



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

PREPARAÇÃO DE FONTES DE IRÍDIO-192 PARA USO EM BRAQUITERAPIA

MARIA ELISA CHUERY MARTINS ROSTELATO

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Mestre em Ciências na
Área de Tecnologia Nuclear.**

**Orientadora:
Dra: Constância Pagano Gonçalves
da Silva**

São Paulo

1997

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

**PREPARAÇÃO DE FONTES DE IRÍDIO-192
PARA USO EM BRAQUITERAPIA**



MARIA ELISA CHUERY MARTINS ROSTELATO

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre
em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.**

**Orientadora:
Dra. Constância Pagano Gonçalves da Silva**

**São Paulo
1997**

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Dra. Constância Pagano G. da Silva, pela orientação, pela valiosa ajuda nas discussões e leituras do trabalho e todos os relatórios realizados para a CPG e pelo apoio moral, durante a realização do trabalho.

Em especial, ao Eng. Paulo Roberto Rela pela confiança depositada, que por ocasião da gestão do departamento de Aplicações na Engenharia e Indústria, confiou-me a gerência do projeto "Produção de fontes para uso em braquiterapia".

É com prazer que agradeço à Vladimir Lepki e Marcelo Racy, pela inestimável colaboração na realização da parte experimental do trabalho.

À José Carlos Cruz, pela proposição de um projeto para nacionalização dos fios de irídio para uso em braquiterapia.

À Maurício das Neves, pelo trabalho conjunto na produção de um fio nacional.

À Cláudio José Rostelato e Jair Rodrigues da Silva, meu muito obrigada pela valiosa ajuda na parte de informática.

Aos colegas, Ana Maria Figueiredo, Antonio Reis, Jair Mengatti, Mauro Dias, Vera Salvador, Wagner Dias, Wagner Nieto e Washington Lopes que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho, o meu agradecimento.

À equipe de operação do reator IEA-R1, pelo cuidado na realização das irradiações e facilidades oferecidas.

À equipe da oficina mecânica, pelo empenho e dedicação na construção da "hot cell".

À Adelino Pereira, Marco Antônio Fernandes, Paulo Cecílio, Paulo Eduardo Novaes, Nivaldo Trippe e todo o departamento de radioterapia do hospital A. C. Camargo, pelo apoio e empenho na realização da avaliação clínica dos fios de irídio.

À Degussa, Divisão de Metais, pela produção do fio de irídio no Brasil.

À Agência Internacional de Energia Atômica, particularmente, Ramendra Mukherjee, Paulo Barreto e Álvaro Bolanos, pela colaboração e apoio na realização deste projeto.

À Germaine Mandelsaft, pela ajuda na versão para o inglês.

À todos os colegas do Departamento de Aplicações na Engenharia e na Indústria, principalmente ao grupo de detectores, pelas discussões, sugestões e colaboração durante a execução do trabalho.

À direção do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, por me proporcionar esta oportunidade.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	OBJETIVO	8
1.3	FINALIDADE.....	8
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
1.5	TEORIA.....	10
	1.5.1 FONTES RADIOATIVAS PARA BRAQUITERAPIA.....	10
	1.5.2 FIOS DE IRÍDIO-PLATINA.....	12
1.6	EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO.....	15
2.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
2.1	FIO IMPORTADO	16
2.2	FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA.....	17
3.	PARTE EXPERIMENTAL.....	19
3.1	FIO IMPORTADO	19
3.2	FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA	27
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1	FIO IMPORTADO	30
	4.1.1 FIO BEST INDUSTRIES.....	30
	4.1.2 FIO HEREAUS.....	40
	4.1.3 FIO CIS - BIO.....	50
4.2	FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA	60

4.3	APLICAÇÃO CLÍNICA	75
4.4	ESTIMATIVA DE CUSTO	77
5.	CONCLUSÃO.....	78
5.1	FIO IMPORTADO	78
5.2	FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas dos radionuclídeos aplicados em braquiterapia e métodos de produção	11
Tabela 2 - Propriedades físicas dos radionuclídeos aplicados em braquiterapia	12
Tabela 3 - Perfil do fluxo de nêutrons térmicos	29
Tabela 4 - Principais constituintes do fio Best1	31
Tabela 5 - Determinação da homogeneidade do fio Best1 - medidas obtidas	33
Tabela 6 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 - frequência das medidas	35
Tabela 7 - Constituintes do núcleo do Fio Hereaus	41
Tabela 8 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medidas obtidas	43
Tabela 9 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - frequência das medidas	45
Tabela 10 - Constituintes do revestimento do fio Cis-Bio	50
Tabela 11 - Constituintes do núcleo do fio Cis-Bio	51
Tabela 12 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medidas obtidas	53
Tabela 13 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - frequência das medidas	55
Tabela 14 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medidas obtidas	63
Tabela 15 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - frequência das medidas	64

Tabela 16 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medidas obtidas	69
Tabela 17 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - frequência das medidas	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição percentual de diagnósticos de câncer primário no Brasil, segundo o sexo (1981-1985).	3
Figura 2 - Distribuição percentual das principais localizações de câncer primário diagnosticadas em homens e mulheres, entre 1981 e 1985, no Brasil	4
Figura 3 - Quantidade de clínicas de radioterapia no Brasil, distribuída por região	5
Figura 4 - Aplicação da técnica de braquiterapia em lesão de pescoço e cavidade oral.....	7
Figura 5 - Esquema de desintegração do irídio-192	13
Figura 6 - Desenho do fio irídio	14
Figura 7 - Reator IEA-R1 utilizado para ativação dos fios de irídio	20
Figura 8 - Dispositivo irradiação TEI-01	21
Figura 9 - Esquema do dispositivo de irradiação TEI-01.	22
Figura 10 - “Hot cell” para manipulação do fio radioativo - vista geral.....	25
Figura 11 - “Hot cell” para manipulação do fio radioativo - painel frontal	25
Figura 12 - “Hot cell” para manipulação do fio radioativo - vista interna.....	26
Figura 13 - “Hot cell” para manipulação do fio radioativo - controle de qualidade	26
Figura 14 - Fio Best1 - secção transversal da amostra.....	31
Figura 15 - Fio Best1 - secção longitudinal da amostra	32
Figura 16 - Determinação da homogeneidade da ativação fio Best1 - medidas obtidas.....	36

Figura 17 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 - medida 1	37
Figura 18 - Histograma da ativação do fio Best1 - medida 1	37
Figura 19 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 - medida 2	38
Figura 20 - Histograma da ativação do fio Best1 - medida 2	38
Figura 21 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 - medida 3	39
Figura 22 - Histograma da ativação do fio Best1 - medida 3	39
Figura 23 - Fio Hereaus - secção longitudinal da amostra.....	40
Figura 24 - Fio Hereaus - secção transversal da amostra	41
Figura 25 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medidas obtidas	46
Figura 26 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medida 1	47
Figura 27 - Histograma da ativação do fio Hereaus - medida 1	47
Figura 28 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medida 2	48
Figura 29 - Histograma da ativação do fio Hereaus - medida 2	48
Figura 30 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medida 3	49
Figura 31 - Histograma da ativação do fio Hereaus - medida 3	49
Figura 32 - Fio Cis-Bio - secção transversal da amostra	51
Figura 33 - Fio Cis-Bio - secção longitudinal da amostra.....	51
Figura 34 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medidas obtidas	56
Figura 35 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medida 1	57

Figura 36 - Histograma da ativação do fio Cis-Bio - medida 1	57
Figura 37 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medida 2	58
Figura 38 - Histograma da ativação do fio Cis-Bio - medida 2	58
Figura 39 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medida 3	59
Figura 40 - Histograma da ativação do fio Cis-Bio - medida 3	59
Figura 41 - Fio Nacional - secção transversal da amostra	61
Figura 42 - Fio Nacional - secção longitudinal da amostra	61
Figura 43 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medidas obtidas	65
Figura 44 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medida 1	66
Figura 45 - Histograma da ativação do fio nacional - medida 1	66
Figura 46 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medida 2	67
Figura 47 - Histograma da ativação do fio nacional - medida 2	67
Figura 48 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medida 3	68
Figura 49 - Histograma da ativação do fio nacional - medida 3	68
Figura 50 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medidas obtidas	71
Figura 51 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medida 1	72
Figura 52 - Histograma da ativação do fio Best 2 - medida 1	72
Figura 53 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medida 2	73
Figura 54 - Histograma da ativação do fio Best2 - medida 2	73

Figura 55 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medida 3	74
Figura 56 - Histograma da ativação do fio Best2 - medida 3	74
Figura 57 - Colocação dos fios na parte anterior da perna direita da paciente - Hospital A. C. Camargo	75
Figura 58 - Radiografia da parte anterior da perna da paciente com os fios da aplicação de braquiterapia.....	76
Figura 59 - Perna direita da paciente após a aplicação de braquiterapia.....	76

PREPARAÇÃO DE FONTES DE IRÍDIO-192 PARA USO EM BRAQUITERAPIA

Maria Elisa Chuery Martins Rostelato

RESUMO

A cada ano aumenta a incidência de câncer no Brasil, constituindo-se em uma das mais importantes causas de mortalidade. Parte dos pacientes são tratados com braquiterapia, uma forma de tratamento de lesões que se baseia na inserção de fontes, no caso fios de irídio ativados, em tumores. Nesse processo, a radiação ionizante destrói com eficiência as células malignas. Estes fios apresentam um núcleo de liga irídio-platina (20-30/70-80) de 0,1mm de diâmetro revestido ou encapsulado em um tubo de platina. A técnica consiste em irradiar o fio no reator nuclear com fluxo de nêutrons adequados para produzir o irídio-192. A atividade linear é de 1mCi/cm a 4mCi/cm e a característica básica requerida é a homogeneidade da ativação ao longo do fio. Este não deve apresentar uma dispersão superior a 5% em um fio de 50cm de comprimento e 0,5mm ou 0,3mm de diâmetro. Foram executados vários experimentos para definirem-se os parâmetros de ativação.

Fios de diversas procedências foram analisados, concluindo-se que os provindos dos Estados Unidos da América e da França estavam adequados para o uso em braquiterapia. Enviados a hospitais especializados, foram aplicados em pacientes, com sucesso. Considerando que a finalidade primordial do trabalho é tornar o produto acessível no Brasil, a um custo mais adequado à realidade brasileira, o IPEN está promovendo a nacionalização da preparação de fontes de irídio-192, para uso em braquiterapia.

IRIDIUM-192 SOURCES PRODUCTION FOR BRACHYTHERAPY USE

Maria Elisa Chuery Martins Rostelato

ABSTRACT

The incidence of cancer increases every year in Brazil and turns out to be one of the most important causes of mortality. Some of the patients are treated with brachytherapy, a form of lesion treatment which is based on the insertion of sources into tumors, in this particular case, activated iridium wires. During this process, the ionizing radiation efficiently destroys the malignant cells. These iridium wires have a nucleus made out of an iridium-platinum alloy 20-30/70-80 of 0,1mm in diameter either coated by platinum or encased in a platinum tube. The technique consists in irradiating the wire in the reactor neutron flux in order to produce iridium-192. The linear activity goes from 1mCi/cm to 4mCi/cm and the basic characteristic, which is required, is the homogeneity of the activation along the wire. It should not present a dispersion exceeding 5% on a wire measuring 50cm in length, 0.5mm or 0.3mm in diameter. Several experiments were carried out in order to define the activation parameters.

Wires from different origins were analyzed. It was concluded that United States of America and France wires were found to be perfectly adequate for brachytherapy purposes and have therefore been sent to specialized hospitals and successfully applied to cancer patients. Considering that the major purpose of this work is to make this product more accessible in Brazil, at a cost reflecting the Brazilian reality, the IPEN is promoting the preparation of iridium-192 sources to be used in brachytherapy, on a national level.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O Brasil apresenta hoje um quadro na área de saúde pública em que se combinam doenças ligadas à pobreza, típicas dos países em desenvolvimento, e doenças crônico-degenerativas, características dos países desenvolvidos. Esta situação reflete as contradições do processo de desenvolvimento do país.

Analisando-se as taxas de mortalidade das macrorregiões do Brasil, o câncer é encontrado em diferentes posições, mas sempre incluído entre as quatro primeiras causas de morte, ao lado das doenças do aparelho circulatório, causas externas, doenças infecciosas e parasitárias, e afecções do período perinatal^{1,2}.

Desta forma, o câncer é um dos principais problemas de saúde pública, constituindo-se numa significativa causa de mortalidade. De acordo com estatísticas do Ministério da Saúde, em 1986, o câncer foi a doença responsável pela taxa de 15% do total de mortalidade de pessoas na faixa etária entre 15 e 64 anos, afetando a população economicamente ativa e, conseqüentemente, a economia brasileira³.

A expectativa de vida ao nascer, no Brasil, vem aumentando progressivamente neste século. Entre 1960 e 1980, a população da chamada

terceira idade (65 e mais anos) duplicou em decorrência da redução de óbitos por doenças infecciosas. Assim, progressivamente, aumenta o número de pessoas que passam a compor as faixas etárias que apresentam risco de desenvolver câncer¹.

A urbanização, fenômeno que frequentemente caminha ao lado do processo de industrialização, tem sido relacionada com uma maior ocorrência de câncer¹. Verhasselt⁴ afirma que, em escala mundial, tem sido identificada forte correlação entre mortalidade por câncer e o nível de urbanização. No Brasil, é justamente nas regiões mais industrializadas que se verificam as maiores taxas de mortalidade por câncer.

As tendências demográficas e epidemiológicas sugerem que, se mantidas as condições atuais, em 30 anos, mais de 85% dos brasileiros viverão em áreas urbanas. Os menores de 14 anos constituirão cerca de 32% da população até o ano 2000, enquanto que o número de idosos terá dobrado e 12% da população terá 60 ou mais anos de idade. As doenças cardiovasculares, as neoplasias malignas e as causas externas serão responsáveis por cerca de 65% dos óbitos¹.

Embora não sejam comumente discutidas, as repercussões de ordem econômica e social do câncer são de grande monta. Para Rice e Hodgson⁵, as implicações para os doentes, a família e a sociedade em geral são a dor, o sofrimento, a incapacidade e a morte. Representam milhões de anos de vida perdidos, vasta quantidade de recursos destinados à detecção, diagnóstico e tratamento e, ainda, recursos econômicos perdidos anualmente pela redução do potencial de trabalho humano.

As figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, o percentual de diagnósticos de câncer segundo o sexo e o percentual das principais localizações de câncer em homens e mulheres³.

Brasil
1981 - 1985

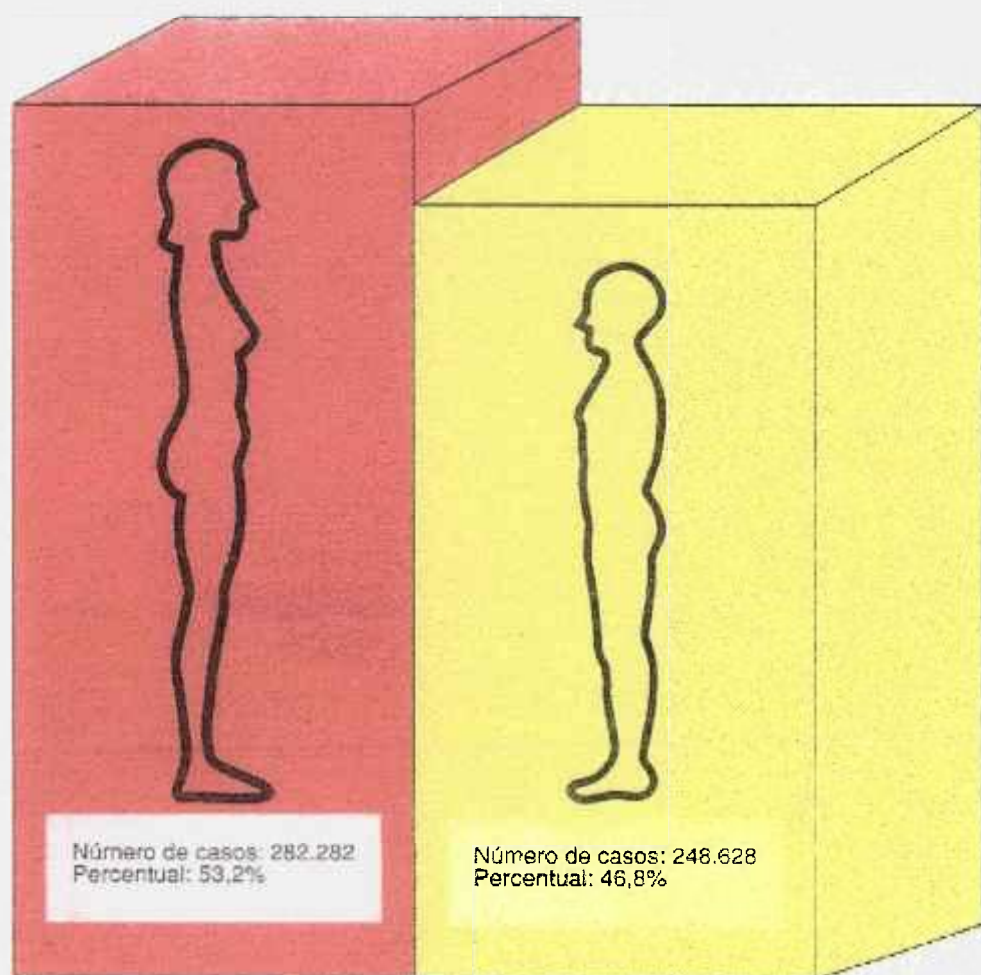


Figura 1 - Distribuição percentual de diagnósticos de câncer primário no Brasil, segundo o sexo (1981-1985).

Fonte: Ministério da Saúde - INCa

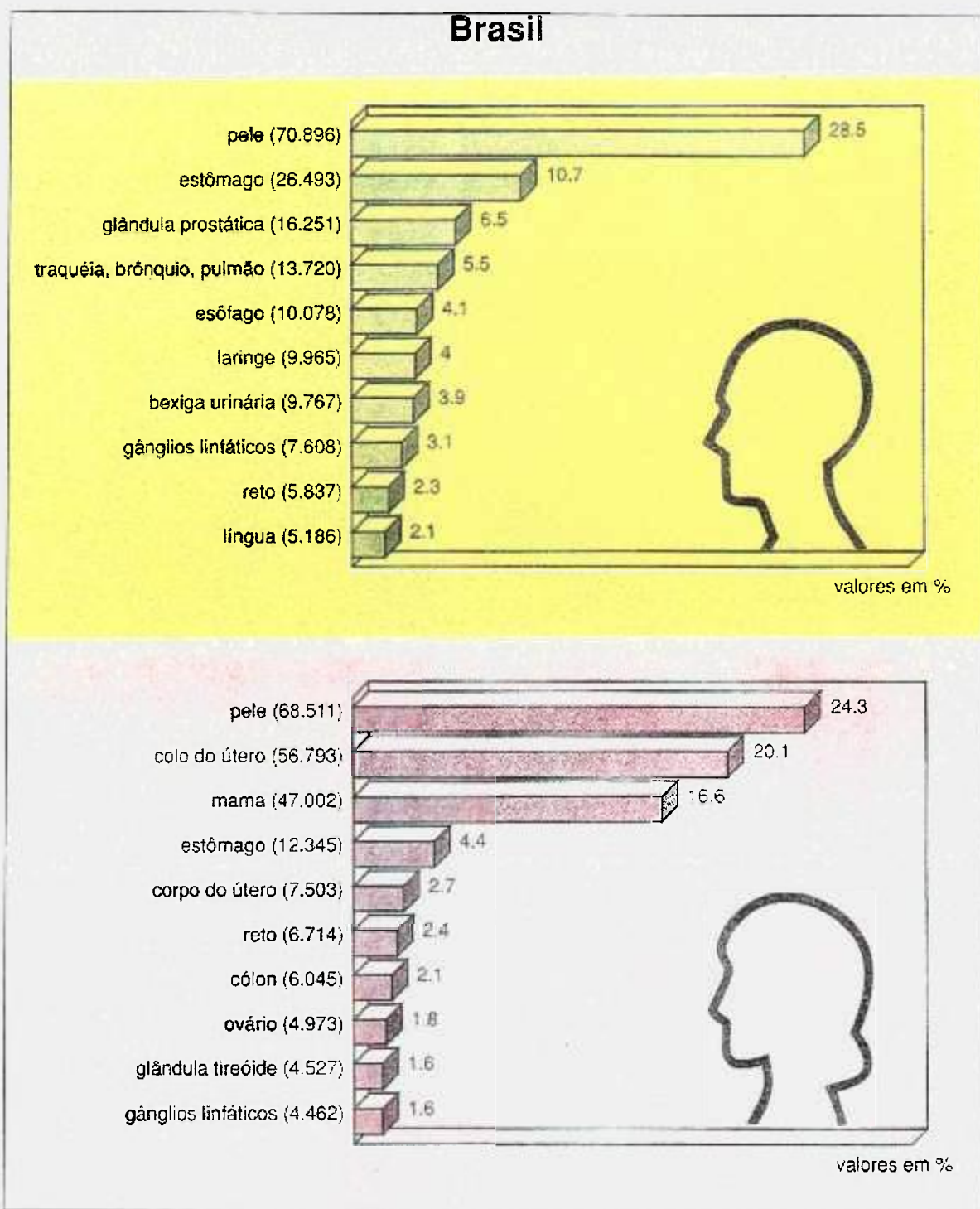


Figura 2 - Distribuição percentual das principais localizações de câncer primário diagnosticadas em homens e mulheres, entre 1981 e 1985, no Brasil

Obs: Os números entre parentêses referem-se ao número absoluto de casos.

Fonte: Ministério da Saúde - INCa

Em 1995, a mortalidade e a incidência de câncer estimadas para o Brasil foram de 91.800 óbitos e 343.400 casos novos¹.

Muitos recursos são destinados ao tratamento do câncer. No Brasil, a região sudeste concentra as clínicas de radioterapia, conforme mostra a figura 3.

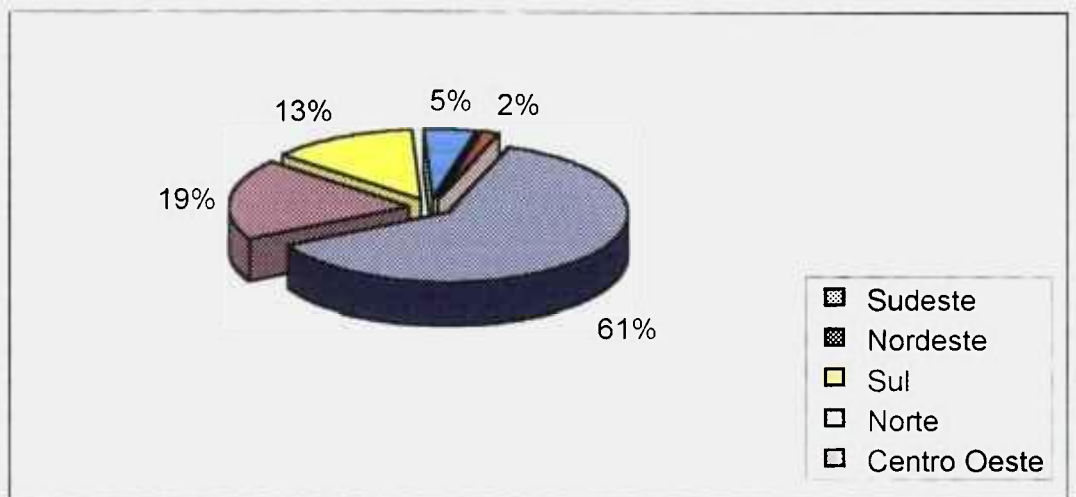


Figura 3 - Quantidade de clínicas de radioterapia no Brasil, distribuída por região

Fonte: Hospital das Clínicas - USP

Segundo dados da Organização Mundial da Saúde (O.M.S.), dois terços (75%) dos pacientes com neoplasia necessitam de tratamento radioterápico em uma ou mais fases da evolução de sua moléstia⁶.

A cada ano aumenta o número de casos de câncer no país, e parte destes pacientes são tratados com braquiterapia usando fontes de irídio-192 na forma de fios⁷.

A braquiterapia, irradiação a curta distância, é uma modalidade de radioterapia usada no tratamento de lesões que se baseia na inserção de fontes, no caso, fios de irídio ativados, na região do tecido atingida pelo tumor. Neste processo, a radiação ionizante destrói as células malignas, com eficiência⁸.

A radioterapia em todas as suas formas depende da absorção das radiações ionizantes pela massa dos tecidos vivos. Em consequência dessa absorção, sobrevêm modificações que podem danificar ou levar à morte as células atingidas⁹.

Todas as células normais ou anormais absorvem a radiação, porém, a intensidade da resposta varia, de acordo com o respectivo tipo histológico. Esta resposta diferencial é chamada radio-sensibilidade. As células malignas são, geralmente, mais sensíveis à radiação do que o tecido normal e, neste fato, está baseada a radioterapia¹⁰

O tratamento com braquiterapia pode ser realizado de forma singular ou associado a outras técnicas. Sua finalidade primordial é o reforço de dose nas áreas mais comprometidas pelos tumores. Os implantes são feitos para vários tipos de tumores, a saber: cavidade oral, pescoço, colo do útero, mama, cérebro, pele, próstata, olho e outros.

Dois exemplos da aplicação da braquiterapia são exibidos pela figura 4.

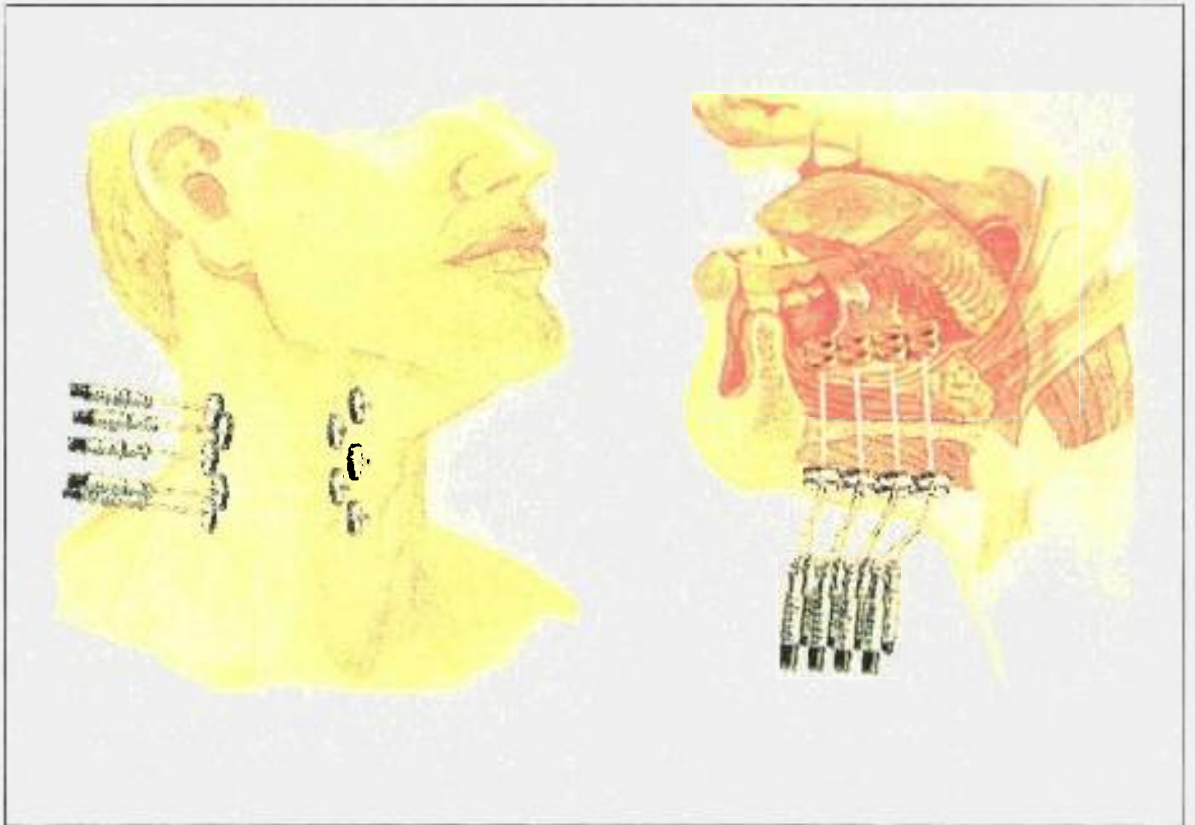


Figura 4 - Aplicação da técnica de braquiterapia em lesão de pescoço e cavidade oral

Fonte: Catálogo Microselectrom da empresa Nucletron

Entre as vantagens específicas da braquiterapia sobre a irradiação externa pode-se ressaltar a capacidade de dar forma à distribuição da isodose em lesões irregulares e a acentuada diminuição da dose fora da área de implante (poupando tecidos normais)^{6,11}.

Nos últimos anos, o irídio-192 tornou-se um radionuclídeo de crescente importância nos tratamentos com braquiterapia. Dentre as vantagens deste radionuclídeo sobre os outros utilizados em braquiterapia encontram-se: o intervalo de energia dos seus fótons é de utilidade terapêutica, a alta atividade específica, a flexibilidade mecânica que facilita a produção de fios, "hairpins", "pellets"¹²

1.2 OBJETIVO

Implementar um laboratório para produção de fontes de irídio-192, compreendendo a determinação de um método de ativação dos fios e a construção de uma “hot cell” para manipulação, controle de qualidade e embalagem dos fios. Não foi encontrada literatura a respeito do método de ativação dos fios para uso em braquiterapia.

1.3 FINALIDADE

Capacitar o país na produção de fios de irídio para aplicação em braquiterapia. O fio de irídio radioativo atualmente utilizado provém de importação e tem custo alto para o país, o que dificulta o acesso à camada populacional mais carente. O trabalho busca obter o produto a um custo menor, tornando-o acessível às clínicas e hospitais, com preços mais adequados à realidade brasileira.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Historicamente, logo após a descoberta da radioatividade natural do Urânio por Becquerel, em 1896, e a do rádio, pelo casal Curie, em 1898, iniciaram-se os estudos e as atividades no sentido de empregá-los no tratamento do câncer¹³. Decorridos três anos da descoberta do rádio, os primeiros pacientes

foram tratados usando pequenas quantidades da substância implantada em seus tumores. A idéia do uso do rádio para propósitos médicos veio da observação feita por Pierre Curie, que atribuiu a cura de uma lesão de pele de Henri Becquerel aos efeitos biológicos da radiação nos tecidos, causados por um tubo de sal de rádio que o mesmo carregava no bolso do colete. Como resultado desta observação, Pierre Curie ofereceu um pequeno tubo de rádio ao Dr. Danlos em Paris e sugeriu que ele usasse no tratamento de tumores. Desta forma, iniciou-se a prática da braquiterapia^{14,15}.

Nos anos seguintes, os trabalhos se multiplicaram, novas aplicações terapêuticas foram descobertas e o uso da braquiterapia se ampliou, principalmente, graças ao tratamento do câncer ginecológico¹⁶

Em 1905, Abble realizou a primeira aplicação intersticial nos Estados Unidos e no mesmo ano foi fundado o "Hold Radium Institute" por Fricke em Manchester. Em Paris, no ano de 1906, Wickham e Degrais criaram o "Laboratoire du Radium"¹⁷. O "Marie Curie Hospital" foi criado em Londres, em 1911 e o "Memorial Center" em New York, em 1913¹³.

O termo braquiterapia foi proposto, pela primeira vez, por Forsell, em 1931¹⁸.

O rádio-226 foi largamente utilizado para controle local de tumores até a metade deste século¹⁹. Com o desenvolvimento dos reatores nucleares durante a segunda guerra mundial, tornou-se viável, em escala industrial, a produção de fontes radioativas artificiais, a saber: cobalto-60, tântalo-182, ouro-198, céσιο-137, irídio-192 e iodo-125, entre as mais utilizadas em braquiterapia^{8,20}.

Novas técnicas de aplicação e de dosimetria com irídio-192 e céσιο-137 tiveram expressivo desenvolvimento a partir de 1955, no Instituto "Gustave Roussy", França, com Bernard Pierquin, Daniel Chassagne e Andrée Dutreix²¹. Pierquin e seus colaboradores implementaram o sistema de dosimetria de Paris para ser usado com fontes de Ir-192 na forma de fios^{22,23,24}.

Desde 1979, os implantes com agulhas de rádio vem sendo substituídos pela técnica dos fios de irídio²⁵.

1.5 TEORIA

1.5.1 FONTES RADIOATIVAS PARA BRAQUITERAPIA

Um radioisótopo, para ser usado em braquiterapia, deve ter as seguintes propriedades¹⁴ :

- ◆ apresentar uma emissão de raios γ adequada, ou seja, com energia suficientemente alta para evitar aumento da deposição de energia no osso por efeito fotoelétrico e para minimizar o espalhamento. Além disso, a energia deve ser apropriada para minimizar as necessidades de proteção radiológica. Para satisfazer todas estas exigências a energia "ótima" de emissão está no intervalo de 0,2MeV a 0,4MeV;
- ◆ a meia-vida deve ser tal que a correção por decaimento durante o tratamento seja mínima;
- ◆ a emissão de partículas carregadas deve ser ausente ou efetivamente blindadas;

- ◆ não deve produzir elementos gasosos em sua desintegração;
- ◆ apresentar alta atividade específica;
- ◆ estar disponível em forma insolúvel e não tóxica;
- ◆ o material não deve ser na forma de pó;
- ◆ é desejável que o material possa assumir várias formas e tamanhos, incluindo tubos rígidos, agulhas, esferas e fios flexíveis; e
- ◆ não apresentar dano durante a esterilização.

As propriedades físicas dos radionuclídeos usados em braquiterapia, bem como sua forma de produção, são mostrados na tabela 1 e 2 ^{8,14}.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos radionuclídeos aplicados em braquiterapia e métodos de produção

Nuclídeo	Meia-vida	Secção de choque para nêutrons térmicos (barns)	Método de produção	Forma da fonte
²²⁶ Ra	1600 anos	-	ocorrência natural	tubos e agulhas
⁶⁰ Co	5,2 anos	37	n-γ	placas
¹³⁷ Cs	30 anos	-	produto de fissão	tubos e agulhas
¹⁹⁸ Au	2,7 dias	99	n-γ	sementes
¹⁸² Ta	115 dias	22	n-γ	fios
¹⁹² Ir	74,2 dias	910	n-γ	fios e sementes
¹²⁵ I	60,1 dias	100	produto de decaimento	sementes

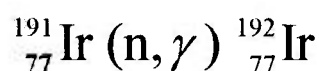
Tabela 2 - Propriedades físicas dos radionuclídeos aplicados em braquiterapia

Nuclídeo	Tipo de desintegração	Energia máxima dos β . (MeV)	Energia média dos γ . (MeV)	Energia máxima dos γ . (MeV)
^{226}Ra	α, β, γ	3,27	0,78	2,45
^{60}Co	β, γ	1,49	1,25	1,33
^{137}Cs	β, γ	1,17	0,66	0,66
^{198}Au	β, γ	0,96	0,42	0,68
^{182}Ta	β, γ	0,59	0,70	1,29
^{192}Ir	β, γ	0,67	0,37	1,06
^{125}I	E.C.com raios- X, γ	-	0,028	0,035

1.5.2 FIOS DE IRÍDIO-PLATINA

O elemento químico irídio ocorre na natureza, na forma mais usual, como metal em combinação com platina, ósmio, ouro e também, em minério de ferro. O irídio metálico é de coloração prateada e brilhante, apresenta alta dureza e baixa ductilidade. A densidade é 22,65²⁶.

O irídio-192 é produzido em reator nuclear pela reação (n, γ):



Tem meia-vida de 74,2 dias, decai por emissão beta e gama para um isótopo estável, Pt-192. Os raios beta emitidos apresentam energia na faixa de 530keV a 670keV. Os principais raios gama emitidos tem em média uma energia de 370keV. O irídio-191 possui alta secção de choque de absorção para nêutrons (910 barns) ^{13,27}.

O esquema de desintegração do irídio-192²⁸ é apresentado na figura 5.

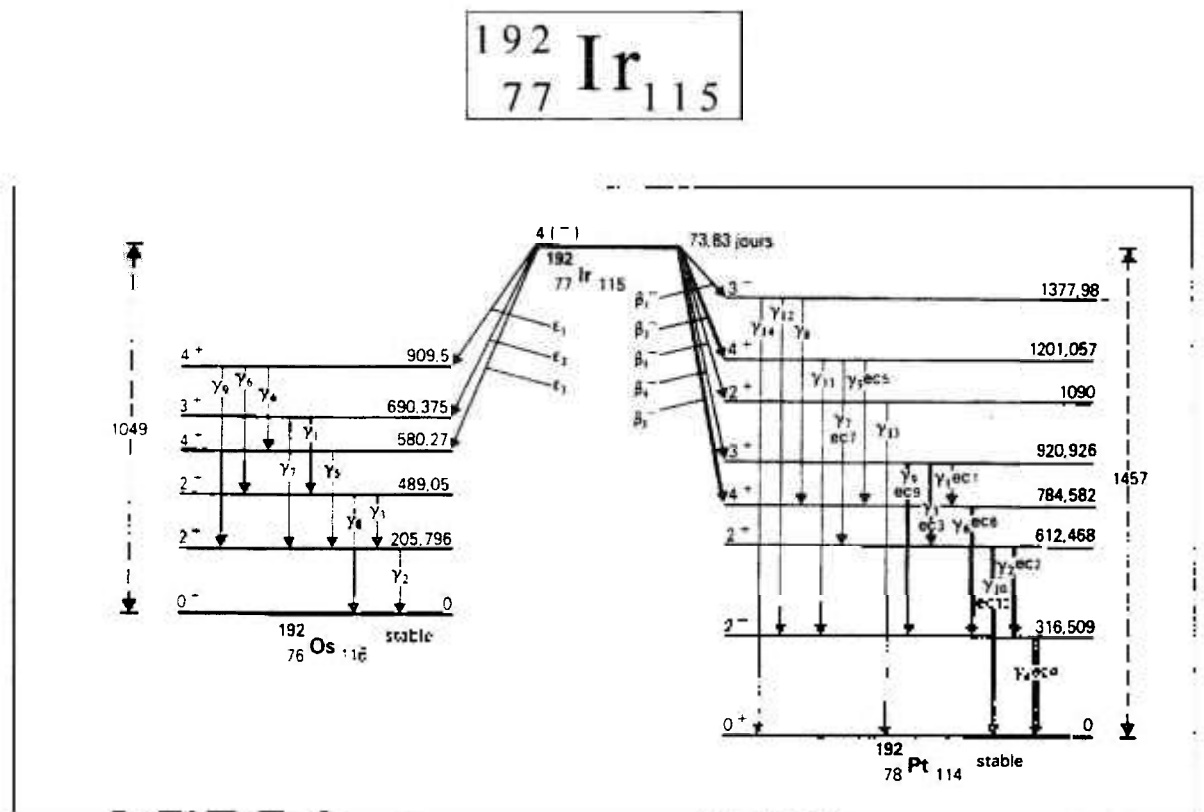


Figura 5 - Esquema de desintegração do irídio-192

Fonte: Table de radionucléides.

As fontes para braquiterapia apresentam-se, usualmente, na forma de fios flexíveis de 0,3mm e 0,5mm de diâmetro e podem ser facilmente cortadas no comprimento requerido para cada aplicação²⁹ (ver figura 6). Estes fios consistem

de um núcleo de uma liga irídio-platina (20-30/70-80), encapsulado em um tubo de platina ou aço inox. O revestimento tem a finalidade de filtrar os raios beta^{14,30}.

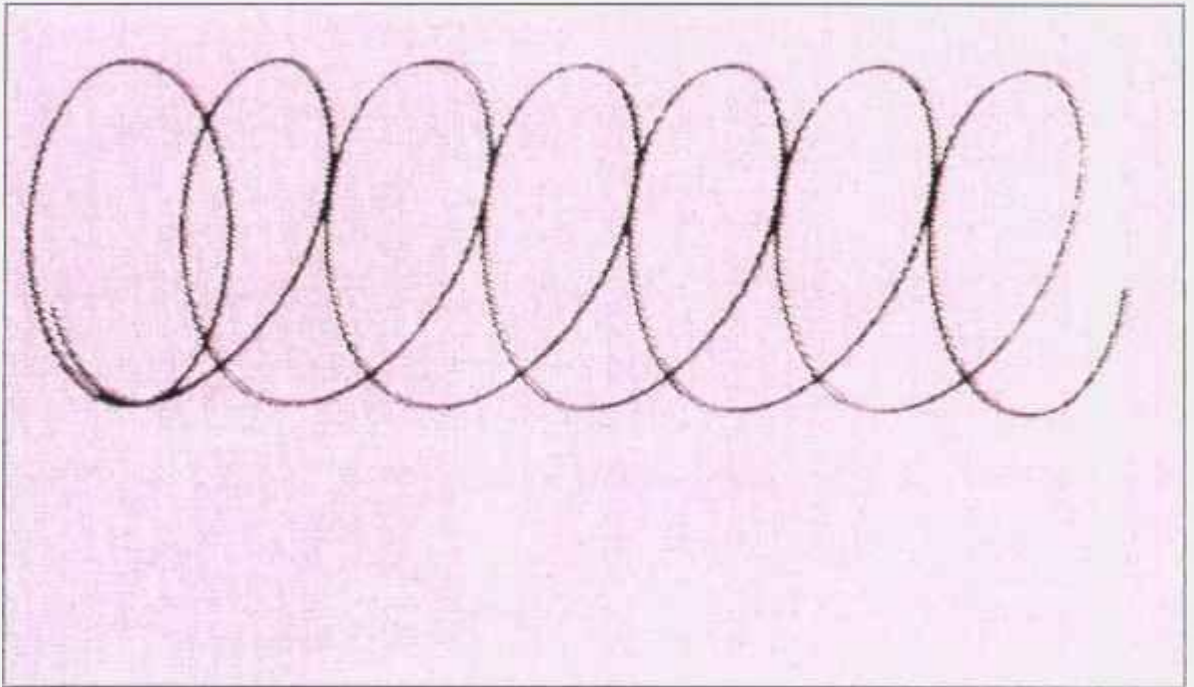


Figura 6 - Desenho do fio irídio

Fonte: Catálogo da empresa Amersham

A platina é um metal de coloração cinza, brilhante, de baixa dureza e grande ductilidade. A densidade é de 21,45³¹.

A atividade linear, para terapia de baixa taxa de dose (LDR - Low Dose Rate), está compreendida entre 1mCi/cm (37MBq/cm) e 4mCi/cm (148MBq/cm), sendo que a principal característica requerida é a uniformidade da atividade ao longo do fio, que não deve apresentar variação maior que 5% num fio de 50cm de comprimento³².

1.6 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO

Quando os fótons interagem com a matéria, são produzidos elétrons secundários, por um dos seguintes processos de interação: efeito fotoelétrico, efeito Compton ou produção de pares^{33,34}. Os elétrons secundários produzidos dissipam sua energia no meio, ou seja, no caso da braquiterapia, essa energia é absorvida pelos tecidos. Os efeitos da radiação ionizante na população de células ocorrem das seguintes formas^{14,35,36}:

- ◆ a ionização pode acontecer em um local não-crítico. Neste caso a célula não sofre dano;
- ◆ a ionização pode matar a célula pela deposição de energia. Isto é denominado dano letal; e
- ◆ a ionização pode causar um dano parcial à célula, sem no entanto matá-la, e com o tempo ela poderá se recuperar. Isto é denominado dano sub-letal.

A magnitude destes efeitos é uma função da dose de radiação absorvida pelo tecido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 FIO IMPORTADO

O trabalho consistiu na aquisição do fio de irídio-platina no mercado nacional e internacional, bem como, na realização de vários tipos de análise, para caracterização do material. Os métodos de análise foram:

- ◆ microscopia eletrônica de varredura;
- ◆ fluorescência de raio X; e
- ◆ análise por ativação neutrônica.

A irradiação do fio foi efetivada no reator IEA-R1, de propriedade do IPEN. Este reator é utilizado para pesquisa e tem potência de 2MW. Diversas posições de irradiação e arranjos experimentais foram ensaiados, visto que a literatura pesquisada não especifica o método de ativação dos fios de forma a garantir a homogeneidade da atividade ao longo do comprimento, estabelecido em 50cm. Definidos os parâmetros de irradiação, a posição e o dispositivo a ser utilizado, foi efetuado um levantamento do perfil do fluxo de nêutrons térmicos no local.

Durante a execução do trabalho, foi construída uma “hot cell” para manipulação, embalagem e controle de qualidade das fontes.

O sistema para controle de qualidade das fontes consistiu da montagem de um dispositivo composto pelos seguintes elementos:

- ◆ uma câmara de ionização a alta pressão, construída no IPEN, para o controle da uniformidade da ativação ao longo do fio. Junto com a câmara, uma fonte de tensão e um eletrômetro (medida em Coulumb).
- ◆ uma câmara de ionização tipo poço, marca Capintec, modelo CRC-12, para medida da atividade total do fio.
- ◆ Para o controle da uniformidade da ativação ao longo do fio, cada fonte foi medida 3 vezes no sistema de controle de qualidade instalado na “hot cell”.

A produção inicial foi destinada ao Hospital A. C. Camargo (Hospital do Câncer), em São Paulo, dentro de um convênio para a avaliação clínica. A produção complementar de fios foi doada para as seguintes instituições de saúde:

- ◆ Hospital Erasto Gartner, de Curitiba;
- ◆ Clínica de Megavoltagem, de Belo Horizonte;
- ◆ Instituto Brasileiro de Combate ao Câncer, de São Paulo; e
- ◆ Santa Casa de Misericórdia, de Araçatuba.

2.2 FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA

Visando ao desenvolvimento de uma sequência de fabricação, no país, para os fios utilizados em braquiterapia, interagiu-se com a empresa Degussa S/A - Divisão de Metal. Uma amostra do fio de irídio-platina foi fabricada nessa empresa e cedida ao IPEN para análise.

O fio fabricado pela Degussa foi composto por um núcleo de 75% de platina e 25% de irídio, recoberto por um tubo de platina. Para o processo de fabricação, as considerações descritas a seguir foram acordadas com a empresa³⁷:

- ◆ controle de qualidade da matéria prima para evitar a presença de contaminantes;
- ◆ preparação da liga em fornos adequados, visando garantir a homogeneidade; e
- ◆ utilização de técnicas de deformação (processo de trefilação), para obter o fio nas dimensões necessárias, com tratamentos térmicos intermediários de forma a garantir ductilidade, durante e após a deformação mecânica.

A trefilação é uma fase crítica do processo de fabricação do fio de irídio-platina em função das dimensões reduzidas do mesmo, das características mecânicas da liga e da necessidade de distribuição homogênea de irídio. Esta liga, quando deformada, apresenta elevado encruamento devido a presença do irídio. Quanto maior a quantidade de irídio, menor foi a sua trabalhabilidade. Durante a trefilação, as reduções a frio não devem ser superiores a 40% da área da secção transversal do fio. Se alcançado este nível de redução, proceder-se-á um recozimento à temperatura em torno de 1400 graus centígrados para garantir a maleabilidade do fio.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 FIO IMPORTADO

O fio de irídio-platina (20-30/70-80), de 0,3mm e 0,5mm de diâmetro, foi adquirido no mercado internacional (Best Industries dos Estados Unidos da América, Hereaus da Alemanha e Cis-Bio da França). O fio foi submetido às seguintes análises:

- ◆ microscopia eletrônica de varredura;
- ◆ fluorescência de raios- X; e
- ◆ análise por ativação neutrônica.

Irradiou-se o fio no reator IEA-R1, mostrado na figura 7, para se definir os parâmetros de ativação.

As condições de irradiação estabelecidas são descritas a seguir:

posição no núcleo - 48

fluxo de nêutrons - $1,96 \times 10^{13} \text{ncm}^2/\text{s}$

tempo de irradiação - 40 horas

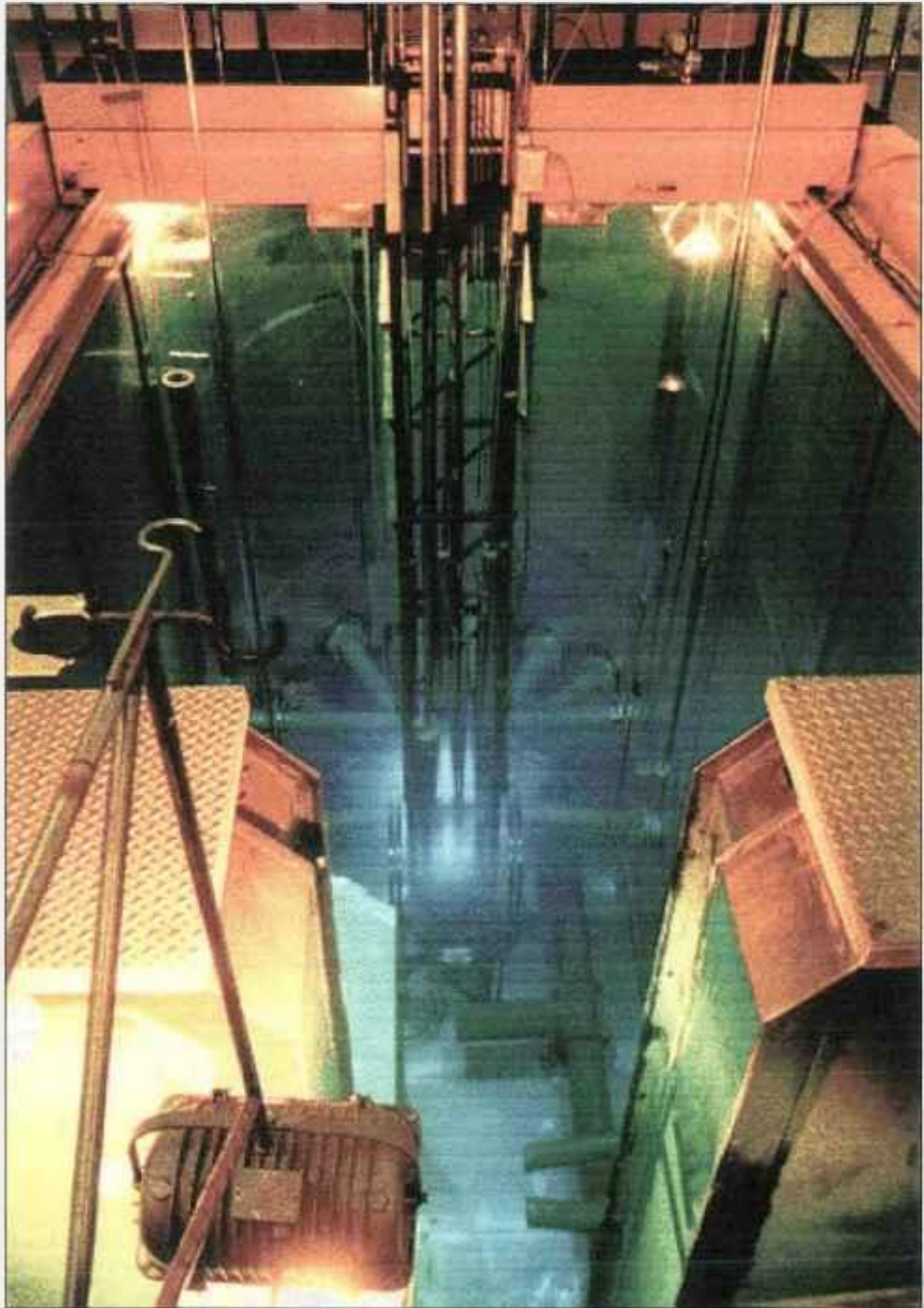


Figura 7 - Reator IEA-R1 utilizado para ativação dos fios de irídio

A fim de possibilitar a irradiação nas condições exigidas, construiu-se um elemento especial de irradiação, o TEI-O1 (ver as figuras 8 e 9), dotado de um motor que permite a rotação da amostra. O fio é colocado em um recipiente de irradiação de alumínio que é inserido no elemento de irradiação. O dispositivo é composto de três partes distintas:

Parte 1 - consiste de um cilindro de alumínio de 450mm de comprimento, 50,8mm de diâmetro externo, e 3,3mm de espessura. Vedado na extremidade inferior, onde existem dois “plugs” que se conectam à placa matriz, o cilindro é dotado de uma tampa com alça na extremidade superior. Neste cilindro é colocado o recipiente de irradiação e o conjunto é inserido no tubo da parte 2.

Parte 2 - tubo redondo de diâmetro externo 110,35mm, comprimento 1750mm e espessura 3,17mm, em alumínio. A extremidade inferior tem um mecanismo de acoplamento para encaixe da parte 1. Na extremidade superior existe uma tampa que é acoplada à peça 3 para se realizar o movimento rotatório.

Parte 3 - tubo de diâmetro externo 25,4mm, comprimento 9000mm e espessura 2,3mm, em alumínio. Uma das extremidades é soldada na parte superior da peça 2 e outra é conectada a um motor na superfície, que possibilita o movimento rotatório das partes 1 e 2.



Figura 8 - Dispositivo irradiação TEI-01

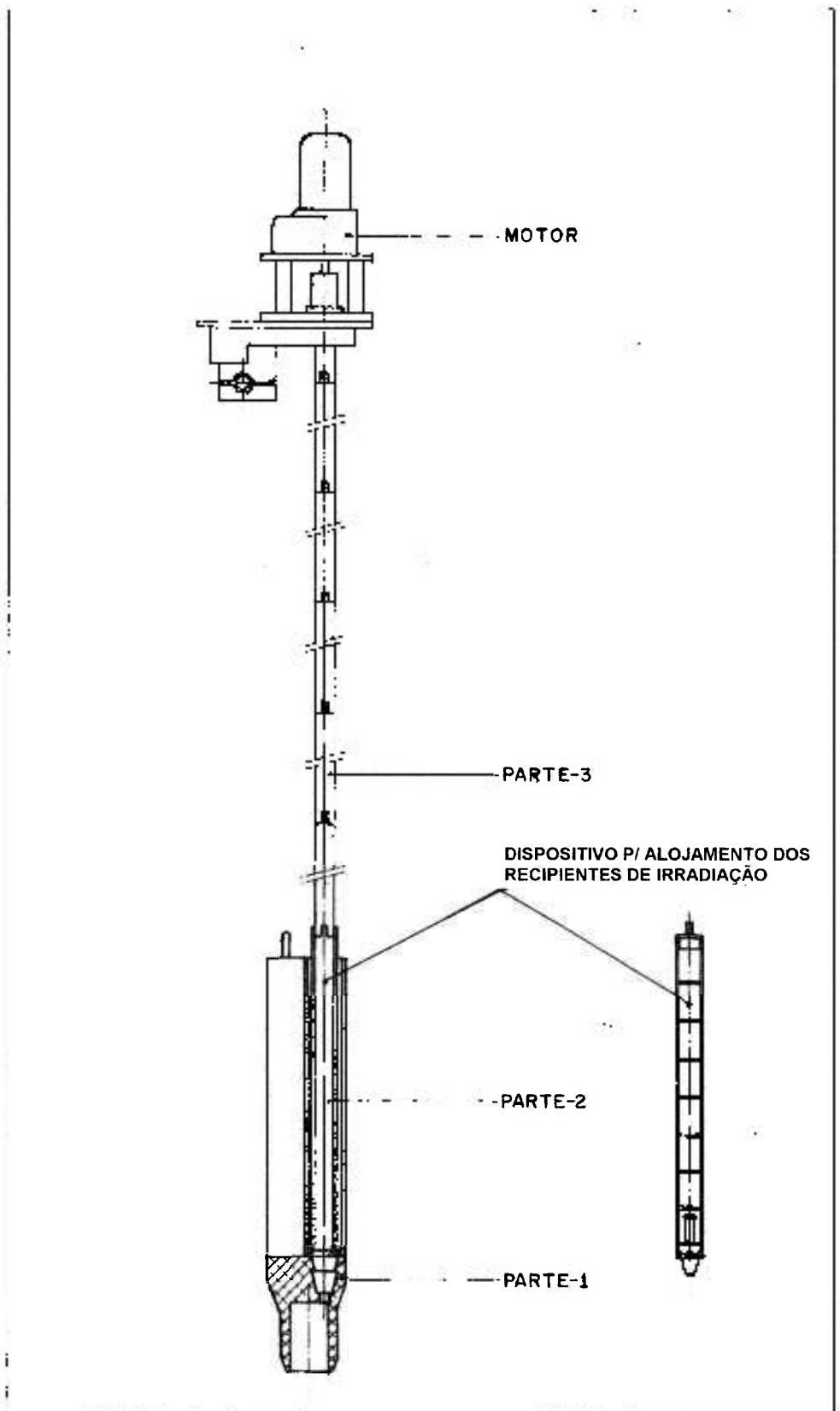


Figura 9 - Esquema do dispositivo de irradiação TEI-01.

Efetuu-se o levantamento do perfil do fluxo de nêutrons no local.

Para o cálculo da ativação do fio no reator IEA-R1 utilizou-se a fórmula³⁸:

$$A = \frac{M \cdot N \cdot \theta \cdot \sigma \cdot \phi}{p} \left(1 - e^{-\lambda \cdot t} \right)$$

onde:

A = atividade

P = peso atômico

M = massa

N = número de Avogadro

θ = abundância isotópica

σ = secção de choque para nêutrons

ϕ = fluxo de nêutrons térmicos no reator

λ = constante de decaimento

t = tempo de irradiação

Principais isótopos ativados^{11,39}:

Ir-192, meia-vida 74,2 dias, secção de choque 910 barns, principais energias gama 317keV, 468keV, 295keV, 308keV e 37,3% de abundância isotópica do Ir-191.

Ir -194, meia-vida 19 horas, secção de choque 112 barns, principais energias gama 294keV, 328keV e 62,7% de abundância isotópica do Ir-193.

Pt-197, meia-vida 18,3 horas, secção de choque 0.7 barns, principais energias gama 77,7keV, 191,4keV e 25,3% de abundância isotópica da Pt-196.

Pt-199, meia-vida 30,8 minutos, secção de choque 3,7 barns, principais energias gama 186keV, 246keV, 317keV, 317keV, 493keV, 543keV, 714keV e 7,2% de abundância isotópica da Pt-198.

Para manipulação, embalagem e controle de qualidade das fontes foi construída uma “hot cell”, baseada em estrutura de ferro com acrílico, e revestida com tijolos de chumbo de 5cm de espessura. Na parte frontal localizam-se um painel de operação, quatro pinças de controle remoto e dois visores de vidro plumbífero. Na parte lateral e posterior foram instaladas duas portas, uma para entrada de material e outra para manutenção. No interior da célula ficam alojados o dispositivo para abertura do recipiente de irradiação, os detectores para medida da atividade e o sistema para embalagem do fio. As várias vistas da “hot cell” descrita são mostradas nas figuras 10, 11 e 12.

Construiu-se um sistema para controle de qualidade da uniformidade da ativação ao longo do fio (ver figura 13), composto por uma fonte de alta tensão, eletrômetro (medida feita em Coulomb), câmara de ionização, blindagem com colimador de 1cm de largura e conjunto de polias e correia, de forma a permitir que o fio passe, centímetro a centímetro, em frente a janela de colimação.

A atividade total do fio foi medida em uma câmara de ionização tipo poço, marca Capintec, modelo CRC-12.

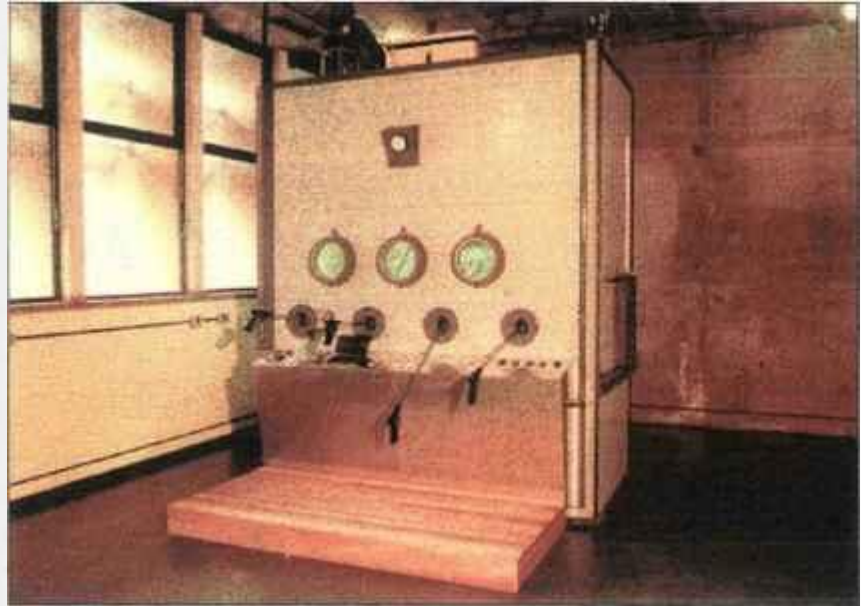


Figura 10 - "Hot cell" para manipulação do fio radioativo -
vista geral.



Figura 11 - "Hot cell" para manipulação do fio
radioativo - painel frontal

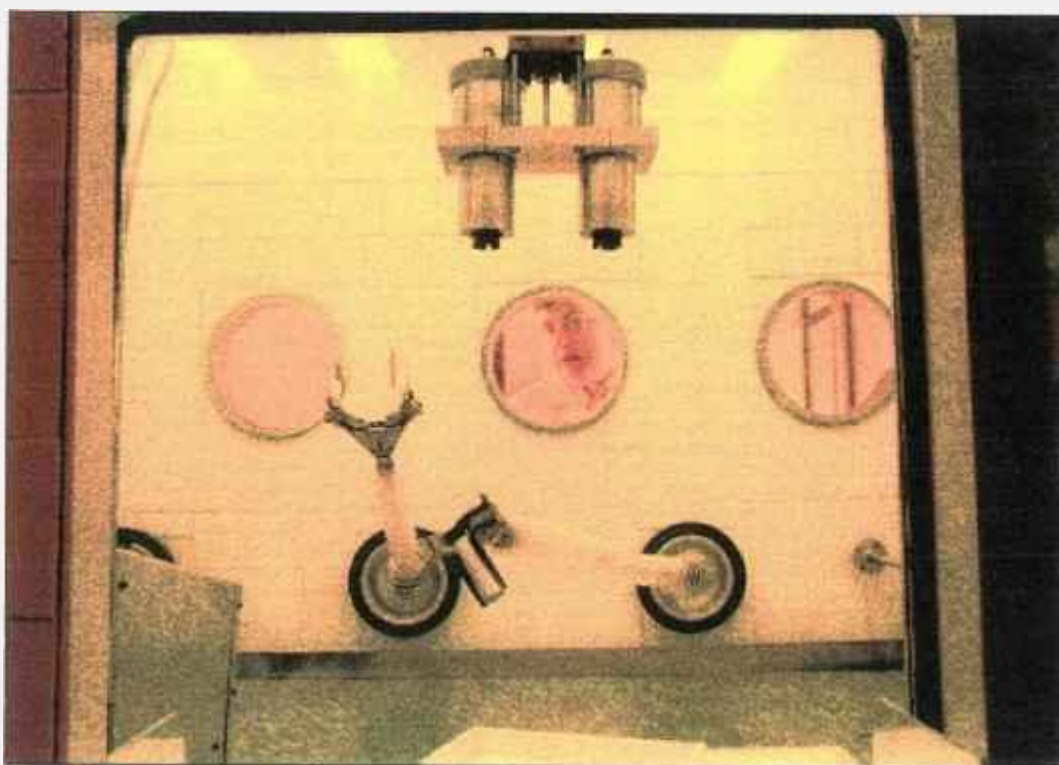


Figura 12 - "Hot cell" para manipulação do fio radioativo - vista interna



Figura 13 - "Hot cell" para manipulação do fio radioativo - controle de qualidade

3.2 FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA

O fio de procedência nacional, produzido pela Degussa S/A, foi caracterizado dimensionalmente, utilizando-se um medidor de perfis. Realizaram-se medidas de microdureza Vicker nas secções transversais do revestimento (platina) e núcleo (platina-irídio). Empregou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e análise por energia dispersiva (EDS) para observação da geometria do núcleo e análise química em diversos pontos. Utilizou-se a técnica de fluorescência de raios-X para analisar a presença de contaminantes no revestimento e núcleo do fio. Para análise do núcleo, uma pequena amostra do fio foi lixada (600 mesh) na secção transversal visando à remoção do revestimento.

A ativação do produto foi efetivada no dispositivo especial para irradiação dos fios de irídio TEI-O1, instalado no reator IEA-R1. O tempo de irradiação foi de 40 horas. O propósito foi averiguar a homogeneidade da distribuição do irídio ao longo do fio e detectar possíveis contaminações.

O sistema de verificação da uniformidade da ativação aceita somente fios de comprimento igual ou superior à 25cm. O fio de produção brasileira tinha 14cm de comprimento. Tendo em vista a insuficiência nas dimensões, foi necessário soldá-lo a um fio importado da marca Best, de forma que o comprimento total ficou em 50cm.

A avaliação da uniformidade da ativação, após a irradiação, foi realizada com tempo de medição de 2 minutos, centímetro a centímetro, com o fio de 50 cm, por 3 vezes, no sistema de controle de qualidade do laboratório de produção de fontes para braquiterapia do IPEN.

Com a finalidade de detectar impurezas, cortou-se 3mm (0,0150g) do fio nacional e mergulhou-se numa solução de água régia (1HNO₃ : 3HCL v/v) por 48 horas, visando sua dissolução. Como ao final deste período o fio não dissolveu, resolveu-se aquecer a solução à 70°C por 8 horas. Este novo ensaio também não obteve sucesso.

Tentou-se novamente dissolver o fio nacional utilizando-se o seguinte método⁴⁰: o fio foi envolto em uma folha de zinco de 1g e martelado para que os materiais tivessem um bom contato. O “pacote” foi colocado em um cadinho de alumina e aquecido a 750°C em um forno por 45 minutos. Depois de resfriado por 30 minutos, a mistura foi imersa em água régia (1HNO₃ : 3HCL v/v) por 24 horas e, finalmente, ocorreu a dissolução. A solução foi evaporada e o soluto foi dissolvido em 30ml de água régia. Esta última solução sofreu várias dissoluções e tomou-se uma alíquota de 10ml (1:100) e analisou-se por espectrometria gama utilizando-se um detector HPGe (detector de germânio de alta pureza).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Irradiou-se o fio no reator IEA-R1, em diferentes posições de irradiação e utilizando diversos arranjos experimentais. Os vários arranjos foram realizados porque a literatura pesquisada não especificava o método de ativação dos fios de forma a garantir a uniformidade da atividade ao longo dos 50 centímetros de comprimento.

Após diversos ensaios, concluiu-se que para conseguir a uniformidade requerida, o fio deve ser irradiado na forma de uma espiral de 2cm de altura, com movimento de rotação uniforme. A fim de possibilitar a irradiação nas condições exigidas, foi construído um elemento de irradiação, o TEI-01, com 8 prateleiras e dotado de um motor que permite a rotação do fio.

Depois de instalado o elemento de irradiação TEI-01 no reator IEA-R1, foi efetuado o levantamento do perfil do fluxo de nêutrons térmicos no local de irradiação. Os resultados obtidos constam na tabela 3.

Tabela 3 - Perfil do fluxo de nêutrons térmicos

Prateleira	Fluxo Térmico ($\times 10^{13} \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Erro Relativo %	Erro Absoluto %
1	0,116	3,0	5,0
2	0,387	3,0	5,0
3	0,641	3,0	5,0
4	1,240	3,0	5,0
5	1,670	3,0	5,0

Prateleira	Fluxo Térmico ($\times 10^{13} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Erro Relativo %	Erro Absoluto %
6	1,920	3,0	5,0
7	1,960	3,0	5,0
8	1,880	3,0	5,0

4.1 FIO IMPORTADO

4.1.1 FIO BEST INDUSTRIES

O fio fornecido pela Best Industries tinha 0,5mm de diâmetro e consistia de um núcleo de Ir-Pt (30/70), com revestimento de aço inox.

Pela técnica de fluorescência de raios-X verificou-se que além de irídio e platina do núcleo, o fio apresentou a seguinte composição química, no revestimento: 17,7% de cromo, 9,2% de níquel, 1,1% de manganês, 0,13% de molibdênio e 71,8% de ferro.

A observação por microscopia eletrônica de varredura mostrou que o fio é constituído por dois tubos concêntricos de aço inox e um núcleo de irídio-platina, como apresentam as figuras 14 e 15.

A análise por EDS (Energy Dispersion Spectroscopy) dos principais constituintes do fio mostrado na figura 14 (aumento de 137 vezes, aparelho - M.E.V. Phillips XL-30) apresentou os resultados que constam na tabela 4.

Tabela 4 - Principais constituintes do fio Best1

Elemento	RA (% em peso)	RB (% em peso)	RC (% em peso)	F (% em peso)
Ir			73,88	
Pt			18,28	
Fe	72,37	71,82	5,58	72,33
Cr	18,45	18,40	1,99	18,35
Ni	9,18	9,78	0,28	9,32

Obs1: RA, RB, RC e F são regiões especificadas na figura 14.



Figura 14 - Fio Best1 - seção transversal da amostra

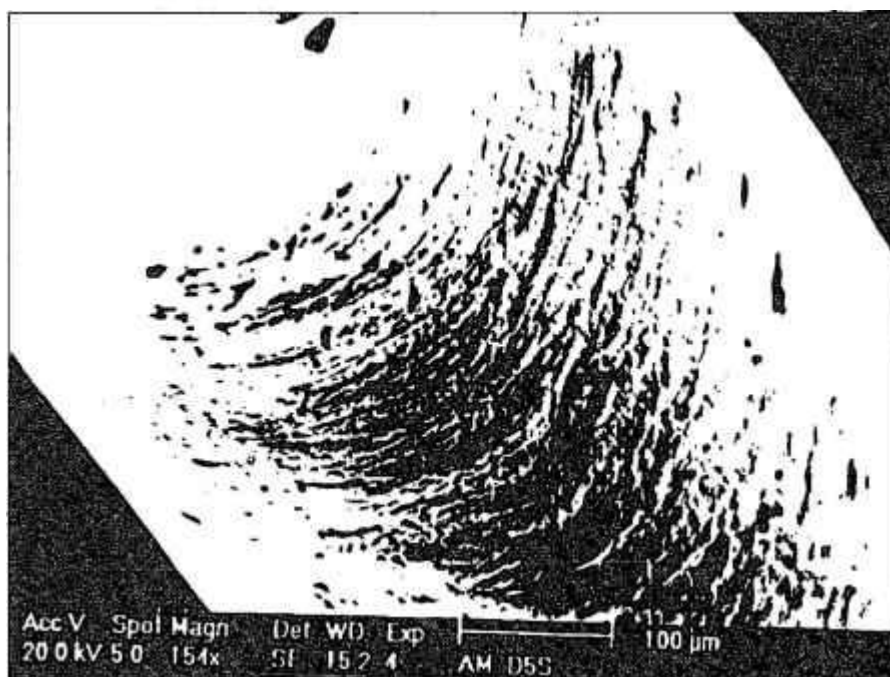


Figura 15 - Fio Best1 - secção longitudinal da amostra

As tabelas 5 e 6 (e a visão gráfica dada pelas figuras 16 à 22), apresentam as séries de medidas e os respectivos gráficos do controle de qualidade de um fio Best irradiado no reator IEA-R1 por 40 horas, na posição número 48, prateleira 7, fluxo de nêutrons $1,96 \times 10^{13} \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$. A avaliação da homogeneidade, após a ativação, foi realizada medindo-se a carga acumulada em nano-Coulomb, com tempo de aquisição de 2 minutos, centímetro a centímetro, por 3 vezes, no sistema de controle de qualidade instalado na “hot cell”.

A média aritmética e o desvio em porcentagem em relação a essa média, para cada uma das séries de medidas, foram as seguintes:

Fio Best 1:

Medida 1	$X = 2,2056 \times 10^{-9} \pm 0,0212 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 1,74\%$
Medida 2	$X = 2,0228 \times 10^{-9} \pm 0,0286 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 2,83\%$
Medida 3	$X = 1,9230 \times 10^{-9} \pm 0,0365 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 0,67\%$

A atividade total foi medida em uma câmara de ionização tipo poço marca Capintec, modelo CRC-12 e o valor encontrado foi: $A = 79,67 \text{mCi} = 2947,79 \text{MBq}$ para um fio de 47cm de comprimento e massa de irídio de 0,075g . A atividade linear foi $A_e = 1,7 \text{mCi/cm} = 62,72 \text{MBq/cm}$.

Tabela 5 - Determinação da homogeneidade do fio Best1 - medidas obtidas

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
1	2,1760	1,9570	1,9410
2	2,1720	2,0120	1,9100
3	2,1270	1,9750	1,9690
4	2,1670	1,9910	2,0160
5	2,2200	1,9900	2,0140
6	2,2090	1,9770	1,9970
7	2,2300	1,9630	1,9890
8	2,2260	2,0260	1,9660
9	2,2180	2,0520	1,9700
10	2,2220	2,0490	2,0300
11	2,2160	2,0430	2,0420
12	2,2250	2,0470	2,0510
13	2,2260	2,0420	2,0870
14	2,2430	2,0800	1,9720
15	2,2440	2,0760	2,0490
16	2,2390	2,0590	2,0430
17	2,2190	2,0420	2,0530

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
18	2,2000	2,0490	2,0370
19	2,1880	2,0530	2,0080
20	2,1960	2,0430	2,0120
21	2,2120	2,0430	2,0410
22	2,2090	2,0240	2,0450
23	2,1970	2,0250	2,0540
24	2,2160	2,0220	2,0430
25	2,2120	2,0190	2,0460
26	2,2080	2,0280	2,0180
27	2,2120	2,0330	2,0200
28	2,1950	2,0160	2,0270
29	2,2010	2,0100	2,0170
30	2,2270	2,0390	2,0060
31	2,2200	2,0350	2,0270
32	2,2360	2,0280	2,0340
33	2,2220	2,0240	2,0220
34	2,2180	2,0180	2,0170
35	2,2120	2,0310	2,0100
36	2,2060	2,0260	2,0230
37	2,2230	2,0270	2,0430
38	2,2090	2,0120	2,0310
39	2,2020	2,0120	2,0160
40	2,2010	2,0350	1,9850
41	2,2070	2,0200	1,9560
42	2,1990	2,0570	1,9850
43	2,2020	2,0620	1,9440
44	2,1940	2,0360	1,9840
45	2,2130	2,0100	1,9520
46	2,1930	1,9730	1,9740
47	2,1750	1,9640	1,9710

Tabela 6 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 -
frequência das medidas

Intervalo	Medida 1		Medida 2		Medida 3	
	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência
$X_1=[0,X-5]$	2,0983	0	1,9251	0	1,9153	1
$X_2=[X-5,X-4]$	2,1204	0	1,9454	0	1,9355	0
$X_3=[X-4,X-3]$	2,1425	1	1,9657	3	1,9556	3
$X_4=[X-3,X-2]$	2,1646	0	1,9859	3	1,9758	7
$X_5=[X-2,X-1]$	2,1867	4	2,0062	2	1,9960	4
$X=[X-1,X]$	2,2088	15	2,0265	15	2,0161	8
$X_6=[X,X+1]$	2,2309	23	2,0467	14	2,0363	11
$X_7=[X+1,X+2]$	2,2529	4	2,0670	8	2,0565	12
$X_8=[X+2,X+3]$	2,2750	0	2,0872	2	2,0766	0
$X_9=[X+3,X+4]$	2,2971	0	2,1075	0	2,0968	1
$X_{10}=[X+4,X+5]$	2,3192	0	2,1278	0	2,1169	0
$X_{11}=[X+5,...]$	Demais	0	Demais	0	Demais	0

Obs1: X refere-se à média aritmética das medidas; a média está destacada em negrito.

Obs2: A primeira coluna indica os intervalos em relação à média, com os números indicando os percentuais utilizados no intervalo.

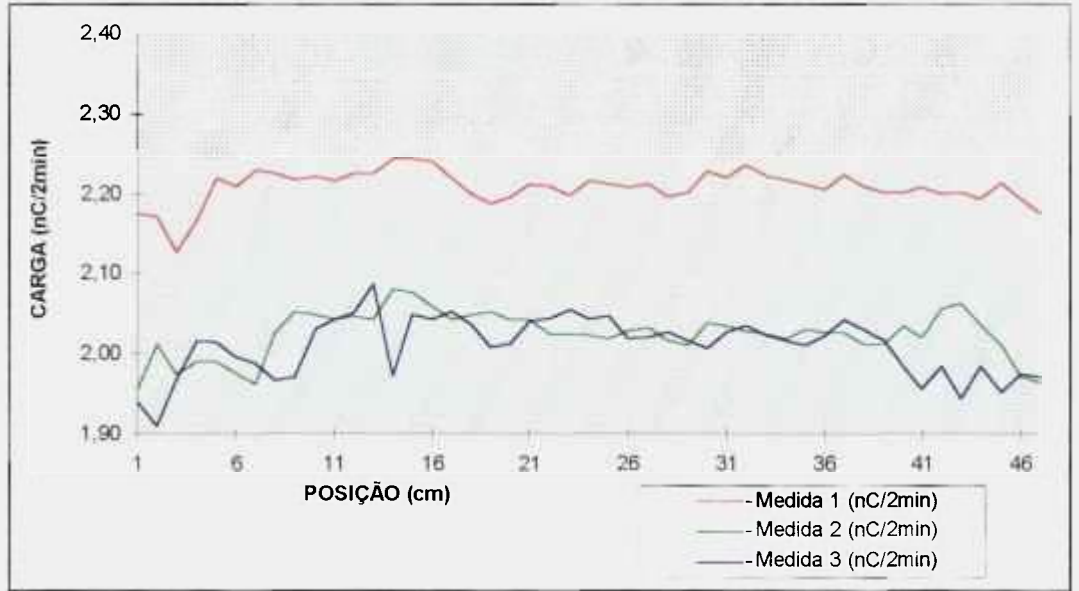


Figura 16 - Determinação da homogeneidade da ativação fio Best1 - medidas obtidas

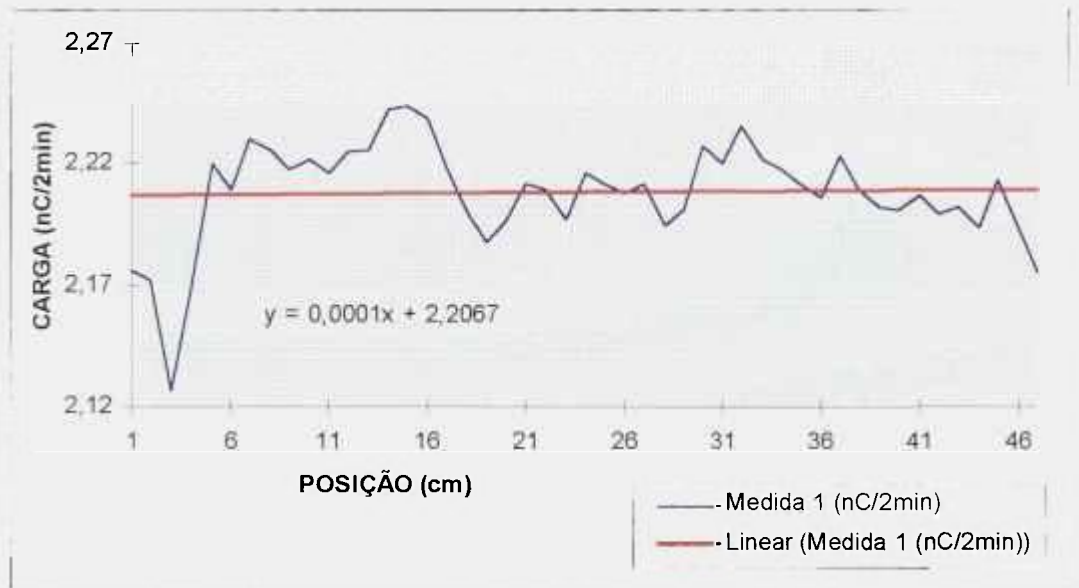


Figura 17 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 - medida 1

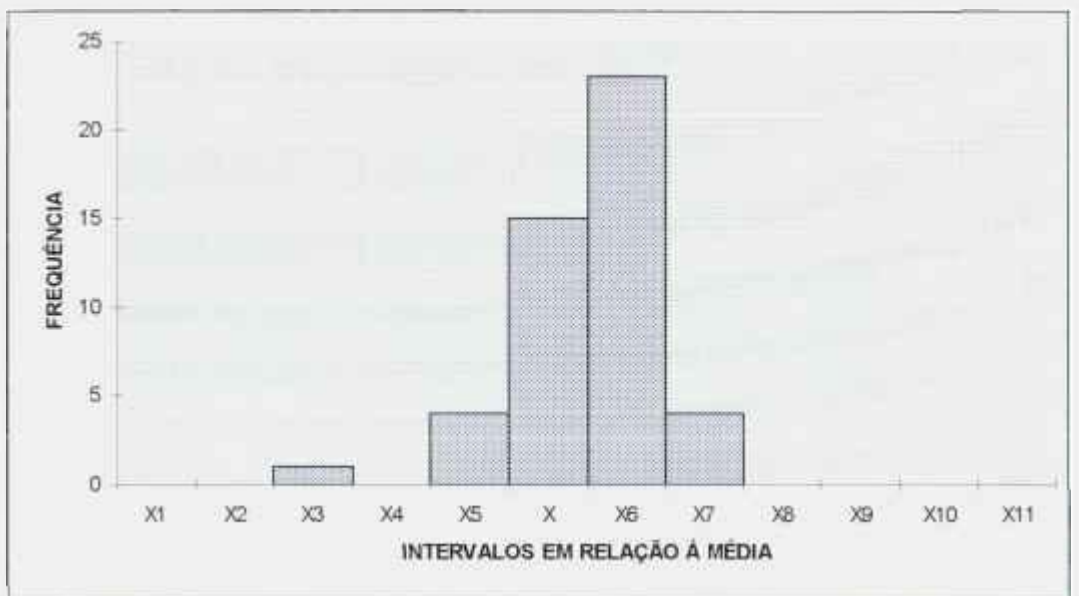


Figura 18 - Histograma da ativação do fio Best1 - medida 1

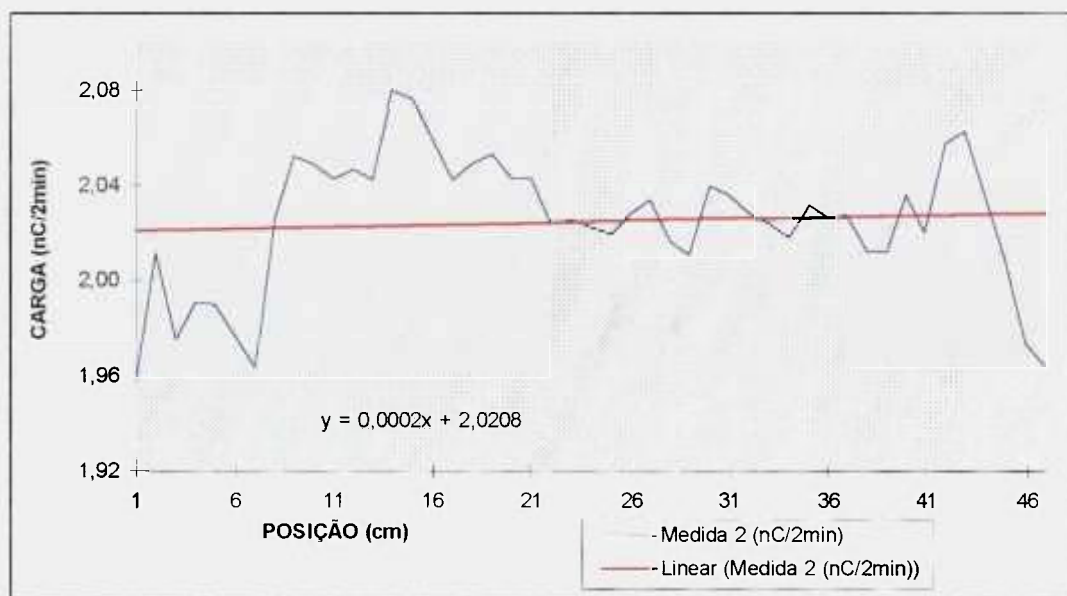


Figura 19 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 - medida 2

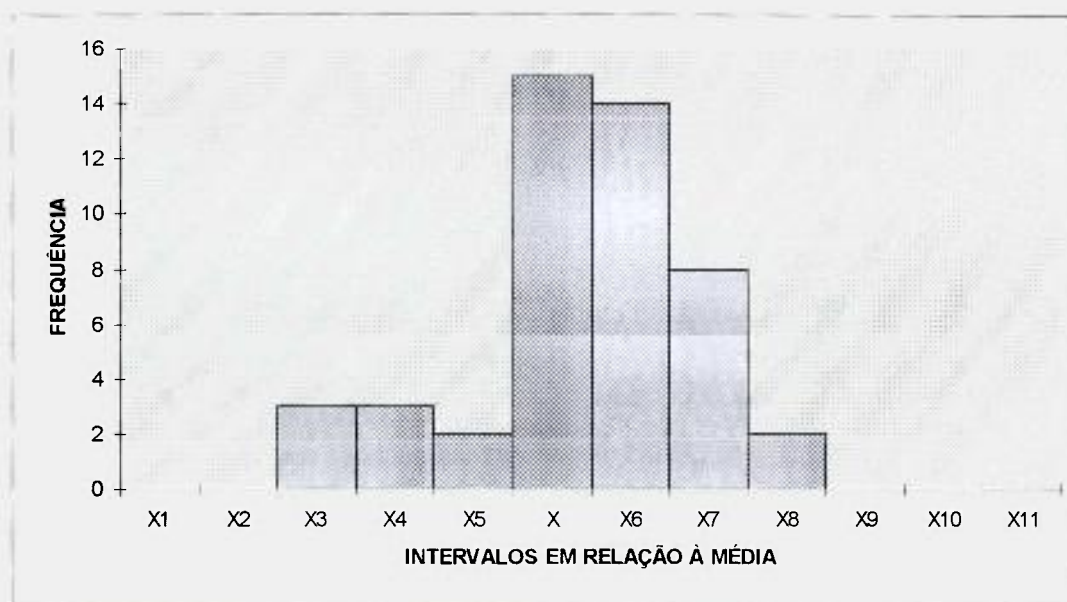


Figura 20 - Histograma da ativação do fio Best1 - medida 2

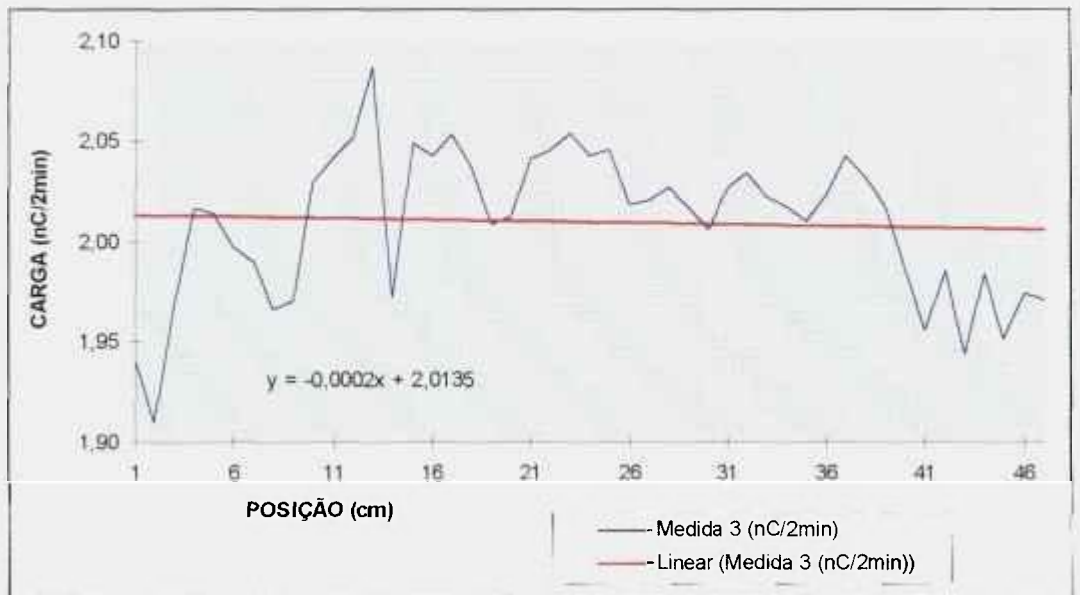


Figura 21 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best1 - medida 3

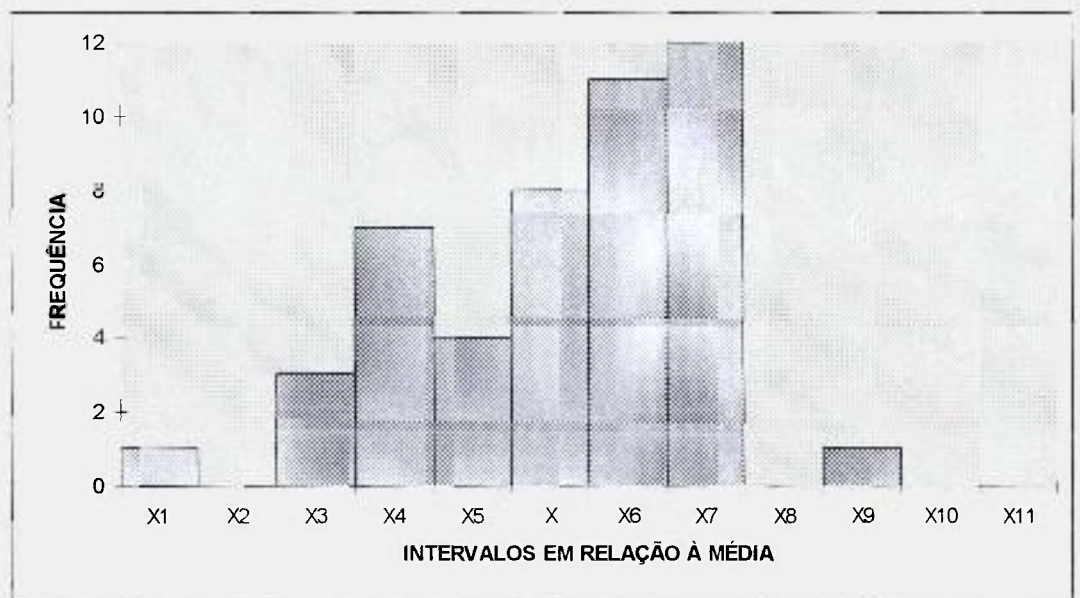


Figura 22 - Histograma da ativação do fio Best1 - medida 3

4.1.2 FIO HEREAUS

O fio fornecido pela Hereaus tinha 0,3mm de diâmetro e consistia de um núcleo de Pt-Ir (75/25) e de um revestimento de platina.

Pela técnica de fluorescência de raios-X, além de irídio e platina, determinou-se, no revestimento, a presença de 0,49% de crômio, 0,56% de ferro e 4,8% de titânio.

A microscopia eletrônica de varredura mostrou que o fio foi constituído por um núcleo de irídio-platina e um revestimento de platina, como apresentam as figuras 23 e 24.

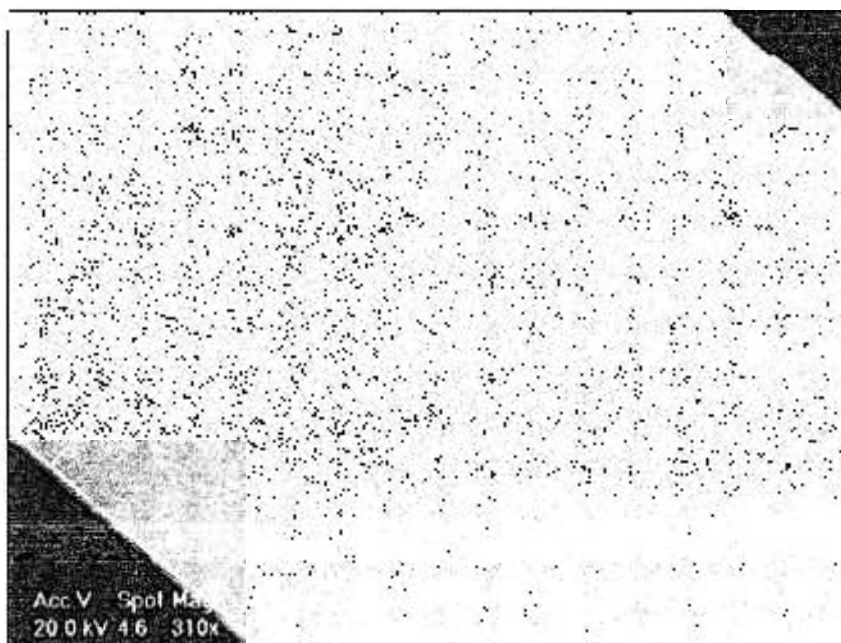


Figura 23 - Fio Hereaus - secção longitudinal da amostra

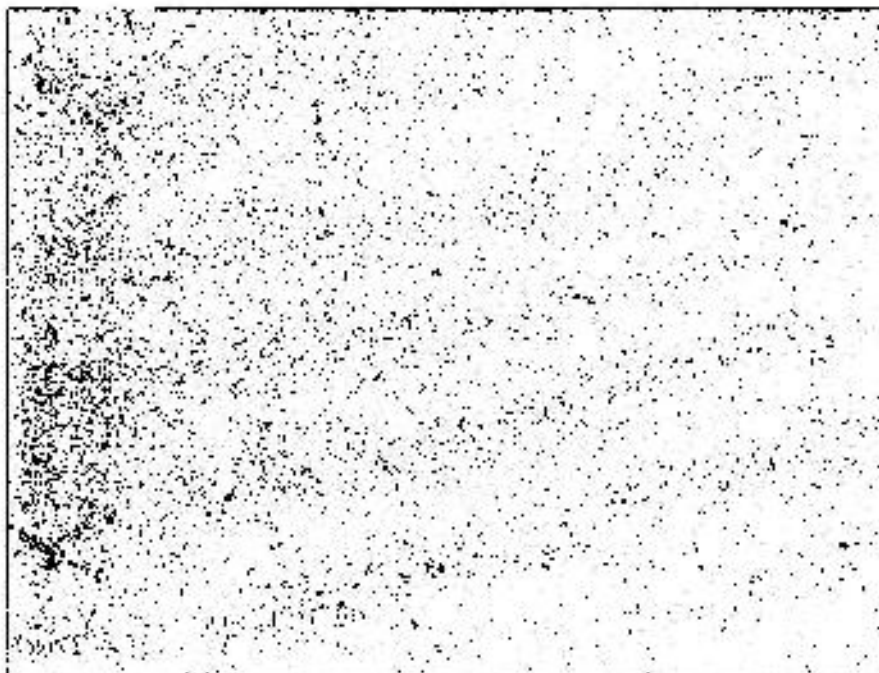


Figura 24 - Fio Hereaus - secção transversal da amostra

A análise por EDS (Energy Dispersion Spectroscopy) foi efetuada no núcleo (aparelho - M.E.V. Phillips XL-30) e apresentou os resultados que constam na tabela 7.

Tabela 7 - Constituintes do núcleo do Fio Hereaus

Elemento	Porcentagem em peso	Erro em porcentagem	Corte da amostra
Ir	35,28	0,81	Longitudinal
Pt	64,72	1,35	Longitudinal
Ir	37,32	0,74	Transversal
Pt	62,68	1,31	Transversal

Através da análise por ativação neutrônica encontraram-se apenas os elementos irídio e platina.

As tabelas 8 e 9 (e a visão gráfica dada pelas figuras 25 à 31), apresentam as séries de medidas e os respectivos gráficos do controle de qualidade de um fio Hereaus irradiado no reator IEA-R1 por 40 horas, posição número 48, prateleira 7, fluxo de nêutrons $1,96 \times 10^{13} \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$. A avaliação da homogeneidade, após a ativação, foi realizada medindo-se a carga acumulada em nano-Coulumb, com tempo de aquisição de 2 minutos, centímetro a centímetro, por 3 vezes, no sistema de controle de qualidade instalado na "hot cell".

A média aritmética e o desvio em porcentagem em relação a essa média, para cada uma das séries de medidas, foram as seguintes:

Fio Hereaus:

Medida 1	$X = 1,7325 \times 10^{-9} \pm 0,0668 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 8,37\%$
Medida 2	$X = 1,7433 \times 10^{-9} \pm 0,0544 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 8,84\%$
Medida 3	$X = 1,7166 \times 10^{-9} \pm 0,0530 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 7,42\%$

A atividade total foi medida em uma câmara de ionização tipo poço marca Capintec, modelo CRC-12 e o valor encontrado foi: $A = 57,25 \text{mCi} = 2118,30 \text{MBq}$ para um fio de 47cm de comprimento e massa de irídio de 0,022g. A atividade linear foi $A_e = 1,22 \text{mCi/cm} = 45,07 \text{MBq/cm}$.

Tabela 8 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus -
medidas obtidas

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
1	1,6067	1,5935	1,6052
2	1,5874	1,8307	1,7759
3	1,7184	1,8974	1,844
4	1,8509	1,7965	1,7265
5	1,8731	1,7486	1,6731
6	1,8094	1,7818	1,7242
7	1,7884	1,7401	1,7046
8	1,8049	1,7203	1,7273
9	1,7306	1,7548	1,7134
10	1,7146	1,7334	1,7177
11	1,7831	1,7860	1,7393
12	1,7232	1,7482	1,7194
13	1,7334	1,7426	1,7003
14	1,7626	1,7309	1,6941
15	1,7551	1,7060	1,6991
16	1,7588	1,7380	1,7001
17	1,7382	1,7971	1,7288
18	1,7163	1,7984	1,7751
19	1,6579	1,7405	1,7959
20	1,6316	1,7175	1,8114
21	1,6769	1,7916	1,7908
22	1,7494	1,8206	1,7411
23	1,7968	1,7873	1,7324
24	1,8118	1,7846	1,7726
25	1,8216	1,7433	1,7757
26	1,7282	1,7843	1,7630
27	1,7259	1,7356	1,7393
28	1,7659	1,7304	1,6951
29	1,8084	1,7175	1,6848
30	1,8073	1,6866	1,6693

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
31	1,7666	1,6521	1,6898
32	1,7223	1,7219	1,7221
33	1,7063	1,8481	1,6661
34	1,6721	1,8004	1,6619
35	1,6778	1,7022	1,6604
36	1,7203	1,7100	1,8127
37	1,6475	1,7589	1,8271
38	1,6159	1,7136	1,7340
30	1,6984	1,7847	1,6939
40	1,8300	1,7346	1,7188
41	1,8399	1,6800	1,7224
42	1,6962	1,7056	1,6829
43	1,6886	1,6567	1,6588
44	1,7105	1,6681	1,6379
45	1,6967	1,6854	1,6591
46	1,6319	1,7059	1,6576
47	1,6901	1,7309	1,6470
48	1,7110	1,7334	1,6572

Tabela 9 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus -
frequência das medidas

Intervalo	Medida 1		Medida 2		Medida 3	
	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência
$X_1=[0,X-5]$	1,6459	5	1,6561	2	1,6318	1
$X_2=[X-5,X-4]$	1,6632	2	1,6735	2	1,6490	2
$X_3=[X-4,X-3]$	1,6805	3	1,6910	3	1,6662	7
$X_4=[X-3,X-2]$	1,6978	4	1,7084	4	1,6833	3
$X_5=[X-2,X-1]$	1,7152	5	1,7258	6	1,7005	8
$X=[X-1,X]$	1,7325	8	1,7433	11	1,7177	2
$X_6=[X,X+1]$	1,7498	3	1,7607	5	1,7349	11
$X_7=[X+1,X+2]$	1,7671	5	1,7781	0	1,7520	3
$X_8=[X+2,X+3]$	1,7845	1	1,7956	7	1,7692	1
$X_9=[X+3,X+4]$	1,8018	2	1,8130	4	1,7864	4
$X_{10}=[X+4,X+5]$	1,8191	5	1,8304	1	1,8036	2
$X_{11}=[X+5,...]$	Demais	5	Demais	3	Demais	4

Obs1: X refere-se à média aritmética das medidas; a média está destacada em negrito.

Obs2: A primeira coluna indica os intervalos em relação à média, com os números indicando os percentuais utilizados no intervalo.

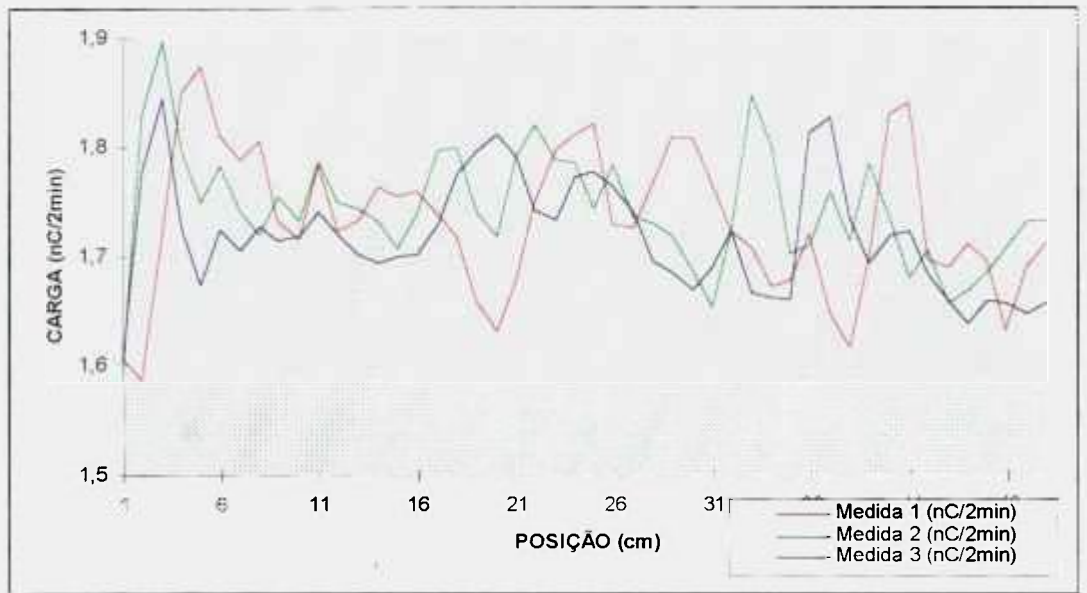


Figura 25 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medidas obtidas

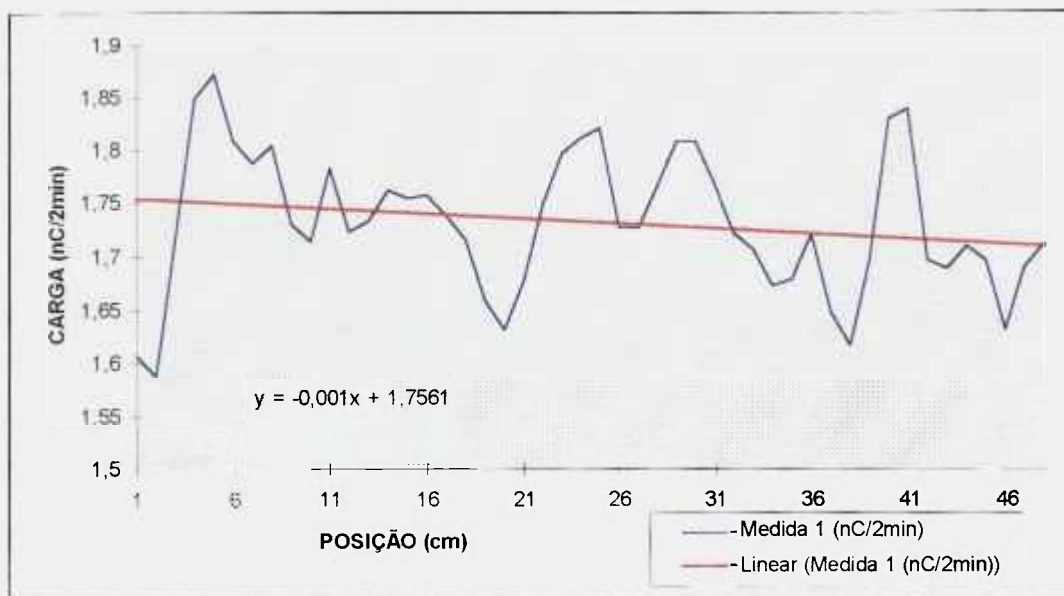


Figura 26 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medida 1

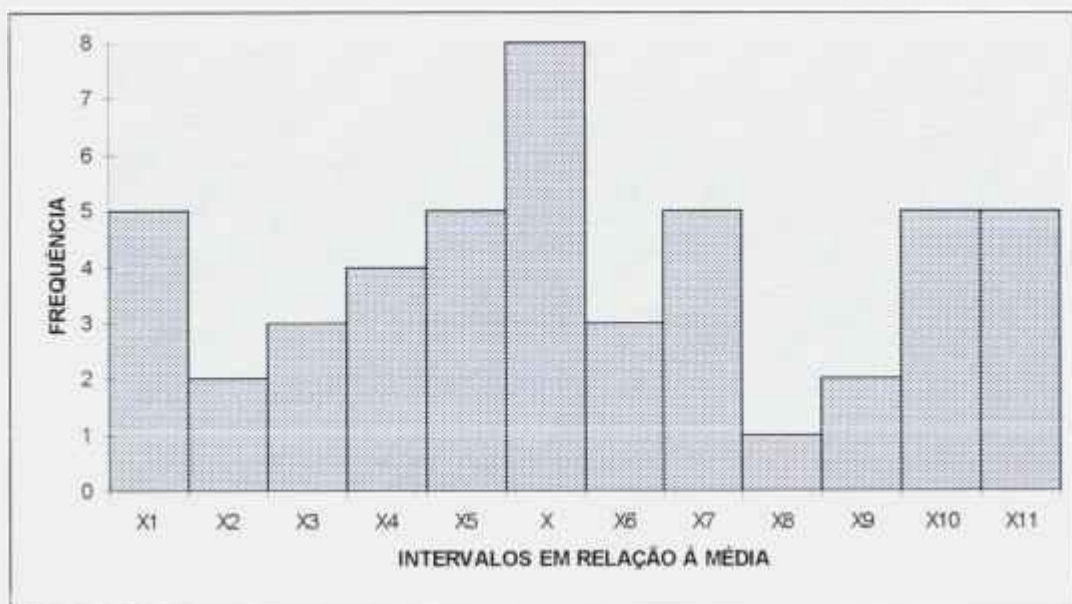


Figura 27 - Histograma da ativação do fio Hereaus - medida 1

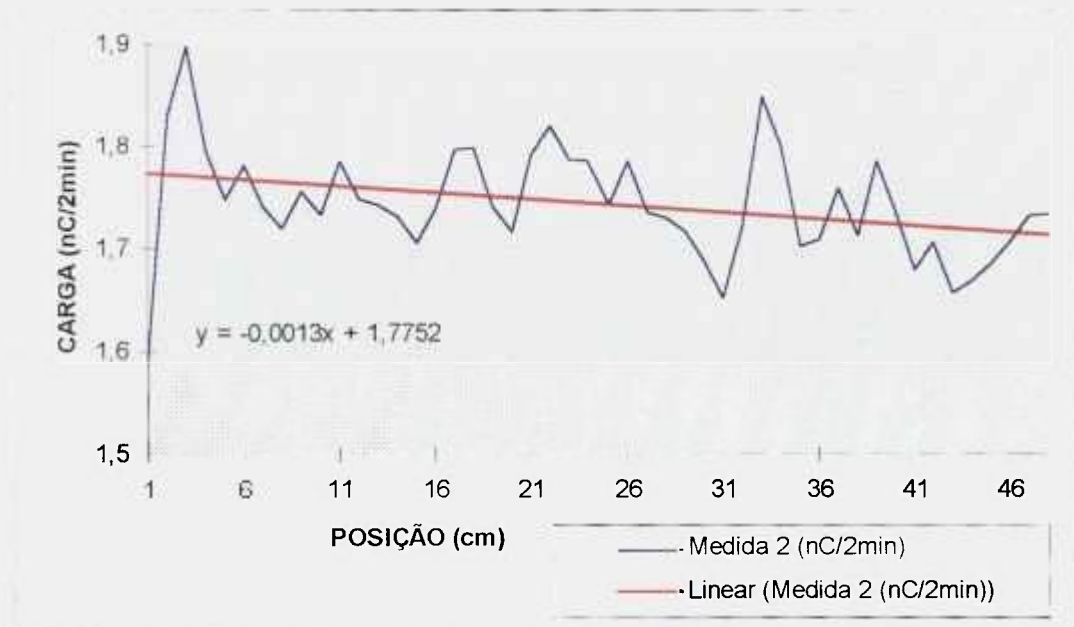


Figura 28 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medida 2

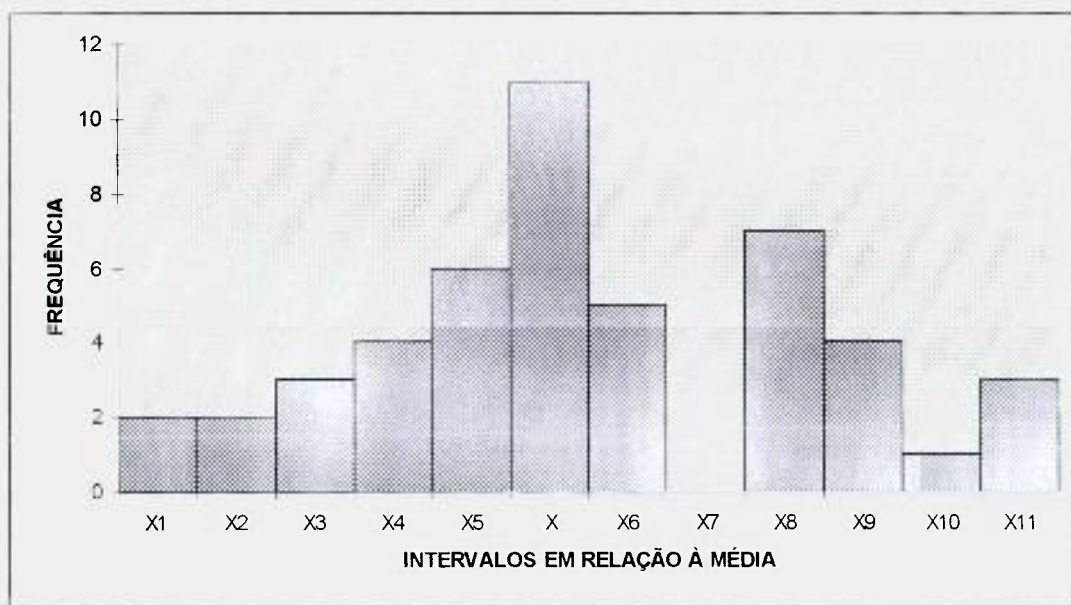


Figura 29 - Histograma da ativação do fio Hereaus - medida 2

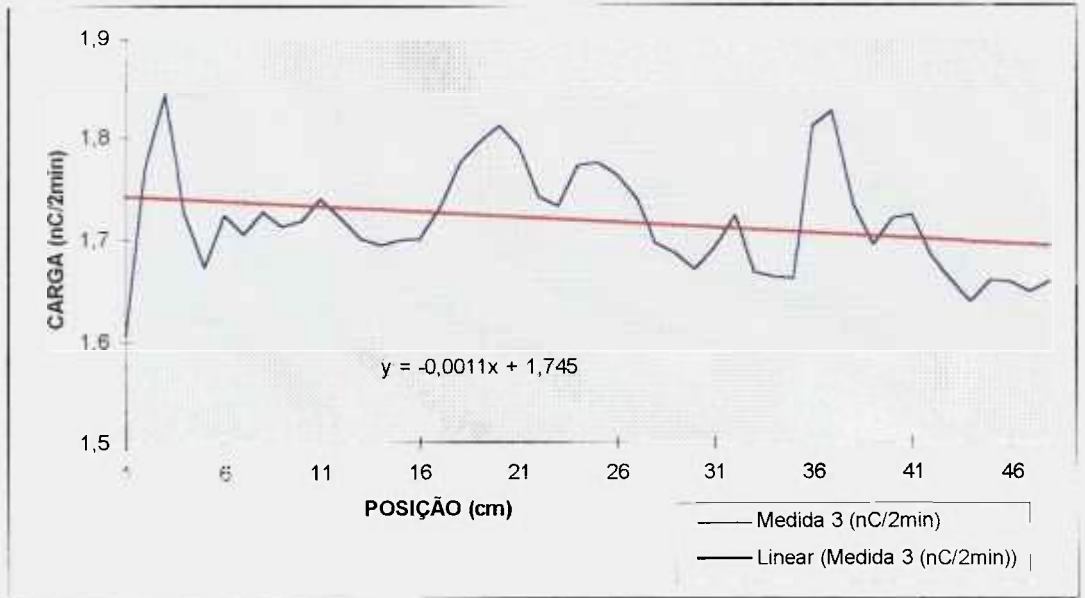


Figura 30 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Hereaus - medida 3

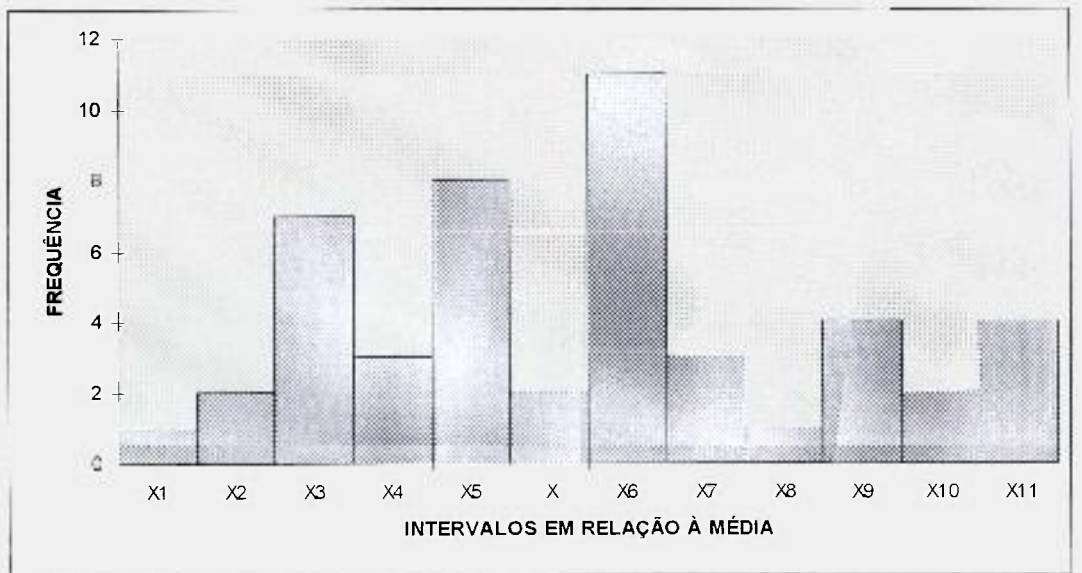


Figura 31 - Histograma da ativação do fio Hereaus - medida 3

4.1.3 FIO CIS - BIO

O fio fornecido pela Cis-Bio tinha 0,3mm de diâmetro e consistia de um núcleo de Pt-Ir (80/20) e de um revestimento de platina.

Pela técnica de fluorescência de raios-X, além de irídio e platina, determinou-se, no revestimento, a presença de 0,35% de crômio, 0,73% de ferro, 0,08% de manganês, 0,05% de cobalto, 0,51% de níquel, 0,21% de cobre e 0,59% de zinco.

A microscopia eletrônica de varredura mostrou que o fio foi constituído por um núcleo de irídio-platina bem centrado e um revestimento de platina, conforme são apresentados nas figuras 32 e 33.

A análise por EDS (Energy Dispersion Spectroscopy) foi efetuada no revestimento e no núcleo (aparelho - M.E.V. Phillips XL-30) e mostrou os seguintes resultados que constam das tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Constituintes do revestimento do fio Cis-Bio

Elemento	Porcentagem em peso	Erro em porcentagem
Ir	0,00	0,00
Pt	100,00	0,18

Tabela 11 - Constituintes do núcleo do fio Cis-Bio

Elemento	Porcentagem em peso	Erro em porcentagem	Corte da amostra
Ir	18,53	0,89	Longitudinal
Pt	81,47	0,44	Longitudinal
Ir	18,83	0,85	Transversal
Pt	81,17	0,42	Transversal

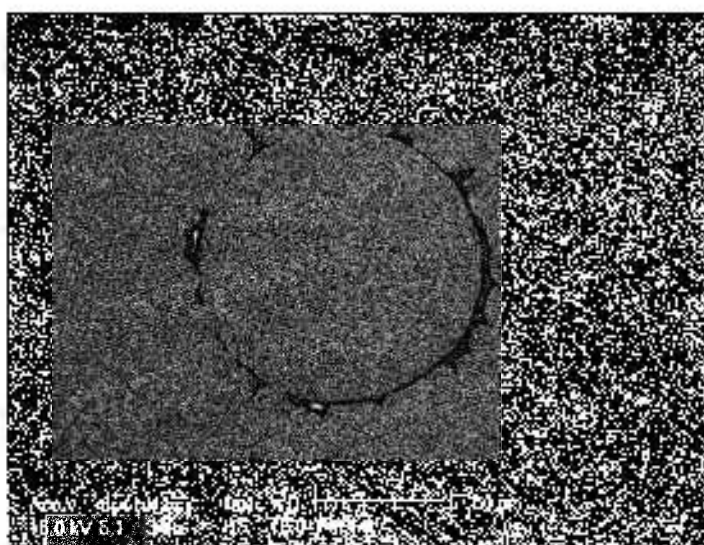


Figura 32 - Fio Cis-Bio - secção transversal da amostra

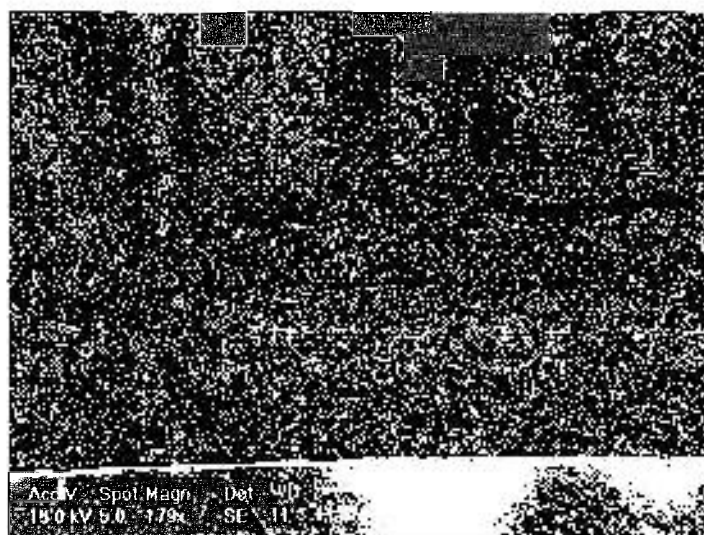


Figura 33 - Fio Cis-Bio - secção longitudinal da amostra

Através da análise por ativação neutrônica encontraram-se apenas os elementos irídio e platina.

As tabelas 12 e 13 (e a visão gráfica das figuras 34 à 40), apresentam as séries de medidas e os respectivos gráficos do controle de qualidade de um fio Cis-Bio irradiado no reator IEA-R1 por 40 horas, posição número 48, prateleira 7, fluxo de nêutrons $1,96 \times 10^{13} \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$. A avaliação da homogeneidade, após a ativação, foi realizada medindo-se a carga acumulada em nano-Coulumb, com tempo de aquisição de 2 minutos, centímetro a centímetro, por 3 vezes, no sistema de controle de qualidade instalado na "hot cell".

A média aritmética e o desvio em porcentagem em relação a essa média, para cada uma das séries de medidas, foram as seguintes:

Fio Cis-Bio:

Medida 1	$X = 1,8187 \times 10^{-9} \pm 0,0290 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 4,69\%$
Medida 2	$X = 1,8185 \times 10^{-9} \pm 0,0299 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 4,86\%$
Medida 3	$X = 1,8076 \times 10^{-9} \pm 0,0242 \times 10^{-9} \text{C}$	$\Delta = 3,51\%$

A atividade total foi medida em uma câmara de ionização tipo poço marca Capintec, modelo CRC-12 e o valor encontrado foi: $A = 60,1 \text{mCi} = 2223,7 \text{MBq}$ para um fio de 47cm de comprimento e massa de irídio de 0,022g . A atividade linear foi $A_e = 1,28 \text{mCi/cm} = 47,31 \text{MBq/cm}$.

Tabela 12 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio -
medidas obtidas

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
1	1,7587	1,7301	1,8124
2	1,7857	1,7513	1,8127
3	1,8184	1,7919	1,7442
4	1,7736	1,8475	1,838
5	1,7989	1,8301	1,8413
6	1,8025	1,7958	1,8352
7	1,8017	1,8199	1,8371
8	1,8181	1,7614	1,8383
9	1,8132	1,8076	1,8141
10	1,8117	1,8356	1,7719
11	1,8151	1,8361	1,7738
12	1,8051	1,8219	1,7626
13	1,8256	1,836	1,7861
14	1,8303	1,8705	1,816
15	1,8582	1,8337	1,8081
16	1,904	1,8267	1,803
17	1,8033	1,8352	1,795
18	1,8042	1,8361	1,7811
19	1,8618	1,8233	1,7811
20	1,8793	1,8009	1,8156
21	1,8538	1,7754	1,7951
22	1,8331	1,7756	1,8046
23	1,8692	1,8178	1,8201

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
24	1,8564	1,852	1,7971
25	1,7928	1,8468	1,7943
26	1,7948	1,8189	1,8141
27	1,8029	1,8337	1,8104
28	1,8191	1,8338	1,8121
29	1,8378	1,8476	1,814
30	1,8325	1,8713	1,8294
31	1,8148	1,814	1,8328
32	1,7945	1,8153	1,8158
33	1,8279	1,8425	1,8078
34	1,8036	1,8423	1,7918
35	1,8146	1,8164	1,8043
36	1,8183	1,8046	1,8345
37	1,8093	1,8127	1,8243
38	1,8017	1,7799	1,8179
39	1,8005	1,7712	1,8404
40	1,7987	1,7789	1,8324
41	1,8261	1,8355	1,7969
42	1,8261	1,8464	1,8202
43	1,8517	1,8238	1,8322
44	1,8333	1,8028	1,8421
45	1,8298	1,8161	1,8127
46	1,7671	1,8441	1,7749
47	1,8472	1,841	1,7522
48	1,7721	1,8345	1,7746

Tabela 13 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio -
frequência das medidas

Intervalo	Medida 1		Medida 2		Medida 3	
	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência
$X_1=[0,X-5]$	1,7278	0	1,7275	0	1,7173	0
$X_2=[X-5,X-4]$	1,7460	0	1,7457	1	1,7353	0
$X_3=[X-4,X-3]$	1,7642	1	1,7639	2	1,7534	2
$X_4=[X-3,X-2]$	1,7824	3	1,7821	5	1,7715	1
$X_5=[X-2,X-1]$	1,8005	7	1,8003	2	1,7896	7
$X=[X-1,X]$	1,8187	17	1,8185	10	1,8076	9
$X_6=[X,X+1]$	1,8369	10	1,8367	17	1,8257	17
$X_7=[X+1,X+2]$	1,8551	4	1,8548	9	1,8438	12
$X_8=[X+2,X+3]$	1,8733	4	1,8730	2	1,8619	0
$X_9=[X+3,X+4]$	1,8915	1	1,8912	0	1,8799	0
$X_{10}=[X+4,X+5]$	1,9097	1	1,9094	0	1,8980	0
$X_{11}=[X+5,...]$	Demais	0	Demais	0	Demais	0

Obs1: X refere-se à média aritmética das medidas; a média está destacada em negrito.

Obs2: A primeira coluna indica os intervalos em relação à média, com os números indicando os percentuais utilizados no intervalo.

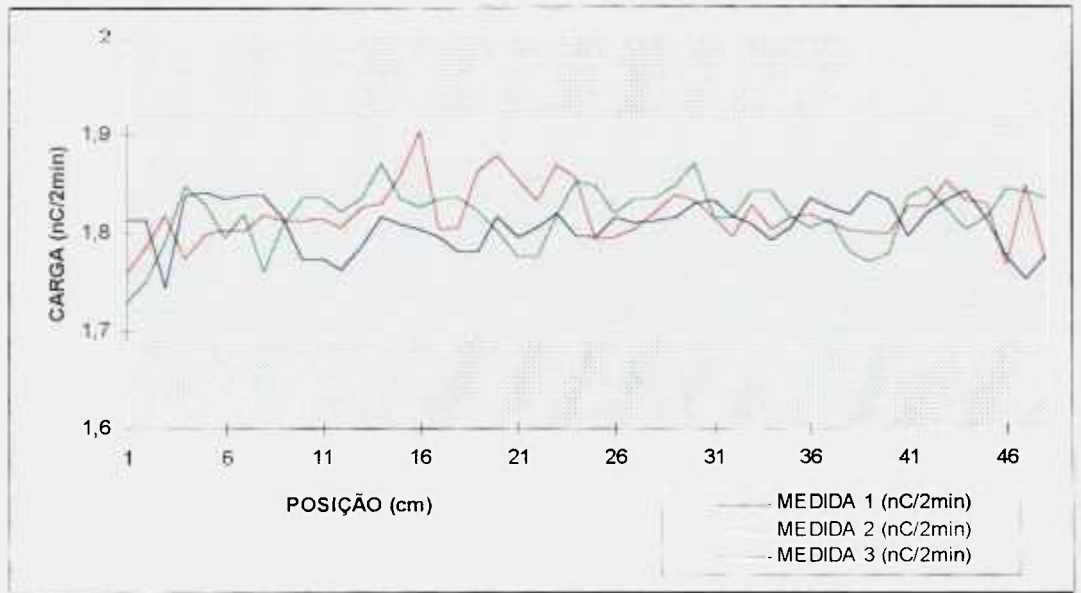


Figura 34 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medidas obtidas

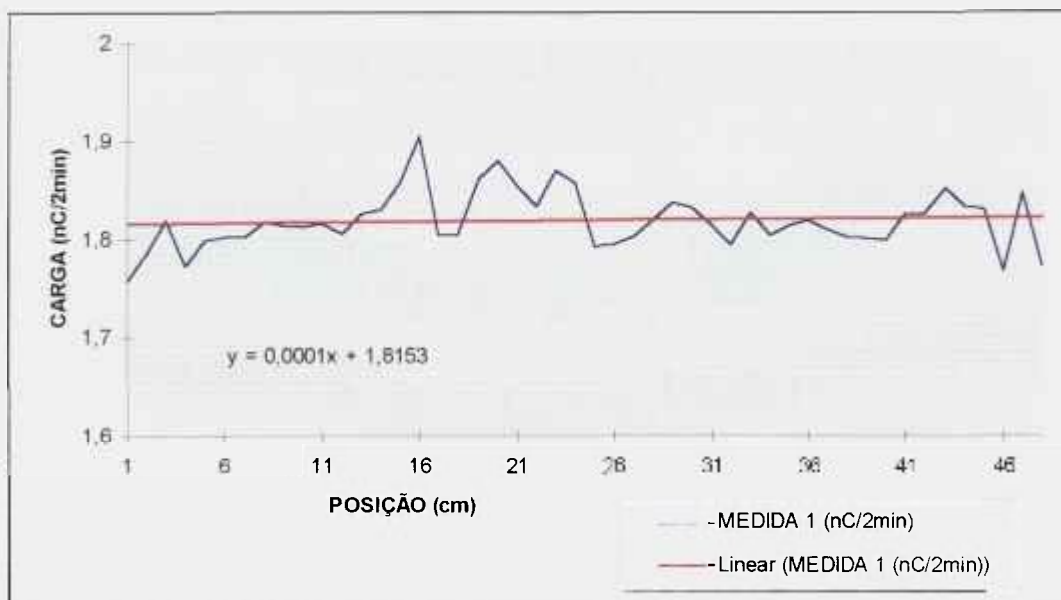


Figura 35 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medida 1

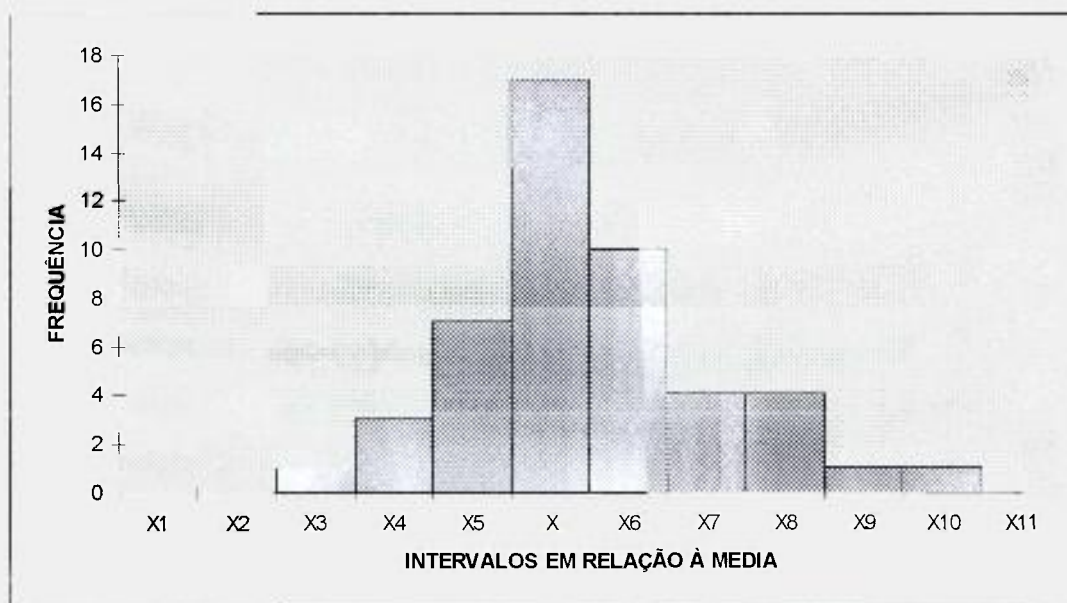


Figura 36 - Histograma da ativação do fio Cis-Bio - medida 1

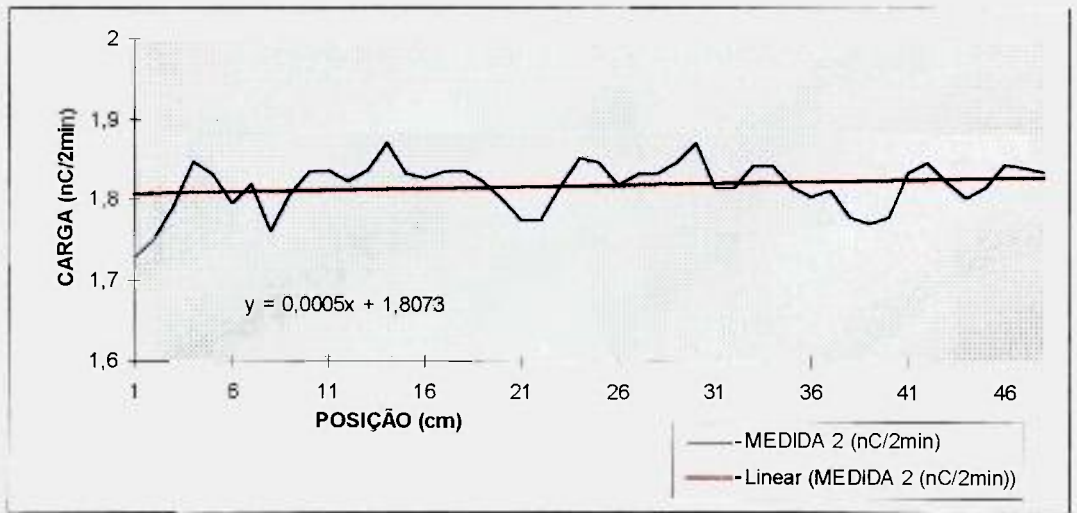


Figura 37 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medida 2



Figura 38 - Histograma da ativação do fio Cis-Bio - medida 2

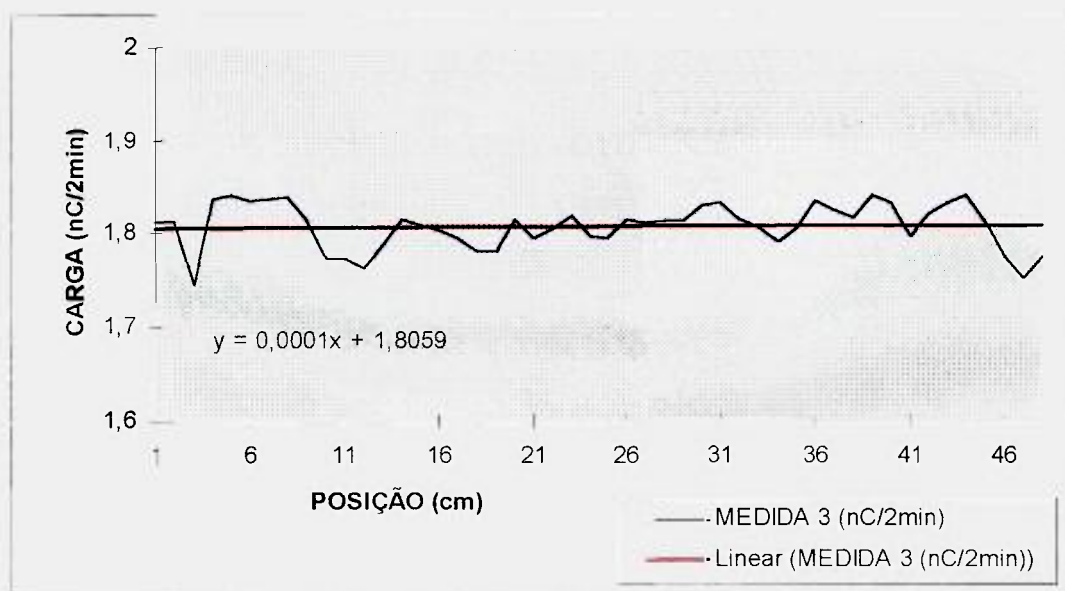


Figura 39 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Cis-Bio - medida 3

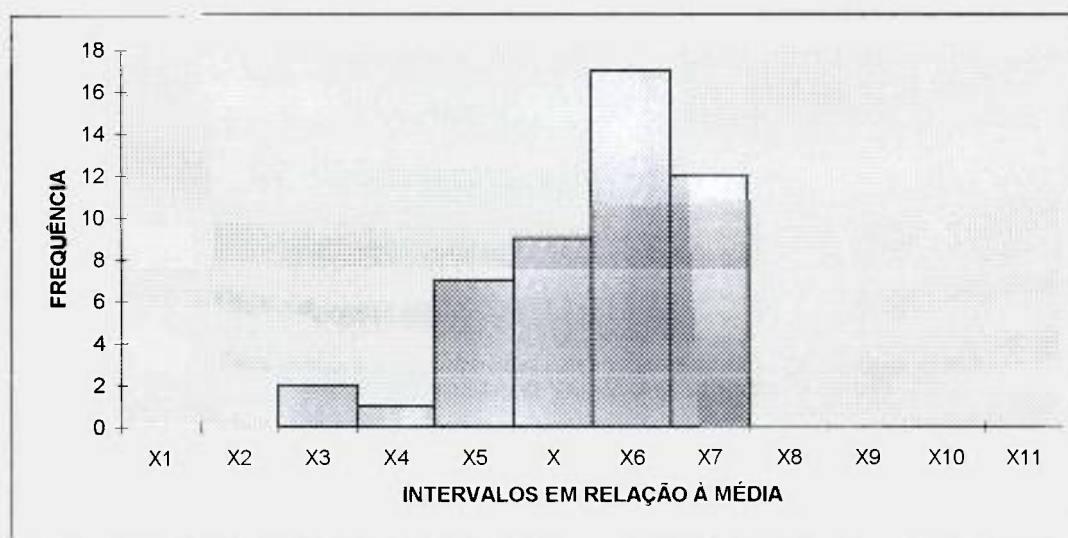


Figura 40 - Histograma da ativação do fio Cis-Bio - medida 3

4.2 FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA

A caracterização dimensional do fio de produção brasileira foi efetuada medindo-se os diâmetros externo e do núcleo, que apresentaram, respectivamente, os valores de $(0,36 \pm 0,02)$ mm e $(0,16 \pm 0,02)$ mm. Não existe um valor normalizado para estas dimensões. No entanto, como este fio deve ser inserido em um cateter com 0,4mm de diâmetro interno, constitui-se um requisito que o diâmetro externo do fio não seja superior à 0,33mm.

A microdureza Vickers foi estimada nas secções transversais do revestimento (platina) e do núcleo (platina-irídio) e apresentaram respectivamente os valores de (101 ± 5) HV e (330 ± 15) HV. Estes valores situaram-se num intervalo que propiciou ductilidade suficiente para manusear o fio sem que ocorresse o seu rompimento.

As secções transversais e longitudinais do fio foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (aparelho - M.E.V. Phillips XL-30). Observou-se uma distribuição irregular do núcleo ao longo da secção longitudinal. Verificou-se através da secção transversal que o núcleo não se apresentava em posição concêntrica em relação ao fio, como mostram as figuras 41 e 42.

Realizou-se em diversos pontos ao longo da secção longitudinal do fio a análise por energia dispersiva (EDS), para a determinação da porcentagem em peso e distribuição dos constituintes. Os valores médios para as porcentagens de platina e irídio foram $(76,05 \pm 3,54)$ e $(23,94 \pm 3,54)$, respectivamente. A diferença entre as porcentagens máxima e mínima de platina e irídio situaram-se em torno de 15%.

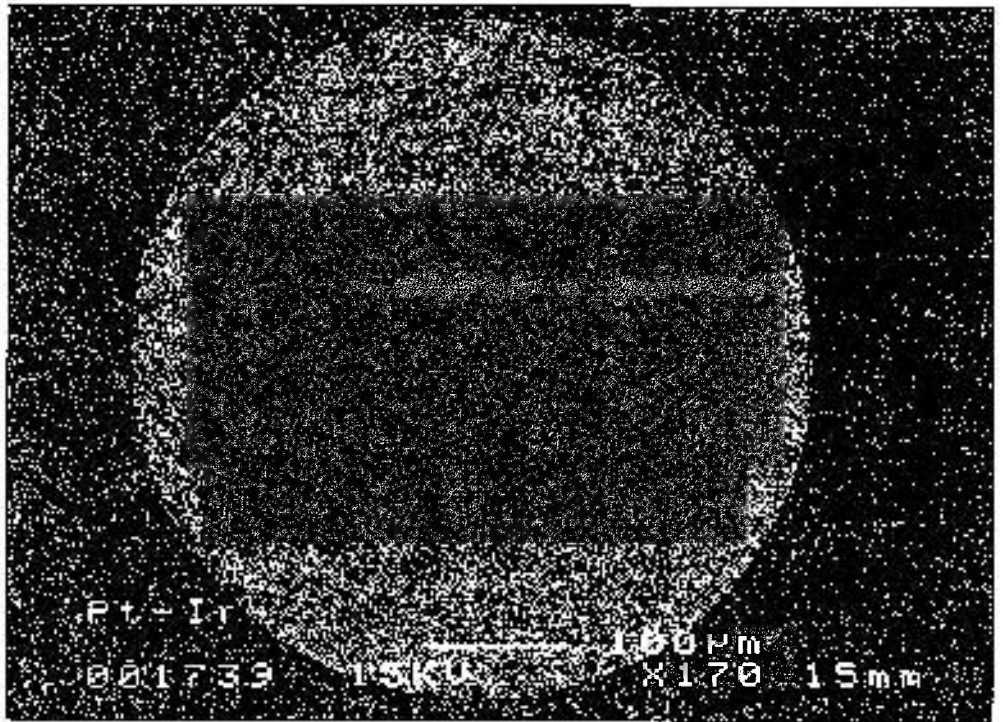


Figura 41 - Fio Nacional - secção transversal da amostra

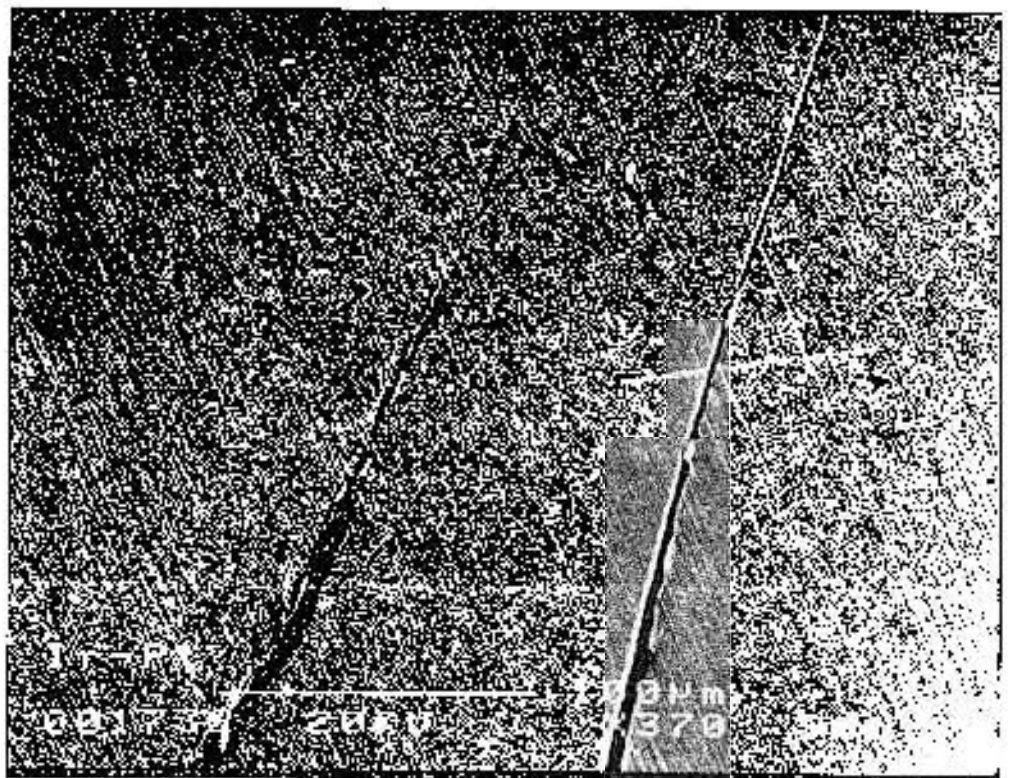


Figura 42 - Fio Nacional - secção longitudinal da amostra

Utilizou-se a técnica de fluorescência de raios-x para analisar a presença de contaminantes. Detectou-se na superfície do fio a presença de platina e baixas concentrações de cobre, ferro e cromo (menor que 50mg/g), que neste caso não alteraram significativamente o espectro. A presença dos contaminantes no fio, provenientes da matéria prima e/ou do conjunto fieira/lubrificante, deve ser a menor possível, pois podem ocasionar elementos radioativos indesejáveis. Para ensaio do núcleo, uma pequena amostra do fio foi lixada (600 mesh), visando a remoção do revestimento e verificou-se a presença apenas de platina e irídio.

A distribuição irregular do irídio e o posicionamento não concêntrico do núcleo no interior do tubo de platina ocasionaram dispersão na medida da atividade ao longo do fio. A variação aceita para o valor da dispersão da atividade é de 5% em relação a média aritmética de cada ponto.

A média aritmética e o desvio em porcentagem em relação a essa média, para cada uma das séries de medidas, foram as seguintes:

Fio de produção brasileira:

$$\text{Medida 1 X} = 0,9150 \times 10^{-9} \pm 0,0843 \times 10^{-9}\text{C} \quad \Delta = 15,06\%$$

$$\text{Medida 2 X} = 0,9007 \times 10^{-9} \pm 0,0601 \times 10^{-9}\text{C} \quad \Delta = 12,09\%$$

$$\text{Medida 3 X} = 0,9054 \times 10^{-9} \pm 0,0642 \times 10^{-9}\text{C} \quad \Delta = 13,36\%$$

Fio Best 2:

$$\text{Medida 1 X} = 1,7054 \times 10^{-9} \pm 0,0356 \times 10^{-9}\text{C} \quad \Delta = 4,63\%$$

$$\text{Medida 2 X} = 1,6959 \times 10^{-9} \pm 0,0315 \times 10^{-9}\text{C} \quad \Delta = 4,03\%$$

$$\text{Medida 3 X} = 1,6993 \times 10^{-9} \pm 0,0376 \times 10^{-9}\text{C} \quad \Delta = 5,04\%$$

As séries de medidas e os respectivos gráficos são apresentadas nas tabelas 14, 15, 16 e 17 e a visão gráfica através das figuras 43 à 56.

Posteriormente, o fio nacional foi separado do fio Best 2 e, com a parte da solda desprezada, a atividade total de cada um deles foi medida em uma câmara de ionização tipo poço marca Capintec, modelo CRC-12. Os valores encontrados para atividade total foram:

Fio Best 2: $A = 62,0\text{mCi} = 2294,0\text{ MBq}$; comprimento = 34cm;
massa de irídio = 0,054g; composição química: platina/
irídio (80/20); e aço inox.

Fio nacional: $A = 98,6\text{mCi} = 3648,2\text{ MBq}$; comprimento = 11cm;
massa de irídio = 0,98g; composição química:
platina/irídio (75/25).

A solução obtida a partir da dissolução do fio nacional foi analisada por espectrometria gama e observou-se em seu espectro apenas a presença dos elementos irídio e platina.

Tabela 14 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional
- medidas obtidas

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
2	0,7772	0,7918	0,7844
3	0,8087	0,8509	0,8206
4	0,8665	0,8517	0,8651
5	0,9116	0,9267	0,9058
6	0,9183	0,9463	0,9215
7	0,9504	0,963	0,9396
8	0,976	0,9295	0,9513
9	1,0136	0,9662	0,9739
10	1,0125	0,8804	0,9868

Tabela 15 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional
- frequência das medidas

Intervalo	Medida 1		Medida 2		Medida 3	
	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência
$X_1=[0,X-5]$	0,8692	3	0,8557	3	0,8602	2
$X_2=[X-5,X-4]$	0,8784	0	0,8647	0	0,8692	1
$X_3=[X-4,X-3]$	0,8875	0	0,8737	0	0,8783	0
$X_4=[X-3,X-2]$	0,8967	0	0,8827	1	0,8873	0
$X_5=[X-2,X-1]$	0,9058	0	0,8917	0	0,8964	0
$X=[X-1,X]$	0,9150	1	0,9007	0	0,9054	0
$X_6=[X,X+1]$	0,9241	1	0,9097	0	0,9145	1
$X_7=[X+1,X+2]$	0,9333	0	0,9187	0	0,9236	1
$X_8=[X+2,X+3]$	0,9424	0	0,9277	1	0,9326	0
$X_9=[X+3,X+4]$	0,9516	1	0,9368	1	0,9417	1
$X_{10}=[X+4,X+5]$	0,9607	0	0,9458	0	0,9507	0
$X_{11}=[X+5,...]$	Demais	3	Demais	3	Demais	3

Obs1: X refere-se à média aritmética das medidas; a média está destacada em negrito.

Obs2: A primeira coluna indica os intervalos em relação à média, com os números indicando os percentuais utilizados no intervalo.

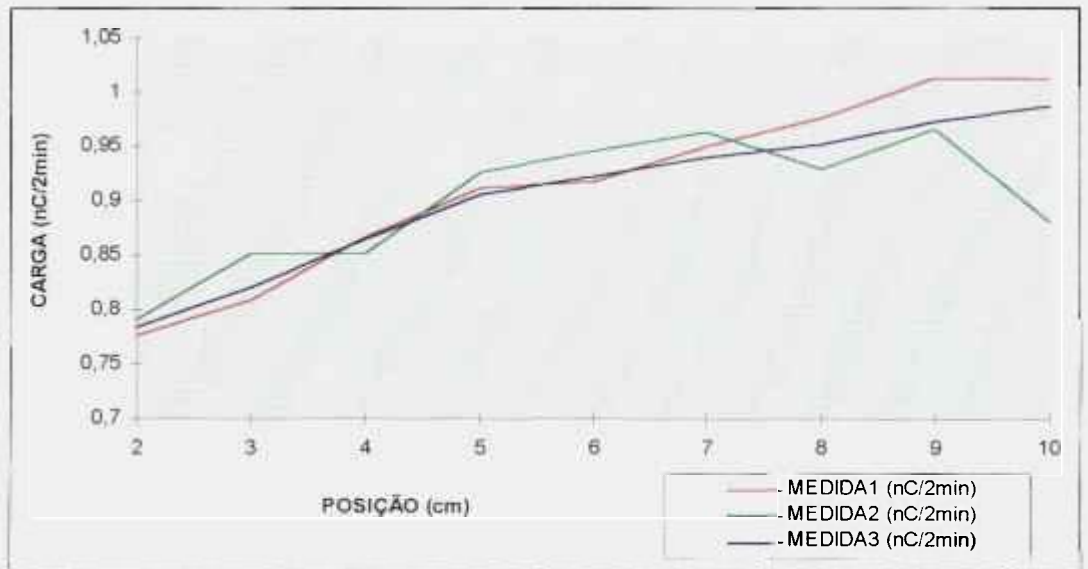


Figura 43 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medidas obtidas

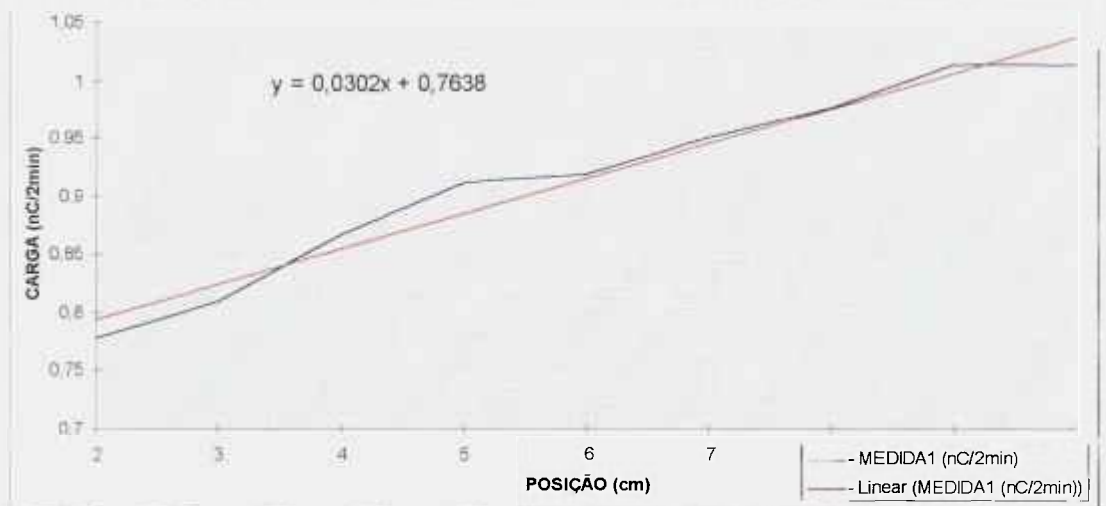


Figura 44 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medida 1

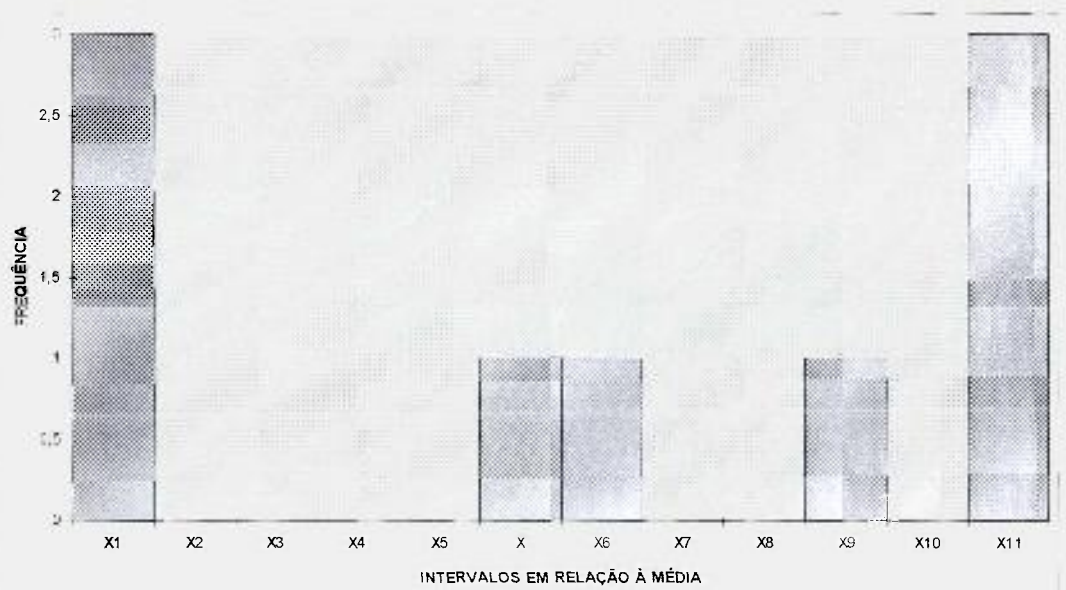


Figura 45 - Histograma da ativação do fio nacional - medida 1

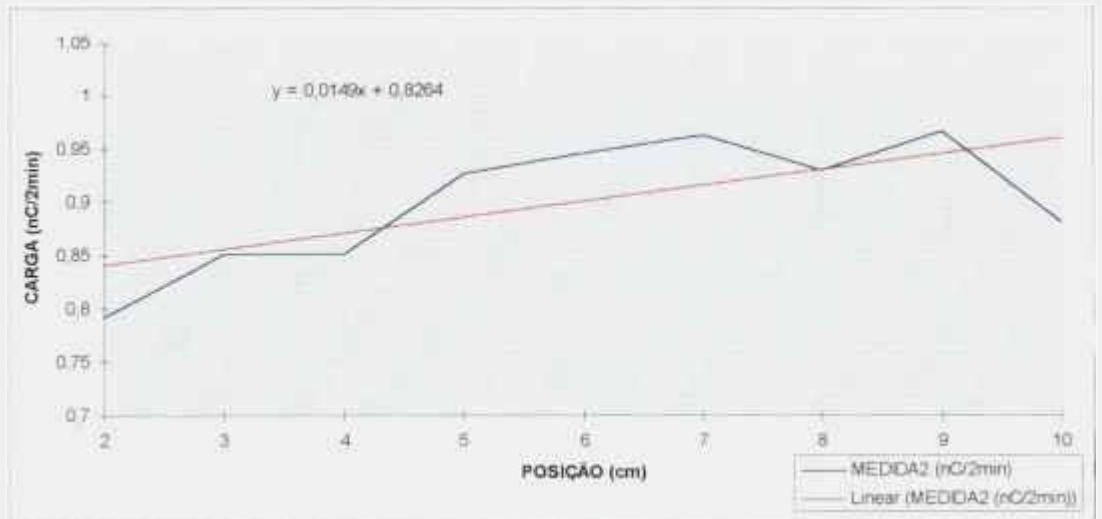


Figura 46 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medida 2

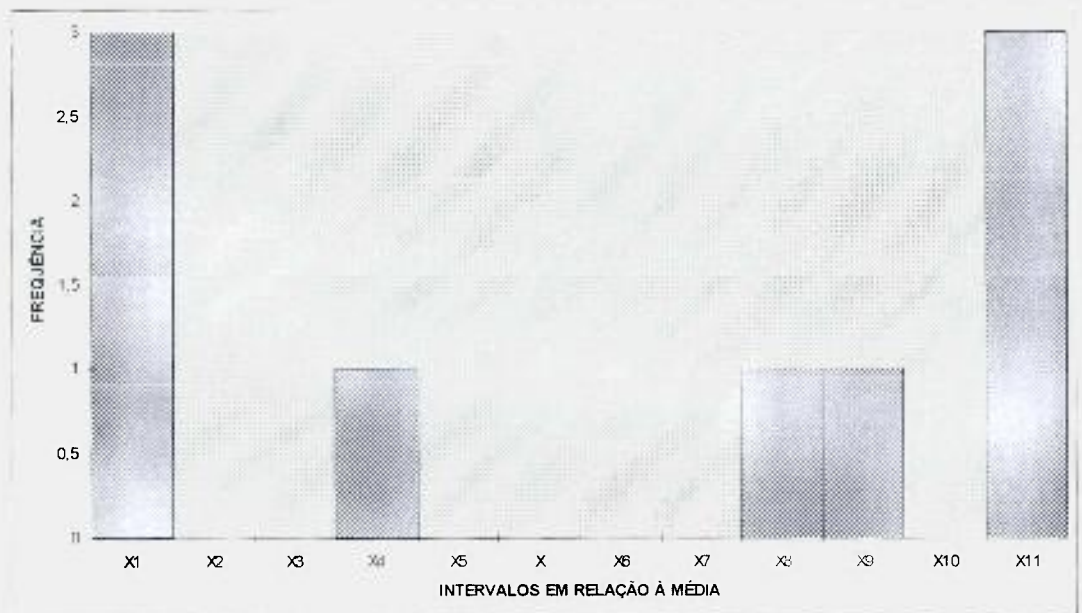


Figura 47 - Histograma da ativação do fio nacional - medida 2

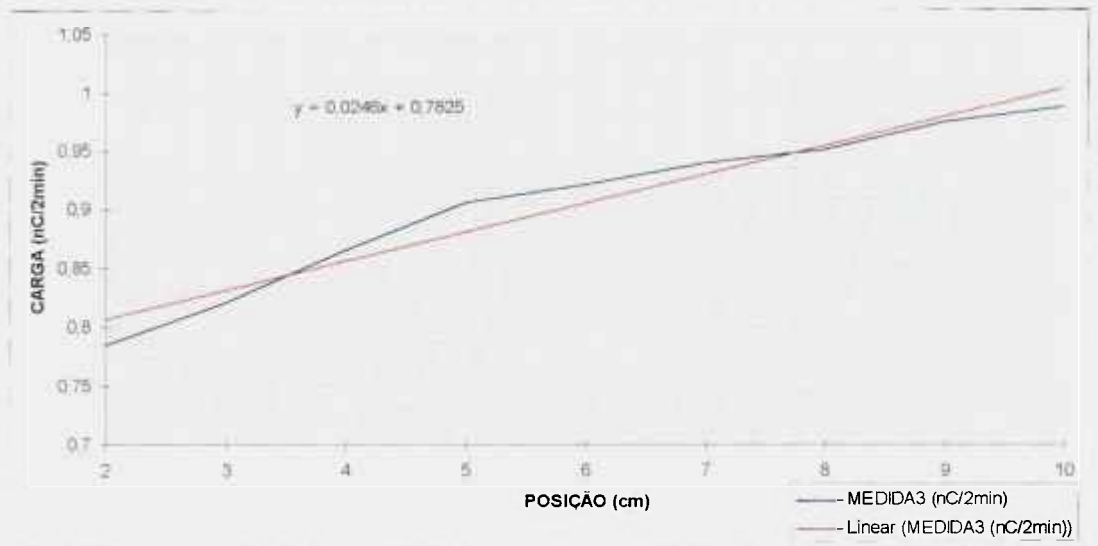


Figura 48 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio nacional - medida 3

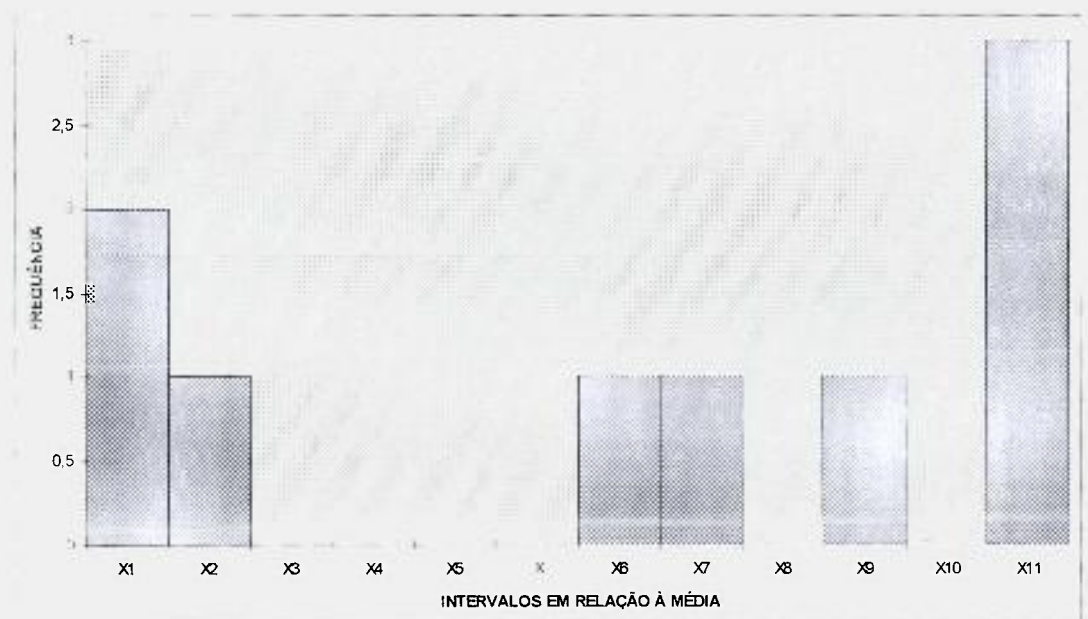


Figura 49 - Histograma da ativação do fio nacional - medida 3

Tabela 16 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 -
medidas obtidas

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
17	1,7536	1,7578	1,7564
18	1,7218	1,7513	1,6968
19	1,744	1,7143	1,6673
20	1,7628	1,6876	1,6712
21	1,7747	1,6977	1,6817
22	1,7261	1,7553	1,7108
23	1,6808	1,7449	1,7174
24	1,7355	1,6882	1,6979
25	1,7617	1,6974	1,6629
26	1,716	1,7002	1,6668
27	1,7147	1,7253	1,6817
28	1,6971	1,7236	1,693
29	1,7022	1,7352	1,6761
30	1,73	1,706	1,6692
31	1,7371	1,6997	1,6675
32	1,7058	1,6862	1,6727
33	1,711	1,6814	1,6335
34	1,7049	1,6711	1,6641
35	1,6989	1,6822	1,6671
36	1,6643	1,6781	1,6616
37	1,6834	1,6713	1,6497
38	1,7087	1,6615	1,6279
39	1,6901	1,6326	1,6303
40	1,6737	1,6791	1,6493
41	1,6787	1,6723	1,626
42	1,6868	1,6958	1,6218
43	1,7109	1,696	1,5969
44	1,6648	1,6865	1,61

Posição	Medida 1 (nC/2min)	Medida 2 (nC/2min)	Medida 3 (nC/2min)
45	1,6387	1,6848	1,5966
46	1,6619	1,6804	1,5996
47	1,6264	1,6276	1,615

Tabela 17 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - frequência das medidas

Intervalo	Medida 1		Medida 2		Medida 3	
	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência	Valor Base	Frequência
$X_1=[0,X-5]$	1,6201	0	1,6111	0	1,5764	0
$X_2=[X-5,X-4]$	1,6372	1	1,6280	1	1,5929	0
$X_3=[X-4,X-3]$	1,6542	1	1,6450	1	1,6095	3
$X_4=[X-3,X-2]$	1,6713	3	1,6619	1	1,6261	4
$X_5=[X-2,X-1]$	1,6883	5	1,6789	4	1,6427	3
$X=[X-1,X]$	1,7054	5	1,6959	10	1,6593	2
$X_6=[X,X+1]$	1,7224	7	1,7128	6	1,6759	10
$X_7=[X+1,X+2]$	1,7395	4	1,7298	3	1,6925	3
$X_8=[X+2,X+3]$	1,7566	2	1,7467	2	1,7091	3
$X_9=[X+3,X+4]$	1,7736	2	1,7637	3	1,7257	2
$X_{10}=[X+4,X+5]$	1,7907	1	1,7806	0	1,7423	0
$X_{11}=[X+5,...]$	Demais	0	Demais	0	Demais	1

Obs1: X refere-se à média aritmética das medidas; a média está destacada em negrito.

Obs2: A primeira coluna indica os intervalos em relação à média, com os números indicando os percentuais utilizados no intervalo.

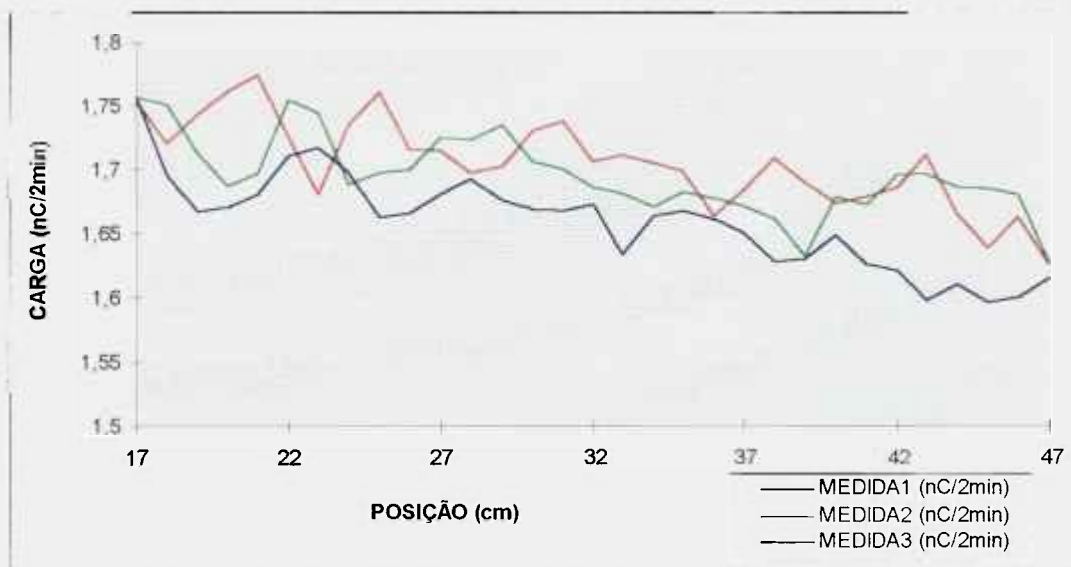


Figura 50 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medidas obtidas

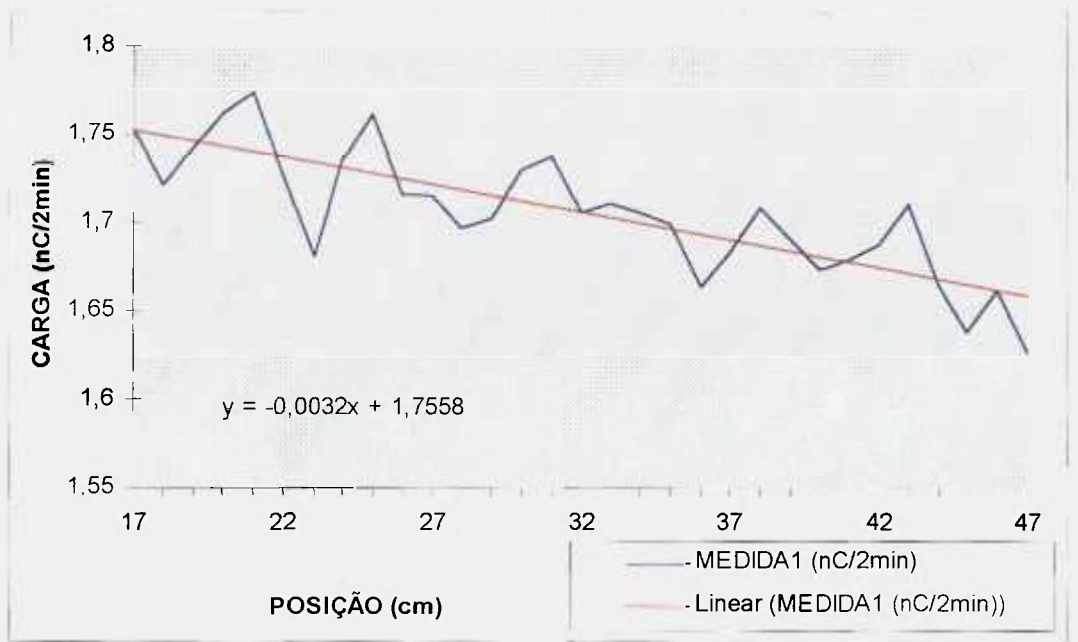


Figura 51 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medida 1

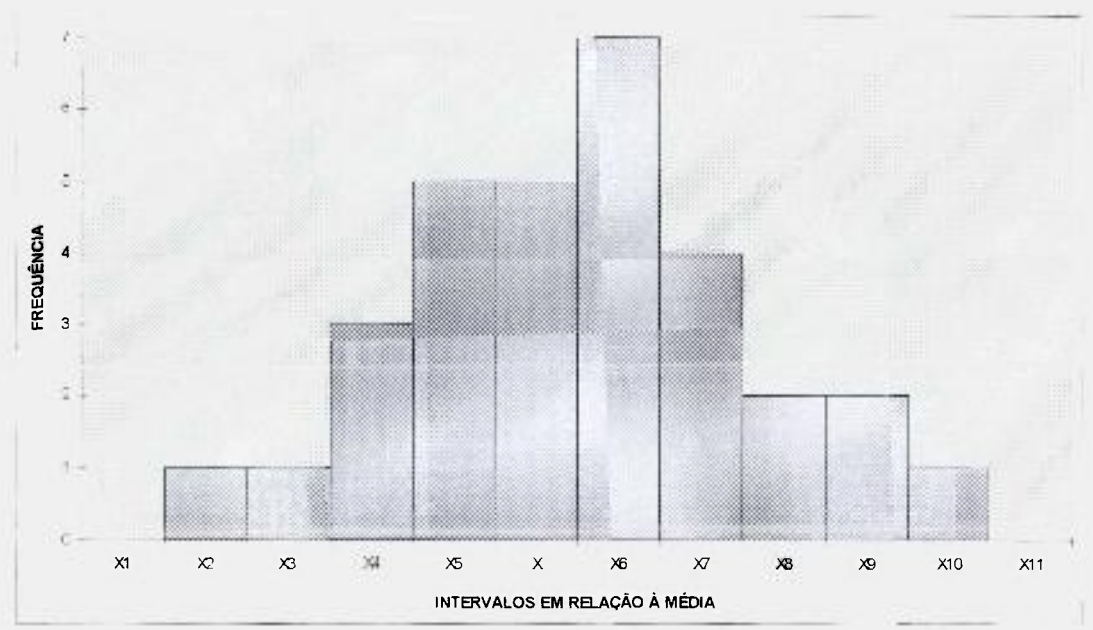


Figura 52 - Histograma da ativação do fio Best 2 - medida 1

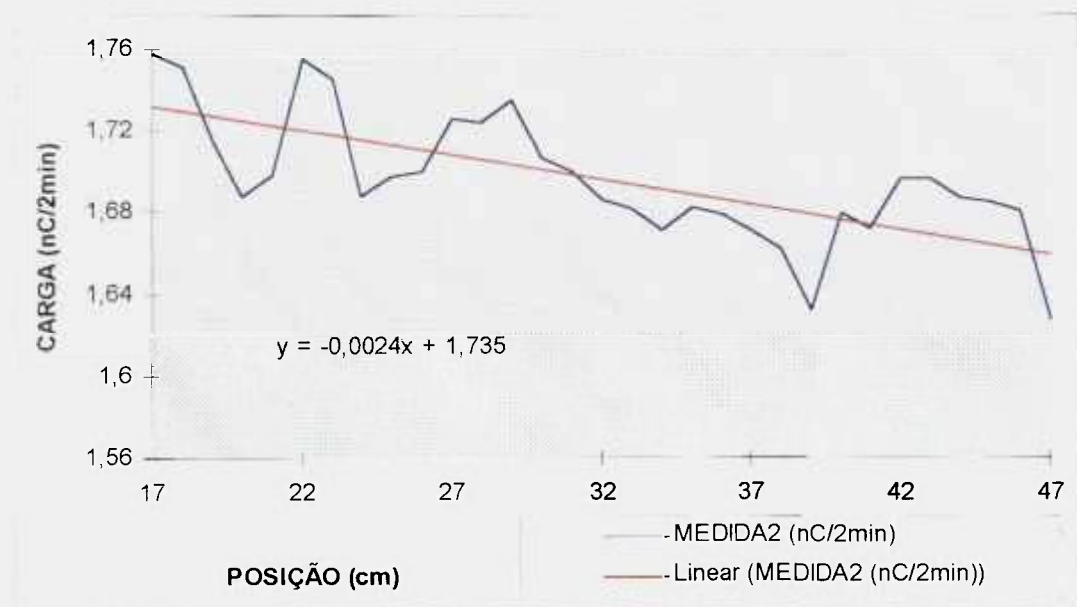


Figura 53 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medida 2

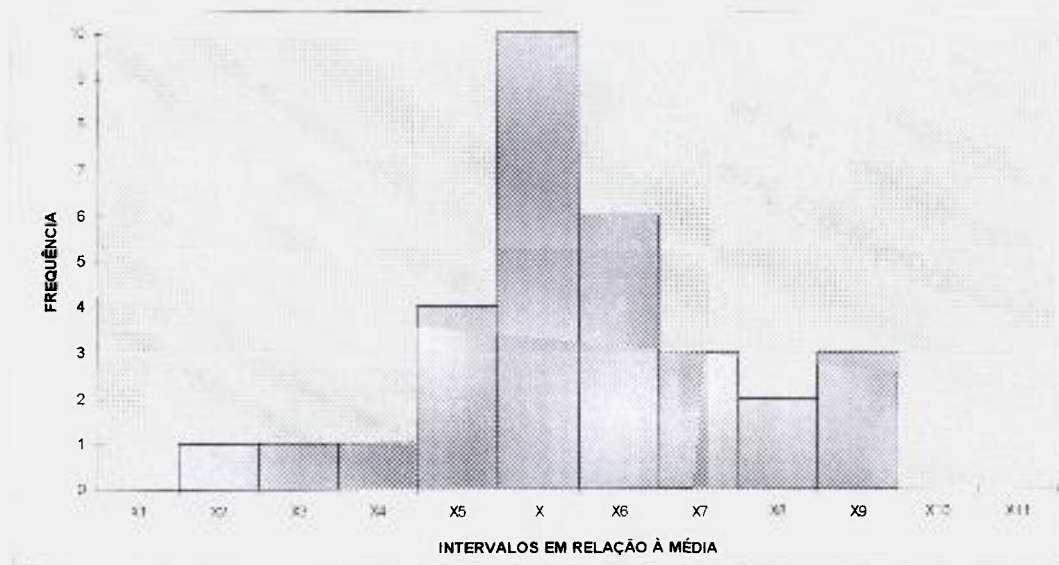


Figura 54 - Histograma da ativação do fio Best2 - medida 2

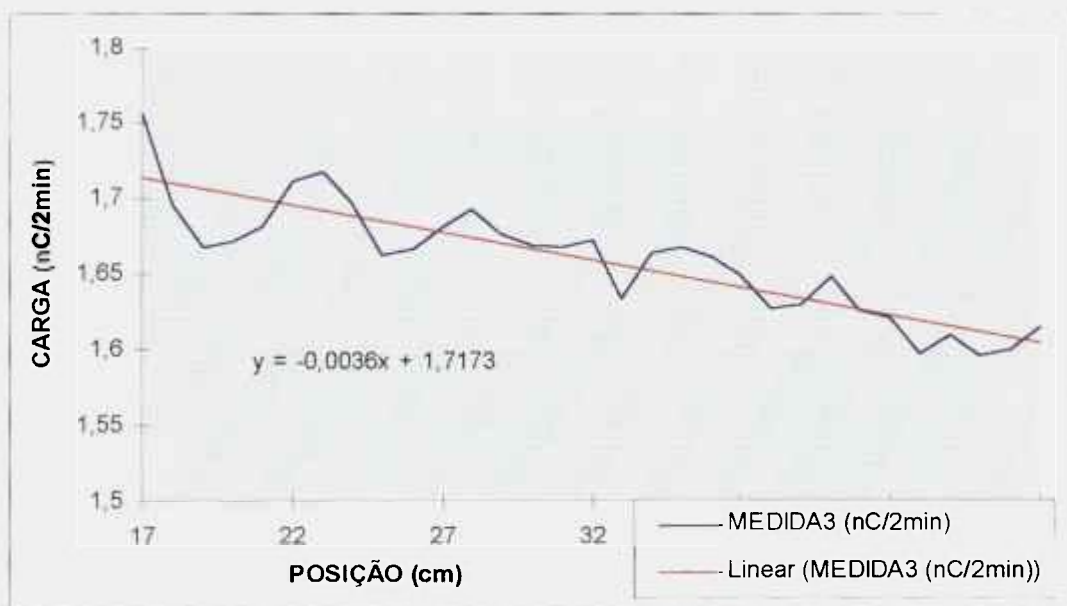


Figura 55 - Determinação da homogeneidade da ativação do fio Best2 - medida 3

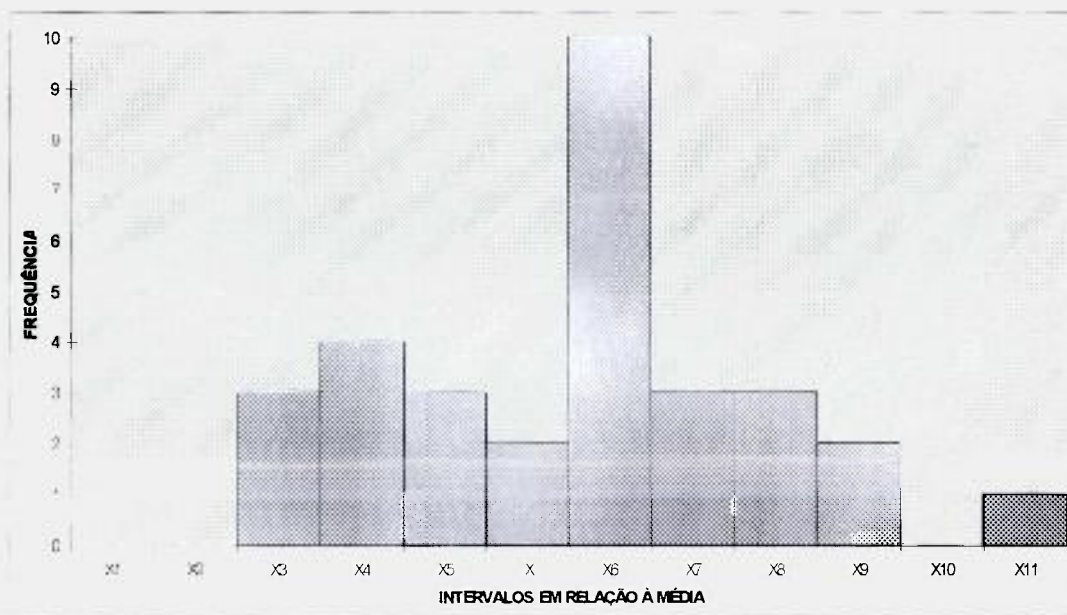


Figura 56 - Histograma da ativação do fio Best2 - medida 3

4.3 APLICAÇÃO CLÍNICA

Os fios irradiados no IPEN, aprovados no controle de qualidade, foram enviados a hospitais e aplicados em 30 pacientes. Apresentamos a seguir um exemplo de aplicação clínica, realizada no Hospital A. C. Camargo⁴¹:

paciente do sexo feminino, 2 anos de idade com um rabdomiosarcoma (músculo da coxa). Sofreu uma remoção cirúrgica e braquiterapia local. Para a aplicação da técnica de braquiterapia utilizou-se um implante planar com 7 fios, de 5cm cada, irradiados no IPEN. A atividade linear foi de 1,95mCi/cm, a taxa de dose foi de 120,47cGy/h e a dose total foi de 4505cGy em 44 horas. O implante foi feito em junho de 1995 e a paciente está curada. As figuras 57, 58 e 59 ilustram a aplicação.

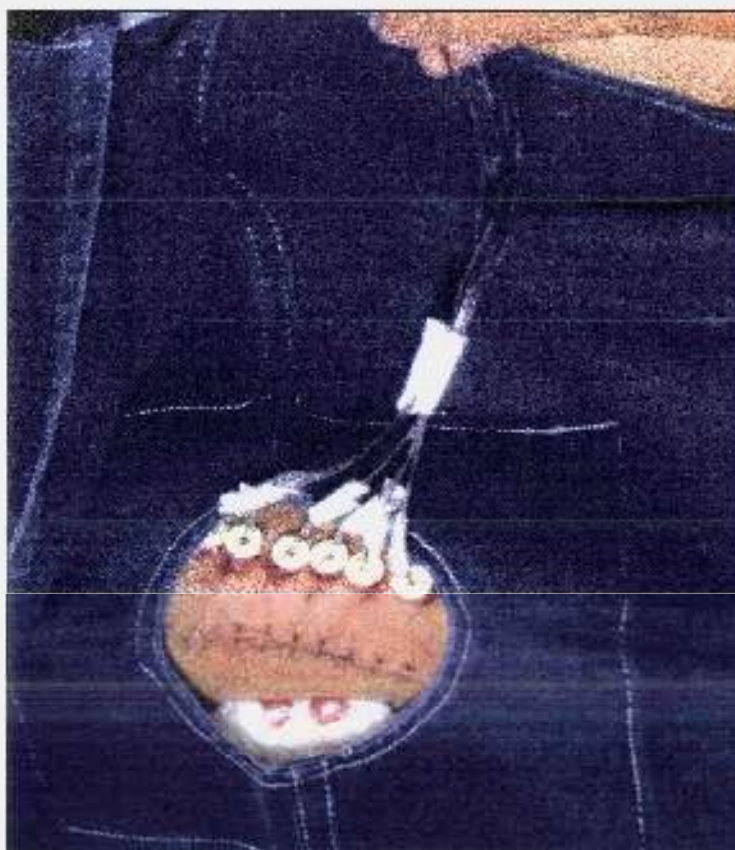


Figura 57 - Colocação dos fios na parte anterior da perna direita da paciente - Hospital A. C. Camargo



Figura 58 - Radiografia da parte anterior da perna da paciente com os fios da aplicação de braquiterapia

Fonte: A. C. Camargo



Figura 59 - Perna direita da paciente após a aplicação de braquiterapia

Fonte: A. C. Camargo

4.4 ESTIMATIVA DE CUSTO

O preço final, para o hospital, de um fio de irídio importado já ativado é da ordem de R\$ 2.000,00 por metro. Estima-se que o fio ativado pelo IPEN, cujo desenvolvimento está sendo apresentado neste trabalho, terá um custo de R\$ 1.200,00. Como se pode observar, o preço será 40% menor, possibilitando o atendimento de um número maior de pacientes.

5. CONCLUSÃO

5.1 FIO IMPORTADO

Observando-se os resultados dos fios importados Best1, Best2 e Cis-Bio apresentados no capítulo anterior, conclui-se que estes fios estão adequados para aplicação em braquiterapia, pois o valor da dispersão da distribuição da atividade em relação a média aritmética das medidas não ultrapassa 5%.

O fio Hereaus, analisado neste trabalho, não satisfaz as condições de homogeneidade da liga Ir-Pt para uso em braquiterapia pois o valor da dispersão da distribuição da atividade em relação a média aritmética das medidas foi superior à 5%. Este fio apresentou variação de até 8,84%, estando inadequado aos fins a que se destina.

Os elementos encontrados nos fios, além de irídio e platina, pela técnica de análise de fluorescência de raios-X, são em quantidades muito pequenas e não produzem uma atividade significativa a ponto de comprometer o seu uso em braquiterapia.

O laboratório para produção de fontes de irídio-192 para uso em braquiterapia está implantado e em produção experimental. As fontes aprovadas no controle de qualidade estão sendo enviadas a clínicas e hospitais e aplicadas em pacientes.

Na próxima fase do trabalho, utilizando-se o fio importado, dar-se-á o início da produção comercial com possibilidade de fornecimento do fio irradiado para todo Brasil e América Latina.

5.2 FIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA

O fio de procedência nacional apresentou características próximas às do fio importado, necessitando pequenas modificações em seu processo de produção.

A dispersão normalmente aceita é da ordem de 5% de desvio em relação à média. O fio nacional apresentou variação de até 15,06%, estando, ainda, inadequado aos fins à que se destina.

Com a finalidade de verificar a presença de impurezas efetuou-se a dissolução do fio de produção brasileira e analisou-se por espectrometria gama. Os únicos elementos encontrados foram irídio e platina.

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que a causa da dispersão acima de 5% no fio nacional não é consequência de impurezas, e, sim da heterogeneidade da liga. Isto posto, recomenda-se alterações na sequência de trefilação, com a finalidade de homogeneizar a distribuição de irídio ao longo do fio, para que possa ser usado em braquiterapia.

Como sequência deste trabalho, com as sugestões anteriormente apresentadas, poderemos obter fio de produção brasileira compatível com a

necessidade da aplicação de braquiterapia, possibilitando o atendimento da classe social menos favorecida, em virtude de um menor custo de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER (INCa). **O Problema do Câncer no Brasil**. Rio de Janeiro, 1995.
- 2 - INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER (INCa). **Câncer no Brasil**. Dados dos Registros de Base Populacional. Rio de Janeiro, 1991.
- 3 - INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER (INCa). Registro Nacional de Patologia Tumoral. **Diagnósticos de Câncer**. Brasil 1981/85. Rio de Janeiro, 1991.
- 4 - VERHASSELT, Y. Notes on Geography and Cancer. **Soc. Sci. Med.**, v. 11, n. 14/16, p. 745-748, 1977.
- 5 - RICE, D. P. ; HODGSON, T. A. Incidences Sociales et Economiques du Cancer aux États-Unids d"Amérique. **World Health Stat.**, v. 33, n. 1, p. 56-100, 1980.
- 6 - TRIPPE, N. **Estado Atual da Radioterapia no Brasil** (Trabalho apresentado no "Workshop on Radiotherapy and its Clinical Applications". Panama, de 31 de julho à 04 de agosto de 1995)
- 7 - ROSTELATO, M. E. C. M. ; RELA, P. R. ; ROCCA, H. C. C. ; LEPKI, V. ; DIAS, W. ; RACY, M. ; NIETO, W. ; REIS, A. **Laboratório de Produção de Fontes Radioativas para Uso em Braquiterapia**. In: II ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES. 25 - 29 outubro, 1993. Caxambu, Anais ... Caxambu 1993, p. 231.
- 8 - CRUZ, J. C. ; OLIVEIRA, V. C. ; PEREZ, C. A. ; KALNICKI, S. **Implantes Intersticiais com Iridio - 192**. (Não publicado).
- 9 - PEREZ, C. A. ; BRADY, L. W. **Principles and Practice of Radiation Oncology**. Physics of Brachytherapy. St. Louis: J. B. Lippincott, 1987.
- 10 - BASIL, A. S. **Radioterapia**. São Paulo: Ed. USP, 1968.
- 11 - BASIL, S. H. Techniques of Interstitial and Intracavitary Radiation. **Cancer J. Am. Soc.**, v. 22, p. 745 - 751, 1968.
- 12 - VERHAEGEN, F. ; DIJK, E. ; THIERENS, H. ; AALBERS, A. ; SEUNTJENS, J. Calibration of Low Activity Ir-192 Brachytherapy Sources in Terms of Reference Air Kerma Rate with Large Volume Spherical Ionization Chambers. **Phys. Med. and Biol.**, v. 37, n. 11, p. 2071 - 2082, 1992.

- 13 - OLIVEIRA, V. C. ; SOARES, W. E. ; SALVAJOLI, J. V. ; PERES, O. ;
MORALES, F. C. ; FUJISAWA, S.; TAMONI, F. M. A. Iridium, terapia
versátil , táticas e técnicas. **Radiol. Bras.**, v. 15, n.1, p. 44 - 48, 1982.
- 14 - GODDEN, T. J. **Physical Aspects of Brachytherapy**. Medical Physics
Handbooks 19. Bristol: Adam Hilger, 1988.
- 15 - BERNSTEIN, M. ; GUTIN, P. Interstitial Irradiation of Brain Tumors.
Neurosurgery, v. 9, n. 6, p. 741 - 750, 1981.
- 16 - GERBAULET, A. ; HAIE-MEDER, C. ; CHASSAGNE, D. Rôle de la
Curiethérapie dans le Traitement des Cancers Gynécologiques. **Bull.**
Cancer, v. 77, p. 245 - 250, 1990.
- 17 - PIERQUIN, B. ; CHASSAGNE, D. ; PÉREZ, R. **Présis de Curiethérapie**.
Paris: Masson, 1964.
- 18 - PINTO, A. C. **A História da Braquiterapia**. A Radioterapia no Brasil.
Curitiba: Liga Paranaense de Combate ao Câncer, 1995.
- 19 - PIERQUIN, B. ; CHASSAGNE, D. ; COX, J. D. Toward Consistent Local
Control of Certain Malignant Tumors. **Radiology**, v. 99, n. 3, p. 661 - 667,
1971.
- 20 - KASE, K. R. ; BJARNGARD, B. E. ; ATTIX, F. H. **The Dosimetry of**
Ionizing Radiation, v. III, New York: Academic Pr, 1990.
- 21 - PIERQUIN, B. HISTORY OF BRACHYTHERAPY. **BRACHYTHERAPY**
WORKING CONFERENCE. Hague, Proceedings ... Hague, 1988, p.3-5.
- 22 - PIERQUIN, B.; CHASSAGNE, D. ; CHAHBAZIAN, C. M. ; WILSON, J. F.
Brachytherapy. St. Louis: Warren H. Green, 1979, p. 43 – 79.
- 23 - PIERQUIN, B. ; DUTREIX, A. ; PAINE, C. H. ; CHASSAGNE, D. ;
MARINELLO, G. ; ASH, D. The Paris System in Interstitial Radiation
Therapy. **Acta Radiol. Oncol.**, v.17, p. 33 - 48, 1978.
- 24 - SCHMIDT-ULLRICH, R. ; ZWICKER, R. D. ; WU, A. ; KATHLEEN, K.
Interstitial Ir-192 Implants of the Oral Cavity: The Planning and
Construction of Volume Implants. **Int. J. Radiat. Oncol., Biol. Phys.**, v.
20, p. 1079 - 1085, 1991.
- 25 - BRIDGE, L. R. ; MARSHALL, D. S. C. ; WILSON, W. P. A Technique for the
Loading of Iridium 192 Wire. **Br. J. Radiol.**, v. 54, p.907-908, 1981.