em esferas de prata e selagem a laser;
- j) Imagyn Medical – International Isotope – EUA  
IsoStar 12501 - cinco esferas de prata radiopaco como marcador, iodo-125 fixado por difusão nas esferas de prata e selagem a laser; e
- k) DraxImage Inc. – Canadá  
BrachySeed LS-1 – fio de platina/irídio como marcador, iodo-125 adsorvido em esferas de vidro dopada com prata e selagem a laser.

### 3.3 Titânio

O elemento titânio foi descoberto em 1791 pelo pastor e mineralogista Willian Justin Gregor quando investigava a areia magnética (Menachanite) existente em Menachan na Cornualha, conhecida como Ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), que após ser tratada com ácido clorídrico e ácido sulfúrico concentrado produzia o  $\text{TiO}_2$  em forma impura. O titânio foi novamente redescoberto em 1795 pelo químico alemão Heinrich Klaproth, desta vez de forma isolada, obtendo o que chamamos de Rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), mostrando que era idêntico ao “Menachin” de Gregor.

Em 1937, Guilherme Kroll juntamente com a Siemens e Helska, desenvolveram um processo que é utilizado até hoje para obtenção de titânio metálico. Adicionando-se sódio ou magnésio como agente redutor forma-se o  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titânio), o qual, ao ser misturado com alcatrão e cloro, em temperatura ambiente, resulta no líquido tetracloreto de titânio ( $\text{TiCl}_4$ ), que por sua vez é purificado em quatro estágios, com magnésio ou sódio em atmosfera inerte, formando a esponja de titânio. Essa por sua vez é lavada em água régia e triturada em bríquetes para formar os eletrodos. Os eletrodos são fundidos em forno de alto vácuo, sendo necessário refundir duas ou mais vezes para homogeneizar a liga e melhorar o tamanho dos grãos, obtendo-se então os lingotes. Esse processo requer o consumo de energia 1,7 vezes maior do que o

necessário para a produção do alumínio, e somente a partir de 1946 foi utilizado fora do laboratório, sendo produzido comercialmente.

A partir de 1950 o titânio começou a ser utilizado como material estrutural, sendo a indústria aeroespacial a sua grande estimuladora <sup>53</sup>.

O setor da indústria de titânio que mais têm crescido nos últimos anos é a fabricação dos produtos de titânio comercialmente puro, sem adição de liga, utilizados nas indústrias de processamento químico, em virtude da grande versatilidade proporcionada por esse produto <sup>54</sup>.

O titânio e suas ligas têm sido usados em diversas aplicações como a aeroespacial, médica e petroquímica. Sua excelente relação entre resistência mecânica e peso, a alta resistência à corrosão, biocompatibilidade e resistência mecânica em altas temperaturas são atributos pelos quais substitui o alumínio em aplicações onde há temperaturas superiores a 180 °C e fazem com que seja um material muito utilizado <sup>55</sup>.

O titânio apresenta excelentes propriedades físicas, dentre as quais se destacam a densidade e o módulo de elasticidade. A maioria dos aços apresenta massa específica em torno de 7,87 g/cm<sup>3</sup>, ou seja, quase o dobro da densidade do titânio (4,54 g/cm<sup>3</sup>); somando-se a isto, tem-se o fato de que as propriedades mecânicas do titânio podem ser melhores que as referidas ligas, visto que o mesmo apresenta tensão específica e rigidez muito altas. Pelo fato do módulo de elasticidade do titânio (107 GPa) ser muito maior que de outros metais leves, como magnésio (45 GPa) e alumínio (69 GPa), o titânio compete com esses para aplicações estruturais espaciais e nanoaeroespaciais, uma vez que seu ponto de fusão (1668 °C) é muito maior que do magnésio (650 °C) e do alumínio (660 °C). O magnésio, por exemplo, não pode ser usado em temperaturas acima de 121 °C, enquanto o titânio pode ser utilizado sob temperaturas de até 426 °C no ar. Temperaturas maiores que essa provocam sua fragilização pelo oxigênio no ar <sup>56</sup>.



Dentre as propriedades químicas, destaca-se a alta reatividade deste metal, o que constitui uma desvantagem no seu processamento. O titânio combina-se muito facilmente com outros elementos, principalmente gases como nitrogênio e oxigênio, os quais se dissolvem rapidamente no metal líquido ou sólido acima de 400 °C, provocando a perda da ductilidade deste. Como consequência desta alta reatividade frente aos gases, é comumente encontrado na crosta terrestre sob a forma de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), chamado rutilo, na concentração de 0,6% sendo, com isso, o quarto elemento mais abundante dentre os metais estruturais, ficando atrás apenas de alumínio, ferro e magnésio. Em relação aos metais, o titânio apresenta limitada solubilidade com esses, mas tem uma forte tendência a se combinar formando compostos intermetálicos frágeis <sup>57</sup>.

O titânio conhecido como comercialmente puro (Ti CP) apresenta teores de pureza que estão entre 98% a 99,5%. Suas propriedades físicas podem variar de acordo com a quantidade de impurezas, de elementos residuais ao processo de purificação, tais como, oxigênio (O), ferro (Fe), nitrogênio (N), carbono (C) e hidrogênio (H). São as impurezas que determinam a classificação dos quatro tipos de titânio denominados comercialmente puros.

Apesar de pequena quantidade de O, Fe, N, C e H presentes no Ti CP, consideráveis mudanças em algumas propriedades mecânicas ocorrem, principalmente, em razão do O e Fe, pois, esses elementos passam a ocupar áreas dentro do arranjo cristalino (interstício) e causam desalojamento parcial dos átomos de titânio, o que acarreta em um encruamento, diminuindo o eventual deslizamento dos átomos quando sujeitos a forças externa, aumentando desta forma a resistência às possíveis deformações plásticas <sup>58</sup>.

O titânio existe em duas formas cristalográficas. Em temperatura ambiente, não ligado (comercialmente puro), tem uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HCP) denominada fase alfa ( $\alpha$ ) e em 883 °C se transforma em uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) conhecida como fase beta ( $\beta$ ). A manipulação destas variações cristalográficas por meio de adições de liga e de processamento termomecânico é a base para o desenvolvimento de

uma vasta gama de ligas e propriedades. Com base nas fases presentes, as ligas de titânio podem ser classificadas como ligas  $\alpha$ , ligas  $\beta$ , ou ligas  $\alpha + \beta$  <sup>59</sup>.

A adição dos elementos de liga visa, basicamente, a manutenção da fase  $\alpha$  ou  $\beta$ . A manipulação microestrutural das ligas de titânio por meio de tratamentos térmicos baseia-se na nucleação e crescimento da fase a partir de  $\beta$  ao se resfriar o material. A transformação martensítica é possível quando a fase  $\beta$  é resfriada rapidamente. Dois tipos de martensita podem ser formados:  $\alpha'$  (hexagonal compacta) e  $\alpha''$  (ortorrômbica) <sup>60</sup>.

Ligas  $\alpha$  - encontram-se nesta categoria os graus comerciais de pureza do titânio, os quais têm sua resistência aumentada, principalmente, pelo oxigênio em solução sólida. A composição destas ligas é tal que, em temperatura ambiente, nenhuma forma da fase  $\beta$  (estável ou metaestável) pode ser retida.

Tais ligas apresentam elevada resistência à fluência e por essa razão são adequadas para utilização em altas temperaturas. Outra característica destas ligas é o fato de não suportarem tratamento térmico <sup>61</sup>.

Ligas  $\alpha+\beta$  - essas ligas possuem quantidades suficientes de estabilizadores  $\alpha$  e  $\beta$  para ampliar o campo de temperaturas  $\alpha+\beta$  e estendê-lo à temperatura ambiente. Um espectro maior de microestruturas pode ser obtido dessas ligas quando comparado às ligas  $\alpha$ . Essa variação microestrutural propicia uma extensa gama de propriedades que são exploradas na indústria aeronáutica/espacial em temperaturas de até 350 °C. A presença de fase  $\beta$  diminui a resistência à fluência e, conseqüentemente, torna essas ligas inadequadas para aplicações em temperaturas mais elevadas. A liga Ti-6Al-4V é um exemplo de liga do tipo  $\alpha+\beta$  <sup>61</sup>.

Ligas  $\beta$  - nestas ligas, a concentração de  $\beta$ -estabilizadores é tão alta que a fase  $\beta$  é termodinamicamente estável à temperatura ambiente, não havendo assim, transformação de  $\beta \rightarrow \alpha$  durante os tratamentos mecânicos.

Essas ligas são trabalhadas a frio e podem ser recristalizadas em baixas temperaturas (cerca de 800 °C) <sup>61</sup>.

Uma característica importante do titânio é a transformação alotrópica que ele apresenta a 882 °C, quando muda sua estrutura cristalina de hexagonal compacta (HCP) para estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A temperatura de transformação é fortemente influenciada por elementos intersticiais. Metais simples dos grupos IIIA e IVA, por exemplo, Al, Ga e Sn; e os elementos intersticiais (H, C, O e N) são denominados elementos  $\alpha$ -estabilizadores (alfagênicos) e, quando adicionado ao titânio puro, promovem o aumento da temperatura de transformação da fase  $\alpha$  para a fase  $\beta$ . Já a adição de metais, tais como, Mo, V, Mn, Fe, Cu, Cr, Nb e Ta diminuem a temperatura desta transformação e esses elementos são denominados  $\beta$ -estabilizadores (betagênicos).

Com exceção do hidrogênio, os demais elementos intersticiais são estabilizadores de fase  $\alpha$ . A presença de elementos intersticiais tende a aumentar a dureza, a resistência mecânica e diminuir a ductilidade do material. Na FIG. 5 são esquematizadas as transformações alotrópicas do titânio puro <sup>62</sup>.

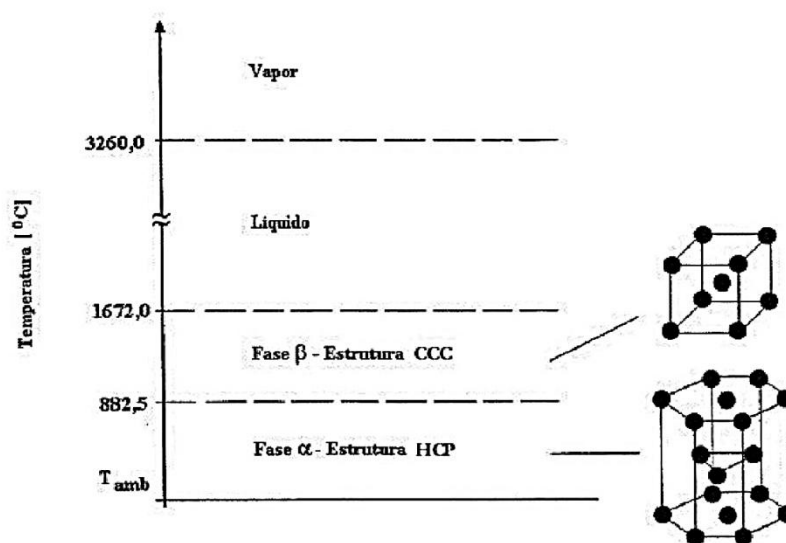


FIGURA 5 - Transformações alotrópicas do titânio puro <sup>62</sup>  
(CCC – Cúbica de Corpo Centrado e HCP – Hexagonal Compacta)

Uma propriedade importante do titânio é sua biocompatibilidade. Hoje, implantes dentários, substituindo a raiz do dente, são possíveis graças ao titânio. Também são fabricados verdadeiros ossos ortopédicos <sup>63</sup>.

Nessas aplicações, os tipos de titânio utilizados são o ASTM-F-67 e o ASTM-F-136. Esses tipos, para medicina, são fabricados com rigoroso controle de qualidade, já que se tratam de componentes temporários ou permanentes a serem incorporados ao corpo humano <sup>63</sup>.

Nenhum material para implante cirúrgico demonstra ser completamente livre de reações adversas no corpo humano. Entretanto, experiências clínicas prolongadas do emprego do material titânio medicinal mostram que um nível aceitável de resposta biológica pode ser esperado quando o material é usado em aplicações apropriadas <sup>17</sup>. Desta maneira, as normas ASTM F67-77 <sup>15</sup>, NBR ISO 5832-2 <sup>17</sup> e o ASM *Metals Handbook* <sup>16</sup> foram utilizados na especificação do titânio medicinal utilizado para confecção das sementes de iodo-125.

A patente *Capsule for interstitial implants* de Russell <sup>28</sup> recomenda a utilização do titânio grau 2, uma forma altamente pura de titânio contendo apenas quantidades aceitáveis de elementos transmutáveis em sua composição química.

O titânio grau 2 é o mais comumente aplicado na fabricação de tubulações e vasos de pressão em virtude de suas propriedades equilibradas de resistência a corrosão, resistência mecânica e ductilidade. Também, o titânio grau 2, é o mais abundante no mercado e mais barato que os graus 1, 3 e 4 <sup>54</sup>.

Pode-se observar na TAB. 2 a composição química do titânio medicinal (normas ASTM F67-77 <sup>15</sup> e NBR ISO 5832-2 <sup>17</sup>).

TABELA 2 - Composição química do titânio medicinal <sup>15,17</sup>

Elemento	Limites máximos de composição em massa (%)				
	Grau 1 ELI	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Graus 4A e 4B
Nitrogênio	0,012	0,03	0,03	0,05	0,05
Carbono	0,03	0,10	0,10	0,10	0,10
Hidrogênio	0,0125 <sup>1</sup>	0,0125 <sup>1</sup>	0,0125 <sup>1</sup>	0,0125 <sup>1</sup>	0,0125 <sup>1</sup>
Ferro	0,10	0,20	0,30	0,30	0,50
Oxigênio	0,10	0,18	0,25	0,35	0,40
Titânio	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço

<sup>1</sup> Exceto para tarugos, para os quais o teor máximo de hidrogênio deve ser 0,010% (fração de massa), e para produtos planos, para os quais o teor máximo de hidrogênio deve ser 0,015% (fração de massa).

Fonte – ABNT, NBR ISO 5832-2

### 3.4 Soldagem

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Esse método de união, considerado em conjunto com a brasagem, tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso. A soldagem é utilizada na fabricação de estruturas simples, como grades e portões, assim como em componentes encontrados em aplicações com elevado grau de responsabilidade, tais como, nas indústrias químicas, petrolíferas e nucleares, e também na criação de peças de artesanato, joias e de outros objetos de arte <sup>64</sup>.

Parte do desenvolvimento que levaria aos métodos de soldagem empregados atualmente teve origem em tempos remotos. Há 5000 anos, na cidade de Ur, Caldéia, uniam-se peças de ouro, considerado o primeiro metal obtido e utilizado, por meio de uma técnica hoje conhecida como soldabrasagem. Há 3000 anos, o homem inventou o processo de forjar a quente, concentrando o calor na zona da peça que queria ligar, seguido de martelamento.

O advento do ferro, por volta de 2000 a.C., foi um passo importante para a metalurgia. Descobertas arqueológicas indicam que o início do desenvolvimento do metal deu-se na Mesopotâmia, onde foi para a China e Índia,

e depois para o Egito, Grécia e Roma. Nesse período, o homem começou a fabricar utensílios de duas ou mais partes por meio de união por forjamento a quente, colocando uma peça contra a outra até que se soldassem.

Uma antiga notícia que se tem sobre a soldagem remonta ao forjamento da espada de Damasco, 1300 a.C., e ao uso de uma espécie de maçarico soprado pela boca, usando álcool ou óleo como combustível, técnica usada pelos egípcios para fundir e soldar bronze que foi transmitida a gregos e romanos <sup>65</sup>.

A técnica da moderna soldagem começou a ser moldada a partir do século XIX com a descoberta do arco elétrico por Sir Humphrey Davy, bem como com a descoberta do acetileno por Edmund Davy e do desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica, permitindo que se iniciassem alguns processos de fabricação de peças utilizando esses novos recursos <sup>66</sup>.

Com o advento da Primeira Guerra Mundial, a técnica da soldagem começou a ser mais utilizada nos processos de fabricação. A Segunda Guerra Mundial imprimiu grande impulso na tecnologia de soldagem, desenvolvendo novos processos e aperfeiçoando os já existentes <sup>23</sup>.

Na FIG. 6 é mostrada a evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.

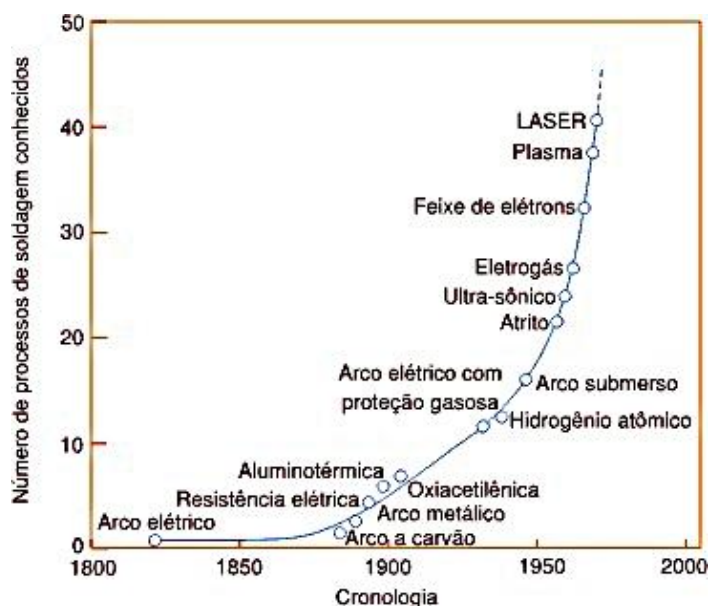


FIGURA 6 - Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo <sup>23</sup>

Um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é abrangido pelo termo soldagem. Classicamente, a soldagem é considerada como um processo de união, porém, na atualidade, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com soldagem são usados para corte de peças metálicas e em muitos aspectos essas operações se assemelham a operações de soldagem.

Na literatura, encontram-se algumas tentativas de definição da soldagem, tais como:

- “Processo de união de metais por fusão.”

Deve-se ressaltar que não apenas os metais são soldáveis e que é possível se soldar sem fusão.

- “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas.”

Nessa definição, o termo “continuidade” é utilizado com um significado similar ao adotado na matemática. Isto é, considera-se que, embora as propriedades possam variar ao longo de uma junta soldada, essa variação não apresenta quebras abruptas como ocorre, por exemplo, em uma junta colada na qual a resistência mecânica muda abruptamente entre um componente da junta colada.

- “Processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”

Esta definição, adotada pela associação Americana de Soldagem (*American Welding Society – AWS*) é meramente operacional, não contribuindo com aspecto conceitual.

Finaliza-se com uma última definição, baseada no tipo de forças responsáveis pela união dos materiais.

- “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre materiais que estão sendo unidos.”

Esta última definição engloba também a brasagem, que pode ser considerada, neste contexto, como um processo de soldagem <sup>64</sup>.

### **3.5 Breve histórico sobre laser**

Após a teoria da relatividade, Einstein, em 1917, publicou uma pesquisa descrevendo o terceiro processo de integração da matéria, a emissão estimulada de radiação e assim forneceu os princípios teóricos para um novo tipo de luz. Posteriormente, Gold chamou-o de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), e o processo ficou conhecido pela sigla LASER.



O desenvolvimento do laser revolucionou a ciência em diversos campos e resultou do trabalho de inúmeros investigadores durante várias décadas, sendo que dois cientistas americanos (Schawlow e Townes) e dois cientistas russos (Basov e Projorov), trabalhando em lugares diferentes, apresentaram quase que simultaneamente trabalhos que demonstraram a possibilidade de se construir aparelhos capazes de emitir esse tipo de luz. Por esse feito, os quatro cientistas dividiram o Prêmio Nobel de Física, em 1964. A construção do primeiro aparelho de emissão de laser para a área médica foi realizada por Maiman, em 1960, que utilizou o rubi como meio para geração. O laser de rubi tem comprimento de onda eletromagnética situada na faixa de luz visível. Na área industrial, o laser tem várias aplicações, como soldagem, corte e gravação<sup>67</sup>.

### **3.5.1 Princípio da geração do laser**

A geração de um feixe de laser é essencialmente um processo de três etapas, que ocorre quase que instantaneamente:

- a) A fonte de bombeamento fornece energia para o meio, excitando os átomos do meio laser, de tal forma que os elétrons mantidos dentro dos átomos são elevados temporariamente a um estado de energia mais alto. Os elétrons mantidos neste estado excitado não podem permanecer assim indefinitivamente e caem para um nível de energia mais baixo. Neste processo, o elétron perde o excesso de energia, ganho do bombeamento, pela emissão de um fóton. Isto é chamado emissão espontânea e os fótons produzidos por esse método são as sementes para a geração do laser;
  
- b) Os fótons emitidos pela emissão espontânea, eventualmente, colidem contra outros elétrons nos estados mais elevados de energia. “Eventualmente” é um tempo muito curto em razão da velocidade da luz e da densidade de átomos excitados. O fóton de entrada, ao colidir com um elétron no estado excitado, faz com que esse elétron retorne ao nível de energia menor, criando outro fóton. Esses dois fótons são coerentes, estão em fase, possuem mesmo

comprimento de onda e deslocam-se na mesma direção. Isto é chamado de emissão estimulada; e

- c) Os fótons são emitidos em todas as direções. Entretanto, alguns fótons viajam ao longo do meio laser para colidir com os espelhos ressonadores e serem refletidos de volta no meio laser. Os espelhos ressonadores definem a direção de amplificação preferencial para emissão estimulada. Para que a amplificação ocorra, deve haver uma maior porcentagem de átomos no estado excitado do que os em níveis de energia menores. Essa inversão de população de mais átomos no estado excitado conduz às condições requeridas para a geração de laser <sup>68</sup>.

Na FIG. 7 é ilustrada uma representação esquemática simplificada das três etapas de geração do laser.

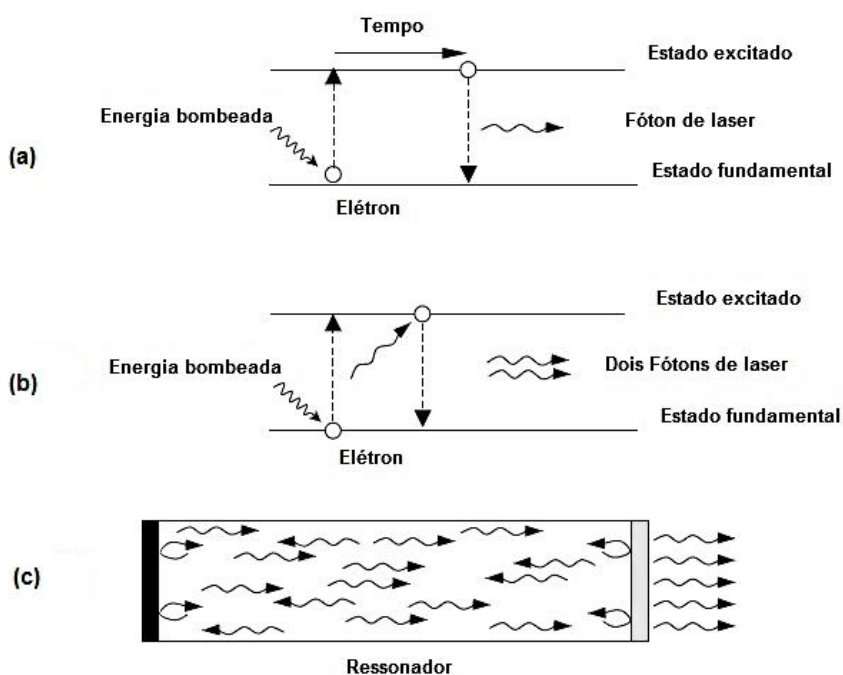


FIGURA 7 - Representação da geração de laser, incluindo: (a) emissão espontânea, (b) emissão estimulada e (c) amplificação <sup>68</sup>

### 3.5.2 Cavity laser

Para produção do laser podem ser usadas cavidades laser com dióxido de carbono, capazes de produzir laser de infravermelho e densidades de energia em torno de  $1 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$  ou fontes pulsadas de YAG (*Yttrium Aluminum Garnet*) no estado sólido. As primeiras são usadas para a soldagem a laser de elevada penetração, enquanto que os lasers de estado sólido são mais usados para a soldagem de ponto e de costura em juntas de pequena espessura, soldagem em microeletrônica e em outras aplicações que exijam um controle preciso da quantidade de energia fornecida à peça<sup>70</sup>.

A FIG. 8 ilustra um modelo de cavidade de laser.

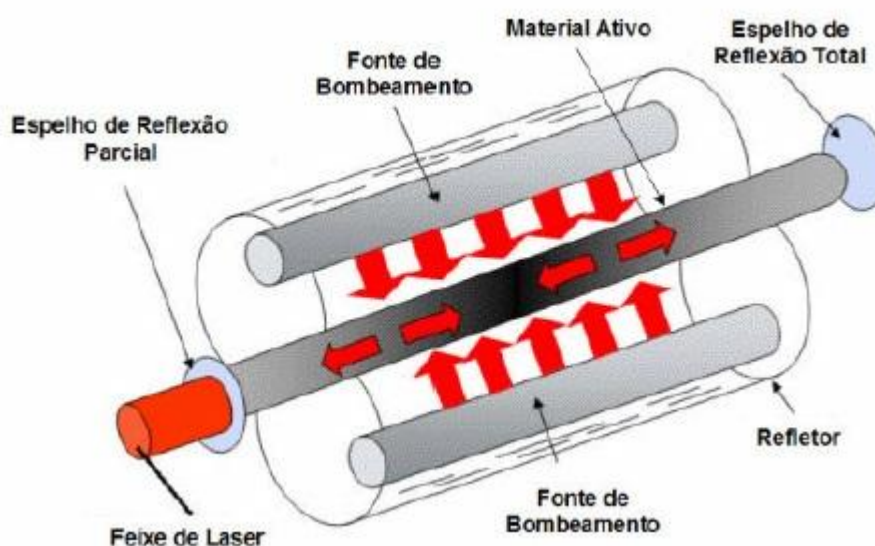


FIGURA 8 - Esquema de funcionamento de uma cavidade geradora de laser<sup>70</sup>

### 3.5.3 Técnicas de soldagem a laser

A tecnologia de soldagem a laser evoluiu consideravelmente. Dentre os lasers mais utilizados para a soldagem podemos destacar o laser de  $\text{CO}_2$ , o laser de Nd:YAG e a tecnologia mais recente do laser de fibra. Todos emitindo radiação eletromagnética em comprimento de ondas entre as faixas do ultravioleta e infravermelho<sup>67,69</sup>.

A soldagem a laser (LBW - *Laser Beam Welding*) é um processo de união baseado na fusão localizada da junta pelo bombardeamento com um feixe de luz concentrada, coerente e monocromática de alta intensidade. De forma similar à soldagem EBW (*Electron Beam Welding*), esse feixe de alta intensidade é suficiente para fundir e vaporizar parte do material da junta no ponto de entrada do feixe no material, causando um furo com o formato do buraco de fechadura (*keyhole*), que penetra profundamente no metal de base <sup>70</sup>.

Na FIG. 9 é mostrado de forma esquemática um sistema de soldagem a laser.

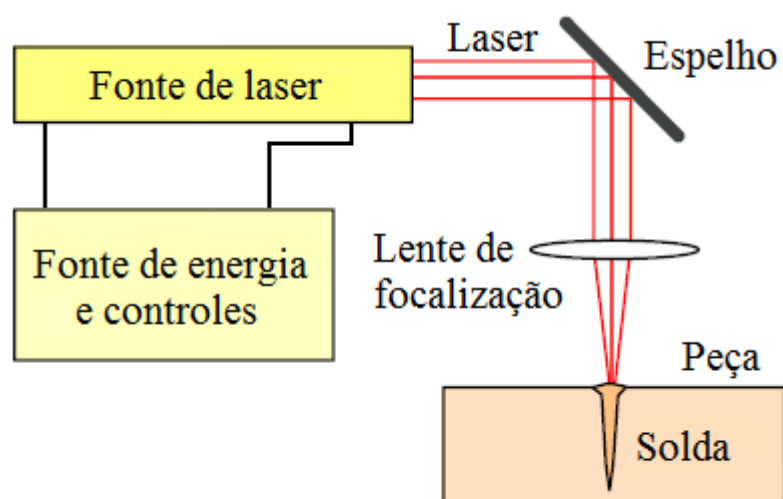


FIGURA 9 - Elementos de um sistema típico para soldagem a laser <sup>70</sup>

A solda laser é caracterizada por um delicado balanço entre aquecimento e resfriamento dentro de um volume, no qual uma poça líquida é formada e permanece estável até a solidificação. O objetivo da solda laser é criar a poça de fusão pela absorção da radiação laser incidente, possibilitar o seu crescimento até o tamanho desejado e então propagar essa poça através da interface sólida, eliminando a linha de junta original entre componentes a serem unidos.

As possibilidades para se obter uma solda laser com qualidade e precisão são enormes. Isto ocorre em virtude dos vários parâmetros do sistema poderem ser controlados de forma precisa, desde a geração do feixe até o efeito

deste no material. Um objetivo primário das pesquisas em solda laser vem sendo identificar esses parâmetros que influenciam na estabilidade e reprodutibilidade da solda, e desenvolver maneiras para controlá-los.

A solda laser pode ser executada de duas maneiras fundamentais: solda por condução e solda por penetração (*keyhole*). A diferença básica entre as duas técnicas está na superfície da poça de metal fundido, que permanece íntegra durante a solda por condução e é alterada na solda por penetração pelo feixe de laser, que penetra na região de fusão.

A técnica de soldagem por condução oferece maior estabilidade ao processo de soldagem. Nela a radiação laser não penetra no material que está sendo soldado, resultando em soldas menos susceptíveis a defeitos, como o aprisionamento de gás (poros) durante o processo.

Na solda por condução, a potência do laser funde o metal de base sem vaporizá-lo. A energia do feixe de laser é absorvida pela superfície e penetra no material por condução térmica, independente do feixe ser contínuo ou pulsado. Quando um laser pulsado é usado, a taxa de repetição deve ser alta o suficiente para formar um cordão hermético, pela sobreposição parcial dos pulsos. A solda por condução é limitada a chapas com até 2 mm de espessura.

A solda com penetração profunda ocorre quando um feixe de laser de alta potência vaporiza o material ao longo de sua espessura. O orifício formado é chamado de *keyhole* e apresenta metal fundido ao seu redor. Uma coluna de vapor é produzida no orifício circundado por uma poça de metal líquida.

Quando essa coluna é movimentada, o material à frente do orifício é fundido ao longo da profundidade. O metal líquido flui em torno das paredes do orifício e se solidifica na parte de trás. A coluna de vapor é estabilizada pelo balanço entre a densidade de energia do feixe de laser e a velocidade de soldagem<sup>71</sup>. Na FIG. 10 é mostrada uma solda por penetração profunda.

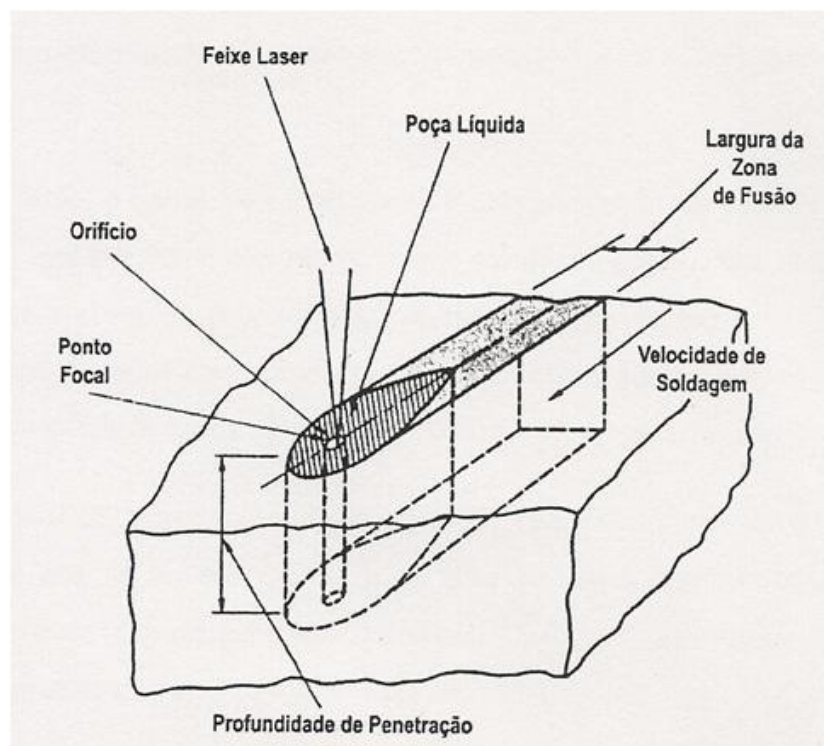


FIGURA 10 - Esquema de solda por penetração profunda (*keyhole*)<sup>71</sup>

A transição entre o modo de condução para um modo como *keyhole* é formado, depende da intensidade do pico de laser e da duração do pulso de laser aplicado à peça de trabalho. Ajuste do tempo da intensidade do pulso de laser pode produzir a mudança de um modo de soldagem para outro durante a interação. A solda pode ser iniciada no modo de condução e então convertida para soldagem com *keyhole* mais tarde na interação<sup>72</sup>.

As técnicas de soldagem por condução e penetração são possíveis de serem executadas tanto com laser contínuo como pulsado. Elas podem ser empregadas também no processo de solda ponto<sup>71</sup>.

Na FIG. 11 é ilustrada a diferença entre a técnica de soldagem a laser por condução e a técnica de soldagem por penetração.

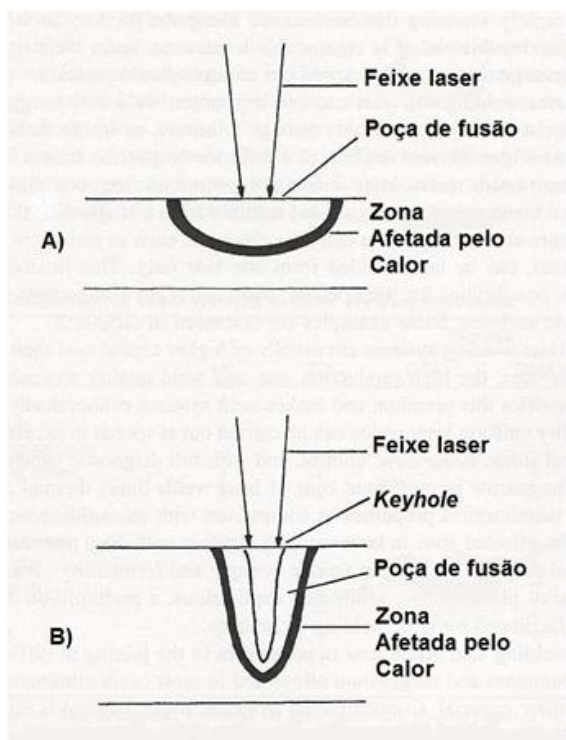


FIGURA 11 - Comparação das técnicas de soldagem a laser por: (a) condução e (b) penetração<sup>71</sup>

### 3.5.4 Comparação com outras técnicas de soldagem

Soldagem a laser não é uma panaceia, mas tem um número de vantagens em comparação com técnicas de soldagem convencional. A primeira vantagem é a capacidade de concentrar a radiação laser em uma pequena área que produz uma fonte de calor de alta intensidade, e então rapidamente expor essa fonte de calor ao longo da junta a ser soldada. A esse respeito, soldagem por feixe de laser é comparável à soldagem por feixe de elétrons, mas tem a vantagem adicional que pode ser realizada em pressão atmosférica.

Costuma-se dizer em relação à soldagem a laser que “se você pode ver, você pode soldar”. De fato a soldagem laser pode ser feita em localizações remotas, através de janelas, ou dentro de componentes tridimensionais onde a introdução de eletrodos ou feixe de elétrons torna-se impossível. Similar à solda por feixe de elétrons, a soldagem a laser atua somente de um lado do material, para se obter a selagem de uma junta sobreposta, diferentemente da solda ponto por resistência que requer acesso pelos dois lados. Essa flexibilidade abre novas

possibilidades no projeto de juntas, particularmente para incorporação de componentes com superfícies inacessíveis.

Enquanto sistemas de solda laser geralmente tem custo maior do que equipamentos de soldagem convencional, a alta taxa de produção e a qualidade da solda que se atinge justifica seu valor e torna esse tipo de sistema economicamente competitivo. Uma solda laser uniforme de alta qualidade pode ser feita em velocidades acima de 10 metros/minuto em aço de 1 mm de espessura, controlado por Controle Numérico Computadorizado (CNC) e com total capacidade de diagnóstico da qualidade da solda.

A estreita zona termicamente afetada (ZTA) na solda laser limita a distorção térmica e melhora as propriedades metalúrgicas em comparação com técnicas de solda a arco elétrico. Na solda laser, a estreita zona termicamente afetada, junto com a profundidade de penetração melhora as propriedades mecânicas, tais como, resistência à fadiga e formabilidade. De fato, isto vem impulsionando a soldagem de conjuntos soldados que podem ter espessuras diferentes (*tailor welded blanks*) a laser, para uso na indústria automobilística.

Existem também desvantagens, como o alto custo do laser e dos sistemas auxiliares para entrega e focalização do feixe. Os custos de operação também são altos, particularmente para aplicações que requerem altas vazões de gás de proteção, como o gás hélio.

O poder de focalização do feixe laser, que de um lado traz a vantagem de entregar a energia eficientemente para a peça e minimizar a zona termicamente afetada pelo calor, traz problemas de alinhamento e preenchimento da junta. Pequenos desalinhamentos na junta podem causar grandes mudanças nas condições de soldagem. Juntas com folgas a partir de 0,1 mm podem resultar em uma falta de interação do feixe com o material e reduzir a eficiência de aquecimento<sup>72</sup>.



Na TAB. 3 é apresentado um resumo das vantagens e desvantagens da soldagem a laser, comparado a outros métodos de soldagem.

TABELA 3 - Comparação dos processos de soldagem <sup>72</sup>

Ítems analisados	Laser	Feixe elétrons	TIG	MIG	Resistência
Eficiência de soldagem	0	0	-	-	+
Qualidade da soldagem	+	+	-	-	-
ZTA estreita	+	+	-	-	0
Alta velocidade de processamento	+	+	-	+	-
Perfil do cordão de solda	+	+	0	0	0
Solda em pressão atmosférica	+	-	+	+	+
Blindagem de raios X	+	-	+	+	+
Solda metais reflexivos	-	+	+	+	+
Adição de materiais de preenchimento	0	-	+	+	-
Automatização do processo	+	-	+	0	+
Custo inicial	-	-	+	+	+
Custo operacional	0	0	+	+	+
Confiabilidade	+	-	+	+	+
Fixação simples	+	-	-	-	-

(+ vantagem; - desvantagem; 0 neutro)

Fonte – Duley, W. W., Laser Welding. 1999.

A principal vantagem da soldagem a laser comparada com outras técnicas deriva do fato de que a intensidade de calor no foco do feixe excede, por até várias ordens de magnitude, o quanto atingível pelos métodos convencionais. Isto imediatamente introduz o conceito de soldagem por *keyhole* ou penetração e

a possibilidade de soldas laser com uma alta relação de aspecto, pequena zona termicamente afetada e alta velocidade de processamento <sup>72</sup>.

O processo de soldagem a laser apresenta as características <sup>71;73,74,75,76,77,78</sup>:

- a) O feixe de laser pode ser facilmente direcionado, o que facilita a automação do processo;
- b) Permite a soldagem em lugares de difícil acesso;
- c) Permite a transmissão do feixe a longas distâncias;
- d) Não produz raios X;
- e) Pequena dimensão da Zona Termicamente Afetada (ZTA) - região do metal de base aquecida durante a soldagem a temperaturas capazes de causarem mudanças na microestrutura e propriedades do material. Tende a ser a região mais crítica de uma junta soldada;
- f) Baixo volume de Zona de Fusão (ZF) - região que, em algum momento durante a soldagem, esteve no estado líquido;
- g) Pode ser usado para cortar materiais não metálicos;
- h) Não é influenciado por campos magnéticos;
- i) Apresenta problemas de soldagem com metais que refletem o feixe;
- j) Baixa eficiência, de 8% a 15%, necessitando de grandes unidades de refrigeração para aplicação de alta potência;
- k) Alta velocidade de processo;
- l) Solda de alta precisão;
- m) Contaminação mínima ou nenhuma. Depende somente do gás de proteção; e
- n) Materiais de baixa soldabilidade às vezes podem ser soldados.

### 3.5.5 Parâmetros de processo de soldagem a laser

Apesar de a solda laser ser de alta qualidade e fornecer novas possibilidades na união de metais, ela só é obtida depois de muito trabalho, com a otimização dos parâmetros do processo. A otimização destes parâmetros define as condições de soldagem que proporciona o melhor desempenho da junta soldada. Em muitos dos casos, essa investigação envolve o corte das soldas para análise da seção transversal, como a geometria da região soldada, as propriedades metalúrgicas e microestruturais. Testes mecânicos também definem uma faixa aceitável de condições de soldagem. Na FIG. 12 são mostrados alguns dos parâmetros de processo de soldagem a laser, os quais afetam a qualidade da solda <sup>71,72</sup>.

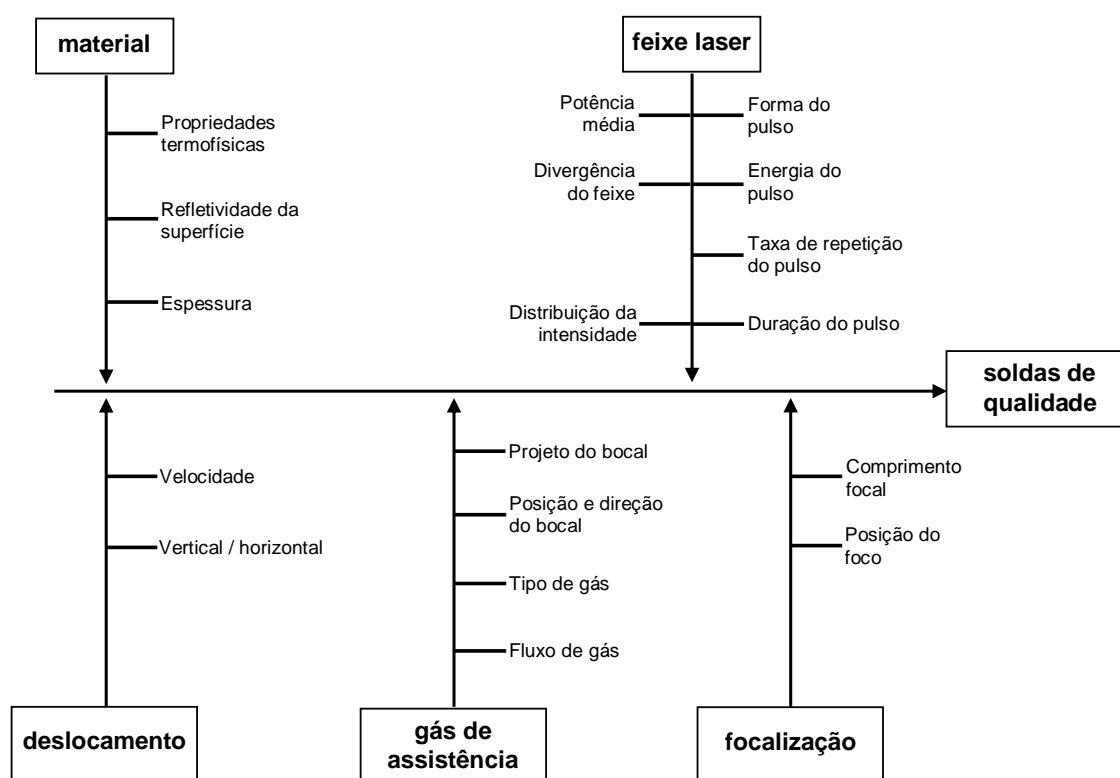


FIGURA 12 - Diagrama de parâmetros que afetam a qualidade da solda com laser pulsado <sup>71,72</sup>

Alguns dos parâmetros mostrados na FIG. 12 são definidos na sequência:

- A solda criada por cada pulso é determinada pela densidade da potência pico e pela duração daquele pulso. O número de pulsos por segundo, a sobreposição de pulsos e a velocidade de soldagem adicionalmente definem uma solda de costura;
- A densidade de potência pico é a concentração da potência no local, que controla a penetração da solda e é função do tipo de fibra e do diâmetro interno da fibra óptica, da óptica de focalização e da saída da potência pico do laser. É determinada dividindo-se a potência pico pela área do feixe incidente na superfície do material. A unidade utilizada é  $W/cm^2$ ;
- A energia do pulso é a energia contida dentro de um pulso e é produto da potência pico pela largura do pulso, conforme Equação 1:

$$E = P_p \times t \quad (1)$$

Na qual,

E é a energia do pulso em Joule (J);

$P_p$  é a potência pico em Watt (W); e

t é a duração do pulso laser em milissegundos (ms).

- A potência pico é um parâmetro que é selecionado diretamente na máquina de solda laser e controla a potência máxima de cada pulso. A unidade utilizada para potência pico é Watt (W);
- A largura do pulso é a duração do pulso laser e é selecionado diretamente na máquina de solda laser e controla o calor no local, largura da solda e o ciclo de calor. A unidade usada é milissegundos (ms);

- A taxa de repetição de pulso ou frequência de pulso também controla o calor no local e o ciclo de calor. Também é ajustado diretamente na máquina de solda laser e é igual ao número de pulsos da lâmpada flash por segundo e pode ser expressa em Hz ou Pulsos Por Segundo (pps); e
- A potência média é aplicada quando mais de um pulso é utilizado para a soldagem. Ela representa a potência média durante o período do pulso, e é o produto da energia do pulso pela taxa de repetição de pulsos (frequência, Hz), conforme Equação 2:

$$P_{med} = E \times f \quad (2)$$

Na qual,

$P_{med}$  é a potência média em Watt (W);

$E$  é a energia do pulso em Joule (J); e

$f$  é a taxa de repetição de pulsos em Hertz (Hz).<sup>68</sup>

Na FIG. 13 são mostrados graficamente alguns dos parâmetros do pulso laser.

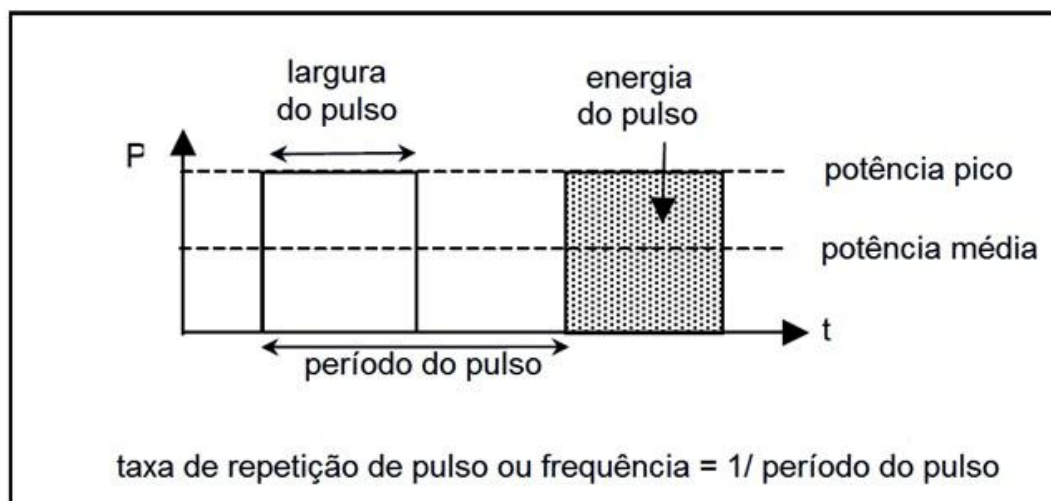


FIGURA 13 - Importantes parâmetros do pulso laser, incluindo potência pico, potência média, largura do pulso, energia do pulso e frequência ou taxa de repetição de pulso<sup>68</sup>

A forma da distribuição temporal do pulso influi na interação do feixe laser com o material e, portanto, nas características da solda.

Um pulso com uma distribuição temporal retangular garante uma densidade de energia praticamente constante durante todo o pulso laser. Quando essa distribuição é retangular com um pico de potência no seu início, a união de ligas de alumínio e cobre é facilitada. Essa forma temporal reduz a expulsão de metal líquido durante o pulso, o que diminui os defeitos do tipo cratera. Os formatos de pulso com rampa, ascendente (*up slope*) ou descendente (*down slope*), são indicados para união de materiais suscetíveis a trincas de solidificação. Com essas formas de pulso pode-se influir na taxa de resfriamento exercendo um controle de tempo da solidificação da poça de fusão e, desta forma, reduzindo as trincas de solidificação.

A relação entre a profundidade e a largura do cordão de solda é influenciada diretamente pela forma do ponto de incidência do feixe laser no material e pela forma da distribuição de energia na secção transversal do feixe.

Os parâmetros do sistema de focalização de maior relevância são: o comprimento focal da lente e o posicionamento do foco em relação à superfície. Uma lente de comprimento focal curto fornece maior penetração, mas dificulta a manutenção das dimensões do cordão de solda, tanto na largura como na profundidade. Esse tipo de lente provoca uma focalização do feixe com cintura mínima, tornando crítica a tolerância do posicionamento do foco em relação à superfície da peça. Via de regra, quando se posiciona o foco do feixe laser levemente abaixo da superfície do material atinge-se a penetração máxima. Considera-se que 1 mm abaixo da superfície da peça sendo o ponto ótimo, mas essa localização pode variar, dependendo da espessura a ser soldada<sup>71,75</sup>.

Na soldagem a laser o gás de assistência tem duas funções:

- a) Proteger a solda por *keyhole* e o metal fundido que está solidificando da oxidação e assim evitar porosidade e inclusões de óxidos, os quais dão origem à má qualidade da solda; e
- b) Proteger a transmissão do feixe laser na focalização durante o funcionamento evitando a ionização na região da solda e assim assegurar uma boa penetração da solda, minimizando a expansão e a dispersão do feixe, o qual pode ser causado pelos vapores e gases ao redor da solda por *keyhole*.

A primeira destas funções é alcançada por vários gases, mas a segunda é mais difícil. Durante a soldagem, o vapor do metal ejetado do *keyhole* absorve potência do laser, ioniza e forma uma nuvem de plasma logo acima da solda *keyhole*. Sob as condições certas, os gases de proteção suprimem a formação do plasma e asseguram máxima transmissão do feixe de laser e a sua absorção pela peça <sup>79</sup>.

As propriedades termofísicas do material influenciam na geometria do cordão e nas dimensões da zona termicamente afetada. Algumas destas propriedades do material são: a refletividade, o coeficiente de absorção, a densidade, a difusividade térmica, o calor específico, o calor latente, a condutividade térmica e as dimensões.

A refletância é uma propriedade que varia com a temperatura e com a rugosidade da superfície do material. Desta forma, pode-se afirmar que a interação do feixe laser com o material é influenciada pela temperatura e pelas condições e acabamento na superfície da peça <sup>71</sup>.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

No decorrer deste trabalho, as atividades desenvolvidas foram focalizadas na viabilidade técnica de um sistema de soldagem a laser de Nd:YAG, para a confecção de produto que tem como principal função a emissão de radiação ionizante para utilização na área da saúde, que demanda desempenho compatível com os padrões estabelecidos pelas normas internacionais ISO 2919 - *Radiological protection - Sealed radioactive sources – General requirements and classification* e ISO 9978 – *Radiation protection - Sealed radioactive sources – Leakage test methods*.

As fases de desenvolvimento do sistema de soldagem a laser Nd:YAG das sementes de iodo-125 compreenderam:

- a) Preparação de amostras – corte e limpeza dos corpos de prova em titânio, para ensaios de soldagem e caracterização dimensional dos tubos de titânio;
- b) Dispositivos de soldagem - projeto, fabricação e montagem do dispositivo de soldagem para ensaios de solda dos corpos de prova. Inicialmente, desenvolveram-se dispositivos que possibilitassem o posicionamento estático e dinâmico dos tubos de titânio durante a soldagem. Com o propósito de otimizar o procedimento de soldagem, implementou-se neste dispositivo um ou mais graus de liberdade, de modo a permitir um movimento relativo do tubo de titânio no ajuste do posicionamento para a soldagem. Após a determinação do modelo a ser utilizado, foi projetado, fabricado e montado um sistema completo automatizado para a soldagem dos tubos de titânio;
- c) Determinação dos parâmetros de soldagem, os quais interferem na qualidade da soldagem:
  - ✓ Feixe de laser
    - Potência média;
    - Potência pico;



- Energia do pulso;
  - Duração do pulso;
  - Taxa de repetição do pulso;
  - Forma do pulso;
- ✓ Gás de proteção
- Projeto do bocal;
  - Posição e direção do bocal;
  - Fluxo de gás;
- ✓ Focalização
- Posição focal;

d) Ensaios de amostras soldadas pelo processo a laser Nd:YAG:

- ✓ Micrográficos das secções longitudinais para avaliação da zona de fusão (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA), com o propósito de avaliar a existência de trincas, poros, inclusões, falta de penetração e mordeduras, que são falhas características nos processos de soldagem<sup>80</sup>;
- ✓ Vazamento ou estanqueidade das amostras para avaliação do desempenho do tubo de titânio soldado, com relação a sua capacidade de manter a integridade do material radioativo contido em seu interior. Utilizou-se um dos ensaios estabelecidos na norma ISO 9978 – *Sealed radioactive sources – Leakage test methods*<sup>21</sup>. Para os ensaios de vazamentos, segundo a norma ISO 9978, utilizaram-se os procedimentos validados em trabalho de mestrado desenvolvido no Instituto<sup>81</sup>;
- ✓ Qualificação de amostras com o propósito de classificar o seu desempenho, de acordo com a norma ISO 2919 – *Sealed radioactive sources – General requirements and classification*<sup>20</sup>, que estabelece os requisitos de desempenho a ensaios térmicos e mecânicos para uma fonte selada aplicável à braquiterapia. Para validação das sementes de braquiterapia ou

fontes seladas seguindo a classificação estabelecida na norma ISO 2919 realizaram-se ensaios em alta temperatura (600 °C), baixa temperatura (-79 °C), alta pressão (2 MPa), baixa pressão (25 kPa) e impacto (50 g); e

- e) Avaliação dos resultados, por meio de estudos de viabilidade técnica da influência dos parâmetros ensaiados durante os procedimentos da soldagem e seus respectivos impactos na qualidade da junta soldada. O propósito foi estabelecer as condições ideais de soldagem para elaboração e aperfeiçoamento de um sistema de soldagem automatizado e sua implementação na produção rotineira das fontes seladas de iodo-125 para aplicação em braquiterapia, no IPEN-CNEN/SP.

#### **4.1 Material utilizado**

Na confecção das sementes de iodo-125 utilizou-se o tubo de titânio como um invólucro, por ser um material resistente a corrosão, leve e biocompatível.

Na seleção dos materiais para a confecção das sementes foram utilizadas as normas ASTM F67-77<sup>15</sup>, ABNT NBR ISO 5832-2<sup>17</sup> e o guia *METALS HANDBOOK*<sup>16</sup>.

O material utilizado nos experimentos de soldagem das fontes seladas foi o titânio, comercialmente puro, grau 2 (Ti CP GR2), fabricado pela empresa *Accellent Endoscopy*, apresentava-se na forma de tubo com diâmetro externo variando de 0,790 mm a 0,808 mm e a espessura de parede variando de 0,043 mm a 0,058 mm em 1 m de comprimento. O material encontrava-se normalizado e pertencia ao lote de fabricação número 3861M, registrado no certificado de análise número 18828.

Na TAB. 4 são apresentados os limites máximos dos elementos químicos presentes na composição do Ti CP GR2, de acordo com as normas ASTM F67-77 e ABNT NBR ISO 5832-2<sup>15,17</sup>.

TABELA 4 - Composição química do titânio<sup>17</sup>

Elemento	% fração de massa
	Norma
Nitrogênio	0,03
Carbono	0,10
Hidrogênio	0,0125
Ferro	0,30
Oxigênio	0,25
Titânio	Balanço

Fonte – ABNT, NBR ISO 5832-2

## 4.2 Preparação das amostras

Para que fosse possível a execução dos ensaios de soldagem utilizando-se os dispositivos de solda, houve a necessidade do corte do tubo de titânio em amostras com comprimentos que pudessem ser acomodadas e fixadas nos referidos dispositivos.

Para essa operação os tubos de titânio foram cortados com o auxílio de uma máquina de corte marca Buehler LTD, modelo Isomet 11-1280-170 *Low Speed Saw*, utilizando-se um disco de corte diamantado, marca Buehler, código 11-4244, da série 15, com alta concentração de diamante (15HC). Após o corte os tubos foram lixados nas faces com lixa d'água grana 400 e desengraxados, por um período de 1 h, com uma mistura de 8 mL de água destilada e 2 mL de detergente Extran MA 02 Neutro, da marca Merck, em um equipamento de limpeza por ultrassom, modelo LS-3DA-2 da marca LIMPSONIC. Após esse procedimento, os tubos foram lavados em 10 mL de água destilada e colocados para secagem. O comprimento do tubo de titânio após o corte variava entre 6,5 mm e 7,0 mm.

### 4.3 Equipamento de soldagem

Nos ensaios de soldagem dos tubos de titânio utilizou-se uma máquina de solda laser do tipo Nd:YAG, da marca Miyachi Unitek Corporation, modelo LW15A-2T, potência máxima de saída de 15 Watts, energia por pulso máxima de 15 J / 5,0 ms, largura temporal dos pulsos desde 0,2 até 10 ms, taxa de repetição de 1 a 30 pps e comprimento de onda 1064 nm, mostrada na FIG 14.



FIGURA 14 - Máquina de solda laser Nd:YAG utilizada nos experimentos

Para a entrega do feixe de laser utilizou-se um cabo de fibra óptica flexível, com diâmetro de núcleo medindo 800  $\mu\text{m}$  e 5 metros de comprimento.

Além disso, utilizou-se um cabeçote de focalização com comprimento focal da lente colimadora de 70 mm e focalização óptica de 70 mm. Nas FIG.15 e 16 são mostrados o cabo de fibra óptica flexível e o cabeçote de focalização, respectivamente.



FIGURA 15 - Cabo de fibra óptica



FIGURA 16 - Cabeçote de focalização

#### 4.4 Dispositivo dinâmico

Confeccionou-se um dispositivo de soldagem que possibilitava movimento circular do tubo de titânio durante os pulsos da máquina de solda laser para que ocorresse a selagem.

O dispositivo consistiu de uma pinça de fixação tipo mandril, marca ROHM, modelo 4P B10, com capacidade de fixação de 0,5 mm a 4 mm acoplado por polias e correia a um moto redutor, marca AJM, modelo P4742, 12 VCC. O moto redutor estava ligado a uma fonte de tensão regulável, marca SUN, modelo CC 182, faixa de trabalho de 0 a 20 V e 0 a 2 A. A velocidade do mandril variava conforme se alterava a tensão de saída da fonte.

O conjunto acoplado entre mandril e moto redutor estava fixado em uma base de PVC por um sistema de articulação semelhante a uma dobradiça. No sistema articulado havia um parafuso conectado que permitia, conforme o seu deslocamento, a variação do ângulo formado entre o tubo de titânio fixado no mandril e o sistema óptico de focalização.

O sistema óptico de focalização do laser estava fixado na base de PVC por meio de um sistema de movimentação por coordenadas XYZ.

O gás de proteção era fornecido por um sistema de tubos flexíveis. Na FIG. 17 é mostrado o dispositivo de soldagem dinâmico.

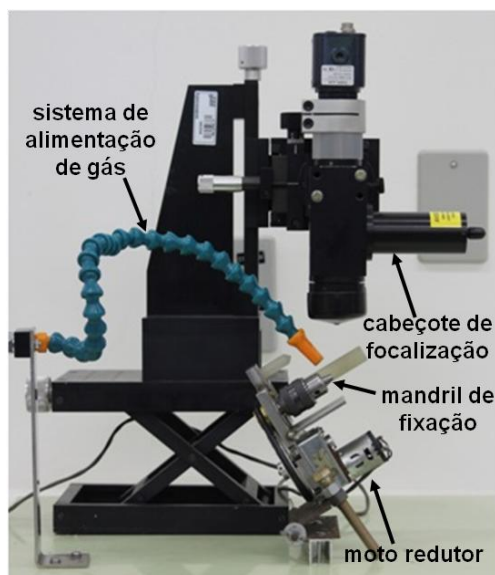


FIGURA 17 - Dispositivo de soldagem dinâmico

#### 4.5 Dispositivo estático

Esse dispositivo foi desenvolvido com o propósito de soldar a semente de iodo-125 utilizando um método estático, que permitia a selagem dos tubos de titânio com aplicação de um único pulso de laser.

O dispositivo consiste em um cilindro de baquelite medindo 18 mm de diâmetro por 11 mm de comprimento, com um orifício no centro medindo 1 mm de diâmetro, e um micrômetro com variação de 0 a 25 mm e precisão de 0,01 mm.

Nesse dispositivo, o tubo de titânio foi posicionado verticalmente no centro do orifício do cilindro de baquelite. Utilizou-se o micrômetro para ajustar o comprimento de material extra necessário para a selagem. Além disso, utilizou-se o próprio tubo de titânio como material extra, com a finalidade de eliminar a necessidade de utilizar metal de adição na selagem da semente (soldagem autógena). O tubo de titânio foi fixado por uma agulha de aço inoxidável AISI 304. Disparou-se o pulso de laser perpendicularmente à parede do tubo de titânio.

O sistema de alimentação do gás de proteção foi montado em um dispositivo de haste metálica com base magnética e consistia de um tubo em aço inoxidável AISI 304 medindo 6,32 mm de diâmetro externo e 1mm de espessura de parede com, aproximadamente, 100 mm de comprimento e curvado em 90° na extremidade de saída do gás.

Nas FIG. 18 e 19 é mostrado o dispositivo de soldagem estático.

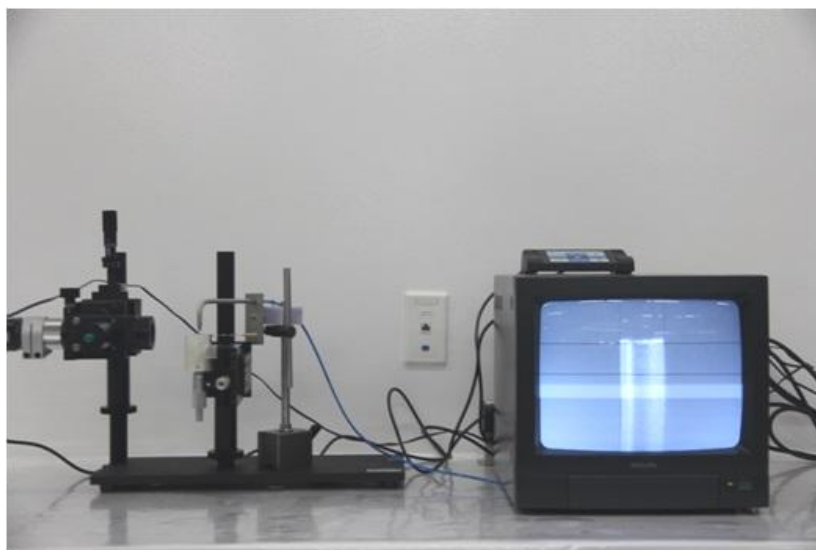


FIGURA 18 - Dispositivo de soldagem estático

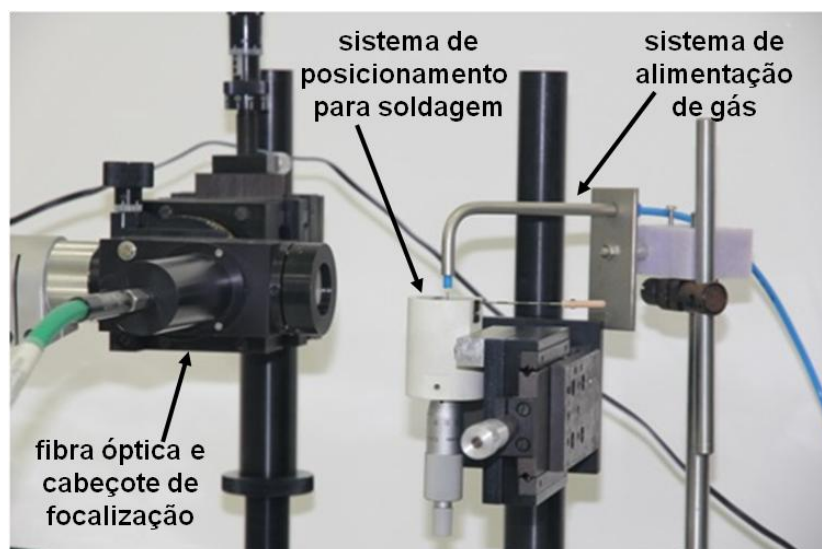


FIGURA 19 - Dispositivo de soldagem estático em detalhe

## 4.6 Ensaios de soldagem

Realizaram-se experimentos de selagem nas extremidades dos tubos de titânio utilizando, primeiramente, os dois dispositivos de soldagem descritos nos itens “4.4 Dispositivo dinâmico” e “4.5 Dispositivo estático”. Esses experimentos tinham como objetivo determinar os parâmetros de soldagem, o comprimento necessário para corte dos tubos de titânio e, principalmente, a escolha do modelo de dispositivo de soldagem a ser desenvolvido para a produção rotineira das sementes de iodo-125. Utilizaram-se, inicialmente, os parâmetros de solda enviados no relatório para aquisição da máquina de solda laser pelo laboratório de ensaios de soldagem do fabricante do equipamento.

### 4.6.1 Ensaios com o dispositivo dinâmico

Na TAB. 5 são apresentados os parâmetros utilizados nos ensaios com o dispositivo dinâmico.

TABELA 5 - Parâmetros variados nos ensaios de soldagem com o dispositivo dinâmico

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores dos parâmetros</b>		
Potência pico (kW)	0,30	0,35	0,37
Largura do pulso (ms)	2,0	2,4	2,6
Frequência de pulso (pps)	13	14	15
Quantidade de pulsos	25	30	35

A posição focal estava localizada na superfície do tubo. As selagens foram realizadas com 28 rpm. O gás de assistência utilizado foi o argônio, com uma vazão de 3 L/min, o sentido de fluxo era de 45°, aproximadamente, em relação ao feixe de laser, utilizando-se um bocal com diâmetro interno de 3,17 mm distante 10 mm do tubo de titânio. O valor do deslocamento do centro do feixe de laser em relação ao topo do tubo de titânio (*offset*), usado para essa aplicação, foi de 0,7 mm.



#### 4.6.1.1 Procedimento do ensaio com o dispositivo dinâmico

Fixou-se um tubo de titânio entre as pinças do mandril, utilizando-se uma chave dedicada ao aperto do mandril.

Ajustou-se o ângulo de incidência do feixe em relação ao tubo de titânio para 45°.

Utilizando um sistema de vídeo *crosshair generator* alinhado com o feixe de laser, posicionou-se o *offset*.

Com o auxílio do sistema de coordenadas XYZ, ajustou-se a posição focal.

Com a máquina de solda laser ligada, inseriram-se os parâmetros de soldagem: energia do pulso, forma do pulso, duração do pulso e taxa de repetição do pulso.

Posicionou-se o bocal do gás de proteção próximo ao tubo de titânio, ajustando-se o fluxo do gás.

Utilizando-se de uma fonte de tensão, ligou-se o moto redutor e ajustou-se a velocidade de rotação do tubo de titânio.

Com o dispositivo em movimento circular, acionou-se o botão de disparo da máquina de solda laser para que ocorresse a selagem do tubo de titânio.

Após uma análise visual, caso o tubo de titânio estivesse selado, invertia-se o tubo no dispositivo para que a outra face do tubo, ainda aberta, ficasse posicionada como no início do experimento.

Colocou-se uma semente de prata no interior do tubo e acionou-se, novamente, tanto o sistema de movimentação circular quanto o botão de disparo da máquina de solda laser.

#### 4.6.2 Ensaios com o dispositivo estático

Na TAB. 6 são apresentados os parâmetros utilizados nos ensaios com o dispositivo estático.

TABELA 6 - Parâmetros variados nos ensaios de soldagem com o dispositivo estático

Parâmetro	Valores dos parâmetros		
Potência pico (kW)	0,95	1,00	1,05
Largura do pulso (ms)	9,0	9,5	10,0
Posição focal (mm)	0	0,5	1,0
Vazão do gás de assistência (L/min)	4	5	6

A posição focal 0 mm indica que o foco do feixe de laser estava posicionado na superfície do tubo de titânio. O gás de assistência utilizado foi o argônio, o sentido de fluxo era de 90° em relação ao feixe de laser, utilizando-se um bocal com diâmetro interno de 2,0 mm, distante 10 mm do tubo de titânio. O valor do deslocamento do centro do feixe de laser em relação ao topo do tubo de titânio (*offset*), usado para essa aplicação, foi de 0,6 mm.

##### 4.6.2.1 Procedimento do ensaio com o dispositivo estático

Posicionou-se um tubo de titânio no orifício central do cilindro de baquelite. O comprimento do material extra necessário para a selagem do tubo de titânio foi ajustado com o auxílio do micrômetro. Fixou-se o tubo no cilindro de baquelite com ajuda da agulha de aço inoxidável AISI 304.

Ajustou-se o ângulo de incidência do feixe em relação ao tubo de titânio para 90°.

Utilizando um sistema de vídeo *crosshair generator* alinhado com o feixe de laser, posicionou-se o *offset*.

Com o auxílio do sistema de coordenadas XYZ, ajustou-se a posição focal.

Com a máquina de solda laser ligada, inseriram-se os parâmetros de soldagem: energia do pulso, forma do pulso e duração do pulso.

Posicionou-se o bocal do gás de proteção próximo ao tubo de titânio, ajustando-se o fluxo do gás.

Uma vez ajustado os parâmetros de soldagem e o fluxo de gás de proteção, acionou-se o botão de disparo da máquina de solda laser para que ocorresse a selagem do tubo de titânio.

Após uma análise visual, caso o tubo de titânio estivesse selado, invertia-se o tubo no dispositivo para que a outra face do tubo, ainda aberta, ficasse posicionada como no início do experimento.

Colocou-se uma semente de prata no interior do tubo e acionou-se novamente o botão de disparo da máquina de solda laser no dispositivo estático.

#### **4.7 Projeto, confecção e montagem do sistema de soldagem a laser**

Uma vez escolhido o modelo de dispositivo de soldagem (dinâmico ou estático) por meio dos resultados dos ensaios realizados, iniciou-se a fase de projeto, confecção e montagem do sistema de soldagem a laser com os dispositivos necessários para uma linha piloto automatizada.

Além do dispositivo de posicionamento de soldagem automatizado propriamente dito, outros dispositivos foram necessários para que a sequência de confecção da semente fosse completa. Projetaram-se os seguintes dispositivos, que fazem parte do sistema de soldagem a laser:

- Seletor de cânulas (tubos de titânio);
- Alimentador de cânulas;
- Seletor de fontes (fios de prata);
- Alimentador de fontes;
- Suporte para sensor em fibra óptica;
- Receptor de fontes seladas;
- Distribuidor inversor;
- Bocal do gás de proteção; e
- Dispositivo de soldagem.

Os dispositivos alimentador e seletor de cânulas foram projetados para trabalharem em conjunto, do mesmo modo que o alimentador e seletor de fontes. Ambos os conjuntos têm a finalidade de armazenar e enviar automaticamente os tubos de titânio ou os fios de prata até o sistema de soldagem.

#### **4.7.1 Seletor de cânulas**

O seletor de cânulas é composto por um tubo em acrílico medindo 60 mm de diâmetro externo, por 5,5 mm de espessura e 75 mm de comprimento. Na superfície interna do tubo existe um canal em forma de rosca por onde o tubo de titânio movimenta-se. Na extremidade inferior existe um fundo “cego” e na superior há uma tampa com um furo central cônico, por onde os tubos de titânio caem dentro do alimentador de cânulas. Na FIG. 20 é mostrado o desenho esquemático do seletor de cânulas.

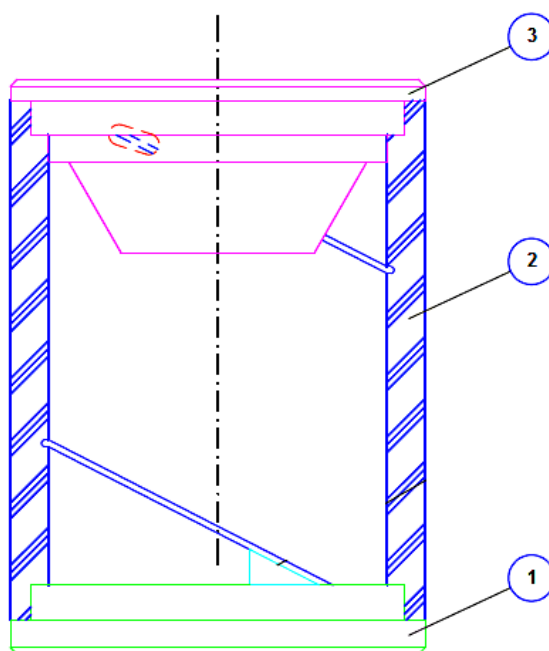


FIGURA 20 - Seletor de cânulas constituído por: tampa inferior (1), tubo em acrílico (2) e tampa superior (3)

#### 4.7.2 Alimentador de cânulas

Esse dispositivo consiste em um motor de passo conectado a um rotor, que movimenta os tubos de titânio dentro de um difusor. Junto com o rotor está um direcionador que orienta os tubos de titânio a um orifício calibrado em uma das laterais do difusor. Além disso, o motor de passo também movimenta o seletor de cânulas por meio de uma correia e polias conectadas com o rotor do alimentador de cânulas e o rotor do seletor. Na FIG. 21 é mostrado o desenho esquemático do alimentador de cânulas junto ao seletor de cânulas.

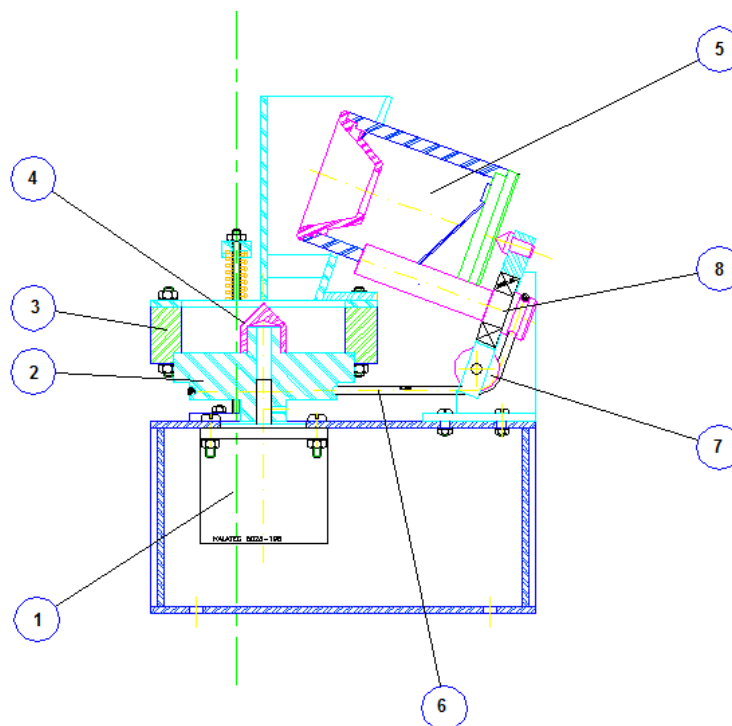


FIGURA 21 - Alimentador de cânulas constituído por: motor de passo (1), rotor (2), difusor (3), direcionador (4), seletor de cânulas (5), correia (6), polias (7) e o rotor do seletor (8)

#### 4.7.3 Seletor de fontes

O seletor de fontes é idêntico ao seletor de cânulas, com exceção do diâmetro do canal, que foi confeccionado para a passagem do fio de prata.

#### 4.7.4 Alimentador de fontes

O alimentador de fontes é idêntico ao alimentador de cânulas, com exceção do diâmetro do orifício da lateral do difusor, que foi produzido para a passagem do fio de prata.

#### 4.7.5 Suporte para sensor em fibra óptica

Os sensores em fibra óptica foram utilizados em todos os aparelhos que fazem parte do sistema de soldagem por se tratarem de dispositivos eletrônicos de alta precisão. Em razão do seu pequeno tamanho e da dificuldade de montagem diretamente nos aparelhos que compõem o sistema de soldagem,

projetou-se um suporte de fixação para os sensores. O suporte consiste em um bloco em PVC medindo 25 mm x 25 mm x 12,7 mm, com furos e roscas de dimensões apropriadas para fixar os conectores dos sensores e das mangueiras flexíveis, por onde passam os tubos de titânio ou os fios de prata. Na FIG. 22 é mostrado o desenho esquemático do suporte do sensor montado com conectores com sensores e conectores com mangueiras.

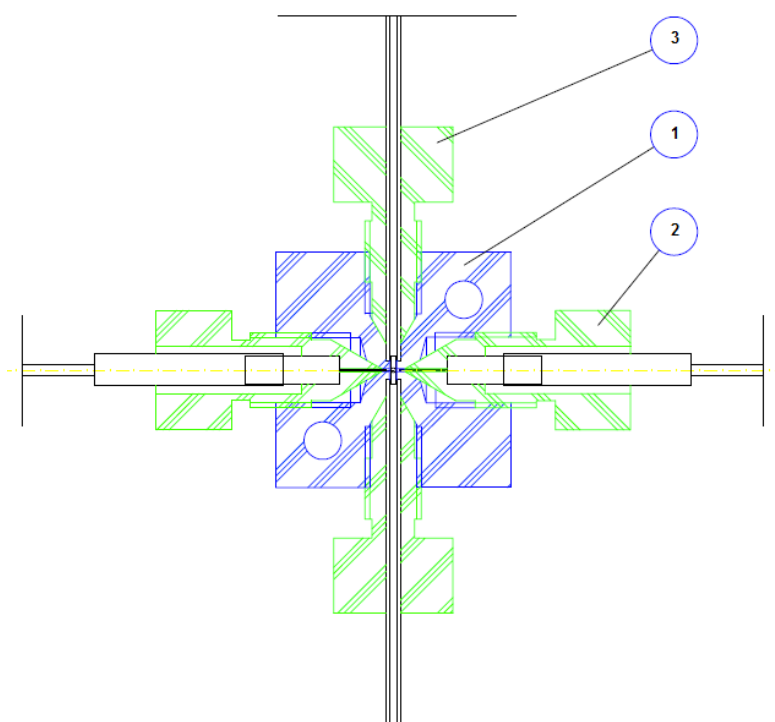


FIGURA 22 - Suporte para sensor em fibra óptica (1), montado com conectores com sensores (2) e conectores com mangueiras (3)

#### 4.7.6 Receptor de fontes seladas

O receptor de fontes seladas consiste em uma placa em PVC medindo 90 mm x 235 mm x 25 mm e usinada com dimensões adequadas para acomodar o frasco de poliestireno que recebe as fontes seladas consideradas aprovadas, o frasco de vidro para receber os tubos de titânio com soldas consideradas reprovadas, mas que ainda não contenham os fios de prata com material radioativo e a blindagem padrão em chumbo que recebe as fontes seladas consideradas reprovadas. Na FIG. 23 é mostrado o desenho esquemático do receptor de fontes seladas com os detalhes de usinagem, montagem, conexões,

mangueira de PTFE para transporte de tubos de titânio e fontes seladas, frasco de poliestireno, frasco de vidro e blindagem padrão em chumbo.

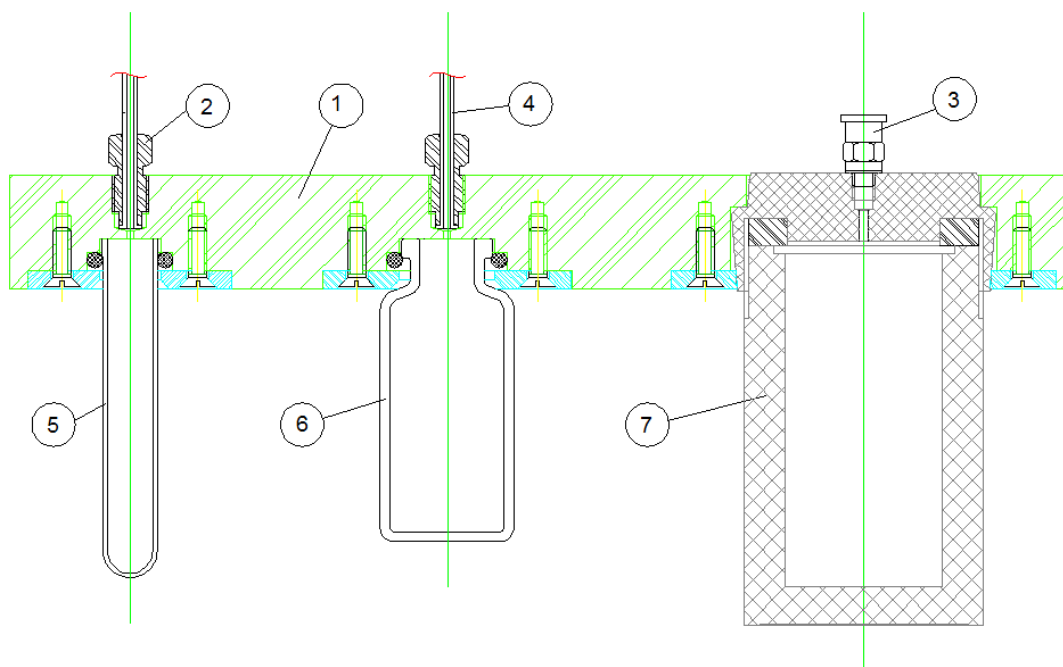


FIGURA 23 - Receptor de fontes seladas (1), constituído por conexões (2 e 3), mangueira de PTFE (4), frasco de polietileno (5), frasco de vidro (6) e blindagem padrão em chumbo (7)

#### 4.7.7 Distribuidor inversor

Esse dispositivo consiste em um motor de passo conectado a um rotor e no sentido transversal desse rotor existe um orifício calibrado para as dimensões do tubo de titânio. No corpo do dispositivo há orifícios conectados às mangueiras por onde o tubo de titânio é transportado por vácuo para dentro do distribuidor para que ocorra: a inversão do tubo de titânio após a primeira solda; o transporte da fonte selada considerada aprovada para o frasco de poliestireno; o transporte do tubo de titânio com o primeiro lado soldado e considerado reprovado para o frasco de vidro ou o transporte da fonte selada considerada reprovada para a blindagem de chumbo. Os sensores óptico e eletromecânico indicam a correta posição e o sentido do tubo de titânio no interior do rotor do distribuidor inversor. Na FIG. 24 é mostrado o desenho esquemático do distribuidor inversor com detalhes de usinagem, montagem, conexões e sensores ópticos.



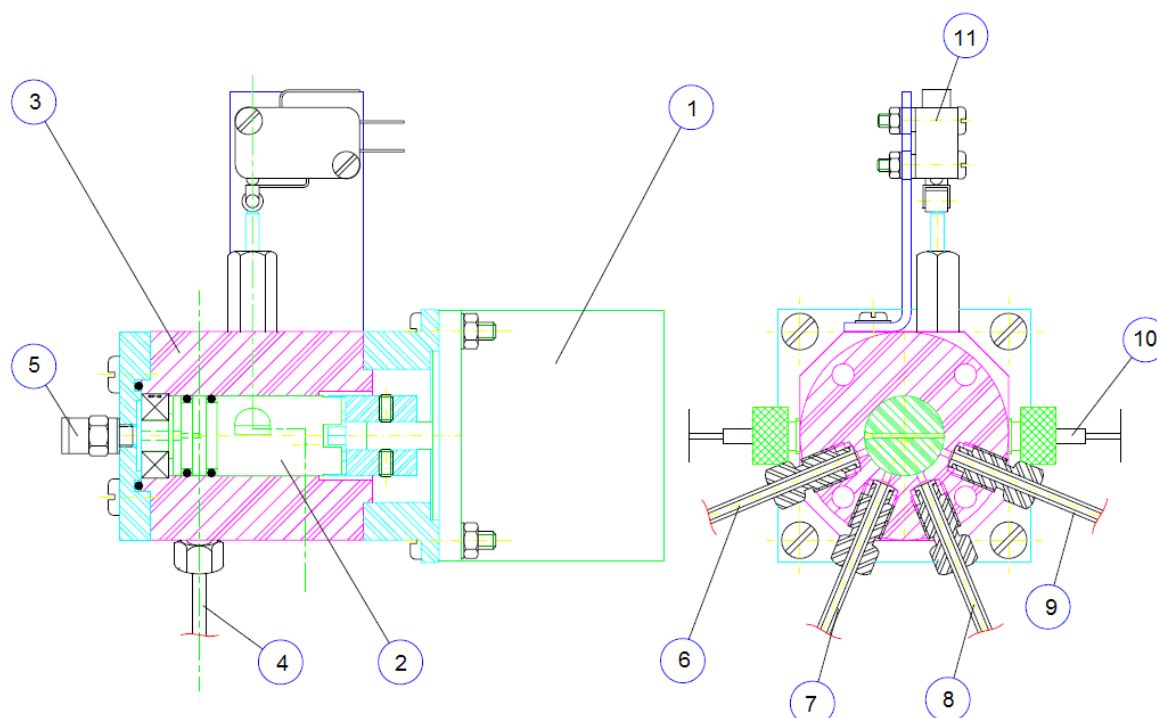


FIGURA 24 - Distribuidor inversor constituído por: motor de passo (1), rotor (2), corpo do dispositivo (3), mangueiras (4), conexão de vácuo (5), conexão para inversão (6), conexão para frasco de poliestireno (7), conexão para frasco de vidro (8), conexão para blindagem de chumbo (9), sensores ópticos (10), e sensor eletromecânico (11)

#### 4.7.8 Bocal do gás de proteção

Três sistemas com bocais de gás de proteção e sentidos de fluxo foram experimentados durante os ensaios com os dispositivos de soldagem. Esses sistemas de bocais são mostrados nas FIG. 25, 26 e 27.

O primeiro modelo de bocal, mostrado na FIG. 25, faz parte de um sistema de tubos flexíveis, composto por elos de tubos articulados montados junto ao bocal no formato circular, que possibilitava o direcionamento do fluxo do gás de proteção e permanecia fixo na posição. O sentido de fluxo foi de 45°, aproximadamente, em relação ao feixe de laser e utilizaram-se dois bocais com diâmetros internos de 6,35 mm e 3,17 mm.



FIGURA 25 - Bocal de gás de proteção com tubos flexíveis

O segundo modelo de bocal, mostrado na FIG. 26, faz parte de um sistema fixo formado por 2 tubos de cobre trefilado recozido sem costura, medindo 4 mm de diâmetro externo, por 2 mm de diâmetro interno e 1 mm de espessura de parede. O sentido de fluxo foi perpendicular ao feixe de laser, os bocais estavam montados um oposto ao outro com um ângulo de 45° em relação à posição do tubo de titânio.

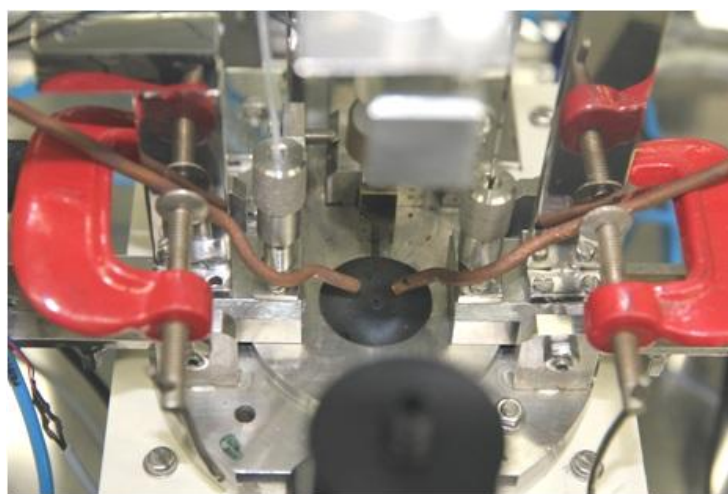


FIGURA 26 - Bocal de gás de proteção com tubos de cobre trefilados fixos

O terceiro modelo, mostrado na FIG. 27, consiste em um tubo em aço inoxidável AISI 304 medindo 6,32 mm de diâmetro externo e 1 mm de espessura de parede com, aproximadamente, 100 mm de comprimento e curvado em 90° na

extremidade de saída do gás. Na saída do gás instalou-se um tubo plástico com diâmetro interno de 2 mm para redução do fluxo de gás.



FIGURA 27 - Bocal de gás de proteção com tubo de aço inoxidável AISI 304 curvado em 90° na saída do gás

#### 4.7.9 Dispositivo de soldagem

Esse equipamento é responsável pelo correto posicionamento dos tubos de titânio durante o processo de selagem e a colocação no interior dos tubos dos fios de prata com o material radioativo adsorvido. Esse dispositivo é basicamente composto por um motor de passo acoplado em um micrômetro por meio de uma correia em uma base junto a um suporte de fixação. Esse conjunto tem a finalidade de ajustar o posicionamento vertical do tubo de titânio em relação ao feixe de laser incidente. O conjunto está fixado em uma base de ajuste junto ao sensor elétrico de posição, à agulha que prende o tubo de titânio na parede do suporte, à conexão da mangueira do inversor de tubos de titânio selados, à mangueira que conecta com o alimentador de tubos de titânio e à mangueira que

conecta o alimentador de fios de prata. Nas FIG 28 e 29 são mostrados os desenhos esquemáticos do dispositivo de soldagem com os seus detalhes.

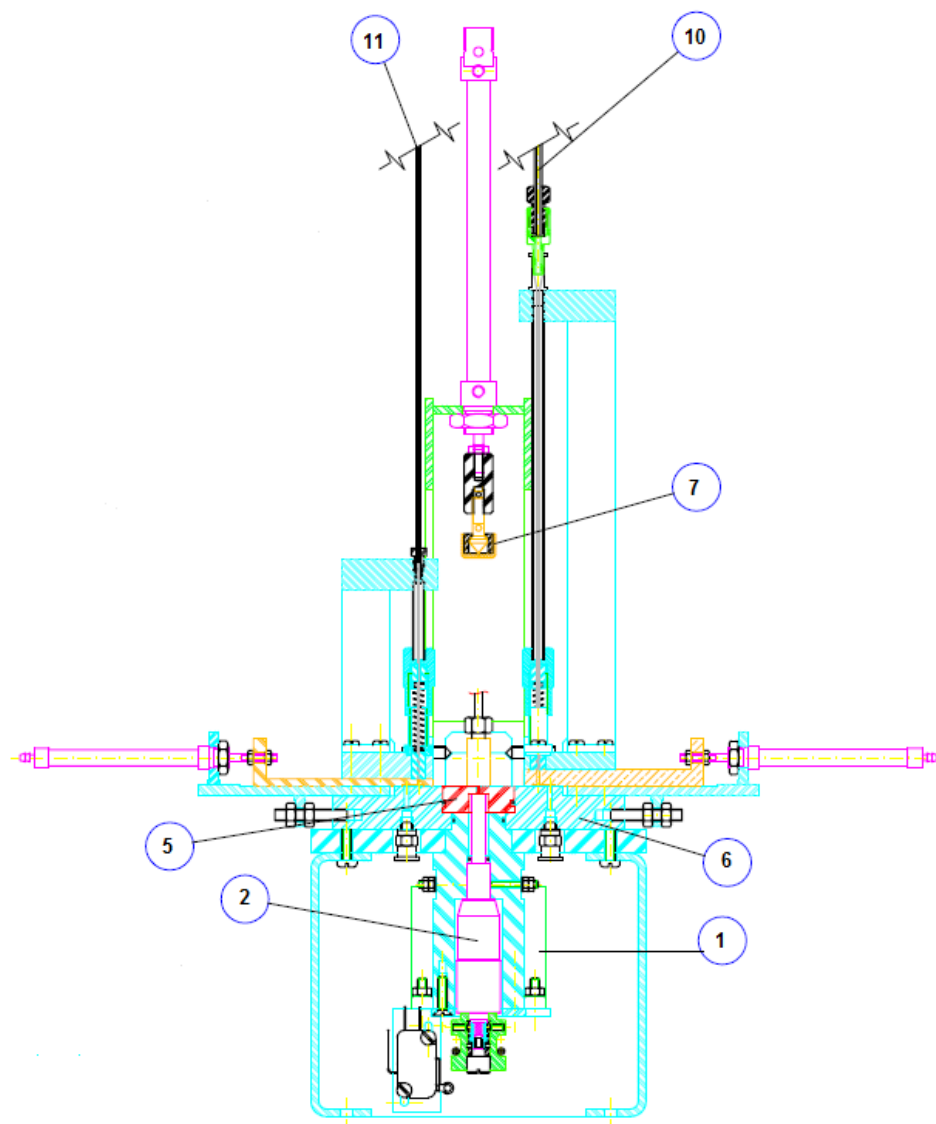


FIGURA 28 - Corte frontal do dispositivo de soldagem constituído por: motor de passo (1), micrômetro (2), suporte de fixação (5), base de ajuste (6), sensor elétrico de posição (7), mangueira para alimentação de tubo de titânio (10) e mangueira para alimentação de fios de prata (11)

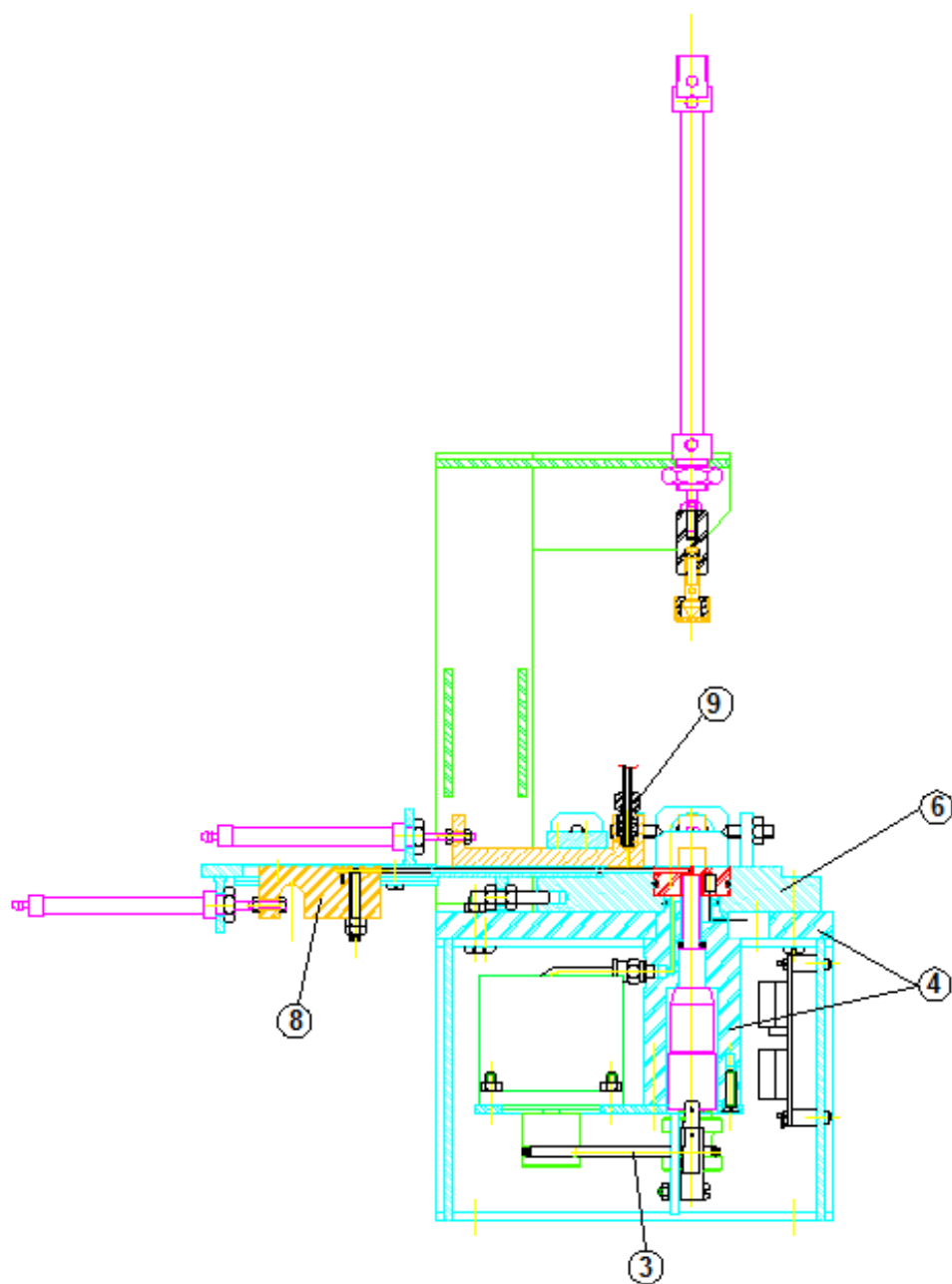


FIGURA 29 - Corte lateral do dispositivo de soldagem constituído por: correia (3), base (4), base de ajuste (6), suporte de agulha de fixação (8) e conexão da mangueira do inversor de tubos de titânio (9)

#### 4.8 Requisitos para aceitação das soldas

Após cada soldagem do tubo de titânio, realizou-se uma análise visual utilizando o próprio sistema de focalização laser. Essa análise tinha como objetivo identificar possíveis defeitos na região soldada, como oxidação, falha de selagem,

consumo excessivo de material, solda assimétrica e solda com diâmetro maior que o diâmetro do tubo.

Nas FIG. 30 e 31 são mostradas duas situações de soldas aprovadas.

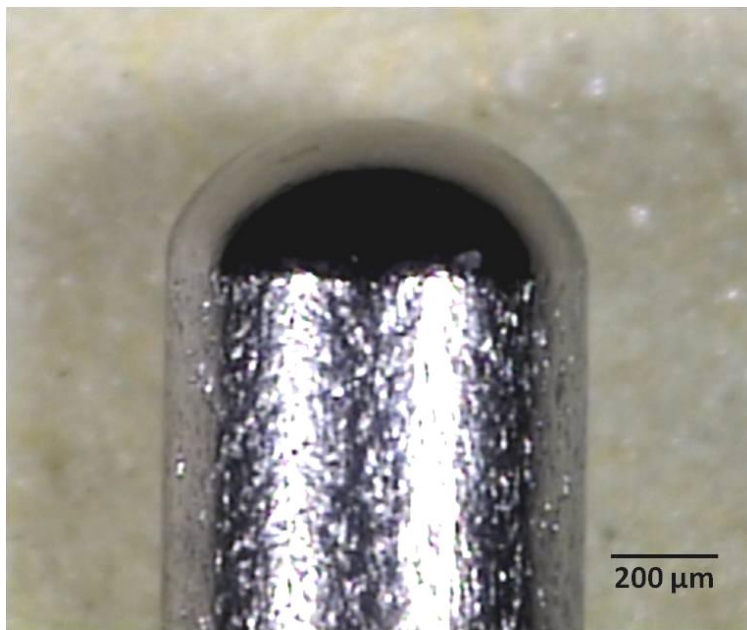


FIGURA 30 - Referência da primeira solda aprovada no tubo de titânio

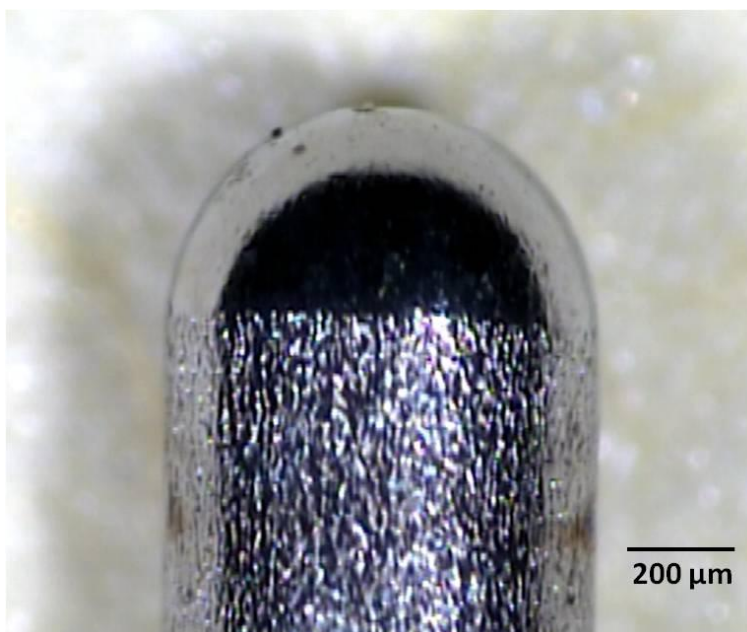


FIGURA 31 - Referência da segunda solda aprovada no tubo de titânio

Nas FIG. 32 a 36 são mostradas situações de soldas reprovadas.

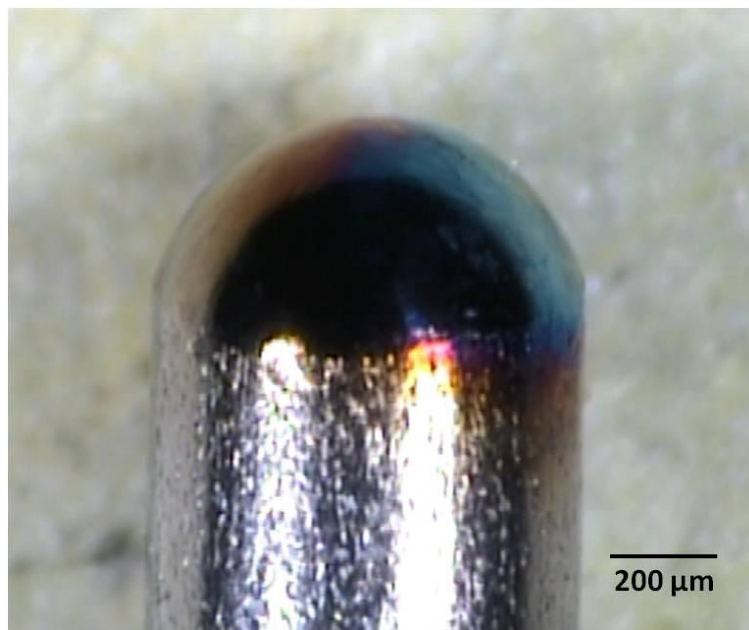


FIGURA 32 - Região da solda oxidada no tubo de titânio

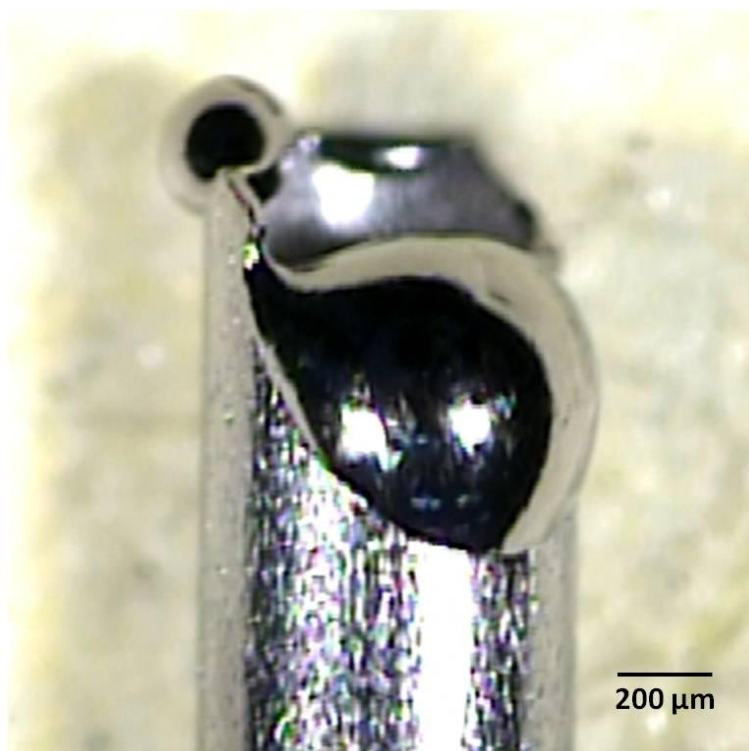


FIGURA 33 - Falha de selagem no tubo de titânio

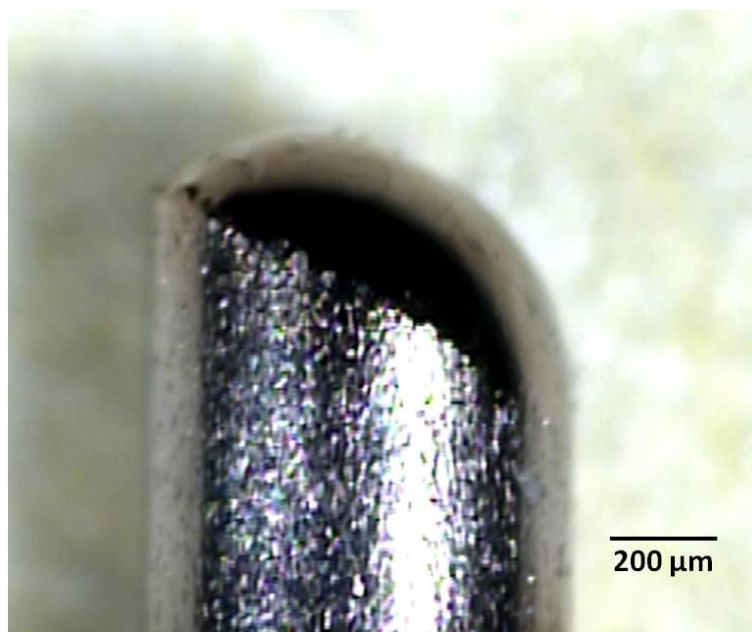


FIGURA 34 - Consumo excessivo de material no tubo de titânio

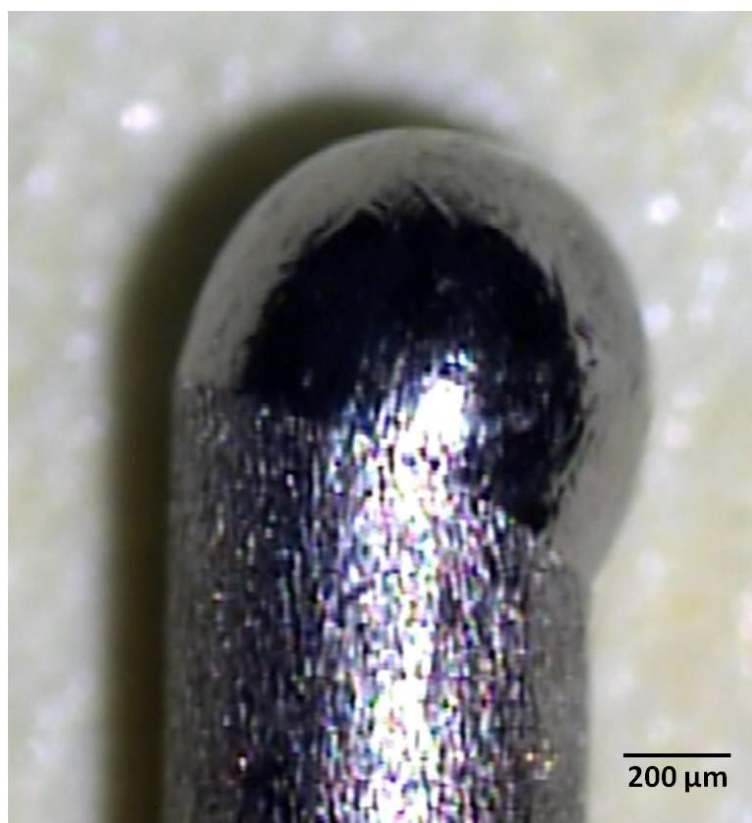


FIGURA 35 - Solda assimétrica no tubo de titânio



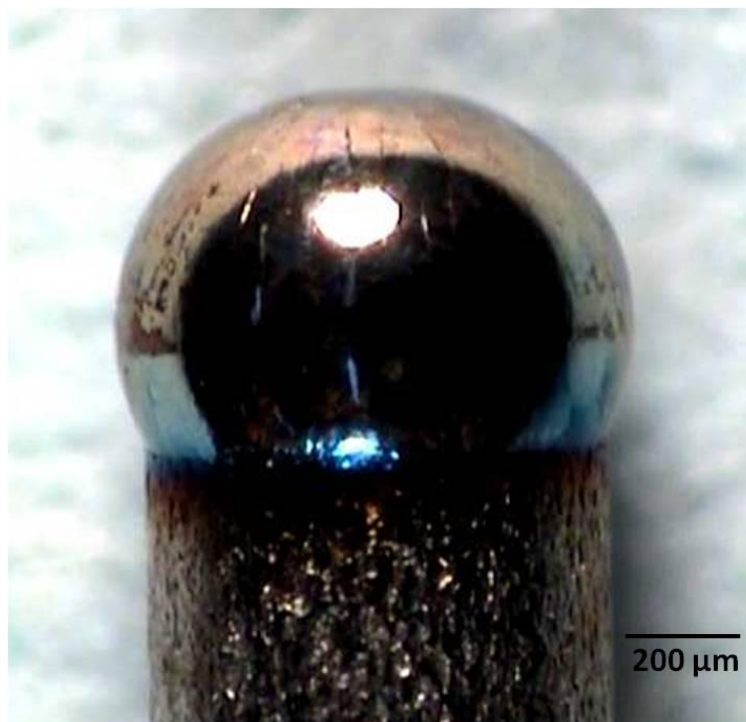


FIGURA 36 - Solda com diâmetro maior que o diâmetro do tubo de titânio

#### 4.9 Ensaio com sistema de soldagem a laser

Para que o sistema de soldagem a laser operasse como projetado, houve a necessidade de automação e integração dos dispositivos ao sistema. A tecnologia de automação consiste em associar peças mecânicas e componentes eletroeletrônicos para controle de máquinas e processos. A tecnologia de automação para produção das sementes de iodo-125 emprega Controlador Lógico Programável (CLP), motores de passo, *drivers*, acionadores pneumáticos, sensores fotoelétricos, interfaces de comunicação e computador.

Iniciado o processo de soldagem, o tubo de titânio, que estava armazenado no seletor de cânulas, caiu dentro do alimentador de cânulas e foi transportado para o dispositivo de soldagem por meio de uma mangueira de politetrafluoretileno (PTFE) em vácuo.

O tubo de titânio, ao chegar ao dispositivo de soldagem, foi enviado para o suporte de fixação pelo acionador pneumático.

No suporte de fixação, o tubo de titânio foi colocado na posição correta de soldagem por intermédio do micrômetro acoplado ao motor de passo e do sensor elétrico de posição. Estando o tubo de titânio na posição correta para soldagem, acionou-se a agulha que fixou o tubo no suporte de fixação.

O sistema de movimentação do gás de proteção foi acionado, o bocal foi posicionado sobre o tubo de titânio e o fluxo de gás de proteção foi liberado.

Uma vez ajustados os parâmetros de soldagem e o fluxo de gás de proteção, acionou-se o botão de disparo da máquina de solda laser para que ocorresse a selagem do tubo de titânio.

Após uma análise visual, caso o tubo de titânio não estivesse selado, o CLP receberia uma informação do operador e o tubo de titânio seria liberado pela agulha de fixação e enviado ao frasco de vidro, por intermédio do dispositivo de inversão.

Se, após a análise visual, o tubo de titânio estivesse selado, o CLP receberia uma informação do operador e o tubo de titânio era liberado pela agulha de fixação e enviado ao dispositivo de inversão por meio de uma mangueira de PTFE, em vácuo, para que fosse invertido e retornasse ao dispositivo de soldagem e a outra face do tubo, ainda aberta, ficasse posicionada para receber o fio de prata com iodo-125 adsorvido (fonte).

O alimentador de fontes foi acionado e o fio de prata, que estava armazenado no seletor de fontes, caiu dentro do alimentador e foi transportado por meio de uma mangueira de PTFE, em vácuo, para o interior do tubo de titânio que estava no dispositivo de soldagem.

Com o fio de prata em seu interior, o tubo de titânio foi colocado novamente na posição correta para soldagem do lado ainda aberto. Estando o tubo de titânio na posição correta para soldagem, acionou-se a agulha que fixou o tubo no suporte de fixação.

O sistema de movimentação do gás de proteção foi acionado, o bocal foi posicionado sobre o tubo de titânio e o fluxo de gás de proteção foi liberado.

Com os parâmetros de soldagem ajustados, acionou-se o botão de disparo da máquina de solda laser para que ocorresse a selagem do tubo de titânio.

Após uma análise visual, se o tubo de titânio não estivesse selado, o CLP receberia uma informação do operador e o tubo de titânio era liberado pela agulha de fixação e enviado à blindagem padrão em chumbo, por intermédio do dispositivo de inversão.

Se, após a análise visual, o tubo de titânio estivesse selado, o CLP receberia uma informação do operador e o tubo de titânio era liberado pela agulha de fixação, enviado ao dispositivo de inversão por meio de uma mangueira de PTFE, em vácuo, para que fosse remetido ao frasco de poliestireno. Na FIG. 37 é mostrado o desenho esquemático da integração dos dispositivos ao sistema de soldagem a laser.

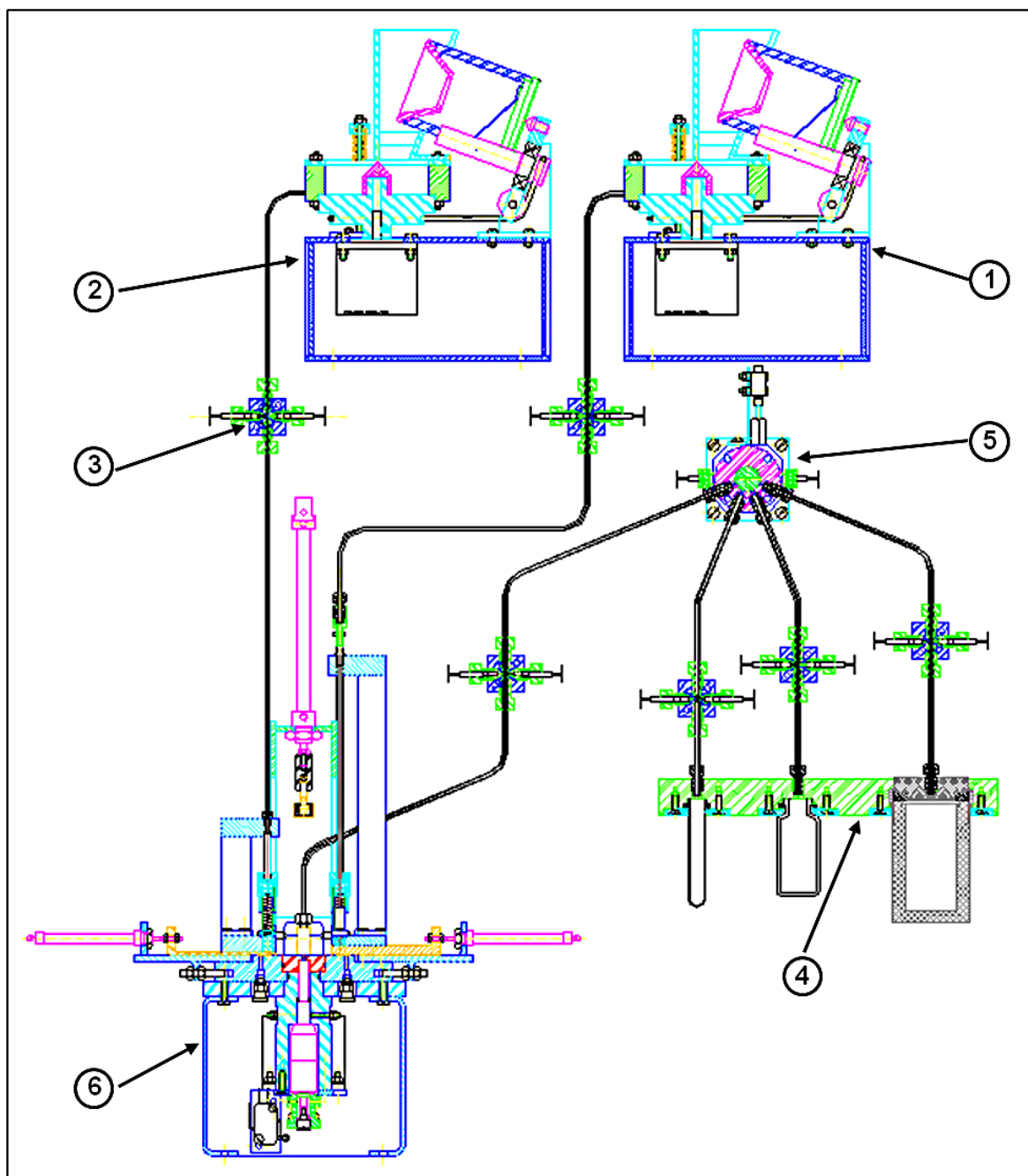


FIGURA 37 - Sistema de soldagem a laser constituído por: seletor e alimentador de cânulas (1), seletor e alimentador de fontes (2), suporte para sensor em fibra óptica (3), receptor de fontes seladas (4), distribuidor inversor (5) e dispositivo de soldagem (6)

#### **4.10 Classificação, identificação e ensaios para validação das fontes seladas de iodo-125 segundo a norma ISO 2919**

A norma internacional ISO 2919 – *Radiological protection - Sealed radioactive sources – General requirements and classification* estabelece um sistema de classificação para fontes radioativas seladas baseado em testes de desempenho e especifica os requisitos gerais para testes de desempenho, testes de produção, marcação e certificação.

A classificação das fontes seladas segundo a norma ISO 2919 é indicada para a aplicação final do produto, requerendo desempenho ou características que impeçam a liberação ou vazamento de material radioativo. Para isso, as fontes seladas devem ser submetidas aos grupos de ensaios térmicos e mecânicos com diferentes níveis de severidade, dependendo do desempenho requerido para sua aplicação.

Na TAB. 7, transcrita da norma ISO 2919, é apresentada uma lista de aplicações das fontes seladas bem como o desempenho mínimo requerido nos ensaios necessários para cada uma das aplicações.

TABELA 7 - Classificação de fontes seladas de acordo com o desempenho requerido para a sua aplicação<sup>20</sup>

Aplicação das fontes seladas		Ensaio requerido				
		Temperatura	Pressão	Impacto	Vibração	Punção
Radiografia industrial	Fonte selada	4	3	5	1	5
	Fonte para ser usada em equipamento	4	3	3	1	3
Médico	Radiografia	3	2	3	1	2
	Teleterapia gama	5	3	5	2	4
	Braquiterapia <sup>a</sup>	5	3	2	1	1
	Aplicadores em superfície <sup>b</sup>	4	3	3	1	2
Medidores gama	Fonte desprotegida	4	3	3	3	3
	Fonte em equipamento	4	3	2	3	2
Medidor Beta e fontes para medidores de baixa energia gama ou análise por fluorescência de Raio X <sup>b</sup>		3	3	2	2	2
Medidor de poço de petróleo		5	6	5	2	2
Medidor de densidade e umidade portátil		4	3	3	3	3
Aplicações gerais de fontes de nêutron (excluindo inicializador de reator)		4	3	3	2	3
Fontes de calibração atividade > 1 MBq		2	2	2	1	2
Fontes de irradiação gama <sup>a</sup>	Categoria I <sup>b</sup>	4	3	3	2	3
	Categorias II, III e IV <sup>c</sup>	5	3	4	2	4
Geradores de íons	Cromatografia	3	2	2	1	1
	Eliminadores estáticos	2	2	2	2	2
	Detectores de fumaça <sup>b</sup>	3	2	2	2	2

a) Fabricantes e usuários podem desejar elaborar outros procedimentos especiais de ensaio que representem o uso normal e possíveis condições de acidente.

b) Excluindo fontes gasosas.

c) Fontes em equipamentos ou um grupo de fontes podem ser testadas.

d) Para essa norma internacional, irradiadores gama são divididos em 4 categorias distintas:

Categoria I: *gammacell* – fonte selada e blindada em contêiner seco;

Categoria II: panorâmico – fonte selada armazenada em contêiner seco;

Categoria III: fonte selada armazenada em piscina de estocagem; e

Categoria IV: *totebox, carrier ou pallet* – fonte selada armazenada em piscina de estocagem.

Os números grifados em amarelo correspondem ao grau de severidade dos ensaios para semente utilizada em braquiterapia.

Fonte – INTERNATIONAL STANDARD, ISO 2919

Os graus de severidade dos ensaios requeridos para cada aplicação de fonte selada são apresentados em detalhe na TAB. 8.

TABELA 8 - Classificação de desempenho de fonte selada<sup>20</sup>

Ensaio	Classe								
	1	2	3	4	5	6	7	8	X
Temperatura	Sem ensaio	- 40°C (20 min) + 80°C (1h)	- 40°C (20 min) + 180°C (1h)	- 40°C (20 min) + 400°C (1h) e choque térmico a 20°C	- 40°C (20 min) + 600°C (1h) e choque térmico a 20°C	- 40°C (20 min) + 800°C (1h) e choque térmico a 20°C	Não usado	Não usado	Ensaio especial
Pressão externa	Sem ensaio	25 kPa absoluto até atmosférico	25 kPa absoluto até 2 MPa absoluto	25 kPa absoluto até 7 MPa absoluto	25 kPa absoluto até 70 MPa absoluto	25 kPa absoluto até 170 MPa absoluto	Não usado	Não usado	Ensaio especial
Impacto	Sem ensaio	50 g de 1 m ou energia equivalente	200 g de 1 m ou energia equivalente	2 Kg de 1 m ou energia equivalente	5 Kg de 1 m ou energia equivalente	20 Kg de 1 m ou energia equivalente	Não usado	Não usado	Ensaio especial
Vibração	Sem ensaio	3 vezes de 10 min 25 a 500 Hz a 49 m/s <sup>2</sup> (5g) <sup>a</sup>	3 vezes de 10 min 25 a 50 Hz a 49 m/s <sup>2</sup> (5g <sub>n</sub> )* e 50 a 90 Hz a 0,635 mm de amplitude de pico a pico e 90 a 500 Hz a 98 m/s <sup>2</sup> (10g) <sup>a</sup>	3 vezes de 30 min 25 a 80 Hz 1,5 mm de amplitude de pico a pico e 80 a 2000 Hz a 196 m/s <sup>2</sup> (20g) <sup>a</sup>	Não usado	Não usado	Não usado	Não usado	Ensaio especial
Punção	Sem ensaio	1 g de 1 m ou energia equivalente	10 g de 1 m ou energia equivalente	50 g de 1 m ou energia equivalente	300 g de 1 m ou energia equivalente	1 kg de 1 m ou energia equivalente	Não usado	Não usado	Ensaio especial
Flexão	Sem ensaio	Ensaio 7.7.1 100N (10,2kg) Para L/D > 15	Ensaio 7.7.1 500N (51kg) Para L/D > 15	Ensaio 7.7.1 1000N (102kg) Para L/D > 15	Ensaio 7.7.1 2000N (204kg) Para L/D > 15	Ensaio 7.7.1 4000N (408kg) Para L/D > 15	Ensaio 7.7.2 Para L > 100mm e para L/D > 10	Ensaio 7.7.3 Para agulha de braquiterapia com L > 30mm	Ensaio especial

<sup>a</sup> 1 g = 9,8 m/s<sup>2</sup>

Os itens grifados em amarelo correspondem aos critérios de classificação para semente utilizada em braquiterapia.

Fonte – INTERNATIONAL STANDARD, ISO 2919

Uma vez estabelecida a classificação, as fontes seladas devem ter no seu projeto a identificação seguindo o critério de codificação estabelecido na ISO 2919. Para aplicação em braquiterapia, a identificação é ISO/12/C53211,

onde os dois números após o código ISO/ indicam o ano da aprovação da norma utilizada, seguindo de uma barra sólida (/), seguido de uma letra C ou E que indica se a atividade da fonte selada excede os limites especificados na TAB. 9. Os cinco dígitos a seguir estabelecem em ordem crescente o grau de severidade que as fontes devem suportar para os ensaios de temperatura, pressão externa, impacto, vibração e punção conforme indicação feita de acordo com a aplicação apresentada na TAB. 8.

TABELA 9 - Nível de atividade específica de acordo com o grupo de radionuclídeo <sup>20</sup>

Grupo de radionuclídeo	Atividade específica TBq (Ci)	
	Lixiviável	Não lixiviável
A	0,01 (0,3)	0,1 (3)
B1	1,11 (30)	11,1 (300)
B2	11,1 (300)	111 (3000)
C	18,5 (500)	185 (5000)

No Anexo A são apresentados grupos de radionuclídeos de acordo com as suas radiotoxicidades.

Fonte – INTERNATIONAL STANDARD, ISO 2919

De acordo com a identificação, as fontes de braquiterapia devem ser aprovadas nos testes:

- Temperatura - Grau de severidade 5;
- Pressão externa - Grau de severidade 3;
- Impacto - Grau de severidade 2;
- Vibração - Não é necessário realização do teste; e
- Puncionamento - Não é necessário realização do teste.

A aprovação dos ensaios está condicionada à capacidade da fonte selada manter a sua estanqueidade após a sua realização.



Para a classificação e validação das fontes seladas, a norma ISO 2919 recomenda ensaiar duas fontes seladas para cada teste de temperatura, pressão externa e impacto.

Outro trabalho de mestrado produzido no IPEN-CNEN/SP também descreve o processo de classificação e ensaios para validação das fontes seladas de iodo-125 segundo a norma ISO 2919 <sup>23</sup>.

#### **4.11 Ensaios para validação das fontes seladas**

Para validação das sementes de braquiterapia ou fontes seladas seguindo a classificação estabelecida na norma ISO 2919 - *Radiological protection - Sealed radioactive sources – General requirements and classification* realizaram-se os ensaios de temperatura, pressão externa e impacto. Após a realização dos mesmos, as fontes seladas foram examinadas de acordo com teste apropriado estabelecido na norma ISO 9978 – *Radiation protection - Sealed radioactive sources – Leakage test methods*, também descrito com detalhes no procedimento adotado.

##### **4.11.1 Ensaios de temperatura**

###### **4.11.1.1 Ensaios a alta temperatura**

Duas sementes contendo material radioativo foram colocadas, individualmente, em vasilhames refratários cerâmicos e inseridos em uma mufla a 600 °C por uma hora, na pressão atmosférica.

Após serem retiradas da mufla, as sementes foram colocadas, individualmente, em um recipiente com água a 20 °C para um choque térmico.

#### 4.11.1.2 Ensaio a baixa temperatura

Duas sementes contendo material radioativo foram colocadas individualmente em vasilhames cerâmicos com dióxido de carbono em cubos (gelo seco) a  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 20 minutos em pressão atmosférica.

Após serem retiradas do dióxido de carbono, as sementes foram colocadas em recipientes com água a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para um choque térmico. Na FIG. 38 é mostrada uma semente de iodo-125 durante um ensaio de baixa temperatura.



FIGURA 38 - Ensaio de baixa temperatura em uma semente de iodo-125

#### 4.11.2 Ensaio de pressão externa

Seguindo recomendação da norma ISO 2919, utilizaram-se diferentes câmaras de testes para o ensaio de pressão e de vácuo.

##### 4.11.2.1 Ensaio de pressão

Para a realização do ensaio de pressão, confeccionou-se um dispositivo conforme orientação da norma ISO 2919, que consiste de: câmara (vaso) de pressão em aço inoxidável AISI 304, com 60 mm de diâmetro e 240 mm de comprimento; válvula para alívio de pressão tipo gaveta, marca Deca, modelo 1S02B; manômetro; tubo flexível para alimentação de gás; regulador de pressão de dois estágios, marca Record e cilindro de gás argônio industrial.

No dispositivo de pressão utilizou-se um manômetro classe B da marca Pressotemp-Socios, com escala de 0 a 3,93 MPa (0 a 40 kgf/cm<sup>2</sup>). O manômetro foi calibrado no Laboratório de Calibração (LAC), da Instalação de Aceleradores Cíclotron, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. A calibração do manômetro recebeu certificado de calibração nº 030/13 com validade até 04/03/14, cujos padrões apresentam rastreabilidade junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC).

A primeira semente foi posicionada no alojamento para fonte no interior da câmara de ensaio e submetida a uma pressão de 2 MPa (21 kgf/cm<sup>2</sup>) em dois ciclos de cinco minutos. No final de cada ciclo a pressão retornou ao valor da pressão atmosférica. Repetiu-se o mesmo procedimento para a segunda semente. Na FIG. 39 é mostrado o dispositivo utilizado nesse ensaio.

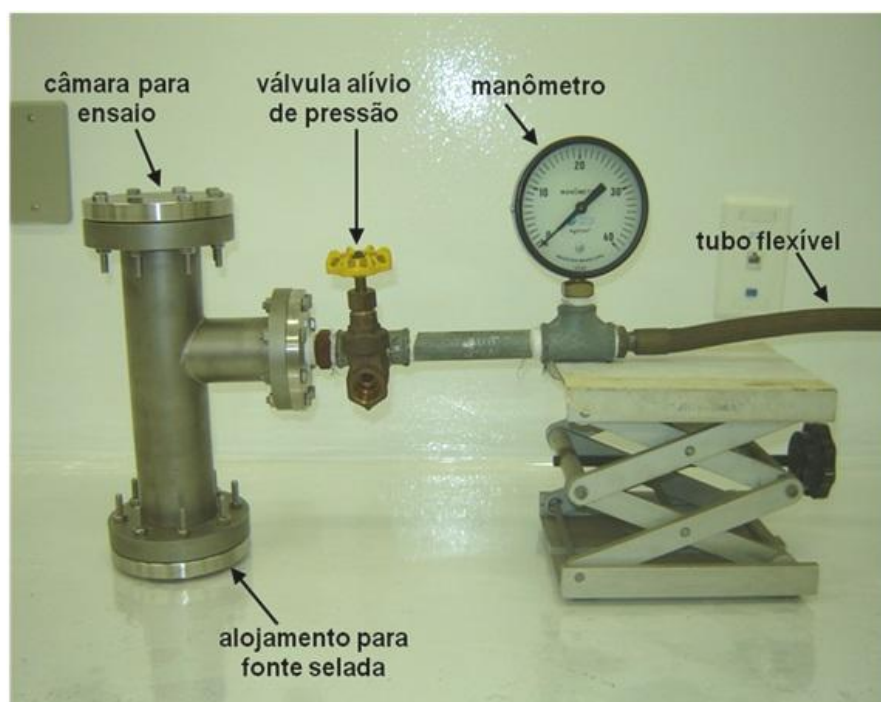


FIGURA 39 - Dispositivo utilizado no ensaio de pressão das sementes de iodo-125

#### 4.11.2.2 Ensaio a vácuo

Para a realização do ensaio a vácuo, confeccionou-se um dispositivo conforme orientação da norma ISO 2919, que consiste de: câmara de pressão; válvula para admissão de gás, tipo agulha; válvula de bloqueio, tipo membrana, modelo Speedvalve; manovacuômetro; tubo flexível metálico e bomba de vácuo, modelo E2M2, todos da marca Edwards.

A câmara de pressão foi montada utilizando-se conexões apropriadas para vácuo em alumínio e aço inoxidável AISI 304.

No dispositivo para ensaio a vácuo, utilizou-se um manovacuômetro classe C da marca Pressotemp-Socios, com escala manométrica de 0 a 207 kPa (30 lbf/pol<sup>2</sup>) e com escala em vácuo de 0 a 102 kPa (30 pol Hg). O manovacuômetro foi calibrado no Laboratório de Calibração (LAC), da Instalação de Aceleradores Cíclotron do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. A calibração do manovacuômetro recebeu certificado de calibração nº 031/13 com validade até 04/03/14, cujos padrões apresentam rastreabilidade junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC).

A primeira semente foi posicionada no alojamento para fonte no interior da câmara de ensaio e submetida a uma pressão negativa de 25 kPa (7,4 pol Hg) em dois ciclos de cinco minutos. No final de cada ciclo a pressão negativa retornou para o valor da pressão atmosférica. Repetiu-se o mesmo procedimento para a segunda semente. Na FIG.40 é mostrada a câmara utilizada nos ensaios de vácuo.

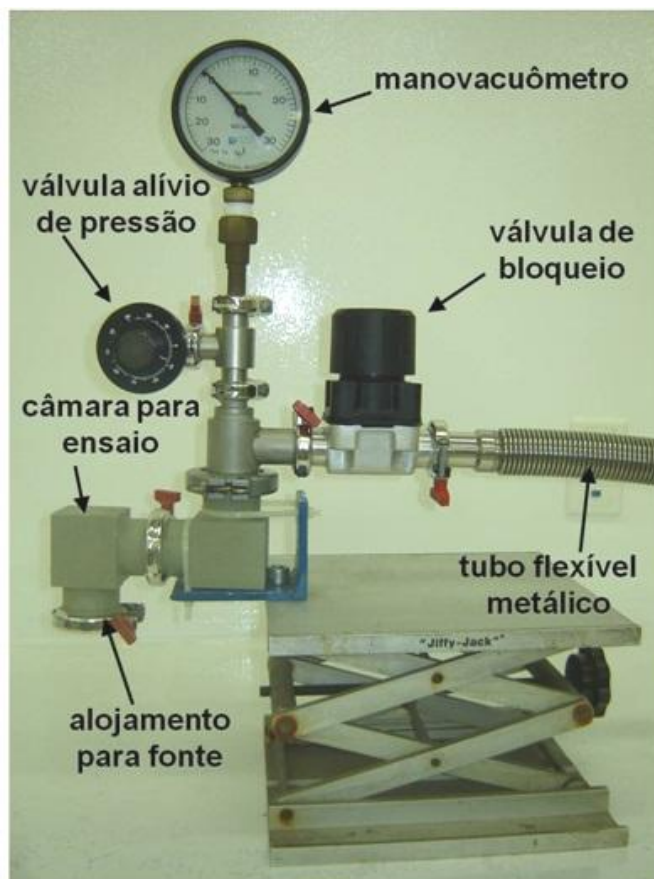


FIGURA 40 - Dispositivo utilizado no ensaio a vácuo das sementes de iodo-125

#### 4.11.3 Ensaio de impacto

Para esse ensaio confeccionou-se um dispositivo, conforme orientação da norma ISO 2919, que consiste de: cilindro de aço carbono com diâmetro de 25 mm e massa calibrada denominada martelo; tubo direcionador e base de aço carbono medindo 280 mm x 220 mm x 20 mm denominada bigorna.

A massa do martelo, de 50,445 g, foi medida em uma balança calibrada da marca Mettler Toledo, modelo AB304S.

O dispositivo é dotado de uma trava que permite o posicionamento do martelo na altura desejada para o ensaio e a liberação para queda livre até a bigorna.

O martelo foi posicionado a uma altura de 1 m, medido entre a superfície superior da semente sobre a bigorna e a face inferior de impacto do martelo.

As sementes, uma de cada vez, foram posicionadas sobre a bigorna na posição horizontal, de modo que sua área ficasse mais vulnerável ao impacto do martelo.

Na FIG. 41 é mostrado o dispositivo de impacto e o martelo utilizado no ensaio de impacto.



FIGURA 41 - Dispositivo de impacto e martelo utilizado no ensaio das sementes de iodo-125

#### 4.12 Ensaios de estanqueidade

A norma internacional ISO 9978 – *Radiation protection - Sealed radioactive sources – Leakage test methods* especifica os diferentes métodos de ensaios de vazamentos para fontes radioativas seladas. Esta norma fornece um

conjunto abrangente de procedimentos que utilizam meios radioativos e não radioativos.

A norma ISO 9978 aplica-se aos controles de:

- Qualidade, que permite a validação dos testes necessários para determinar a classificação de um protótipo de fonte radioativa selada, de acordo com a norma ISO 2919;
- Produção das fontes radioativas seladas; e
- Inspeções periódicas das fontes radioativas seladas realizadas em intervalos regulares, durante a vida útil.

O ensaio de estanqueidade foi escolhido conforme orientação disponibilizada no Guia da norma ISO 9978 e que permitia escolha dos testes a serem realizados, de acordo com controle e tipo de fonte selada.

Conforme apresentado na TAB 10, transcrita da norma ISO 9978, as fontes para braquiterapia são classificadas como tipo A3 e os ensaios preferenciais são os de imersão e hélio. O ensaio com gás hélio, para que seja válido, necessita que o volume interno livre da fonte selada seja igual ou maior que  $0,1 \text{ cm}^3$ . A semente de iodo-125 possui volume interno livre de  $0,0014 \text{ cm}^3$ , portanto, restando somente os métodos que são utilizados no ensaio de imersão.

TABELA 10 - Seleção dos métodos de testes de vazamento relacionados com a tecnologia de fabricação <sup>21</sup>

Tipo de fonte	Testes para produção de fontes		Testes para classificação de fontes	
	1ª opção	2ª opção	1ª opção	2ª opção
A Fontes seladas contendo material radioativo				
A1 Janela única e fina (detectores de fumaça)	Imersão (5.1)	Vazamento (5.3)	Imersão (5.1)	Vazamento (5.3)
A2 Fontes de referência de baixa atividade, encapsuladas em plástico				
A3 Fontes encapsuladas uma ou duas vezes (excluindo trítio e rádio) para medição, radiografia e braquiterapia	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
A4 Fontes encapsuladas uma ou duas vezes de rádio e outras fontes gasosas	Emanação gasosa (5.2)	Imersão (5.1)	Emanação gasosa (5.2)	Imersão (5.1)
A5 Fontes encapsuladas duas vezes para teleterapia e fontes de alta atividade de irradiação	Hélio (6.1)	Vazamento (5.3.2)	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
B Fontes simuladas seladas Dos tipos A3, A4 e A5			Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
C Fontes seladas do tipo <i>dummy</i>			Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)

Os números entre parênteses referenciam os respectivos ensaios da norma ISO 9978.  
Fonte – INTERNATIONAL STANDARD, ISO 9978

Segundo resultados obtidos em trabalho de mestrado produzido no IPEN-CNEN/SP, o método mais indicado para ser realizado durante a produção das sementes foi o ensaio de imersão em água destilada por 24 horas, em temperatura ambiente ( $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ) e aplicação de ultrassom por 10 minutos <sup>81</sup>. Optou-se por esse ensaio por ser em temperatura ambiente.

De acordo com a norma ISO 9978, as fontes radioativas seladas são consideradas sem vazamentos se a atividade medida na água de imersão não exceder o limite de 185 Bq (5 nCi) e o ensaio deve ocorrer na totalidade das fontes produzidas, ou seja, 100% do lote.

Para a realização dos ensaios de estanqueidade das sementes conforme a norma ISO 9978 – *Radiation protection - Sealed radioactive sources – Leakage test methods* utilizaram-se dois calibradores de dose da marca



CAPINTEC, modelo CRC 15W, com detector de iodeto de sódio tipo poço para as medidas de atividade contida no líquido do ensaio de imersão, e CRC 15R, com câmara de ionização tipo poço para as medidas de atividade das fontes seladas; lavadora por ultrassom marca UNIQUE Ultrasonic Clear, modelo USC 1450, 150 W, 25 kHz para limpeza das fontes seladas; frascos de poliestireno medindo 12 mm de diâmetro externo e 75 mm de comprimento; rolhas de borracha; pipeta de volume fixo de 2 mL e água destilada como líquido de imersão.

Inicialmente, selaram-se 70 sementes por soldagem a laser, contendo no seu interior, fio de prata com iodo-125. Posteriormente, mediu-se a atividade e colocou-se cada semente nos frascos de poliestireno numerados de 1 a 70.

Em seguida, separaram-se seis tubos, que continham seis sementes com maiores atividades, para os ensaios de validação (impacto, temperatura e pressão); 50 tubos com sementes individuais para ensaio de imersão e 14 sementes foram reunidas em um único frasco para ensaios de imersão formando um lote.

Os frascos contendo as sementes foram preenchidos com 2 mL de água destilada e tampados com rolha de borracha, permanecendo em imersão em temperatura ambiente ( $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ) por 24 horas. No início desse período aplicou-se ultrassom por 10 minutos. Após as 24 horas, retirou-se os 2 mL de água, transferindo-se a outro frasco limpo numerado. As sementes foram então removidas e colocadas em um frasco numerado com água destilada limpa. A atividade contida no líquido foi medida no detector de iodeto de sódio. Repetiu-se o procedimento acima para todos os 57 frascos.

#### **4.13 Análise das soldas**

As soldas produzidas para esse experimento foram investigadas por microscopia óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e por medidas de microdureza (HV).

#### 4.13.1 Ensaio metalográfico

O ensaio metalográfico foi realizado com a finalidade de examinar a região soldada do tubo de titânio sob o aspecto de sua estrutura, a fim de esclarecer ou prever possíveis falhas durante o processo de soldagem.

As soldas analisadas foram retiradas da seção longitudinal das amostras soldadas das sementes de iodo-125.

Realizou-se o ensaio metalográfico em sementes com fio de prata sem a deposição do material radioativo (*dummy*) com auxílio de um microscópio óptico metalográfico, marca Carl Zeiss, modelo III e por MEV, marca HITACHI, modelo Tabletop Microscope TM3000, pertencente ao Laboratório de Biofotônica, localizado no Centro de Lasers e Aplicações (CLA), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

Na preparação das amostras utilizou-se um kit de embutimento a frio com resina poliéster da marca Silaex. Esse kit de embutimento possibilita a montagem de amostras para ensaios metalográficos. Além de facilitar o manuseio de pequenas peças, evita que as amostras com arestas rasguem a lixa ou o pano de polimento, o que influencia no acabamento superficial da amostra.

Posicionou-se a semente a ser embutida no centro de um molde, deixando um espaço de, pelo menos, 5 mm entre a semente e a parede do molde, para preencher esse espaço com a resina poliéster.

Em um becker foram colocadas a resina poliéster e o catalisador na proporção de 10 mL para 300  $\mu$ L, respectivamente, e misturados até ficar homogêneo.

Cuidadosamente, despejou-se a resina poliéster no molde de embutimento até enchê-lo.

Aguardou-se um tempo superior a 24 horas em temperatura ambiente para que ocorresse a polimerização da resina. Após esse tempo a peça embutida na resina poliéster foi extraída do molde.

Foram utilizadas lixas grana 400, 600, 800, 1200, 2500 e 4000 até chegar próximo ao centro das amostras em uma lixadeira e politriz modelo Maximille, marca Metalotest, 250 rpm.

Realizou-se o polimento mecânico por meio de feltro impregnado com pasta de diamante granulação de 6  $\mu\text{m}$ . O lubrificante utilizado foi uma mistura de glicerina com álcool na proporção de 10% de glicerina e 90% de álcool. O polimento mecânico foi realizado durante 15 minutos, aproximadamente, em uma politriz modelo DP-10, marca Panambra, 300 rpm.

O ataque químico foi realizado agitando-se a superfície polida mergulhada no reativo colocado em uma pequena cuba. O tempo de duração do ataque químico foi de 10 segundos, aproximadamente. Após o ataque, lavou-se imediatamente a superfície atacada com água e sabão e, em seguida, efetuou-se a secagem, passando-se primeiramente um pequeno chumaço de algodão umedecido com álcool e depois um jato de ar quente à superfície.

A solução de ataque químico utilizada era composta por:

- Ácido fluorídrico 40% em 10 mL;
- Ácido nítrico 65% em 10 mL; e
- Ácido láctico 90% em 30 mL.

#### **4.14 Ensaio de microdureza**

Para o ensaio de microdureza utilizou-se amostra embutida conforme procedimento descrito no item “4.13.1 Ensaio metalográfico” com exceção do ataque químico.

Analizou-se a microdureza Vickers da zona fundida (ZF), metal de base (MB) e zona termicamente afetada (ZTA) utilizando um equipamento para ensaio

de penetração instrumentado da marca Helmut-Fischer, modelo HM2000, pertencente ao Laboratório de Corrosão e Tratamento de Superfícies (LABCORTS), localizado no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

Utilizou-se para esse ensaio uma carga de 250 mN conforme procedimento:

- Aplicação de carga gradativa em 10 passos, com duração de 0,1 s cada, até atingir a força máxima; e
- Remoção da carga gradativa em 10 passos de 0,1 s cada.

O ensaio foi realizado na zona fundida do tubo de titânio (medidas na transversal e longitudinal) e no sentido longitudinal ao comprimento do tubo de titânio (da região fundida até o metal de base).

Na FIG. 42 é mostrada a localização das marcações onde realizaram-se as medidas de microdureza na amostra.

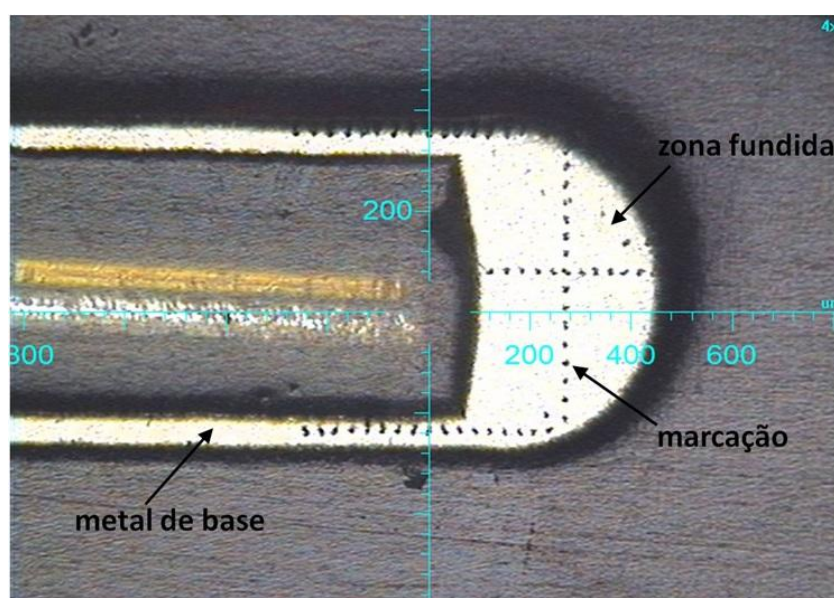


FIGURA 42 - Ensaio de microdureza - marcações

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Material utilizado

Na TAB. 11 são apresentados os limites máximos dos elementos químicos presentes na composição do titânio, de acordo com as normas e com o certificado de análise química fornecido pelo fabricante <sup>15,17</sup>.

TABELA 11 - Composição química do titânio

Elemento	% fração de massa	
	Norma	Fornecedor
Nitrogênio	0,03	0,009
Carbono	0,10	0,007
Hidrogênio	0,0125	0,004
Ferro	0,30	0,024
Oxigênio	0,25	0,132
Titânio	Balanço	Balanço

Como apresentado na TAB. 11, o material adquirido da empresa Accellent Endoscopy encontra-se com valores abaixo do limite máximo permitido para o titânio comercialmente puro, grau 2.

### 5.2 Corte e limpeza do material

Em uma análise visual após o corte do tubo de titânio, verificou-se que as amostras cortadas apresentavam arestas ou pedaços de material indesejáveis gerados pelo disco de corte. Essas aparas de materiais precisaram ser removidas, pois a sua permanência ocasionaria um contato imperfeito entre a amostra e o dispositivo de soldagem, gerando um alinhamento irregular entre o feixe de laser e a amostra a ser soldada, dificultando-se a confecção da solda e a colocação do fio de prata com iodo-125 no interior do tubo, uma vez que impediria a sua passagem.

Para a eliminação das aparas metálicas, as amostras foram acabadas com lixa grana 400 e, posteriormente, desengraxadas e lavadas.

Nas FIG. 43 e 44, respectivamente, é mostrado o tubo de titânio cortado, apresentando aparas de material gerado pelo disco de corte, e acabado, após ser desbastado com lixa grana 400.

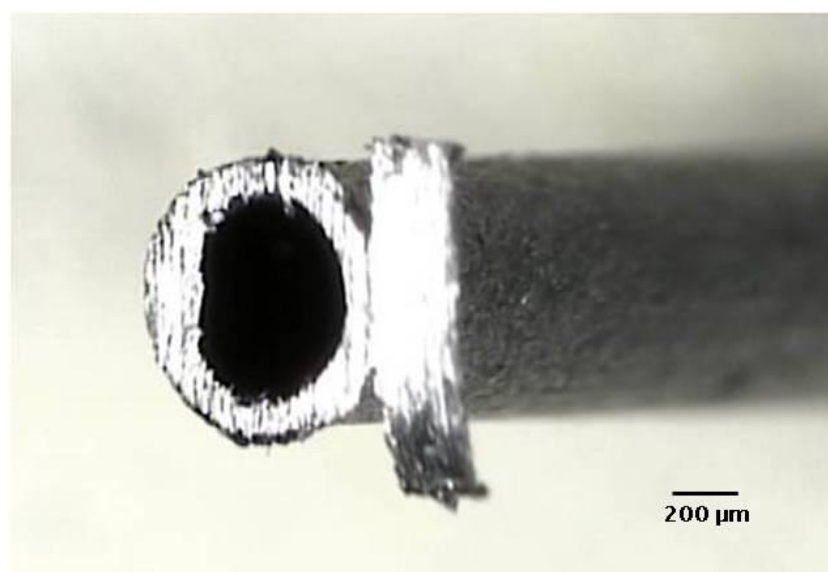


FIGURA 43 - Corte do tubo de titânio apresentando rebarbas



FIGURA 44 - Tubo de titânio após ser desbastado com lixa grana 400

### 5.3 Determinação dos parâmetros de soldagem

Uma vez que as sementes de iodo-125 apresentam dimensões milimétricas, dificultando sensivelmente o manuseio e os ajustes das amostras

durante os ensaios, foram necessários, aproximadamente, 1000 ensaios de soldagem para testar os dispositivos, ajustar o sistema de soldagem e otimizar os parâmetros de soldagem.

Na TAB. 12 são apresentados os parâmetros de soldagem a laser e os seus respectivos valores utilizados durante os ensaios com o dispositivo dinâmico.

TABELA 12 - Valores dos parâmetros finais de soldagem utilizados no dispositivo dinâmico

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Potencia do pulso (kW)	0,35
Largura do pulso (ms)	2
Energia do pulso (J)	0,7
Taxa de repetição do pulso (pps)	15
Potência média (W)	10,5
Forma do pulso	quadrada
Quantidade de pulsos	25
Velocidade de rotação (rpm)	28
Posição e direção do bocal	45°, <i>sideflow</i>
Fluxo de gás (L/min)	3
Posição focal (mm)	0
<i>Offset</i> (mm)	0,7

Os valores dos parâmetros de soldagem a laser mostrados na TAB. 12 indicam a melhor condição obtida durante os ensaios com o dispositivo dinâmico para a realização da soldagem do tubo de titânio, que permitiram a selagem completa em ambos os lados do tubo.

O comprimento necessário do tubo de titânio para selagem de ambos os lados não foi definido, uma vez que os resultados apresentados nos ensaios de soldagem utilizando o dispositivo de soldagem dinâmico mostraram não ser o adequado para o desenvolvimento do sistema de soldagem das sementes de iodo-125.

Na TAB. 13 são apresentados os parâmetros de soldagem a laser e os seus respectivos valores utilizados durante os ensaios com o dispositivo estático.

TABELA 13 - Valores dos parâmetros finais de soldagem utilizados no dispositivo estático

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Potencia do pulso (kW)	1
Largura do pulso (ms)	10
Energia do pulso (J)	10
Potência média (W)	10
Forma do pulso	quadrada
Quantidade de pulsos	1
Posição e direção do bocal	90°, coaxial
Fluxo de gás (L/min)	4 a 6
Posição focal (mm)	0,5
<i>Offset</i> (mm)	0,6
Comprimento do tubo de titânio (mm)	6,68 a 6,78

Os valores dos parâmetros de soldagem a laser mostrados na TAB. 13 indicam a melhor condição obtida durante os ensaios com o dispositivo estático para a realização da soldagem do tubo de titânio, que permitiram tanto a selagem completa em ambos os lados do tubo quanto a definição dos parâmetros iniciais para uso do dispositivo automatizado.

A definição da faixa de comprimento necessário do tubo de titânio para a selagem das duas extremidades foi realizado após a determinação dos parâmetros indicados na TAB. 13, pois, conforme a variação dos valores dos parâmetros de soldagem, o comprimento extra necessário de tubo para selagem altera, por se tratar de soldagem autógena.

#### **5.4 Ensaio de soldagem utilizando dispositivo dinâmico**

Algumas dificuldades surgiram no decorrer dos ensaios com esse dispositivo. O comprimento focal oscilava durante o movimento de rotação do



tubo de titânio enquanto ocorria a selagem. Essa oscilação acontecia por causa da dificuldade de fixação do tubo no cabeçote de rotação do dispositivo de soldagem a laser. Com isso, a selagem apresentava um acabamento irregular, proporcionando uma variação na espessura da solda e dificultando a determinação dos parâmetros de soldagem, conforme mostrado nas FIG. 45 e 46.

Outro problema foi em relação ao posicionamento exato do tubo de titânio no cabeçote de rotação do dispositivo. O tubo necessitava ficar inclinado em um ângulo que variava entre 30° e 40° em relação ao feixe do laser. A inclinação dificultava o ajuste do material extra necessário para a soldagem do tubo de titânio.

Para que ocorresse uma solda de boa qualidade utilizando um dispositivo de soldagem dinâmico, haveria a necessidade de se projetar e produzir um dispositivo que apresentasse uma mínima variação no comprimento focal durante o movimento de rotação do tubo de titânio e o posicionasse no ângulo correto para a soldagem. Além disso, o dispositivo deveria proporcionar a colocação do fio de prata com iodo-125 no interior do tubo. O alcance das propriedades de movimento de rotação e posicionamento angular precisos no dispositivo de soldagem dinâmico tornaria o processo de produção das sementes de iodo-125 inviável em razão do alto custo de desenvolvimento.

Na FIG. 45 é mostrada a região soldada do tubo de titânio, obtida em ensaio micrográfico, por meio do microscópio óptico modelo Fotomicroscópio III, marca Carl Zeiss.

Podem ser observadas variações na espessura da solda em razão das oscilações no comprimento focal durante o processo de selagem.

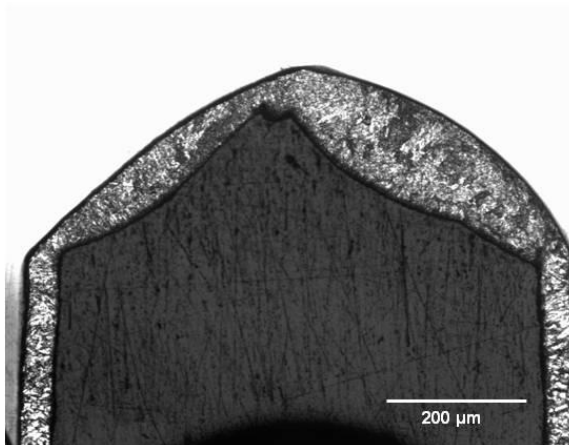


FIGURA 45 - Micrografia da região soldada com variação na espessura (150x, HF + HNO<sub>3</sub>)

Na FIG. 46 é mostrado o acabamento irregular produzido na região externa da solda, em virtude da oscilação no comprimento focal. As arestas formadas entre a região soldada e a superfície do tubo podem ocasionar um travamento das sementes seladas durante o processo de carregamento dos aplicadores das sementes de iodo-125.

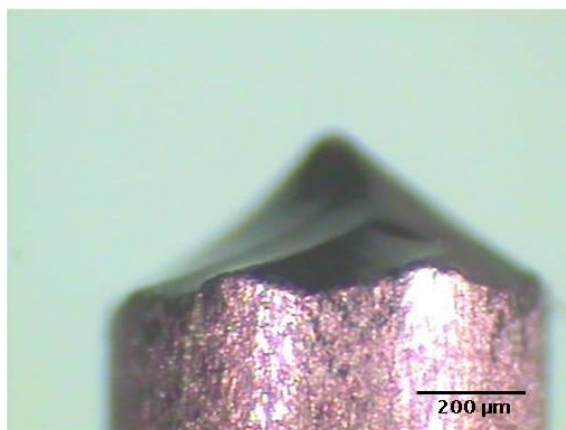


FIGURA 46 - Imagem do acabamento irregular da solda no tubo de titânio (100x)

### 5.5 Ensaio de soldagem utilizando dispositivo estático

Foi utilizado como referência para montagem do dispositivo de soldagem estático o modelo denominado dispositivo n° 2 usado no trabalho de mestrado desenvolvido no IPEN-CNEN/SP <sup>23</sup>.

Com a utilização do modelo de dispositivo estático na selagem do tubo de titânio, obteve-se uma melhora no acabamento da região soldada em razão da eliminação da oscilação que ocorria no comprimento focal.

A geometria produzida na região soldada com esse modelo de dispositivo é semelhante à apresentada na semente de iodo-125 utilizada como referência para o desenvolvimento da semente a ser produzida no IPEN-CNEN/SP. Além disso, a formação de uma geometria interna simétrica é necessária para a determinação da anisotropia aplicada no planejamento dos implantes das sementes de iodo-125.

O acabamento externo esférico, sem excesso de solda, é imprescindível no uso com os aplicadores de sementes, os quais demandam que o acabamento da região soldada seja o mais esférico possível, com o intuito de evitar o bloqueio no momento do carregamento das fontes seladas de iodo-125. Além disso, esse modelo de dispositivo propiciou um melhor ajuste do material extra necessário para a soldagem do tubo de titânio, tornando possível a determinação dos parâmetros de soldagem a laser para a selagem das sementes de iodo-125, uma vez que era impraticável com o uso do dispositivo dinâmico.

Na FIG. 47 é mostrada a região soldada do tubo de titânio obtida em ensaio micrográfico. Pode ser observada uma região de solda simétrica e com formato circular, em razão da formação de gota durante a fusão do metal extra.

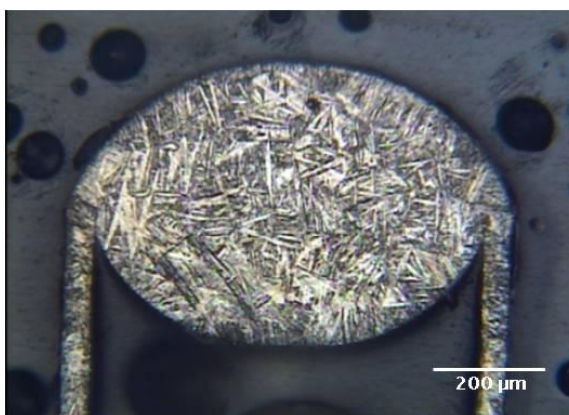


FIGURA 47 - Micrografia da região soldada com espessura simétrica e ausente de falhas (200x, HF + HNO<sub>3</sub>)

Na FIG. 48 é mostrada a região externa da solda do tubo de titânio com acabamento esférico e simétrico ideais, não apresentando excesso de solda nas laterais do tubo, o que ocasionaria um possível travamento das sementes no aplicador.

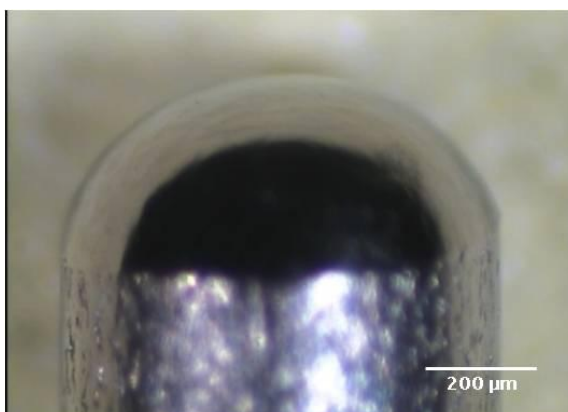


FIGURA 48 - Imagem do acabamento da solda no tubo de titânio satisfatório (175x)

### 5.5.1 Escolha do modelo de dispositivo para uso em projeto

Pelo fato do dispositivo dinâmico apresentar problemas de posicionamento do tubo de titânio e oscilação no comprimento focal do feixe de laser, e também por terem sido identificados dois artigos técnicos<sup>24,25</sup> descrevendo o processo de selagem do tubo de titânio para uso em sementes de iodo-125, optou-se por não utilizar esse modelo de dispositivo neste trabalho.

Uma vez que o dispositivo estático apresentou resultados satisfatórios, isto é, a geometria da região soldada ficou esférica, semelhante à da semente de iodo-125 que foi utilizada como referência, e não foram identificadas referências na literatura de dispositivos que utilizassem um sistema estático, e com um único pulso de laser para selagem do tubo de titânio, adotou-se esse modelo de dispositivo para servir de referência ao projeto e desenvolvimento do sistema de soldagem automatizado a laser para produção das sementes de iodo-125.

## **5.6 Projeto, confecção e montagem do sistema de soldagem a laser**

O sistema de soldagem automatizado foi construído com o objetivo de servir como sistema piloto, a fim de desenvolver o processo de soldagem a laser dos tubos de titânio para a implantação da produção rotineira das sementes de iodo-125 no IPEN-CNEN/SP.

Portanto, para que o sistema automatizado trabalhasse adequadamente, alguns dispositivos tiveram que ser criados para complementarem as operações que antes eram realizadas manualmente.

Assim, para que o ciclo da soldagem da semente de iodo-125 ocorresse por inteiro; isto é, a soldagem de uma das extremidades do tubo de titânio, a colocação no interior do tubo do fio de prata com iodo-125 e, por fim, a soldagem da outra extremidade; foi necessária a confecção de um mecanismo de posicionamento de tubos e mais oito dispositivos complementares.

Os dispositivos citados no item “4.9 Ensaios com sistema de soldagem a laser” foram fabricados e integrados para formar o sistema de soldagem automatizado.

### **5.6.1 Seletor de cânulas**

Na FIG. 49 é mostrado o dispositivo seletor de cânulas. Pode ser observada uma abertura na lateral da tampa superior, a qual é calibrada para o comprimento do tubo de titânio. Essa abertura tem a função de liberar um único tubo de titânio de cada vez, para que não ocorra travamento na tubulação que irá transportar o tubo de titânio até o dispositivo de soldagem a laser e, assim, ser identificado pelos sensores ópticos de sua localização.

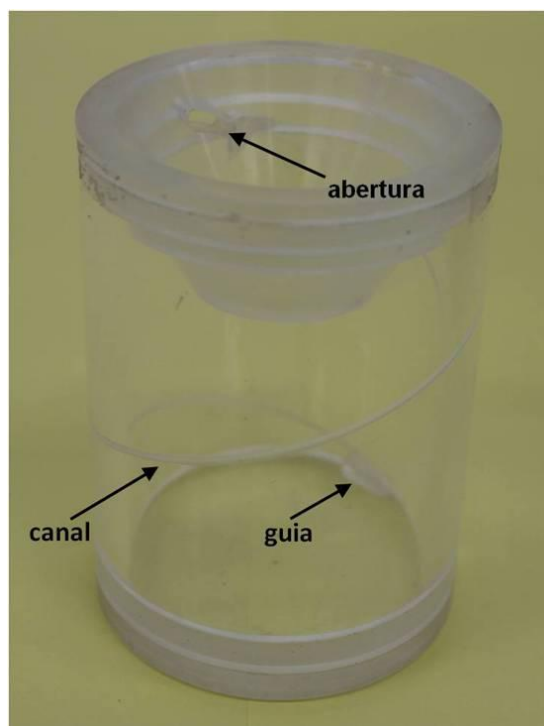


FIGURA 49 - Seletor de cânulas

Observa-se também o canal em forma de rosca na parede interna do dispositivo. Esse canal foi projetado para que o tubo de titânio não saia e retorne ao fundo do dispositivo, enquanto se desloca para a abertura calibrada na tampa superior.

Durante os primeiros ensaios com esse dispositivo notou-se que algumas vezes os últimos tubos não entravam no canal e ficavam rolando na tampa inferior. Como solução, fabricou-se uma guia triangular que tem um dos ângulos idêntico ao do canal. Essa guia foi fixada na parede do dispositivo, alinhada com o início da rosca, e tinha como objetivo conduzir os tubos remanescentes para o canal. Após esse recurso, obteve-se a totalidade do envio dos tubos de titânio para o dispositivo alimentador de cânulas.

### 5.6.2 Alimentador de cânulas

Este dispositivo foi projetado para executar duas funções ao mesmo tempo: movimentar o seletor de cânulas, fazendo com que os tubos de titânio

contidos no seu interior se desloquem para o dispositivo alimentador de cânulas, e enviar o tubo de titânio para o dispositivo de soldagem a laser.

Nas FIG. 50 e 51 é mostrado o dispositivo alimentador de cânulas, montado e ajustado, em ângulos diferentes. Observa-se no centro do dispositivo o direcionador alinhado com um orifício de passagem na parede do corpo do difusor, por onde o tubo de titânio atravessa e é transportado para o dispositivo de soldagem a laser. Um parafuso posicionado atrás do direcionador ajusta o alinhamento com o orifício.

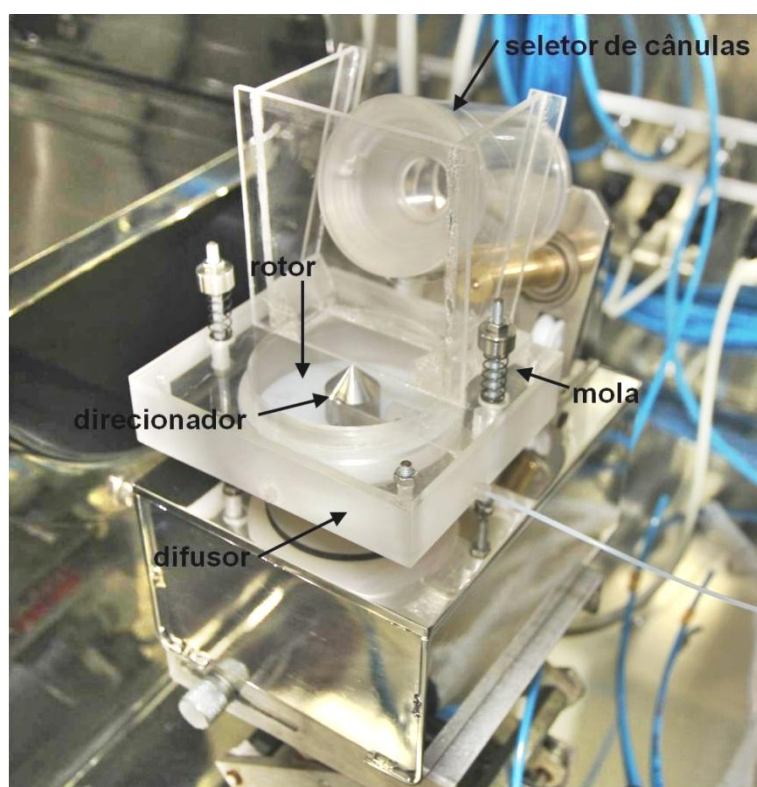


FIGURA 50 - Alimentador de cânulas (perspectiva)

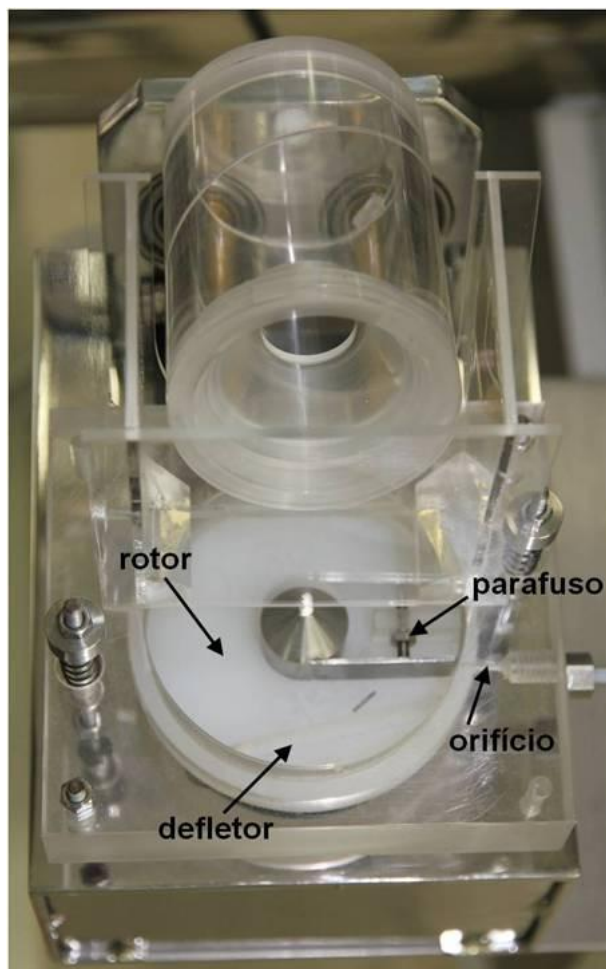


FIGURA 51 - Alimentador de cânulas (vista superior)

No decorrer dos ensaios com o dispositivo alimentador de cânulas, notou-se que, com o movimento circular do rotor, alguns tubos de titânio eram levados aleatoriamente para a parede do difusor. Desta maneira, o tubo de titânio não se alinhava com o orifício, originando um bloqueio na sua entrada, ocasionando uma interrupção no fornecimento dos tubos de titânio no dispositivo de soldagem.

Utilizando a mesma ideia da guia triangular usada no dispositivo seletor de cânulas, desenvolveu-se um defletor que encaminhava o tubo de titânio para o direcionador, que antes se deslocava encostado na parede do difusor. Desta maneira, conseguiu-se eliminar a causa do bloqueio dos tubos de titânio no orifício de passagem.



### **5.6.3 Seletor de fontes**

Por se tratar de um dispositivo semelhante ao seletor de cânulas, diferenciando-se somente no diâmetro do canal da parede interna do dispositivo, o seletor de fontes apresentou o mesmo problema de não conseguir enviar na totalidade os fios de prata com iodo-125 para o dispositivo alimentador de fontes.

O problema foi resolvido do mesmo modo que no dispositivo seletor de cânulas, descrito no item “5.6.1 Seletor de cânulas”.

### **5.6.4 Alimentador de fontes**

O alimentador de fontes diferencia-se do alimentador de cânulas somente no diâmetro do orifício de passagem do corpo do difusor. Assim, o problema ocorrido no alimentador de cânulas surgiu no alimentador de fontes e foi solucionado conforme descrito no item “5.6.2 Alimentador de cânulas”.

### **5.6.5 Suporte para sensor em fibra óptica**

Os sensores em fibra óptica foram utilizados neste projeto para indicar os diversos posicionamentos do tubo de titânio ou do fio de prata com iodo-125 durante os seus deslocamentos no sistema de soldagem ou como indicação de sentido no dispositivo distribuidor inversor. Por se tratar de um tipo de sensor que detecta o objeto pela sua passagem através de um feixe alinhado de luz, desenvolveu-se um suporte que permitisse a passagem do tubo de titânio ou do fio de prata e ocorresse a interrupção do feixe de luz, mas que não houvesse um travamento deles no seu interior.

Na FIG. 52 é mostrado o suporte montado com conectores junto com o sensor em fibra óptica e os conectores de fixação das mangueiras.

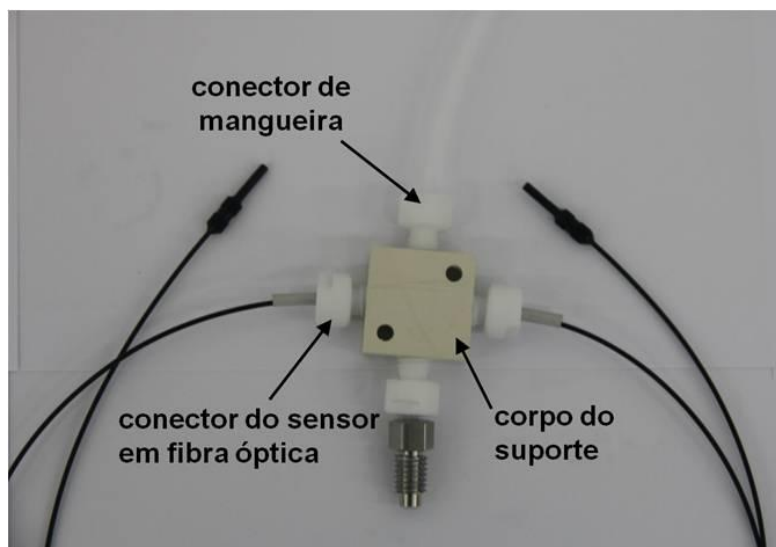


FIGURA 52 - Suporte para sensor em fibra óptica

Algumas dificuldades surgiram durante a montagem e ajuste da sensibilidade dos sensores em fibra óptica no suporte. Os sensores são de pequeno tamanho e com isso, dificultavam a montagem e o alinhamento do feixe de luz, causando perda de sensibilidade. Uma vez que o feixe de luz era alinhado, conseguia-se a sensibilidade necessária para identificação do objeto. Com o conector travado não se perde o alinhamento nem a sensibilidade.

#### 5.6.6 Receptor de fontes seladas

O dispositivo receptor de fontes seladas foi desenvolvido com a finalidade de armazenar tubos de titânio soldados em três possíveis situações. A primeira situação era que se a primeira solda fosse rejeitada, o tubo seria enviado para um frasco de vidro. A segunda situação era que se a segunda solda fosse rejeitada, o tubo com a fonte radioativa no seu interior seria enviado para a blindagem de chumbo, e a terceira situação era que se ambas as selagens estivessem aprovadas, neste caso, a semente de iodo-125 seria enviada ao frasco de poliestireno.

Durante os ensaios com esse dispositivo observou-se que em algumas situações, dependendo da geometria formada na solda reprovada, o tubo de titânio prendia ou no interior da mangueira de transporte em PTFE ou no

dispositivo distribuidor inversor e em alguns casos, no corpo do suporte para sensor em fibra óptica. Essa situação não foi prevista, pois no decorrer dos ensaios de soldagem utilizando o dispositivo estático não ocorreram casos em que a geometria da região soldada ficasse com a dimensão maior que a área interna da mangueira de transporte em PTFE, utilizada neste projeto.

Para evitar que os tubos soldados rejeitados pudessem ocasionar um bloqueio durante um processo de produção das sementes de iodo-125 no futuro, confeccionou-se um mecanismo que transferia o tubo soldado rejeitado diretamente para uma blindagem de chumbo padrão, evitando assim a passagem do tubo rejeitado pelo dispositivo distribuidor inversor.

Utilizou-se nesse novo mecanismo uma mangueira de transporte em poliuretano com área interna maior ao de PTFE e também se refez a geometria interna do suporte para o sensor em fibra óptica. Esse mecanismo foi montado diretamente no dispositivo de soldagem a laser por meio de um acionador pneumático.

Uma vez que há duas situações de soldas rejeitadas por inspeção visual, na primeira e na segunda selagem, conforme critérios adotados no item “4.8 Requisitos para aceitação das soldas” e referenciados nas FIG. 32 a 36, optou-se por enviar os tubos soldados rejeitados, em ambas as situações, para o mesmo recipiente (blindagem de chumbo padrão).

Essa opção foi em razão de não haver espaço suficiente no dispositivo de soldagem a laser para acomodar duas unidades desse novo mecanismo, e também por concentrar todos os tubos rejeitados em um único recipiente.

Na FIG. 53 é mostrado o dispositivo originalmente projetado e montado com os três recipientes.

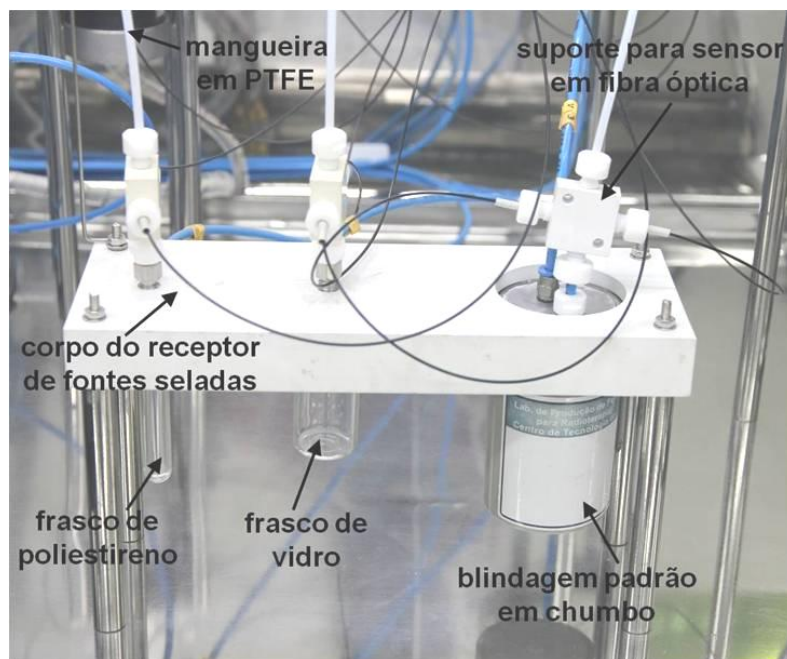


FIGURA 53 - Receptor de fontes seladas

Em virtude da criação do mecanismo de transferência dos tubos selados rejeitados, readequou-se o dispositivo receptor de fontes para acomodar somente o frasco de poliestireno e a blindagem padrão em chumbo.

Na FIG. 54 é mostrado o dispositivo receptor de fontes seladas reprojeto e montado.

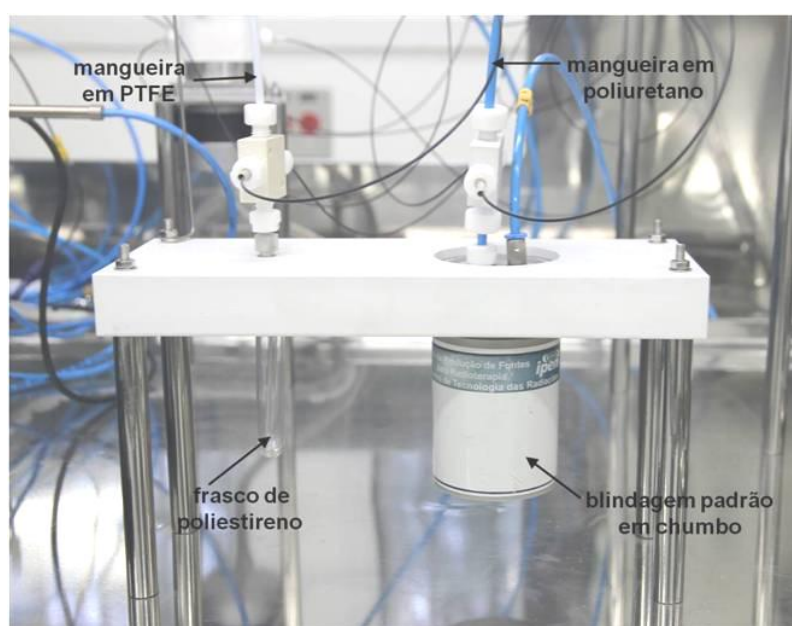


FIGURA 54 - Receptor de fontes seladas readequado

Observa-se na FIG. 54 a mangueira em poliuretano na cor azul, a qual substituiu a em PTFE. O diâmetro interno da mangueira em PTFE é de 1,6 mm, diferente da mangueira de poliuretano que apresenta um diâmetro interno de 2,5 mm, maior o suficiente para não permitir o bloqueio dos tubos selados rejeitados.

### 5.6.7 Distribuidor inversor

O dispositivo distribuidor inversor foi projetado com a finalidade de inverter o sentido do tubo de titânio após a confecção da primeira solda para ser colocado um fio de prata com iodo-125 no seu interior ou selecionar o recipiente adequado ao qual será enviado o tubo de titânio soldado.

Este dispositivo utiliza um motor de passo que é controlado por um *driver* que permite uma resolução máxima de 50.800 passos por revolução. Para esse dispositivo utilizou-se uma resolução de 36.000 passos por revolução, ou seja, 0,01 graus por passo. Essa precisão no movimento do rotor possibilitou um alinhamento perfeito entre o orifício calibrado no rotor e as conexões das mangueiras para transporte e inversão dos tubos soldados. Na FIG. 55 é mostrado o dispositivo distribuidor inversor conectado ao sistema de soldagem a laser.

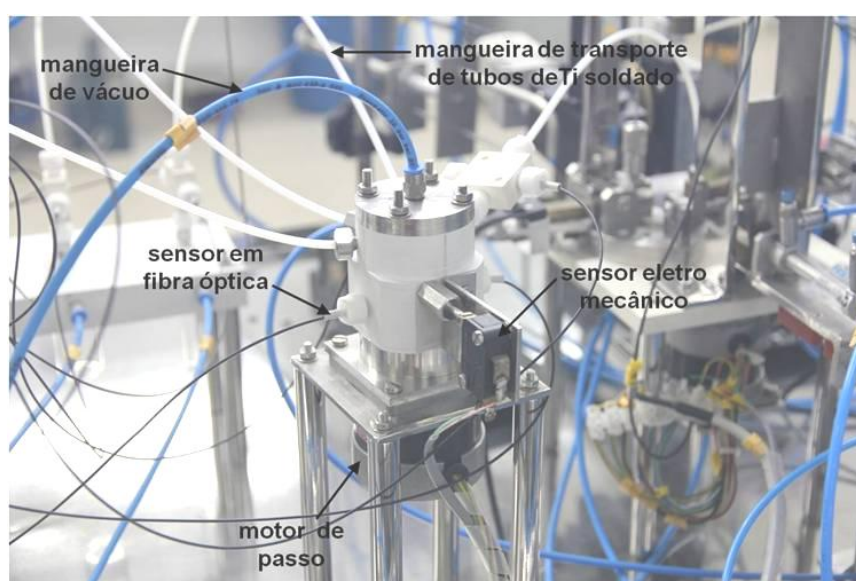


FIGURA 55 - Distribuidor inversor

Na FIG. 55 observam-se os diversos itens que fazem parte do dispositivo distribuidor inversor e as mangueiras em PTFE que o conectam ao sistema de soldagem e ao receptor de fontes.

A maior dificuldade apresentada com esse dispositivo ocorreu durante a sua montagem, que necessitava de um alinhamento perfeito do feixe de luz do sensor óptico. O sensor apresenta algumas dimensões em décimos de milímetros, o que dificulta o processo de fabricação do conector de fixação. Foi necessária a utilização de usinagem de precisão para a confecção dos conectores que fixam os sensores no corpo do dispositivo distribuidor inversor e, com isso, permitir o alinhamento adequado do feixe de luz, que é necessário para conseguir a sensibilidade mínima de detecção do sensor.

#### **5.6.8 Bocal do gás de proteção**

No decorrer dos ensaios para determinação de qual modelo de bocal de gás de proteção seria utilizado no projeto, observou-se que o tipo que utilizava tubos flexíveis (FIG. 25) saía facilmente da posição. Essa variação de posição ocorria em razão desse modelo de bocal ser produzido em plástico e ser flexível. Isto acontecia porque se o conjunto do bocal ficasse fixo na posição adequada, como foi idealizado, atrapalharia algumas funcionalidades do dispositivo de soldagem a laser. Em razão disto, movimentava-se o conjunto do bocal para a posição correta somente no momento da solda.

Como alternativa, confeccionou-se um segundo modelo de bocal de gás (FIG. 26) com dimensões reduzidas em relação ao dispositivo anterior e que permitisse a fixação no dispositivo de soldagem a laser, sem que atrapalhasse as suas funcionalidades. Para que isto fosse possível, os bocais foram fixados distantes da posição de soldagem do tubo de titânio.

Para que o gás de proteção conseguisse agir em toda a região da solda, decidiu-se montar dois bocais, um oposto ao outro com um ângulo de 45° em relação à posição do tubo de titânio.

Notou-se durante os ensaios que essa configuração causava uma turbulência do gás na região da solda tornando a proteção ineficaz.

Para solucionar as falhas ocorridas com os dois primeiros modelos de bocais de gás de proteção, utilizou-se um modelo (FIG. 27) em que o bocal de gás deslocava-se, por meio de um atuador pneumático, até a posição correta, somente no momento da solda. Com esta configuração, o gás de proteção era enviado por cima do tubo de titânio, fazendo com que toda região da solda fosse protegida.

Na FIG. 56 é mostrado o conjunto do bocal de gás de proteção desenvolvido para atuar com o sistema de soldagem.

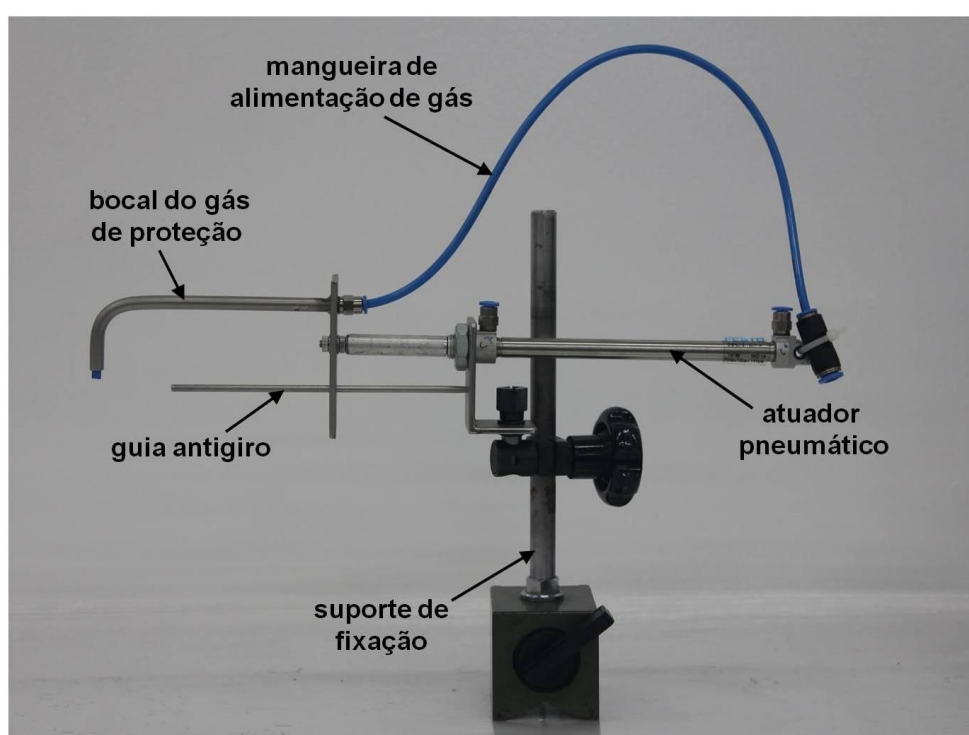


FIGURA 56 - Arranjo do bocal do gás de proteção utilizado no sistema de soldagem a laser

Observa-se na FIG. 56 o atuador pneumático que movimenta o bocal de gás até a posição de soldagem e também a guia antigiro, que mantém o alinhamento do bocal do gás durante o seu deslocamento.

Diferente dos outros dois, esse modelo de bocal de gás permitiu a proteção da região soldada, impedindo que essa apresentasse oxidação após a sua solidificação.

#### **5.6.9 Dispositivo de soldagem**

Desenvolveu-se o dispositivo de soldagem com o objetivo de selar o tubo de titânio sem que houvesse contato do operador do sistema com o material.

Esse equipamento é responsável pelo correto posicionamento dos tubos de titânio durante as etapas de selagem e a colocação dos fios de prata com o material radioativo (iodo-125) adsorvido no interior dos tubos.

Na FIG. 57 é mostrado o dispositivo de soldagem conectado ao distribuidor/inversor. Observam-se também alguns componentes que são utilizados para posicionar o tubo de titânio para a soldagem a laser.



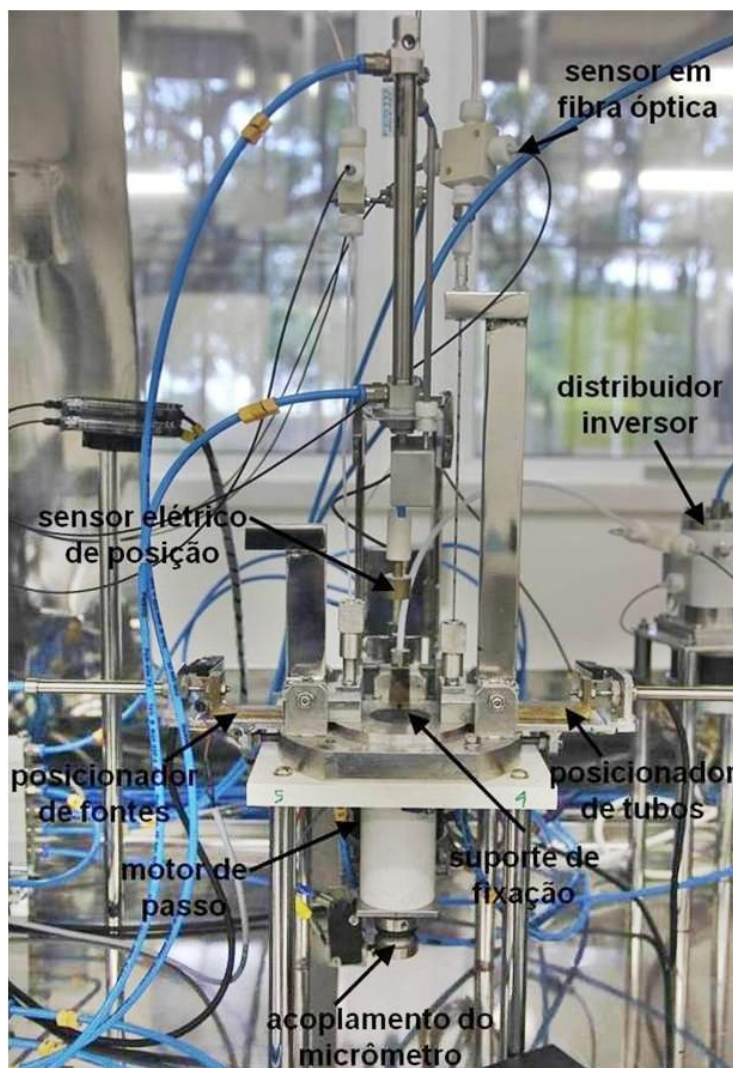


FIGURA 57 - Dispositivo de soldagem a laser

O dispositivo de soldagem a laser apresentou maior dificuldade operacional durante a sua regulagem, uma vez que possui vários elementos móveis. Esses elementos são ajustados um em relação ao outro para atuarem com precisão no transporte e posicionamento do tubo de titânio e do fio de prata com iodo-125.

Durante os testes de funcionalidade o dispositivo de soldagem apresentou resultados apropriados para o qual foi projetado, isto é, o ciclo completo da soldagem das sementes de iodo-125, em virtude dos eficientes instrumentos de precisão acoplados e ajustados com o dispositivo.

Na FIG. 58 é mostrado o dispositivo de soldagem montado com o mecanismo de transferência dos tubos selados rejeitados.

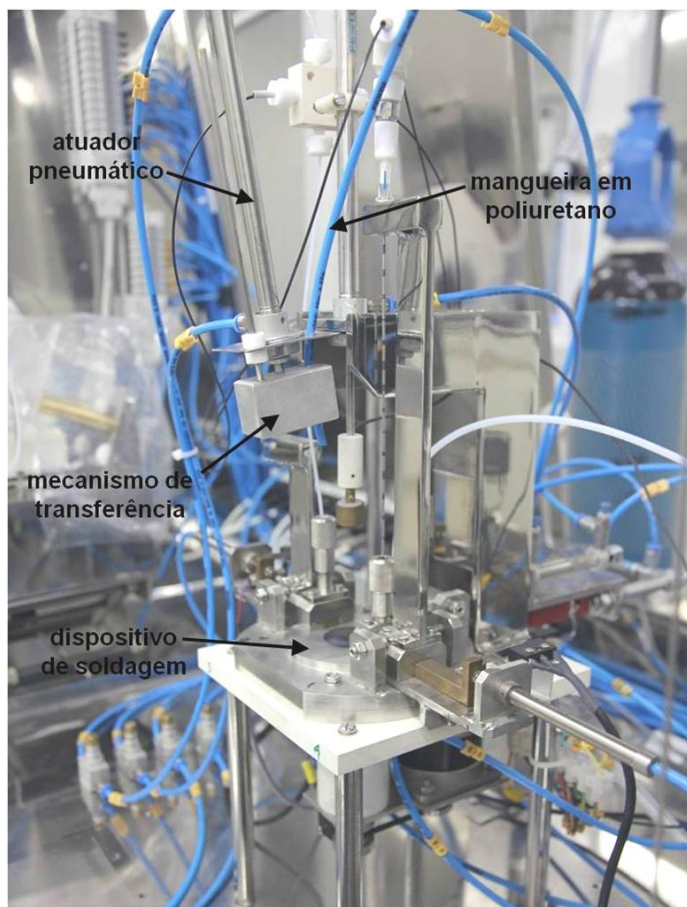


FIGURA 58 - Dispositivo de soldagem a laser com mecanismo de transferência dos tubos selados rejeitados

Observa-se na FIG. 58 o atuador pneumático que movimenta o mecanismo de transferência e a mangueira em poliuretano utilizada para o transporte dos tubos selados rejeitados.

Como citado nos resultados do dispositivo descrito no item “5.6.6 Receptor de fontes seladas”, um novo mecanismo para transferência dos tubos selados rejeitados foi montado diretamente no dispositivo de soldagem. Dessa maneira, readequou-se o dispositivo de soldagem para comportar esse novo mecanismo.

## 5.7 Ensaio com sistema de soldagem a laser

O sistema de soldagem foi projetado para atuar o mais automatizado possível, a fim de evitar possíveis mudanças pelo operador em parâmetros essenciais do processo de soldagem a laser das sementes de iodo-125. Além disso, o sistema foi confeccionado para operar sob controle radiológico dentro de *glove box*. Para atender esse controle, optou-se por estabelecer uma sequência de produção em que todas as etapas da selagem e a colocação do fio de prata com iodo-125 no interior do tubo de titânio ocorressem em um único sistema.

Como descrito na metodologia do ensaio, para que o sistema de soldagem a laser operasse como projetado, houve a necessidade de automação e integração dos dispositivos ao sistema. A automação elétrica do sistema deu origem a um trabalho de mestrado desenvolvido no Instituto. <sup>4</sup>



FIGURA 59 - *Hardware* do sistema de soldagem a laser <sup>4</sup>

Na FIG. 59 é mostrado o *hardware* que controla o sistema de soldagem a laser composto por CLP (Siemens S7-200), fontes de alimentação, *drivers* de motores de passo, relés e módulo de interface da máquina de solda laser.

Uma vez que os dispositivos de soldagem e receptor de fontes sofreram alterações, houve a necessidade de ajustar o sistema para que as modificações ocorridas nos dispositivos pudessem ter êxito.

Na FIG. 60 é mostrado o desenho esquemático do sistema de soldagem a laser com as alterações no dispositivo receptor das fontes seladas e a incorporação do mecanismo de transferência no dispositivo de soldagem.

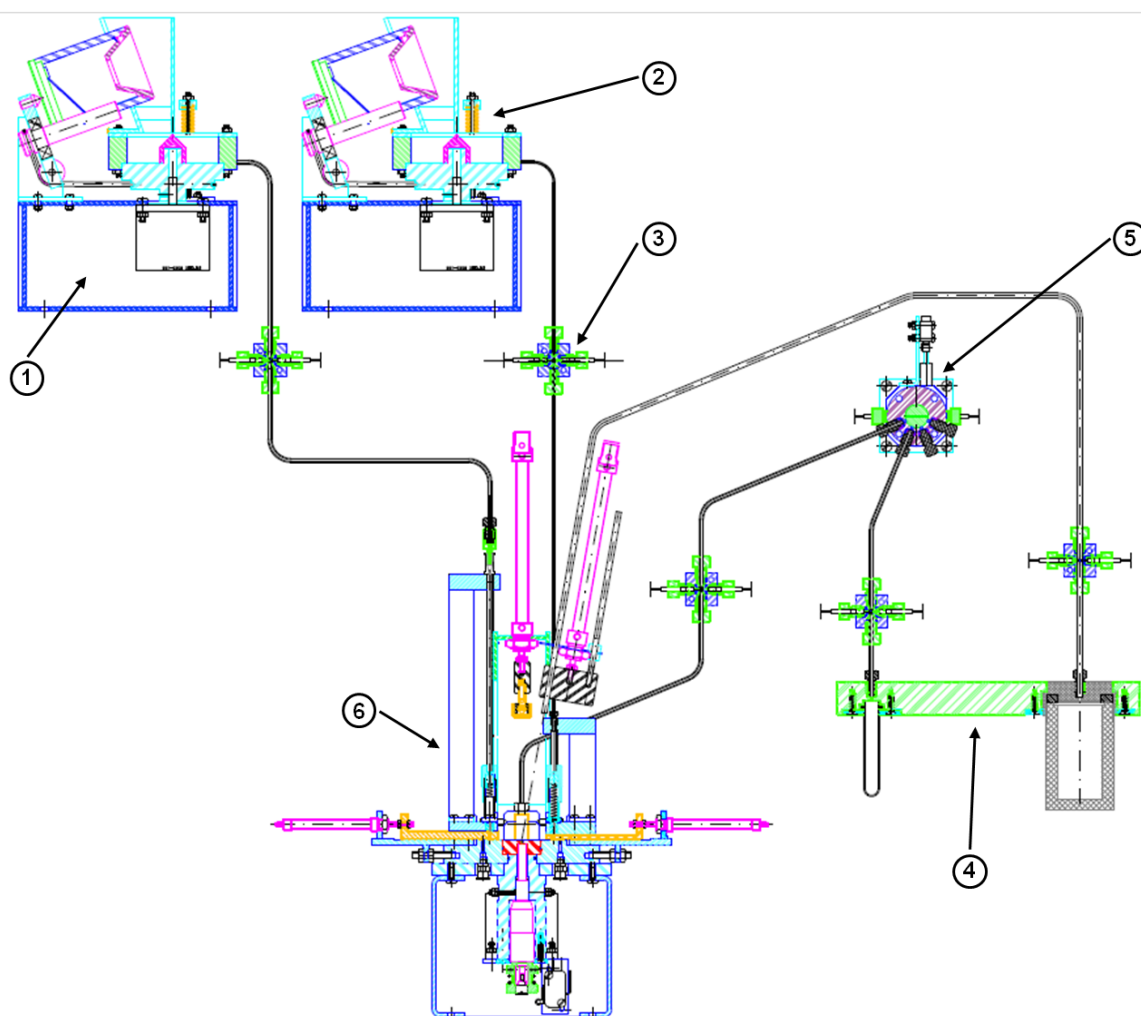


FIGURA 60 - Sistema de soldagem a laser modificado constituído por: seletor e alimentador de cânulas (1), seletor e alimentador de fontes (2), suporte para sensor em fibra óptica (3), receptor de fontes seladas (4), distribuidor inversor (5) e dispositivo de soldagem (6)

Um fluxograma apresentando o processo de soldagem utilizado nos ensaios de produção das sementes de iodo-125 no sistema de soldagem a laser modificado é mostrado na FIG. 61.

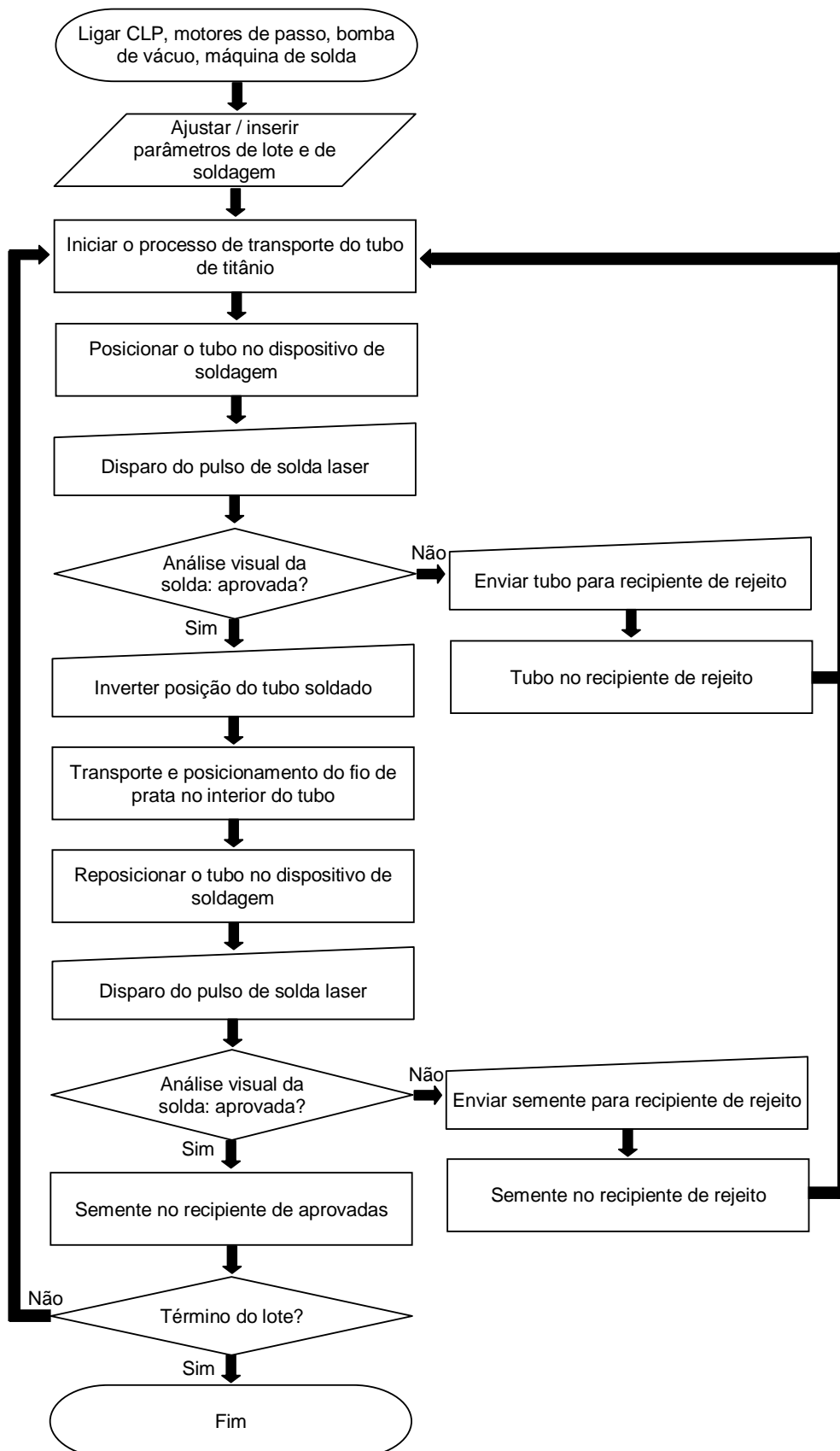


FIGURA 61 - Fluxograma do processo de soldagem utilizado no sistema de soldagem a laser

Na FIG. 62 é mostrado o dispositivo de soldagem modificado e alguns dos dispositivos auxiliares que fazem parte do sistema de soldagem a laser.

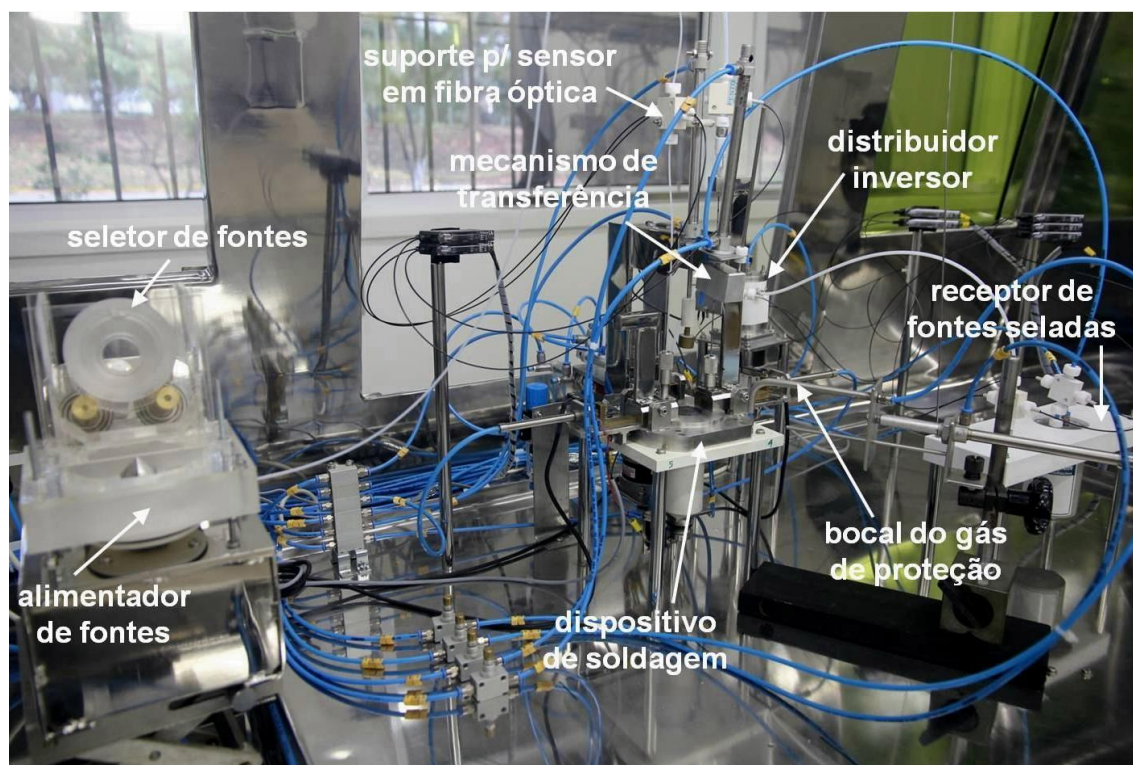


FIGURA 62 - Sistema de soldagem a laser

Observa-se na FIG. 62 o mecanismo de transferência acoplado no dispositivo de soldagem e o dispositivo receptor de fontes modificado para receber as fontes seladas rejeitadas diretamente do dispositivo de soldagem a laser.

No decorrer dos ensaios utilizando o sistema de soldagem a laser, observou-se que após a soldagem do tubo de titânio, respingos provenientes da soldagem aderiam ao suporte de fixação do dispositivo de soldagem e danificavam a sua superfície, visto que esse suporte era fabricado em baquelite, o qual possui temperatura de moldagem de  $170\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ . Esse problema foi solucionado com o desenvolvimento e confecção de um suporte de fixação em cerâmica, em conjunto com uma empresa especializada, pois a geometria e a precisão das dimensões do suporte dificultavam a sua produção no Instituto. Na FIG. 63 são mostrados os suportes de fixação em baquelite e cerâmica.

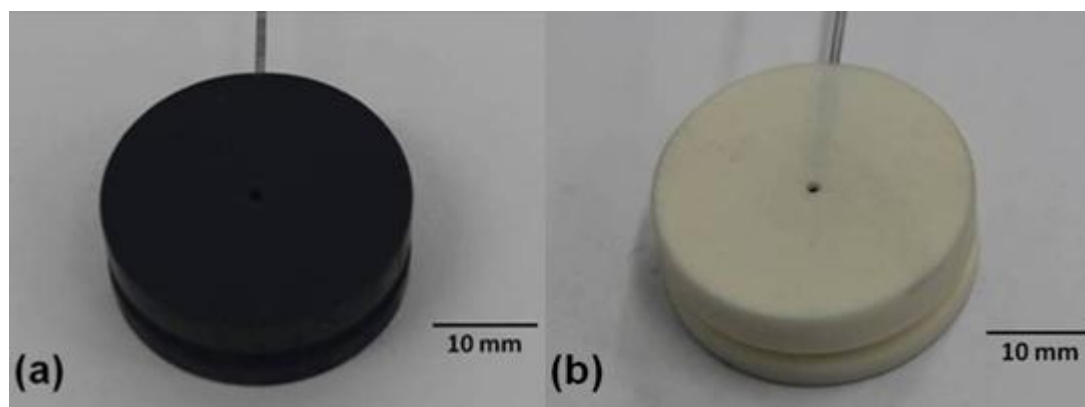


FIGURA 63 - Suportes de fixação em: (a) baquelite e (b) cerâmica

Tanto os ajustes dos dispositivos individuais, quanto o resultado obtido dos sistemas de controle proporcionaram o desempenho preciso do sistema de soldagem a laser como um todo.

### 5.8 Determinação dos parâmetros de soldagem com sistema de soldagem a laser

Utilizaram-se, no início dos ensaios com o sistema de soldagem a laser, os mesmos parâmetros de soldagem utilizados com o dispositivo de soldagem estático, com pequenas variações dos parâmetros durante os ensaios.

Na TAB. 14 são apresentados os parâmetros variados utilizados nos ensaios com o sistema de soldagem a laser.

TABELA 14 - Parâmetros variados nos ensaios de soldagem com o sistema de soldagem a laser

Parâmetro	Valores								
Potência pico (kW)	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2				
Largura do pulso (ms)	7	8	9	10					
Vazão do gás de assistência (L/min)	1	2	3	4	5	6	7	8	

O gás de assistência utilizado foi o argônio. O sentido de fluxo era de 90° em relação ao feixe de laser, utilizando-se um bocal com diâmetro interno de 2,0 mm, distante 10 mm do tubo de titânio. O valor do deslocamento do centro do feixe de laser em relação ao topo do tubo de titânio (*offset*) que foi usado para

essa aplicação era de 0,6 mm. A posição focal estava localizada a 0,5 mm abaixo da superfície do tubo.

Embora o modelo e a geometria do bocal de gás de proteção tenham sido testados junto com o dispositivo de soldagem estático, a vazão do gás de proteção foi determinada durante os ensaios com o sistema de soldagem a laser.

Em alguns parâmetros de soldagem, tal como a vazão do gás de proteção, utiliza-se uma faixa de vazão ao invés de um valor fixo, pois nesse caso, pequenas variações na vazão não devem influenciar na proteção da região soldada.

Foram selados tubos de titânio com vazões variando de 1 L/min até 8 L/min. Foi considerada como a faixa de vazão adequada a que manteve as zonas fundidas e termicamente afetadas isentas de oxidação.

Nas FIG. 64, 65 e 66 são mostradas, respectivamente, uma solda no tubo de titânio com vazão de gás insuficiente, outra com vazão de gás adequada e, por último, com vazão de gás em excesso.

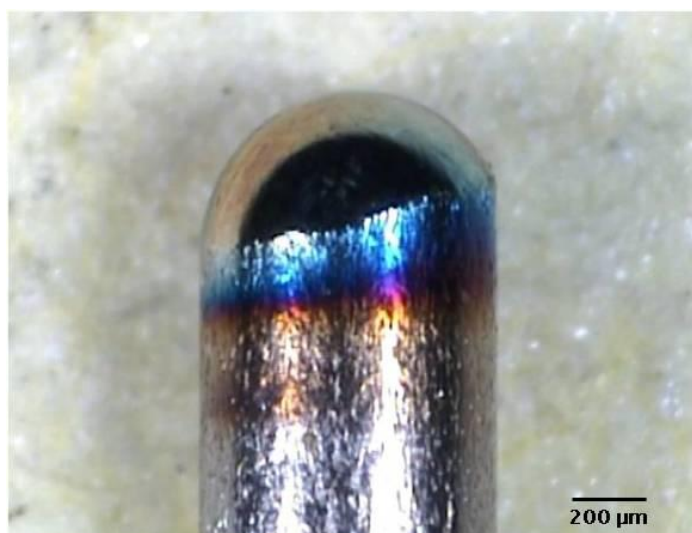


FIGURA 64 - Solda com vazão de gás insuficiente apresentando oxidação na superfície (Q=1 L/min)



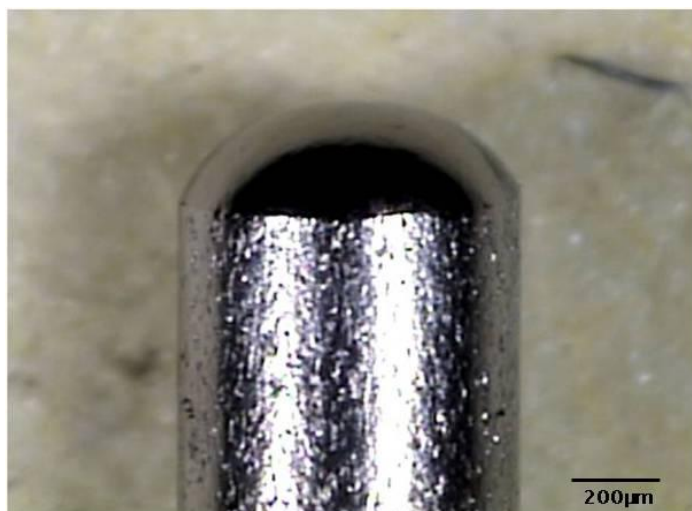


FIGURA 65 - Solda com vazão de gás adequada sem oxidação na superfície (Q=5 L/min)

Observa-se na FIG. 64 a mudança de coloração proveniente da oxidação ocorrida pela falta de gás no momento da soldagem a laser, diferente da FIG. 65, que não apresenta oxidação em virtude da correta vazão de gás aplicada na região de solda.



FIGURA 66 - Solda com vazão de gás em excesso apresentando oxidação na superfície (Q=8 L/min)

A vazão de gás em excesso na região soldada é tão prejudicial quanto a vazão de gás insuficiente. O fluxo de gás torna-se turbulento carregando o ar atmosférico com umidade, causando oxidação nas zonas de fusão e termicamente afetada.

A vazão do gás de proteção utilizada para soldagem dos tubos de titânio mostrados nas FIG. 64, 65 e 66 foram 1 L/min, 5 L/min e 8 L/min, respectivamente, com 1,0 kW de potência pico e 10 ms de largura de pulso (valores fixos).

Na FIG. 67 é mostrada a região externa da solda do tubo de titânio produzida com os parâmetros de soldagem indicados na TAB. 14.

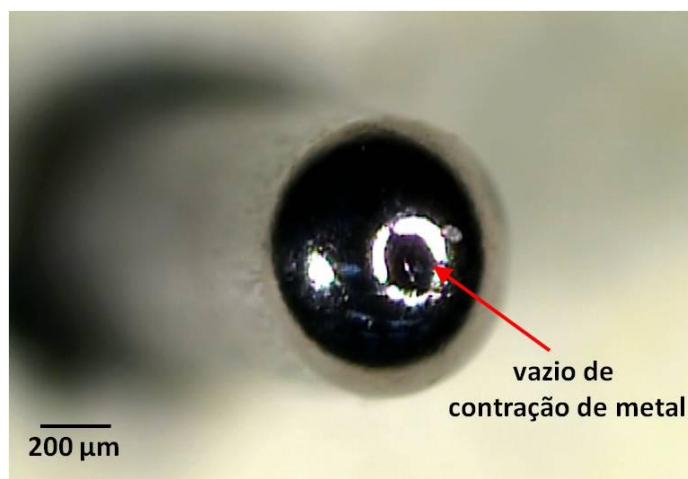


FIGURA 67 - Imagem do acabamento da solda no tubo de titânio apresentando vazão de contração de metal ( $P_p=0,9$  kW;  $t=8$  ms;  $Q=6$  L/min)

Observa-se na FIG. 67 o vazão de contração de metal no centro da região soldada proveniente da contração da zona fundida.

Pelo fato da soldagem autógena ser empregada na selagem dos tubos de titânio, isto é, a selagem ocorre sem o uso de material de adição, tornou-se necessário determinar para cada modelo de dispositivo, inclusive no sistema de soldagem a laser Nd:YAG, o comprimento do material extra (tubo de titânio) necessário para que ocorresse a selagem por completo.

Na FIG. 68 é mostrado um tubo de titânio com falha na selagem em razão da falta de material extra.

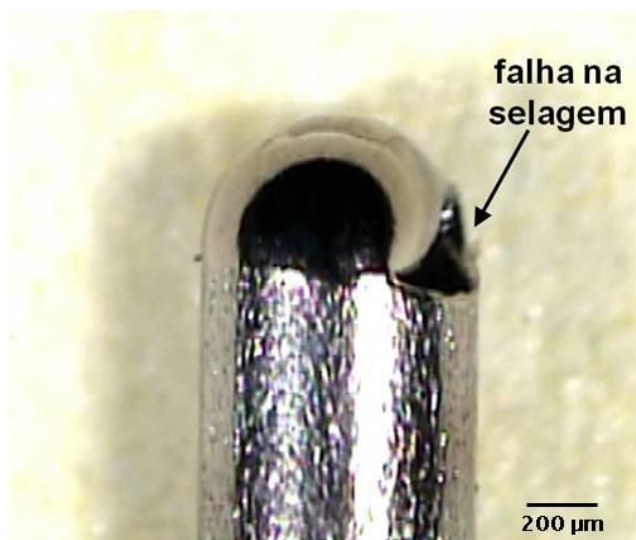


FIGURA 68 - Falha na selagem ( $P_p=0,8$  kW;  $t=9$  ms;  $Q=6$  L/min)

Como descrito na literatura, um dos parâmetros com o qual a penetração está relacionada é a potência do pulso laser <sup>68,72,75</sup>. No caso da soldagem dos tubos de titânio, a potência do pulso está relacionada com a quantidade de material fundido.

Para otimização dos parâmetros de soldagem a laser, realizaram-se ensaios com pulsos de potências variadas a fim de determinar a potência de pulso que proporcionasse uma selagem com o melhor acabamento esférico possível.

Nas FIG. 69, 70 e 71 são mostrados, respectivamente, tubos de titânio soldados com potência de pulso insuficiente, excesso de potência e potência de pulso adequada.

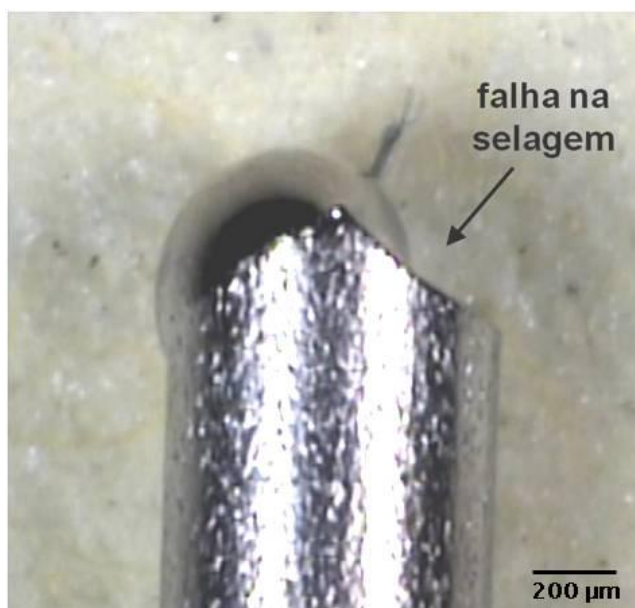


FIGURA 69 - Tubo de titânio apresentando falha na selagem em razão da potência de pulso de laser insuficiente ( $P_p=0,8$  kW)

Observa-se na FIG. 69 falha na selagem com fusão parcial do tubo de titânio em razão da falta de potência do pulso laser.

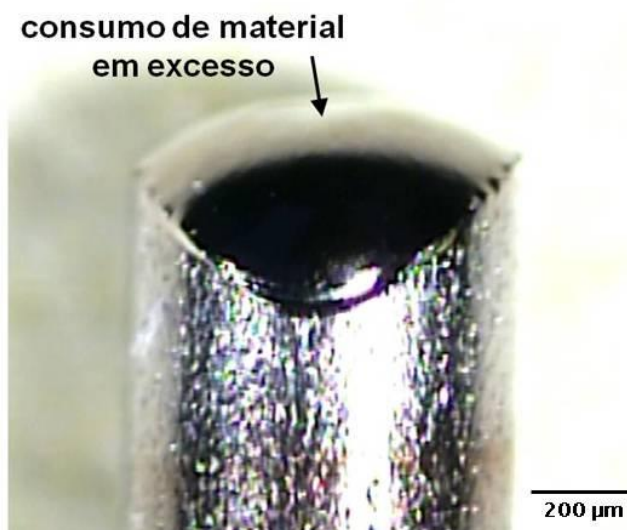


FIGURA 70 - Tubo de titânio soldado apresentando consumo elevado de material em razão do excesso de potência de pulso ( $P_p=1,2$  kW)

Embora o tubo de titânio tenha sido selado, observa-se na FIG. 70, um consumo de material em quantidade maior que o necessário para se formar uma região soldada com acabamento esférico. Esse consumo maior de material está relacionado ao excesso de potência utilizada no pulso do laser.

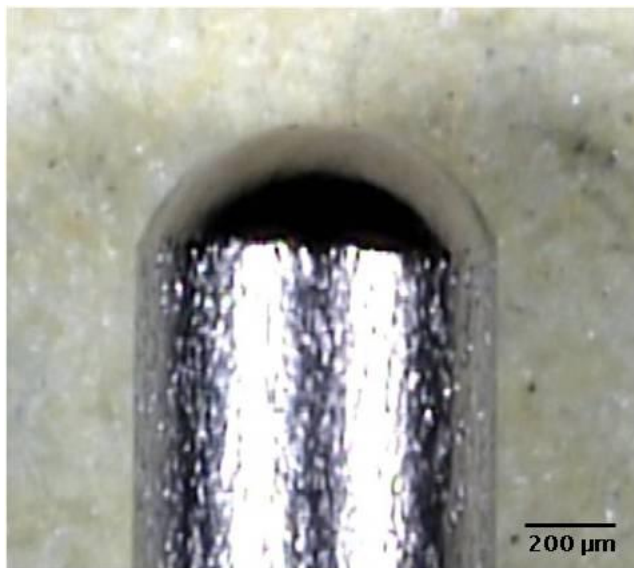


FIGURA 71 - Tubo de titânio soldado com potência de pulso de laser adequada apresentando região da solda simétrica e esférica ( $P_p=1,0$  kW)

Na FIG. 71 é mostrado um tubo de titânio soldado utilizando potência de pulso de laser adequada, capaz de produzir uma região de solda esférica.

A faixa de potência utilizada na determinação dos parâmetros de soldagem com o sistema de soldagem laser referentes às FIG. 69, 70 e 71 variou de 0,8 kW a 1,2 kW, com 10 ms de largura de pulso e 5 L/min de vazão de gás argônio (valores fixos). A potência considerada adequada foi de 1,0 kW.

Tal como descrito na literatura, a maioria dos casos de soldagem a laser utiliza pulso em forma quadrada. No entanto, há algumas aplicações em que a utilização de conformação do pulso pode melhorar a solda. Existem inúmeras formas de pulso, no entanto, duas formas básicas de pulso são mais comumente usadas. A primeira, *spike pulse*, é utilizada para superar materiais altamente reflexivos, tais como cobre e alumínio. A segunda, *annealing pulse*, é muito utilizada para minimizar o ciclo térmico da peça durante a soldagem de materiais sensíveis à fissuração<sup>68</sup>.

Na FIG. 72 é mostrada a região soldada de um tubo de titânio apresentando fissuração.



FIGURA 72 - Região soldada apresentando fissuração

Para eliminar o problema de fissuração como apresentado na FIG. 72, utilizou-se o modo de conformação de pulso. O modelo utilizado foi *annealing pulse* como descrito na literatura <sup>68</sup>.

Esse modelo permite aumentar gradativamente a potência do pulso (*up slope*) para aquecimento, soldagem (expansão da solda até a geometria ou o tamanho necessário) e o resfriamento controlado, diminuindo os riscos de defeitos (*down slope*). Na FIG. 73 observa-se, esquematicamente, o modelo *annealing pulse* aplicado na solda mostrada na FIG. 74.

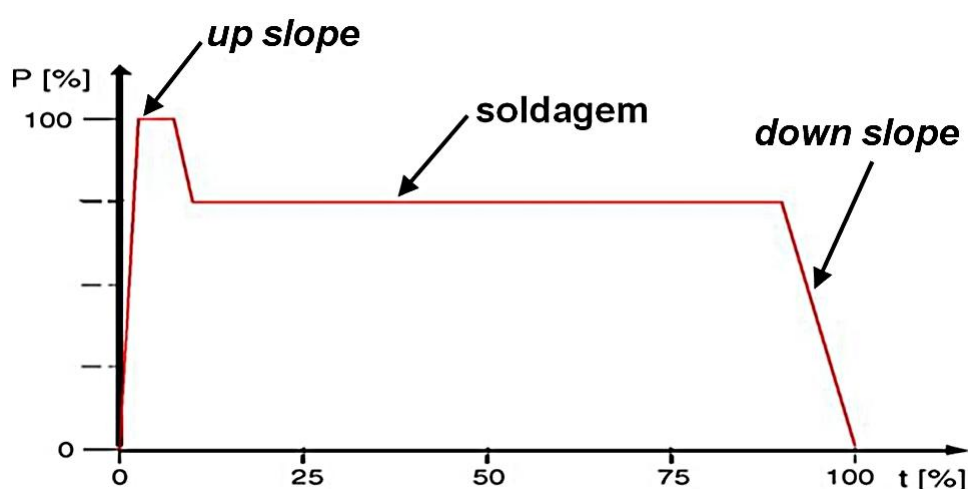


FIGURA 73 - Conformação do pulso (*annealing pulse*)

Quando se utiliza esse recurso da máquina de solda laser, conforme variam as larguras temporais do *up slope* e *down slope*, a energia do pulso

diminui, sendo necessária aumentá-la. Como a melhor condição para selagem da semente de iodo-125 utiliza o valor máximo de largura temporal disponível pela máquina de solda laser (10 ms), foi necessário aumentar a potência pico para alcançar a energia necessária para selagem da semente.

Na FIG. 74 observa-se a região soldada do tubo de titânio utilizando os parâmetros otimizados e a conformação de pulso mostrada na FIG. 73.

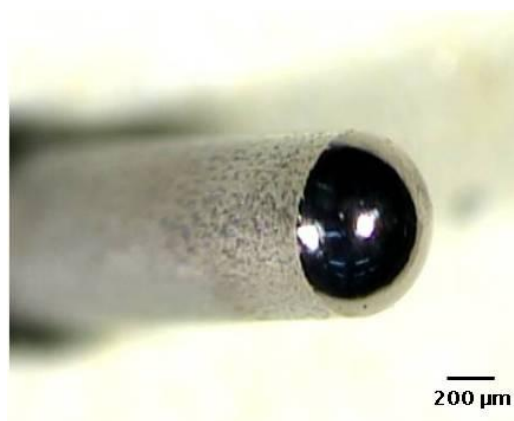


FIGURA 74 - Tubo de titânio utilizando parâmetros otimizados

Observa-se na FIG. 74 o acabamento esférico necessário para a utilização com os aplicadores dos implantes das sementes de iodo-125 na próstata.

Na FIG. 75 é mostrada uma semente confeccionada utilizando-se os parâmetros otimizados (TAB. 15).

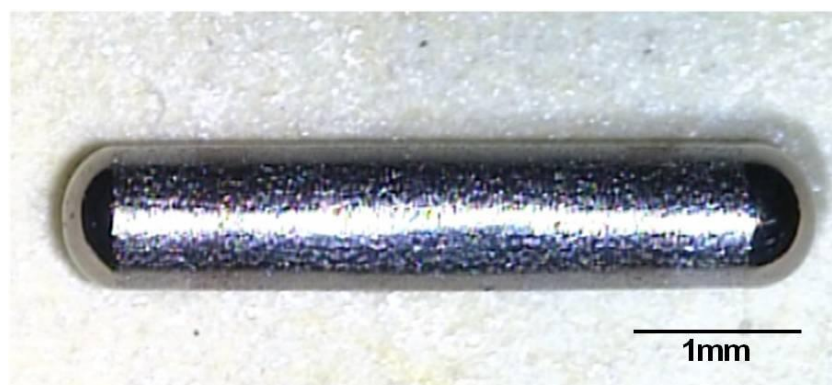


FIGURA 75 - Semente de iodo-125 produzida no IPEN-CNEN/SP

Na TAB. 15 são apresentados os parâmetros de soldagem a laser e os seus respectivos valores utilizados durante os ensaios com o sistema de soldagem a laser.

TABELA 15 - Valores dos parâmetros finais de soldagem utilizados com o sistema de soldagem a laser

Parâmetros	Valores
Potencia do pulso (kW)	1,25
Largura do pulso (ms)	10
<i>Up Slope</i> (ms)	0,7
<i>Down Slope</i> (ms)	7,0
Energia do pulso (J)	7,6
Potência média (W)	7,6
Forma do pulso	<i>annealing</i>
Quantidade de pulsos	1
Posição e direção do bocal	90°, coaxial
Fluxo de gás (L/min)	4 a 6
Posição focal (mm)	0,5
<i>Offset</i> (mm)	0,6
Comprimento do tubo de titânio (mm)	6,75

Os valores dos parâmetros de soldagem apresentados na TAB. 15 indicam a melhor condição obtida durante os ensaios com o sistema de soldagem a laser para a realização da soldagem completa em ambos os lados do tubo de titânio.

A definição do comprimento necessário do tubo de titânio para a selagem das duas extremidades foi realizado após a determinação dos parâmetros indicados na TAB. 15, pois, conforme a variação dos valores dos parâmetros de soldagem, o comprimento extra necessário de tubo para selagem altera por se tratar de soldagem autógena.

### **5.9 Ensaios realizados para avaliar procedimento de selagem e sistema de soldagem a laser das sementes quanto aos requisitos estabelecidos para sua utilização**

As atividades das sementes produzidas para avaliar o procedimento e o sistema de soldagem variavam de 708 kBq (19,16  $\mu$ Ci) até 9,879 MBq (267 $\mu$ Ci).



### 5.9.1 Ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125

Nos ensaios de estanqueidade utilizou-se o método de ensaio por meio radioativo do tipo imersão por 24 horas em água destilada em temperatura ambiente ( $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e aplicação de ultrassom por 10 minutos. Esse ensaio é proveniente de resultados obtidos em trabalho de mestrado produzido no IPEN-CNEN/SP<sup>81</sup>.

Na TAB. 16 são apresentados os valores de atividade obtidos na água do ensaio de imersão após a primeira lavagem das sementes de iodo-125.

TABELA 16 - Ensaio de estanqueidade após a primeira lavagem das sementes de iodo-125

	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>		<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>		<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>		<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>
1	295,260	16	161,616	30	38,369	44	103,082
2	35,261	17	31,191	31	63,344	45	85,655
3	542,050	18	68,265	32	54,353	46	417,730
4	59,052	19	96,200	33	310,208	47	130,869
5	240,463	20	142,339	34	291,634	48	1021,200
6	30,525	21	40,404	35	39,849	49	117,845
7	96,459	22	63,233	36	307,729	50	45,843
8	412,180	23	51,504	37	58,312	51	801,050
9	121,582	24	35,113	38	375,550	52	37,777
10	292,559	25	182,928	39	736,670	53	52,503
11	49,728	26	110,963	40	200,836	54	105,191
12	78,662	27	3309,280	41	109,150	55	31,487
13	97,051	28	835,830	42	53,021	56	37,962
14	55,278	29	271,247	43	61,050	lote	2885,186
15	59,644						

Observa-se na TAB. 16 e FIG. 76 que, após a primeira lavagem, uma grande quantidade de medidas de atividade da água de ensaio (32%) estava acima do limite superior de 185 Bq (5 nCi) estipulado pela norma ISO 9978. Essa

quantidade de medidas com valores excedendo o limite superior de atividade permitido pela norma ISO 9978 aponta uma necessidade de realizar mais procedimentos de limpeza.

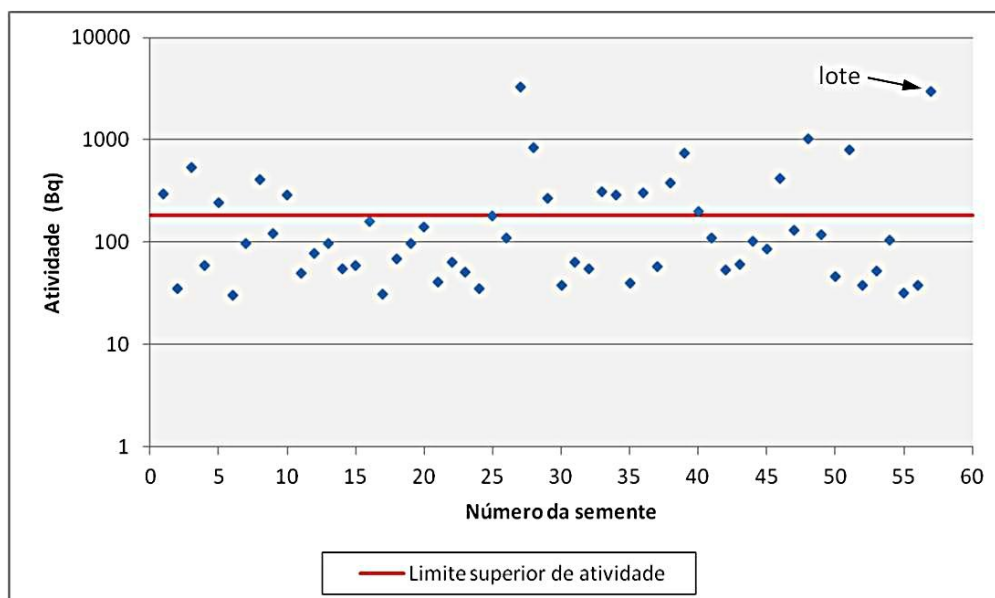


FIGURA 76 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a primeira lavagem das sementes de iodo-125

Embora seja uma grande quantidade de medidas acima do limite de aprovação, apenas duas medidas, excluindo a medida do lote, ficaram com valores acima de 1000 Bq, o que é um excelente resultado para uma primeira lavagem.

Era de se esperar que a medida do lote ficasse com valor muito acima do limite superior, uma vez que havia 14 sementes juntas no mesmo frasco de lavagem.

Na TAB. 17 são apresentados os valores de atividade obtidos na água do ensaio de imersão após a segunda lavagem das sementes de iodo-125.

TABELA 17 - Ensaio de estanqueidade após a segunda lavagem das sementes de iodo-125

	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>			
1	13,912	16	10,434	30	11,396	44	5,217
2	18,537	17	12,099	31	106,560	45	7,622
3	57,794	18	20,350	32	40,330	46	11,729
4	2,183	19	230,584	33	87,172	47	36,963
5	203,352	20	12,728	34	117,882	48	92,907
6	26,492	21	44,770	35	1,7390	49	34,595
7	25,604	22	5,920	36	471,380	50	46,731
8	62,567	23	45,214	37	83,250	51	321,604
9	44,844	24	30,932	38	56,943	52	9,472
10	409,220	25	11,322	39	574,610	53	31,339
11	10,878	26	178,488	40	128,168	54	8,658
12	78,884	27	3996	41	80,882	55	14,023
13	282,532	28	90,243	42	13,209	56	16,243
14	0,999	29	314,389	43	61,605	lote	358,086
15	6,660						

Observa-se na TAB. 17 e FIG. 77 uma diminuição das medidas de atividade, de 18 para 9 medidas, após a segunda lavagem, que ficaram acima do limite de 185 Bq (5 nCi) estipulado pela norma ISO 9978.

Essa diminuição de atividade em todas as medidas indica não haver vazamentos nas sementes de iodo-125, inclusive nas sementes do lote.

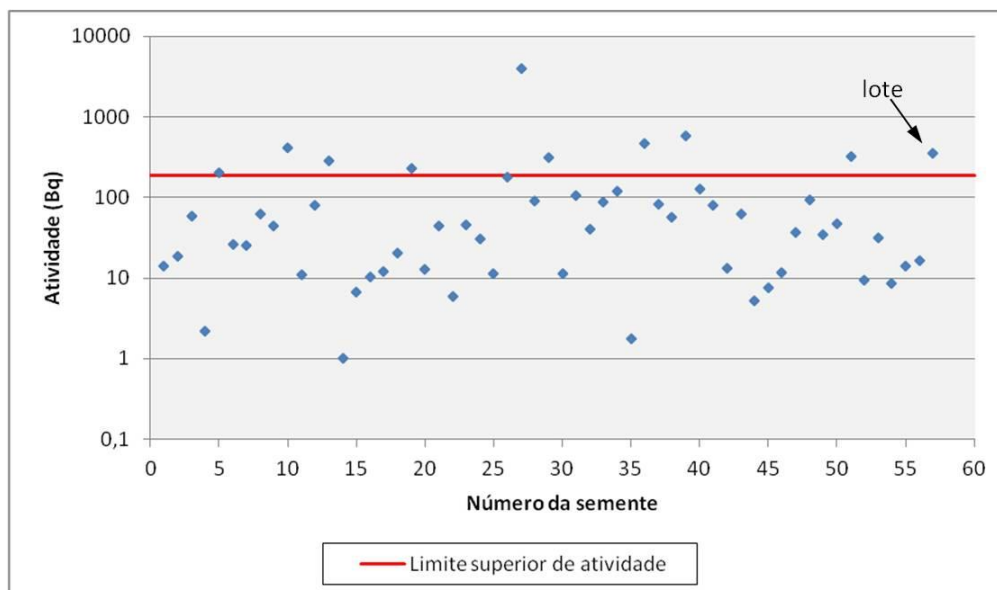


FIGURA 77 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a segunda lavagem das sementes de iodo-125

Na TAB. 18 são apresentados os valores de atividade obtidos na água do ensaio de imersão após a terceira lavagem das sementes de iodo-125.

TABELA 18 - Ensaio de estanqueidade após a terceira lavagem das sementes de iodo-125

	Atividade Semente na água (Bq)	Atividade Semente na água (Bq)	Atividade Semente na água (Bq)	Atividade Semente na água (Bq)
1	3,441	16	0,333	30
2	1,443	17	0,814	31
3	8,140	18	4,255	32
4	0,222	19	15,022	33
5	0,814	20	7,807	34
6	1,295	21	0,074	35
7	17,612	22	0,037	36
8	5,994	23	3,848	37
9	0,555	24	0,666	38
10	434,380	25	3,108	39
11	0,074	26	10,545	40
12	61,383	27	196,433	41
13	24,198	28	25,863	42
14	0,111	29	32,745	43
15	0,481			lote
				102,453

Observa-se na TAB. 18 e FIG. 78, que apenas duas medidas de atividade ficaram acima do limite de aprovação (185 Bq). Essa queda gradativa dos valores de atividade indica que o processo de limpeza foi eficiente.

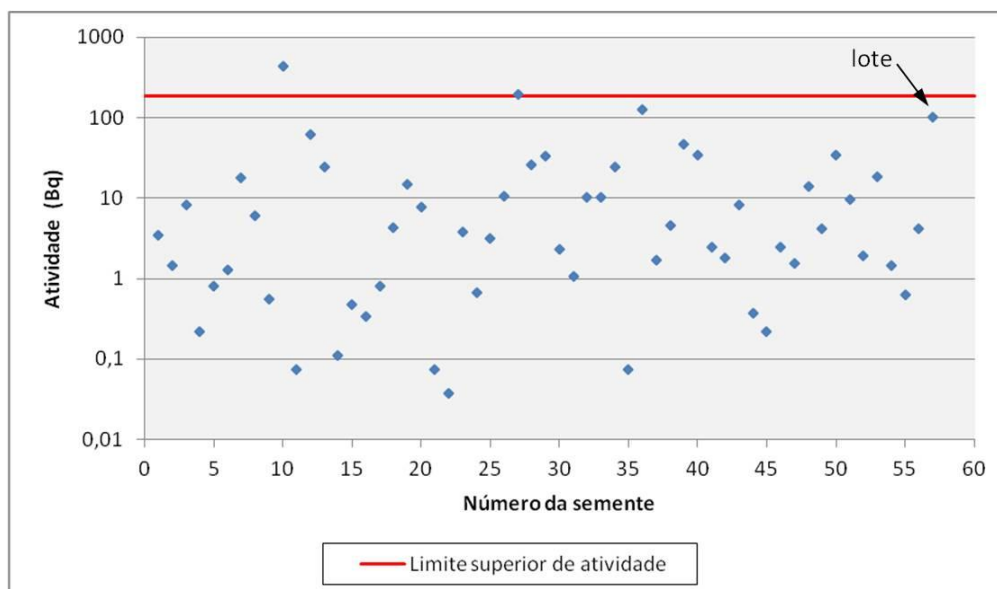


FIGURA 78 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a terceira lavagem das sementes de iodo-125

Na TAB. 19 são apresentados os valores de atividade obtidos na água do ensaio de imersão após a quarta lavagem das sementes de iodo-125.

TABELA 19 - Ensaio de estanqueidade após a quarta lavagem das sementes de iodo-125

	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>	<b>Atividade Semente na água (Bq)</b>			
1	8,880	16	6,253	30	2,738	44	0,555
2	6,253	17	1,073	31	2,516	45	0,962
3	37,555	18	1,776	32	7,363	46	1,221
4	1,591	19	5,883	33	13,061	47	1,924
5	2,405	20	11,100	34	61,346	48	10,730
6	1,813	21	2,109	35	0,407	49	2,553
7	12,839	22	2,294	36	7,548	50	6,808
8	50,505	23	7,141	37	2,997	51	25,715
9	2,442	24	2,590	38	5,624	52	9,213
10	16,095	25	2,923	39	16,650	53	23,051
11	0,851	26	16,946	40	9,657	54	4,477
12	1,221	27	32,042	41	4,181	55	0,925
13	36,889	28	57,313	42	2,627	56	4,070
14	1,221	29	83,657	43	6,401	lote	13,579
15	1,369						

Observa-se na TAB. 19 e FIG. 79 que, após a quarta lavagem, todas as medidas de atividade da água de ensaio das sementes, inclusive a medida do lote (14 sementes), ficaram bem abaixo do limite máximo estipulado pela norma ISO 9978 (185 Bq), constatando a ausência de vazamentos nas sementes de iodo-125.

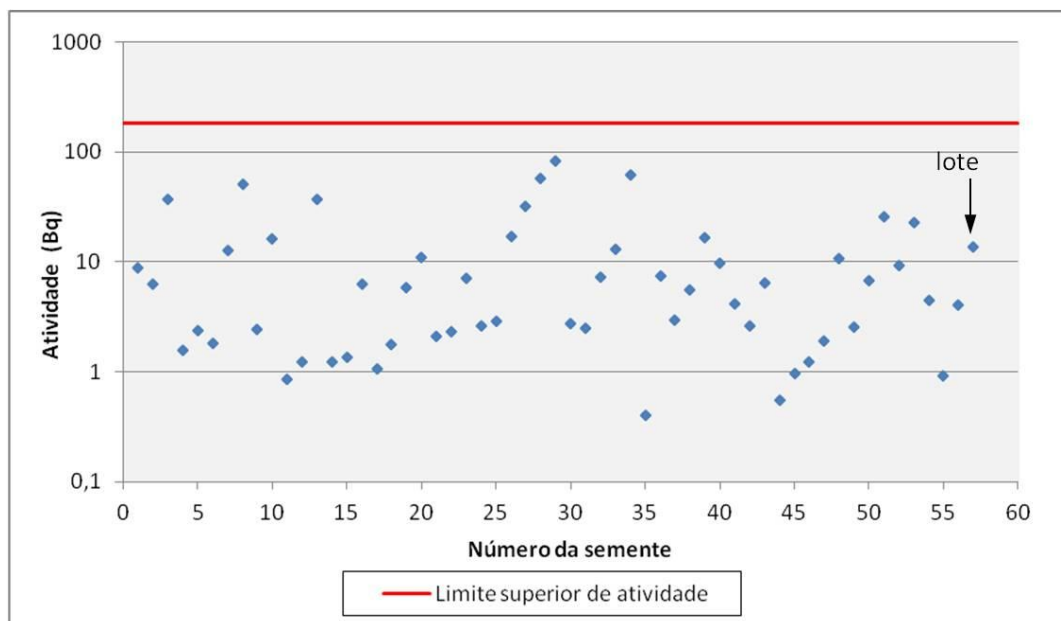


FIGURA 79 - Medidas de atividade na água de ensaio de estanqueidade após a quarta lavagem das sementes de iodo-125

A literatura recomenda pelo menos cinco lavagens consecutivas nas sementes de iodo-125 para eliminar uma possível contaminação superficial decorrente do processo de soldagem<sup>81</sup>. Porém, os resultados obtidos no ensaio de estanqueidade mostraram que quatro lavagens foram suficientes para a limpeza total e identificação de vazamentos nas sementes desse experimento.

### 5.9.2 Ensaios de validação das sementes de iodo-125

Após serem limpas e constatadas ausências de vazamentos, foram escolhidas para os ensaios de validação as sementes de iodo-125 com maior atividade.

As medidas de atividade da água do ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125 submetidas aos ensaios de temperatura, pressão externa e impacto são apresentadas na TAB. 20 e mostradas na FIG. 80.

TABELA 20 - Ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125 após serem submetidas aos ensaios de validação

Semente	Ensaio	Valor de atividade (Bq)
4	Impacto	0,333
9	Temperatura	1,850
19	Temperatura	10,767
28	Pressão externa	46,805
30	Pressão externa	2,738
37	Impacto	2,331

Observa-se na FIG. 80 que a maior medida de atividade obtida após os ensaios de validação ficou 3,9 vezes menor que o limite superior de 185 Bq (5 nCi), atendendo ao critério de aprovação estabelecido pela norma ISO 9978.

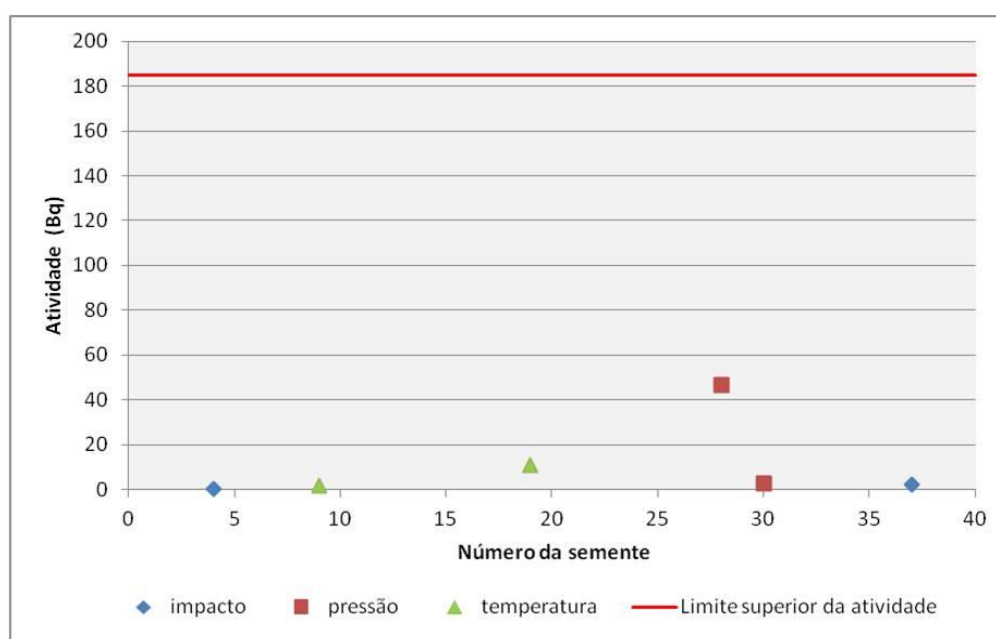


FIGURA 80 - Ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125 após serem submetidas aos ensaios de validação

Na FIG 81 é mostrado o aspecto da semente de iodo-125 após o ensaio de impacto.



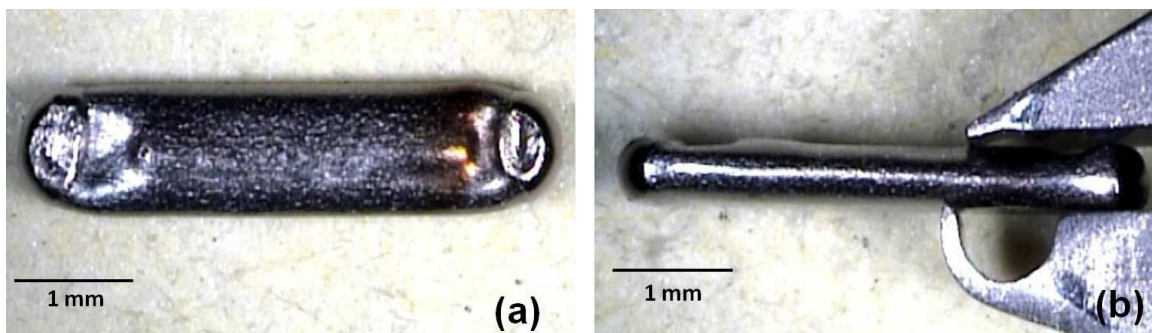


FIGURA 81 - Ensaio de impacto: (a) vista frontal e (b) vista lateral

Observa-se na FIG. 81 um esmagamento da semente de iodo-125 provocado pelo choque do martelo com a parede do tubo de titânio. Mesmo com a deformação em razão do impacto, o tubo de titânio soldado demonstrou ser eficiente, não apresentando vazamento.

Nas FIG. 82 e 83 são mostradas, respectivamente, as sementes de iodo-125 após os ensaios de pressão e temperatura.



FIGURA 82 - Ensaio de pressão



FIGURA 83 - Ensaio de temperatura

Como pode ser visto na FIG. 82 a semente não mostrou mudanças na sua aparência após o ensaio de pressão. Porém, a semente utilizada no ensaio de temperatura (FIG. 83) apresentou mudança de coloração em razão da

oxidação ocorrida durante o ensaio de alta temperatura (600 °C) a qual foi submetida.

Também pode ser observado na TAB. 20 que, mesmo após os ensaios de validação, todas as medidas de atividade ficaram abaixo do limite superior para aprovação (185 Bq). Esses resultados validam o procedimento e o sistema de soldagem das sementes de iodo-125 quanto aos requisitos estabelecidos na norma ISO 2919.

### **5.10 Ensaio metalográfico**

O ensaio metalográfico foi realizado por meio de microscopia óptica e MEV nas seções longitudinais dos tubos de titânio soldados.

Nas FIG. 84 e 85 são mostradas as duas extremidades do tubo de titânio soldado. Observa-se a ausência de poros na zona de fusão e a inexistência de trincas nos cantos entre a superfície interna do tubo de titânio e a zona de fusão. Além disso, pode ser observada a ausência de falhas de selagem ou vazio de contração de metal na zona de fusão.

Também pode ser observada uma variação na geometria interna da gota solidificada. Na primeira solda, a pressão interna no tubo provocada pelo gás de assistência (argônio) não interfere na formação da gota de metal fundido esférico, uma vez que o tubo de titânio ainda está aberto na outra extremidade. Porém, na segunda solda, a pressão interna gerada pelo gás de assistência aumenta em razão da outra extremidade já estar soldada, gerando uma concavidade na gota de metal fundido.

Essas pequenas variações na espessura da solda não interferem no tratamento que o paciente deve receber, pois a dose de radiação é transmitida na região da parede do tubo.



FIGURA 84 - Microscopia óptica da seção longitudinal da primeira solda no tubo de titânio



FIGURA 85 - Microscopia óptica da seção longitudinal da segunda solda no tubo de titânio

Nas FIG. 86 e 87 observa-se a microestrutura do titânio na região do metal de base e na zona de fusão. Verifica-se que o metal de base apresenta uma estrutura típica de grãos  $\alpha$  equiaxiais<sup>82,83</sup> enquanto que a zona de fusão exibe morfologia similar a agulhas finas, característica de microestrutura martensítica, que é típica dos processos de soldagem com alta velocidade de resfriamento<sup>84,85</sup>.

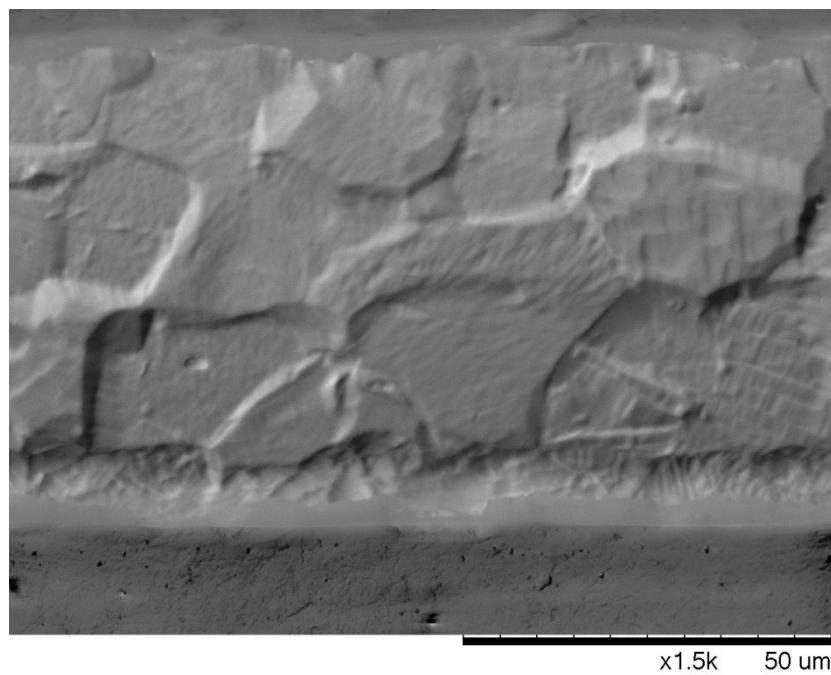


FIGURA 86 - MEV da microestrutura do metal de base (grãos equiaxiais)

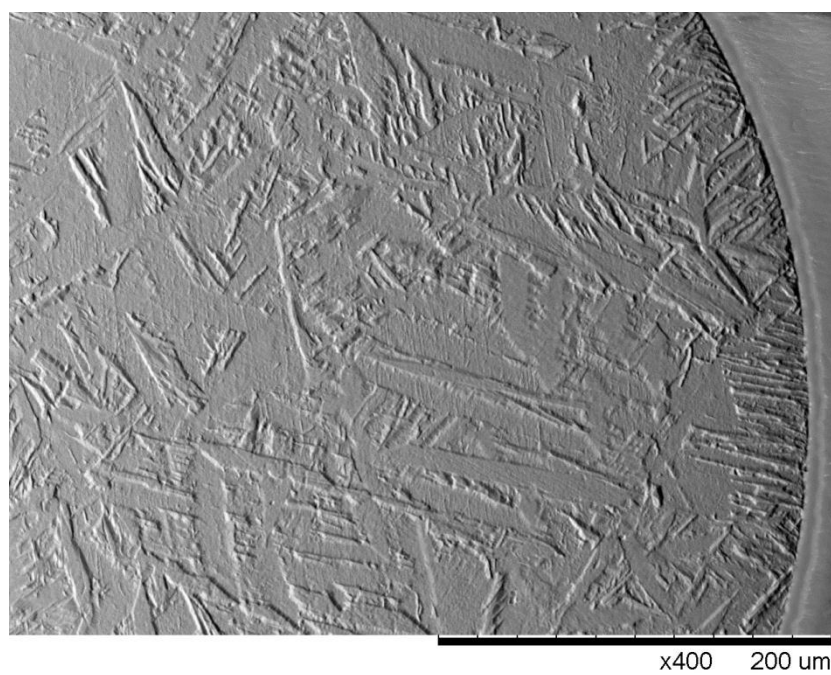


FIGURA 87 - MEV da microestrutura da zona de fusão (estrutura martensítica)

### 5.11 Ensaio de microdureza

Os ensaios de microdureza Vickers (HV) foram realizados na primeira e segunda solda de três amostras das sementes inativas. As marcações foram efetuadas nos sentidos longitudinal (série 1) e transversal (série 2) da zona de fusão (ZF), e também no sentido longitudinal ao comprimento do tubo de titânio (séries 3 e 4).

Na FIG. 88 são mostradas as localizações das marcações provenientes do ensaio de microdureza em contraste com a microestrutura formada na região da zona de fusão do tubo de titânio.

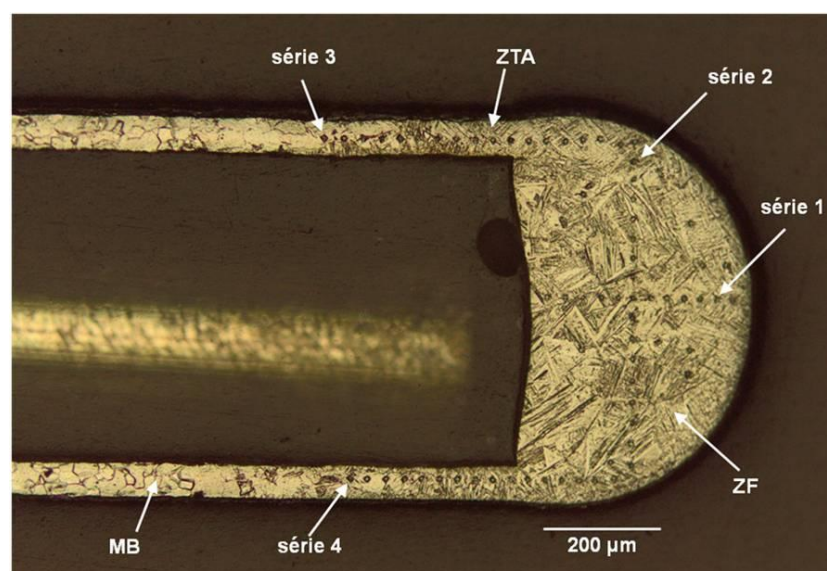


FIGURA 88 - Ensaio de microdureza Vickers (HV) nas regiões da ZF, MB e ZTA do tubo de titânio soldado pelo processo a laser Nd:YAG

Nas FIG. 89 e 90 são mostrados os perfis de microdureza Vickers (HV) obtidos nos sentidos longitudinal e transversal da zona de fusão (séries 1 e 2) na primeira e segunda solda, respectivamente, das amostras de sementes inativas.

Observa-se na FIG. 89 que as medidas de microdureza Vickers (HV) obtidas ao longo das seções longitudinais (série 1) e transversais (série 2) da zona de fusão (ZF) permaneceram constantes.

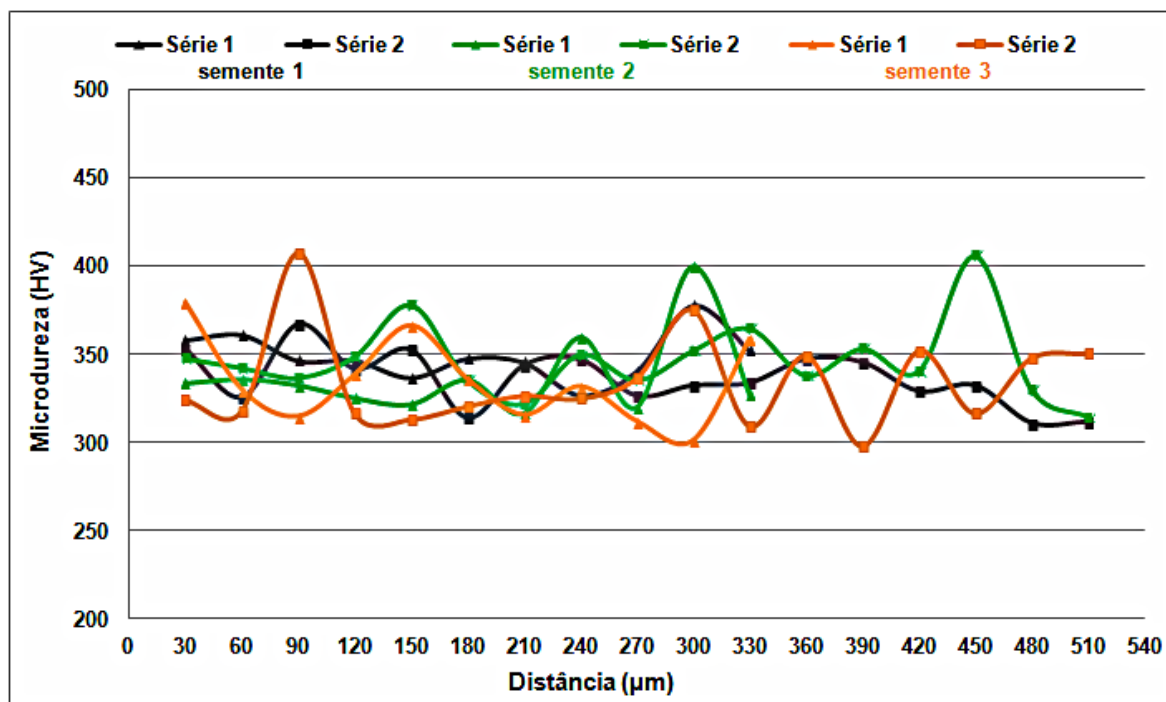


FIGURA 89 - Perfis de microdureza Vickers (HV) da zona de fusão (ZF) da primeira solda no tubo de titânio

Na FIG. 90 são apresentados os perfis de microdureza Vickers (HV) obtidos nos sentidos longitudinal e transversal da zona de fusão (séries 1 e 2) na segunda solda do tubo de titânio.

Semelhante ao encontrado na FIG. 89, esses perfis também permaneceram constantes, independente da geometria na ZF ser diferente da primeira solda.

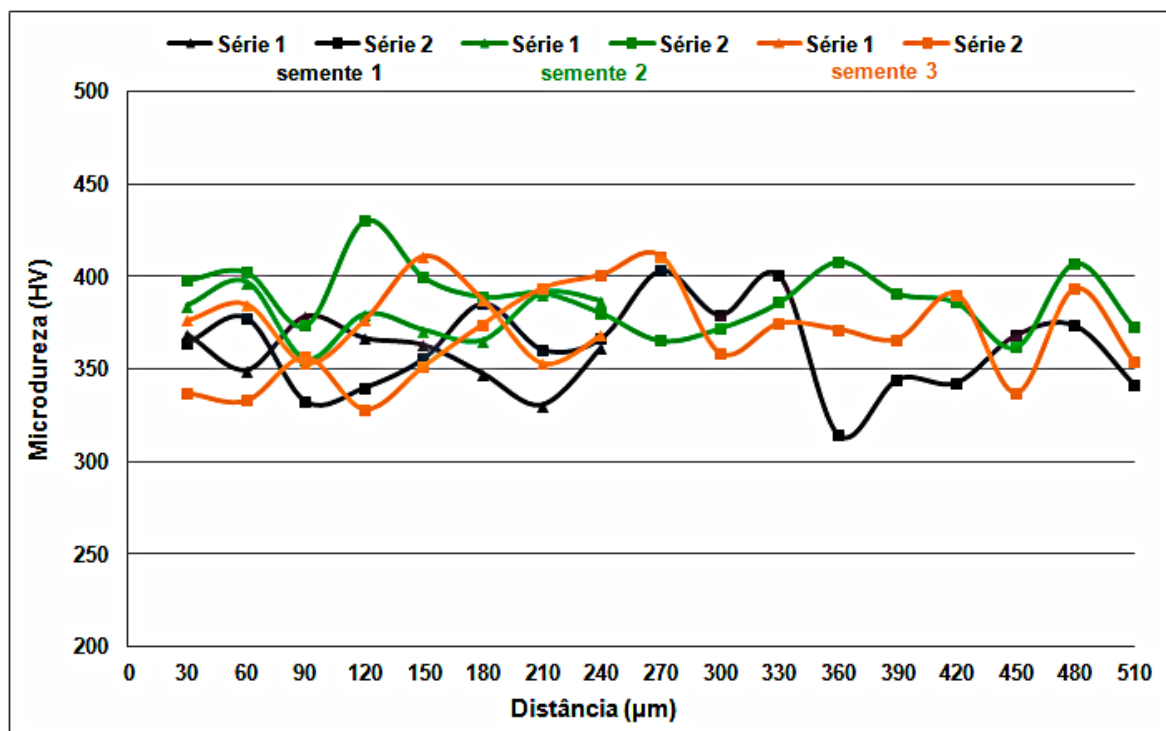


FIGURA 90 - Perfis de microdureza Vickers (HV) da zona de fusão (ZF) da segunda solda no tubo de titânio

As médias de microdureza Vickers (HV) das séries 1 e 2 e da média geral da primeira e segunda solda são apresentadas na TAB. 21.

TABELA 21 - Médias de microdureza Vickers (HV) das séries 1 e 2 e média geral na primeira e segunda solda

Semente	Solda	Série1	Série 2	Média Geral
		Dureza (HV)	Dureza (HV)	Dureza (HV)
1	1 <sup>a</sup>	348,77 ± 13,49	335,51 ± 15,90	340,91 ± 16,12
2	1 <sup>a</sup>	336,58 ± 23,80	347,24 ± 21,99	342,90 ± 22,92
3	1 <sup>a</sup>	335,01 ± 24,61	333,93 ± 27,89	334,37 ± 26,11
1	2 <sup>a</sup>	358,37 ± 15,17	358,96 ± 22,30	358,76 ± 19,86
2	2 <sup>a</sup>	378,66 ± 13,86	390,49 ± 17,03	386,55 ± 16,74
3	2 <sup>a</sup>	376,17 ± 18,97	363,78 ± 23,13	367,91 ± 22,23

Os valores expostos na TAB. 21 apresentam desvios padrões que variam de 3,66% a 8,35% em relação às médias das medidas de microdureza

Vickers (HV). Dessa maneira, indicam que a microdureza na ZF, nas duas soldas, encontrava-se homogênea para as 3 sementes.

Nas FIG. 91 e 92 são mostrados os perfis de microdureza Vickers (HV) obtidas no sentido longitudinal ao comprimento do tubo de titânio. Esses perfis foram obtidos por meio das medidas de microdureza nas paredes do tubo de titânio (séries 3 e 4), conforme indicado na FIG. 88. As medidas foram realizadas do MB até a ZF da primeira e da segunda soldas.

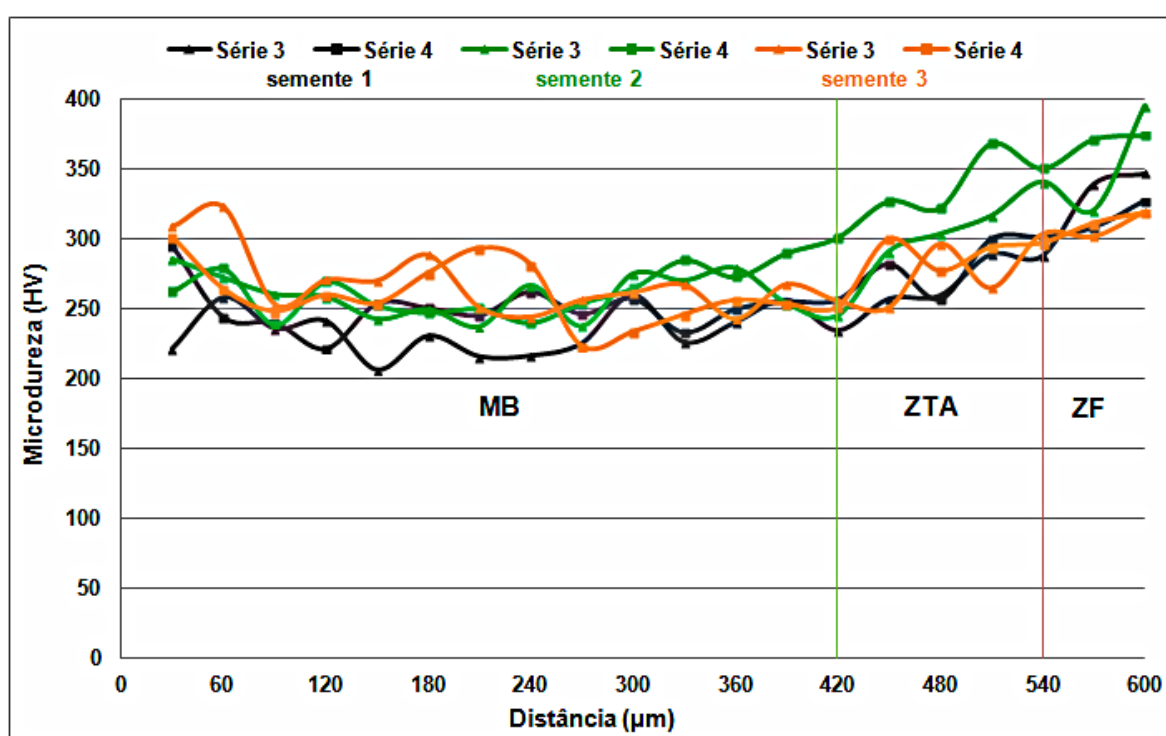


FIGURA 91 - Perfis de microdureza Vickers (HV) do metal de base até a zona de fusão (primeira solda)



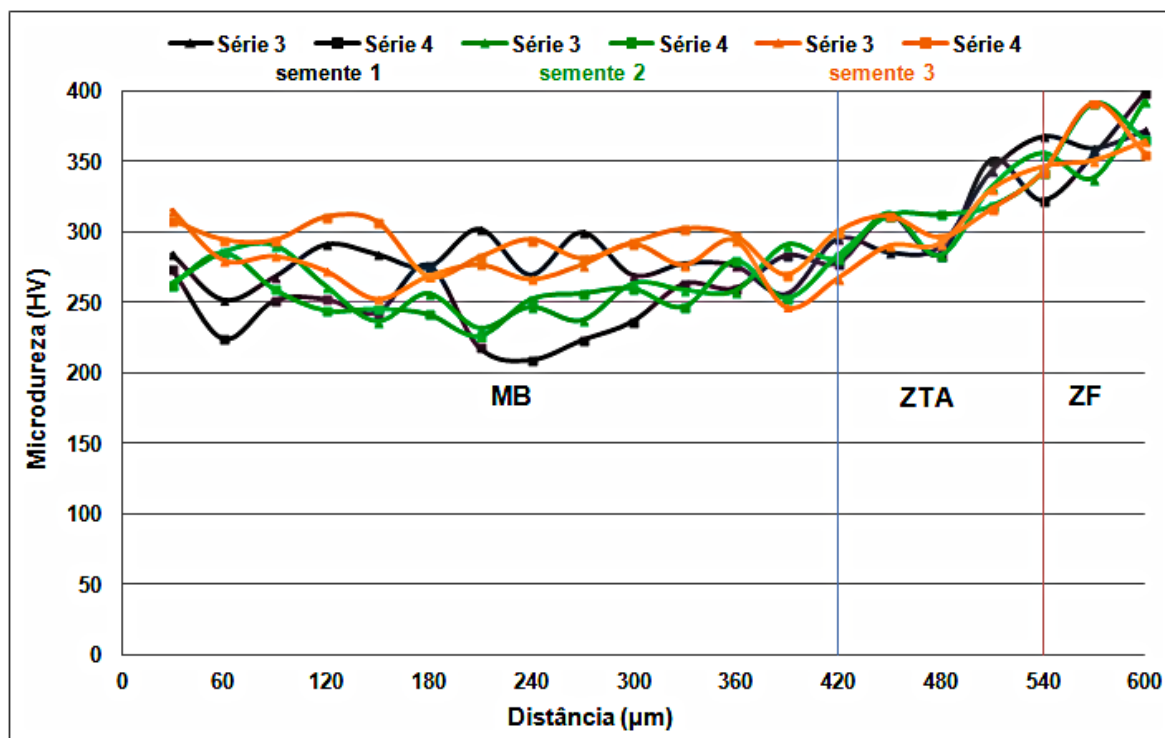


FIGURA 92 - Perfis de microdureza Vickers (HV) do metal de base até a zona de fusão (segunda solda)

Nas FIG. 91 e 92 observa-se que a dureza na zona de fusão (ZF) foi maior, diminuindo gradativamente na zona termicamente afetada (ZTA) e alcançando valores menores no metal de base (MB). Esse comportamento está em conformidade com a microestrutura martensítica formada na zona de fusão em razão da alta velocidade de resfriamento.

Também pode ser observado que as medidas de microdureza Vickers (HV) indicam uma pequena zona termicamente afetada, de aproximadamente 120 μm de comprimento, característico de processo de soldagem a laser.

### 5.12 Repetitividade do sistema de soldagem

Na TAB. 22 são apresentados os valores dos comprimentos finais das sementes confeccionadas para avaliar o procedimento de selagem e sistema de soldagem laser.

TABELA 22 - Variação do comprimento das sementes

Semente	Comprimento final (mm)	Semente	Comprimento final (mm)	Semente	Comprimento final (mm)
1	4,67	25	4,53	49	4,63
2	4,56	26	4,55	50	4,59
3	4,59	27	4,55	51	4,60
4	4,56	28	4,54	52	4,55
5	4,59	29	4,58	53	4,61
6	4,55	30	4,56	54	4,59
7	4,56	31	4,56	55	4,55
8	4,53	32	4,57	56	4,66
9	4,51	33	4,60	57	4,64
10	4,63	34	4,59	58	4,58
11	4,55	35	4,54	59	4,50
12	4,50	36	4,55	60	4,58
13	4,57	37	4,55	61	4,50
14	4,57	38	4,61	62	4,62
15	4,64	39	4,58	63	4,57
16	4,54	40	4,55	64	4,52
17	4,59	41	4,56	65	4,59
18	4,54	42	4,55	66	4,61
19	4,50	43	4,57	67	4,53
20	4,60	44	4,50	68	4,50
21	4,65	45	4,55	69	4,61
22	4,57	46	4,52	70	4,52
23	4,60	47	4,55		
24	4,63	48	4,55		

Verifica-se na TAB. 22 e FIG. 93 uma variação nas medidas de comprimento das sementes de iodo-125. No entanto, os valores obtidos se encontram dentro da faixa de 4,5 mm a 5,0 mm que é recomendada pela literatura<sup>26,28,30,35,36</sup>. As medidas de comprimento das sementes de iodo-125 apresentam um valor médio de 4,57 mm com desvio padrão de 0,04 mm.

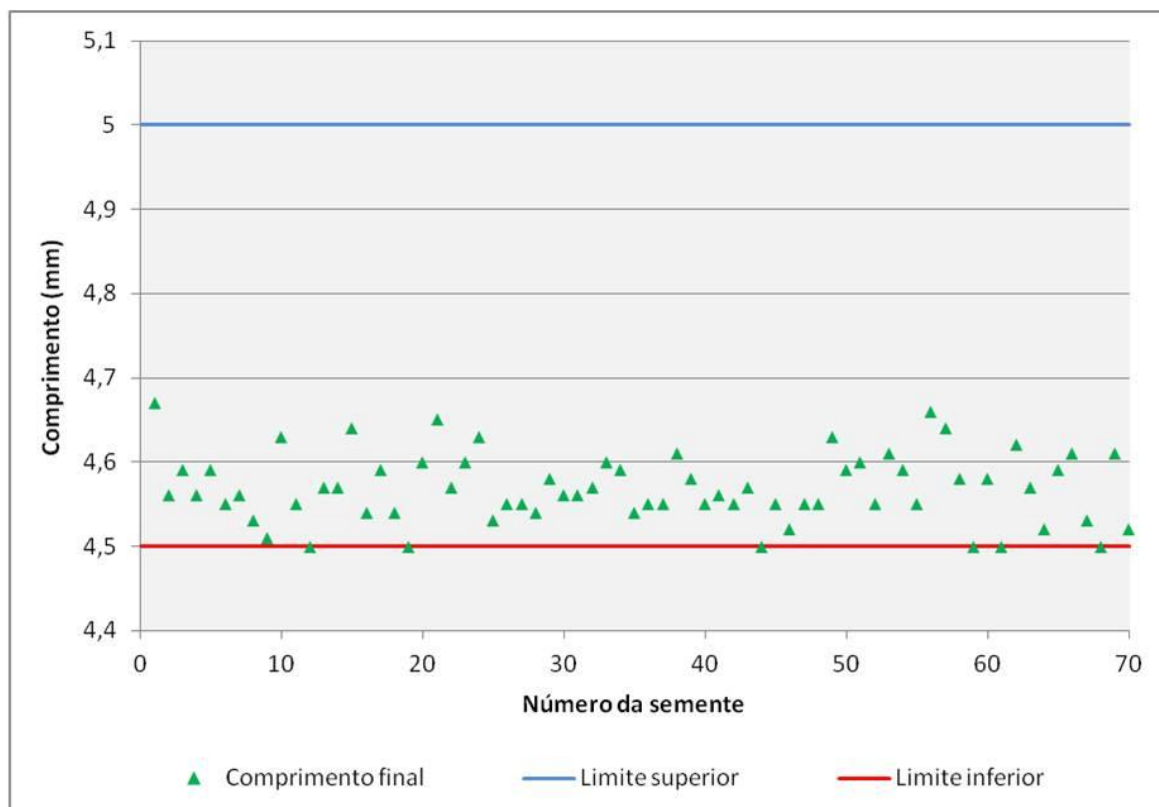


FIGURA 93 - Comprimento final das sementes

Verifica-se também na FIG. 93 que os valores concentram-se entre o limite inferior de 4,5 mm a 4,6 mm, indicando que os parâmetros utilizados para a soldagem a laser estavam corretos.

### 5.13 Eficiência do sistema de soldagem

A eficiência do sistema de soldagem foi determinada para a primeira e segunda soldas a laser Nd:YAG.

Porém, utilizou-se o sistema de soldagem desenvolvido neste trabalho somente na soldagem da primeira extremidade do tubo de titânio.

Pelo fato do Laboratório de Desenvolvimento e Produção de Fontes para Radioterapia e da *glove box* utilizada como blindagem radiológica do sistema de soldagem encontrarem-se em processo de licenciamento junto à CNEN, utilizaram-se na soldagem da segunda extremidade da semente, que continha o fio de prata com material radioativo (iodo-125) no seu interior, os mesmos

parâmetros de soldagem a laser obtidos, mas em um sistema de soldagem manual alternativo.

Na FIG. 94 são mostrados os valores de eficiência para a primeira e segunda soldas, e também a quantidade de tubos utilizados para cada solda.

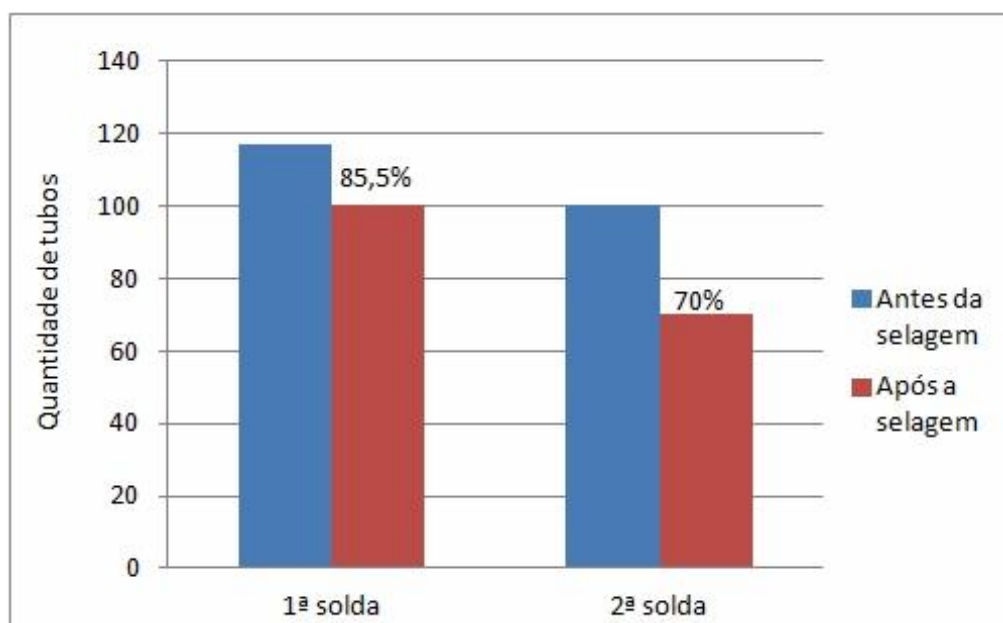


FIGURA 94 - Eficiência do sistema de soldagem

Para a primeira soldagem a laser automatizada utilizaram-se 117 tubos de titânio e obtiveram-se 100 tubos soldados considerados aprovados visualmente, o que representa 85,5% de eficiência. Na segunda soldagem, manual, utilizaram-se os 100 tubos de titânio obtidos na primeira e obtiveram-se 70 sementes consideradas aprovadas visualmente, o que representa 70% de eficiência. Essas eficiências são confirmadas com os resultados obtidos no ensaio de estanqueidade.

Espera-se que a eficiência global do sistema, após o licenciamento da instalação radiativa pela CNEN para trabalhar em rotina com material radioativo, alcance, pelo menos, a mesma eficiência obtida na primeira etapa de soldagem a laser Nd:YAG automatizada, o que corresponde a 85,5%.

## 6 CONCLUSÃO

Após ensaios dos modelos de dispositivos de soldagem, o dispositivo estático foi o mais apropriado para o desenvolvimento do sistema de soldagem a laser Nd:YAG, pois possibilitou um acabamento na região soldada semelhante à semente de iodo-125 importada, utilizada como referência para o desenvolvimento deste trabalho. O dispositivo dinâmico, ao contrário do dispositivo estático, produziu uma região soldada com acabamento irregular, apresentando variação na espessura da solda. Portanto, para se obter o mesmo resultado com o dispositivo dinâmico, o processo de produção nacional das sementes de iodo-125 tornar-se-ia inviável, em virtude do custo de desenvolvimento de um sistema automatizado com precisão suficiente para soldagem em movimento.

O sistema de soldagem a laser automatizado mostrou-se eficiente, pois apresentou 85,5% de eficiência para a primeira solda na produção das sementes de iodo-125, visto que o dispositivo de soldagem estático manual, utilizado para a segunda solda, alcançou somente 70% de eficiência. Esses valores de eficiência foram confirmados com os resultados obtidos no ensaio de estanqueidade.

O sistema de soldagem a laser desenvolvido mostrou-se eficaz em virtude do eficiente processo de automação utilizado, capaz de produzir sementes de iodo-125 com soldas com acabamentos similares às produzidas com o dispositivo estático e qualidade que atendem aos critérios dos severos ensaios determinados nas normas ISO 2919 e ISO 9978.

Os parâmetros utilizados na soldagem a laser Nd:YAG mostraram-se adequados, pois as sementes de iodo-125 produzidas não apresentaram poros, falhas de selagem ou vazios de contração de metal nas soldas, nem trincas nos cantos entre a superfície interna do tubo de titânio e a zona de fusão. Também, as medidas de microdureza Vickers (HV) indicaram uma zona termicamente afetada próxima de 120  $\mu\text{m}$ , característica do eficiente processo de soldagem a laser. Além disso, os comprimentos finais das sementes concentraram-se entre o limite

inferior de 4,5 mm a 4,6 mm, apresentando um valor médio de 4,57 mm com um desvio padrão de 0,04 mm, indicando uma excelente repetitividade.

A otimização dos valores dos parâmetros de soldagem utilizados durante os ensaios possibilitou a formação de uma região soldada que atende às precisas medidas dos aplicadores utilizados nos implantes das sementes de iodo-125 pelas clínicas e hospitais do País.

## TRABALHOS FUTUROS

- Produção piloto e em escala comercial das sementes de iodo-125;
- Licenciamento do Laboratório de Desenvolvimento e Produção de Fontes para Radioterapia, junto à CNEN;
- Pedido de patente, junto ao INPI;
- Publicações em outras revistas especializadas, além das da área de tecnologia nuclear; e
- Desenvolvimento das fontes seladas de irídio-192 de alta taxa de dose (HDR) para braquiterapia.

## ANEXOS

**ANEXO A Tabelas transcritas da norma ISO 2919 - *Radiological protection*  
 – *Sealed radioactive sources – General requirements and classification***

Classificação dos radionuclídeos quanto às suas radiotoxicidades

<b>Grupo A</b>				
<sup>227</sup> Ac	<sup>242</sup> Cm	<sup>231</sup> Pa	<sup>241</sup> Pu	<sup>228</sup> Th
<sup>241</sup> Am	<sup>243</sup> Cm	<sup>210</sup> Pb	<sup>242</sup> Pu	<sup>230</sup> Th
<sup>243</sup> Am	<sup>244</sup> Cm	<sup>210</sup> Po	<sup>223</sup> Ra	<sup>230</sup> U
<sup>249</sup> Cf	<sup>245</sup> Cm	<sup>238</sup> Pu	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> U
<sup>250</sup> Cf	<sup>246</sup> Cm	<sup>239</sup> Pu	<sup>228</sup> Ra	<sup>233</sup> U
<sup>252</sup> Cf	<sup>237</sup> Np	<sup>240</sup> Pu	<sup>227</sup> Th	<sup>234</sup> U

<b>Grupo B1</b>				
<sup>228</sup> Ac	<sup>36</sup> Cl	<sup>125</sup> I	<sup>212</sup> Pb	<sup>160</sup> Tb
<sup>110m</sup> Ag	<sup>56</sup> Co	<sup>126</sup> I	<sup>224</sup> Ra	<sup>127m</sup> Te
<sup>211</sup> At	<sup>60</sup> Co	<sup>131</sup> I	<sup>106</sup> Ru	<sup>129m</sup> Te
<sup>140</sup> Ba	<sup>134</sup> Cs	<sup>133</sup> I	<sup>124</sup> Sb	<sup>234</sup> Th
<sup>207</sup> Bi	<sup>137</sup> Cs	<sup>114m</sup> In	<sup>125</sup> Sb	<sup>204</sup> Tl
<sup>210</sup> Bi	<sup>152(13y)</sup> Eu	<sup>192</sup> Ir	<sup>46</sup> Sc	<sup>170</sup> Tm
<sup>249</sup> Bk	<sup>154</sup> Eu	<sup>54</sup> Mn	<sup>89</sup> Sr	<sup>236</sup> U
<sup>45</sup> Ca	<sup>181</sup> Hf	<sup>22</sup> Na	<sup>90</sup> Sr	<sup>91</sup> Y
<sup>115m</sup> Cd	<sup>124</sup> I	<sup>230</sup> Pa	<sup>182</sup> Ta	<sup>95</sup> Zr
<sup>144</sup> Ce				



---

**Grupo B2**


---

<sup>105</sup> Ag	<sup>64</sup> Cu	<sup>43</sup> K	<sup>143</sup> Pr	<sup>97</sup> Tc
<sup>111</sup> Ag	<sup>165</sup> Dy	<sup>85m</sup> Kr	<sup>191</sup> Pt	<sup>97m</sup> Tc
<sup>41</sup> Ar	<sup>166</sup> Dy	<sup>87</sup> Kr	<sup>193</sup> Pt	<sup>99</sup> Tc
<sup>73</sup> As	<sup>169</sup> Er	<sup>140</sup> La	<sup>197</sup> Pt	<sup>125m</sup> Te
<sup>74</sup> As	<sup>171</sup> Er	<sup>177</sup> Lu	<sup>86</sup> Rb	<sup>127</sup> Te
<sup>76</sup> As	<sup>152(9,2h)</sup> Eu	<sup>52</sup> Mn	<sup>183</sup> Re	<sup>129</sup> Te
<sup>77</sup> As	<sup>155</sup> Eu	<sup>56</sup> Mn	<sup>186</sup> Re	<sup>131m</sup> Te
<sup>196</sup> Au	<sup>18</sup> F	<sup>99</sup> Mo	<sup>188</sup> Re	<sup>132</sup> Te
<sup>198</sup> Au	<sup>52</sup> Fe	<sup>24</sup> Na	<sup>105</sup> Rh	<sup>231</sup> Th
<sup>199</sup> Au	<sup>55</sup> Fe	<sup>93m</sup> Nb	<sup>220</sup> Rn	<sup>200</sup> Tl
<sup>131</sup> Ba	<sup>59</sup> Fe	<sup>95</sup> Nb	<sup>222</sup> Rn	<sup>201</sup> Tl
<sup>7</sup> Be	<sup>67</sup> Ga	<sup>147</sup> Nd	<sup>97</sup> Ru	<sup>202</sup> Tl
<sup>206</sup> Bi	<sup>72</sup> Ga	<sup>149</sup> Nd	<sup>103</sup> Ru	<sup>171</sup> Tm
<sup>212</sup> Bi	<sup>153</sup> Gd	<sup>63</sup> Ni	<sup>105</sup> Ru	<sup>48</sup> V
<sup>82</sup> Br	<sup>159</sup> Gd	<sup>65</sup> Ni	<sup>35</sup> S	<sup>181</sup> W
<sup>14</sup> C	<sup>197</sup> Hg	<sup>239</sup> Np	<sup>122</sup> Sb	<sup>185</sup> W
<sup>47</sup> Ca	<sup>197m</sup> Hg	<sup>185</sup> Os	<sup>47</sup> Sc	<sup>187</sup> W
<sup>109</sup> Cd	<sup>203</sup> Hg	<sup>191</sup> Os	<sup>48</sup> Sc	<sup>135</sup> Xe
<sup>115</sup> Cd	<sup>166</sup> Ho	<sup>193</sup> Os	<sup>75</sup> Se	<sup>87</sup> Y
<sup>141</sup> Ce	<sup>130</sup> I	<sup>32</sup> P	<sup>31</sup> Si	<sup>90</sup> Y
<sup>143</sup> Ce	<sup>132</sup> I	<sup>233</sup> Pa	<sup>151</sup> Sm	<sup>92</sup> Y
<sup>38</sup> Cl	<sup>134</sup> I	<sup>203</sup> Pb	<sup>153</sup> Sm	<sup>93</sup> Y
<sup>57</sup> Co	<sup>135</sup> I	<sup>103</sup> Pd	<sup>113</sup> Sn	<sup>175</sup> Yb
<sup>58</sup> Co	<sup>115m</sup> In	<sup>109</sup> Pd	<sup>125</sup> Sn	<sup>65</sup> Zn
<sup>51</sup> Cr	<sup>190</sup> Ir	<sup>147</sup> Pm	<sup>85</sup> Sr	<sup>69m</sup> Zn
<sup>131</sup> Cs	<sup>194</sup> Ir	<sup>149</sup> Pm	<sup>91</sup> Sr	<sup>97</sup> Zr
<sup>136</sup> Cs	<sup>42</sup> K	<sup>142</sup> Pr	<sup>96</sup> Tc	

---

**Grupo C**


---

<sup>37</sup> Ar	<sup>111m</sup> In	<sup>193m</sup> Pt	<sup>96m</sup> Tc	natural U
<sup>58m</sup> Co	<sup>113m</sup> In	<sup>197m</sup> Pt	<sup>99m</sup> Tc	<sup>131m</sup> Xe
<sup>134m</sup> Cs	<sup>85</sup> Kr	<sup>87</sup> Rb	<sup>232</sup> Th	<sup>133</sup> Xe
<sup>135</sup> Cs	<sup>97</sup> Nb	<sup>187</sup> Re	natural Th	<sup>91m</sup> Y
<sup>71</sup> Ge	<sup>59</sup> Ni	<sup>103m</sup> Rh	<sup>235</sup> U	<sup>69</sup> Zn
<sup>3</sup> H	<sup>15</sup> O	<sup>147</sup> Sm	<sup>238</sup> U	<sup>93</sup> Zr
<sup>129</sup> I	<sup>191m</sup> Os	<sup>85m</sup> Sr		

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. **Câncer de próstata**. Disponível em: <<http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/tiposdecancer/site/home/prostata>>. Acesso em: 17 Fev. 2014.
- 2 - INSTITUTO NACIONAL DE CANCER. **ABC do câncer – Abordagens básicas para o controle do câncer**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2012.
- 3 - INSTITUTO NACIONAL DE CANCER. **Estimativas 2014: Incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro, 2014.
- 4 - SOMESSARI, S. L. **Automação do processo de soldagem a laser (Nd:YAG) para confecção das sementes de iodo-125 utilizadas em braquiterapia**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 5 - GRAY, J. R. **Prostate Brachytherapy: a new treatment option for prostate cancer patients**. Columbia: Galen Healthcare, 1998.
- 6 - MATIZKIN, H.; KAVER, I.; BRAMANT-SCHEREIBER, L.; AGAI, R.; MERIMSKY, O.; INBAR, M. Comparison between two Iodine-125 brachytherapy implants techniques: pre-planning and intra-operative by various dosimetry quality indicators. **Radiother. and Oncol.** v.68, p. 289-294, 2003.
- 7 - AMERICAN UROLOGICAL ASSOCIATION FOUNDATION. **The Management of localized prostate cancer – A patient guide**. 2008. Disponível em: <<https://www.auanet.org/common/pdf/education/clinical-guidance/Prostate-Cancer-PatientGuide.pdf>>. Acesso em 17 Fev. 2014.
- 8 - BLASKO, J. C. ; GRIMM, P. D. ; RAGDE, H. **Brachytherapy and organ preservation in the management of carcinoma of the prostate**. Semin. Rad. Oncol. , v. 3, n. 4, p. 240-249, 1993.
- 9 - ZEITUNI, C. A. **Dosimetria de fontes de iodo-125 aplicadas em braquiterapia**. 2008. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 10 - MEIGOONI, A. S. Dosimetric characterization of low energy brachytherapy sources: Measurements. In: WORLD CONGRESS ON MEDICAL PHYSICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, 2000, July 23-28, 2000, Chicago. **Proceedings...** Chicago, 2000.
- 11 - ROSTELATO, M. E. C. M.; RELA, P. R.; GASIGLIA, H. T.; LEPKI, V.; FEHER, A.; Iodine-125 seeds production for brachytherapy use. In: WORLD CONGRESS ON MEDICAL PHYSICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, July 23-28, 2000, Chicago. **Proceedings...** Chicago, 2000.

- 12 - BALTER, P. A. ; AGUIRRE, J. F. ; HANSON, W. F.; Practical considerations for the calibration of low energy/low activity seeds. In: WORLD CONGRESS ON MEDICAL PHYSICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, July 23-28, 2000, Chicago. **Proceedings...** Chicago, 2000.
- 13 - SOUZA, C. D. **Comparação entre métodos de fixação do iodo radioativo em substrato de prata para confecção de fontes utilizadas em braquiterapia.** 2012. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 14 - VICINI, F.; WHITE, J.; GUSTAFSON, G.; MATTER, R. C.; CLARKE, D. H.; EDMUNDSON, G.; MARTINEZ, A. The use of iodine-125 seeds as a substitute for iridium-192 seeds in temporary interstitial breast implants. **Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.**, v. 27, n. 3, p. 561-566, 1993.
- 15 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Unalloyed titanium for surgical implant applications.** 1977. (F 67 - 77).
- 16 - AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals handbook.** Properties and selection: stainless steels, tool materials and special-purpose metals. 9 ed., v. 3, p.374 – 375, 1980.
- 17 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Implantes para cirurgia – materiais metálicos parte 2: titânio puro,** Maio 2001. (NBR ISO 5832-2).
- 18 - WILLIAMSON, J. F.; On the dosimetric Influences of air-kerma strength calibration geometry and internal source structure for Pd-103 and I-125 brachytherapy sources. In: WORLD CONGRESS ON MEDICAL PHYSICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, July 23-28, 2000, Chicago. **Proceedings...** Chicago, 2000.
- 19 - FEHER, A.; CALVO, W. A. P.; ROSTELATO, M. E. C. M.; ZEITUNI, C. A.; SOMESSARI, S. L.; COSTA, O. L.; MOURA, J. A. MOURA, E. S.; SOUZA, C. D.; RELA, P. R. Development of an encapsulation method using plasma arc welding to produce iodine-125 seeds for brachytherapy. In 2011 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2011, October 24-28, 2011, Belo Horizonte, MG. **Proceedings...** Belo Horizonte, ABEN, 2011 DVD-ROM.
- 20 - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Radiological protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification.** Feb. 15, 2012. (ISO-2919).
- 21 - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Radiation protection - Sealed radioactive sources – Leakage test methods.** Feb.15, 1992. (ISO-9978).

- 22 - ROSTELATO, M. E. C. M.; **Estudo e desenvolvimento de uma nova metodologia para confecção de sementes de iodo-125 para aplicação em braquiterapia**. 2005. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 23 - FEHER, A.; **Desenvolvimento de procedimento utilizando processo de soldagem plasma para confecção de sementes de iodo-125**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 24 - SAXENA, S. K.; SHARMA, S. D.; KUMAR, Y.; MUTHE, K. P.; DASH, A.; VENKATESH, M. Development of a spherical iodine-125 brachytherapy seed for its application in the treatment of eye and prostate cancer, **Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals**, v. 23, n. 6, p. 807-818, 2008.
- 25 - LEE, H.K. Optimization of Nd:YAG laser welding parameters for sealing small titanium tube ends. **Materials Science and Engineering: A**, v. 415, p. 149-155, 2006.
- 26 - MINNESOTA MINING AND MANUFACTURING COMPANY. David O. Kubiawicz. **Radioactive iodine seed**. US Pat. n. 4.323.055, 6 Apr. 1982.
- 27 - THERAGENICS CORPORATION. John L. Russell Jr. **X-ray-emitting interstitial implants**. US Pat. n. 4.702.228, 27 Oct. 1987.
- 28 - THERAGENICS CORPORATION. John L. Russell Jr. ; David N. Coggins. **Capsule for interstitial implants**. US Pat. n. 4.784.116, 15 Nov. 1988.
- 29 - BEST INDUSTRIES, INC. Krishnan Suthanthiran. **Device and method for encapsulating radioactive materials**. US Pat. n. 4.891.165, 02 Jan. 1990.
- 30 - NORTH AMERICAN SCIENTIFIC. Michael L. Cutrer. **Laser welded brachytherapy source and method of making the same**. US Pat. n. 5.997.463, 07 Dez. 1999.
- 31 - ROBERT ROBERTSON. **Encapsulated low-energy brachytherapy sources**. US Pat. n. 6.099.458, 08 Aug. 2000.
- 32 - NYCOMED AMERSHAM PLC. David W. Bolenbaugh. **Brachytherapy seeds**. US Pat. n. 6.132.359, Oct. 2000.
- 33 - SYNTHEON, LLC. Charles R. Slater, Thomas O. Bales, Kevin W. Smith. **Radioactive therapeutic seed having selective marker configuration**. US Pat. n. 6.200.258, 13 Mar. 2001.
- 34 - BRISTOL-MYERS SQUIBB PHARMA COMPANY. Prahlad R. Singh, Gerald P. Tercho, Jack N. Wentz, Keith R. Olewine. **Radioactive seeds for brachytherapy and a process for making the same**. US Pat. n. 6.391.279, 21 May 2002.

- 35 - EUROTOPE ENTWICKLUNGSGESELLSCHAFT FUR ISTOPENTECHNOLOGIEN MBH. Jurgen Ziegler, Cláudia Muller, Gunnar Mann, Andre Hess. **Medical radioactive iodine-125 miniature radiation sources and methods of producing the same**. US Pat. n. 6.485.406, 26 Nov. 2002.
- 36 - NORTH AMERICAN SCIENTIFIC. Michael L. Cutrer. **Radioactive seed with multiple markers and method for using same**. US Pat. n. 6.503.186, 07 Jan.2003.
- 37 - AMERSHAM BIOSCIENCES. Michael Drobnik. **Carrier-free 103pd brachytherapy seeds**. US Pat. n. 2006/0052654 09 Mar. 2006.
- 38 - MARTINS, R.; **Radiação no tratamento do carcinoma**. 2008. Monografia – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados.
- 39 - VIEIRA, W.S.; **Desenvolvimento de um sistema dosimétrico postal para fontes de 192Ir utilizadas em braquiterapia**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 40 - REIS, L.P.; **Cálculo dos parâmetros dosimétricos de sementes de braquiterapia de iodo-125 para implantes permanentes em próstata através do método de Monte Carlo**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte.
- 41 - HAERTEL, M. E. M. **Estudo do protocolo de cálculos dosimétricos em braquiterapia com sementes implantáveis**. 2007. Monografia – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- 42 - HOSPITAL A.C. CAMARGO. **Tudo sobre o câncer**. Disponível em: <<http://www.accamargo.org.br/tudo-sobre-o-cancer/prostata/32/>>. Acesso em 14 Fev. 2013.
- 43 - LAWRENCE, D.; SONDHANUS, C.; FEDER, B.; SCALLON, J. Soft x-ray “seeds” for câncer therapy. **Radiology**, v. 86, n. 1:143, 1966.
- 44 - HILLARIS, B. S.; HENSCHKE, U. K.; HOLT, J. G. Clinical Experience with Long Half-Life and Low-Energy Encapsulated Radioactive Sources in Cancer Radiation Therapy. **Radiology**, v. 91, n. 6, p. 1163-1167, 1968.
- 45 - WILLIAMSON, J. F. Brachytherapy technology and physics practice since 1950: A half-century of progress. **Phys. Med. Biol.**, v. 51, n. 13, p. R303-R325, 2006.
- 46 - MOURA, E. S. **Estudo e levantamentos de parâmetros para dosimetria de fontes de iodo-125 aplicadas em braquiterapia**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

- 47 - ONCURA ONCOSEED™ IMC6711. **Instructions for the use of Iodine-125 Seeds for Medical Brachytherapy Treatments**. Arlington Heights, Illinois, 2005.
- 48 - RIVARD, M. J. Monte Carlo radiation dose simulations and dosimetric comparison of the model 6711 and 9011 125I brachytherapy sources. **Med. Phys.**, v. 36, n. 2, p. 486-491, 2009.
- 49 - PATEL, N. S.; CHIU-TSAU, S. T.; WILLIAMSON, J. F.; FAN, P.; DUCKWORTH, T.; SHASHA, D.; HARRISON, L. B. Thermoluminescent dosimetry of the Symmetra™ 125I model I25.S06 interstitial brachytherapy seed. **Med. Phys.**, v. 28, n. 8, p. 1761-1769, 2001.
- 50 - MEIGOONI, A. S.; YOE-SEIN, M. M.; AL-OTOOM, A. Y.; SOWARDS, K. T. Determination of the dosimetric characteristics of InterSource 125iodine brachytherapy source. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 56, n. 4, p. 589-599, 2002.
- 51 - ZUOFENG, L. Monte Carlo calculations of dosimetry parameters of the Urocor Prostaseed 125I source. **Med. Phys.**, v. 29, n.6, p.1029-1034, 2002.
- 52 - HEINTZ, B. H.; WALLACE, R. E. ; HEVEZI, J. M. Comparison of I-125 sources used for permanent interstitial implants. **Med. Phys.**, v. 28, n.4, p. 671–682, 2001.
- 53 - NAS TITANIO – **As curiosidades sobre a descoberta do metal titânio**. Disponível em: <<http://www.nastitanio.com.br/artigos/nas-titanio-e-as-curiosidades-sobre-a-descoberta-do-metal-titanio.php>>. Acesso em 02 Fev. 2013.
- 54 - TIBRASIL TITÂNIO – **O que é titânio**. Disponível em: <<http://www.titanio.com.br/news.htm>>. Acesso em 05 Fev. 2013.
- 55 - SILVA, D. R.; ROSSI, W.; BERRETTA, J. R.; VIEIRA JUNIOR, N. D.; LIMA, M. S.F. Soldagem a laser de ligas de titânio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4., 7-11 de maio, 2007, Estância de São Pedro, RS. **Anais...** RS: ABCM, 2007.
- 56 - MORCELLI, A. E.; **Estudo dos micromecanismos de deformação e fratura da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando-se técnicas de microscopia eletrônica e difração de raios X**. 2009. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 57 - BRAGA, N. A; FERREIRA, N. G; CAIRO, C. A. A. Obtenção de titânio metálico com porosidade controlada por metalurgia do pó. **Química Nova**, São Paulo, v.30, n.2, p. 450-457, 2007.

- 58 - BAUER, J. R. O.; **Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V fundidos em diferentes ambientes**. 2007. Tese (Doutorado) – Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 59 - AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals handbook**. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. 10 ed., v. 2, p.1770, 1990.
- 60 - DUVAIZEM, J. H.; **Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de liga à base de titânio-nióbio-zircônio processados com hidrogênio e metalurgia do pó para utilização em implantes dentários**. 2009. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 61 - MELLO, G. M. R.; LIMA, C. R. P.; CARAM, R.; Propriedades mecânicas de ligas de titânio tipo  $\beta$  desenvolvidas para próteses totais de quadril. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 15., 9-13 Nov., 2002, Natal **Anais...**Natal: UFRN, 2002. p. 2652-2658.
- 62 - MACEDO, H. R. A.; **Efeito do tratamento térmico do titânio sobre a proliferação de células pré-osteoblásticas**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- 63 - TIBRASIL TITÂNIO – **Noticiário técnico**. Disponível em: <<http://www.titanium.com.br/pr03.htm>>. Acesso em 17 Fev.2013.
- 64 - MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2009. cap 1, introdução à soldagem. p. 17-26.
- 65 - SILVA, F. L. T; Pequeno histórico da soldagem. In: Ziedas, S.; Tatini, I. **Soldagem**, São Paulo, SP.; Senai, 1997. cap. 1, p. 13-15.
- 66 - NERIS, M. M. **Soldagem dos metais**. Santos, SP. Universidade Santa Cecília, 2002. (material didático do curso de Soldagem dos Metais).
- 67 - MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2009. Cap. 19, processos de soldagem de alta intensidade – soldagem a laser. p. 307-312.
- 68 - UNITEK MIYACHI CORPORATION, **Nd:YAG Laser Welding Guide**, 2003. California, EUA.
- 69 - SILVA, D. R. **Análise da influência dos gases de proteção nas propriedades da solda a laser da liga Ti6Al4V**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

- 70 - MODENESI, P.; MARQUES, P. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte, MG. Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. (material didático do curso de Soldagem I).
- 71 - BERRETA, J R. **Solda laser em materiais dissimilares com laser de Nd:YAG pulsado**. 2005. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 72 - DULEY, W. W. **Laser welding**. Hoboken, NJ.: John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- 73 - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – **Processos de alta intensidade**. Disponível em: <<ftp://www.demec.ufmg.br/ema097solda/23-AltaIntens.pdf>>. Acesso em 15 Out. 2009.
- 74 - MODENESI, P.; **Terminologia usual de soldagem e símbolos de soldagem**. Belo Horizonte, MG. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. (material didático do curso de Soldagem I).
- 75 - RAMALHO, J. P.; JR, L. G. Soldagem a laser. In: Ziedas, S.; Tatini, I. **Soldagem**, São Paulo, SP.; Senai,. cap. 1, p. 271-281. 1997.
- 76 - RELA, P, R., Processo de soldagem com plasma. In: WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processo e metalurgia**. São Paulo, S.P.: Edgard Blucher (Ed.), 1992. v.1. p. 156-179.
- 77 - AMERICAN WELDING SOCIETY, **Welding handbook**. Welding Processes 8 ed.,. v. 2, cap. 22, p. 713–738, 1991.
- 78 - CALVO, W. A. P. **Avaliação e caracterização da liga de níquel tipo 600 após processo de soldagem por fusão tig, arco plasma e laser**. 1997. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 79 - DAWES, C. **Laser welding** – A practical guide. Cambridge, CB1.: Abington Publishing, 1992
- 80 - COLPAERT, H.; COSTA e SILVA, A. L. V. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 4 ed., São Paulo - SP: BLUCHER, 2008.
- 81 - MOURA, J. A. **Estudo e desenvolvimento de metodologia para controle de qualidade em processo de produção de fontes seladas de iodo-125 para aplicação em braquiterapia**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 82 - WISKOTT, H. W. A.; DOUMAS, T.; SCHERRER, S. S.; BELSER, U. C.; SUS, C. Mechanical and structural characteristics of commercially pure grade 2 Ti welds and solder joints. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 12, p. 719-725, 2001



- 83 - AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals handbook**. Metallography and Microstructures, 9 ed., v. 9, p.460–462, 1980.
- 84 - BEZERRA, R. M. Microestrutura e resistência à corrosão do Ti c.p. soldado a laser utilizando em prótese sobre implantes. **Eclét. Quím.**, São Paulo, 2013. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-46701999000100009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46701999000100009&lng=en&nrm=iso) . Acesso em: 02 Jul. 2013.
- 85 - PIVETA, A. C. G.; RICCI, W. A.; MONTANDON, A. A. B.; NAGLE, M. M. Análise metalográfica do titânio puro submetido à soldagem laser Nd: YAG e TIG. **Rev. Odontol. UNESP**, v. 42, n. 1, p. 1-6, 2013.