

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

CONST. DE UM PROTÓTIPO P.
RADIAÇÃO-X INDUSTRIAL

Guaratinguetá
1987



CONSTRUÇÃO

CARLOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE " MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA "

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA E, APROVADA EM SUA FOR-
MA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

CONSTRUÇÃO DE UM PROTOTIPO
PARA RADIAÇÃO-X INDUSTRIAL

A. W. de Souza
Prof. Dr. Antonio Washington A. de Souza
Coordenador

EXAMINADORA:

Carlos Eduardo Silva de Amorim

Augusto Brandão D'Oliveira
Prof. Dr. Augusto Brandão D'Oliveira

-03-

Egberto Vana
Prof. Dr. Egberto Vana

Guaratinguetá - São Paulo - Dezembro de 1987

1110000128



CONSTRUÇÃO DE UM PROTOTIPO
PARA RADIAÇÃO-X INDUSTRIAL

Carlos Eduardo Silva de Amorim

Guaratinguetá - São Paulo - Dezembro de 1987

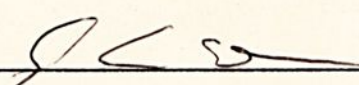


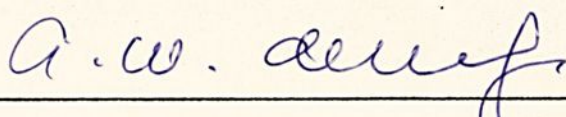
CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA RADIAÇÃO-X INDUSTRIAL

CARLOS EDUARDO SILVA DE AMORIM

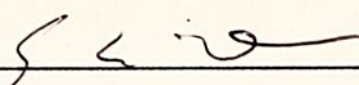
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE " MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

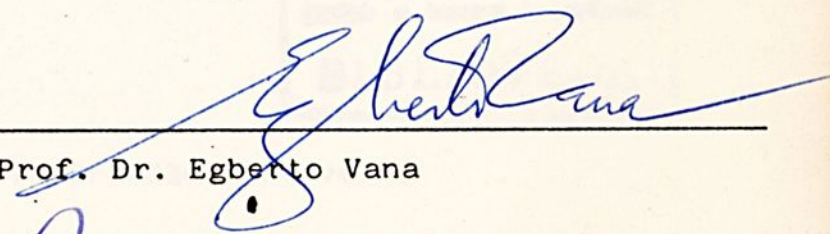
ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA E, APROVADA EM SUA FOR-
MA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

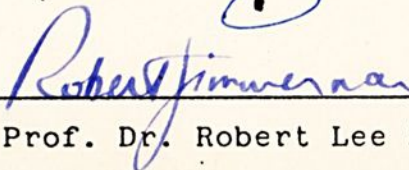

Prof. Dr. Augusto Brandão D'Oliveira


Prof. Dr. Antonio Washington A. de Souza
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Augusto Brandão D'Oliveira


Prof. Dr. Egberto Vana


Prof. Dr. Robert Lee Zimmerman

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"

UNESP - Faculdade de Engenharia

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO
PARA RADIAÇÃO-X INDUSTRIAL

Carlos Eduardo Silva de Amorim

00128



Prof. Augusto Brandão d'Oliveira

T621.386.1(043)

A524c



AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Augusto B. d'Oliveira, pela orientação e pela cuidadosa revisão deste trabalho.

Aos professores Washington de Sousa, Egberto Viana e Nelson Múrcio, pelas valiosas observações e sugestões feitas durante o desenvolvimento dos trabalhos experimentais.

Aos técnicos Cardoso, Wilson, Laércio e Edson pelo apoio moral e amigo, pela ajuda técnica e pela pronta disponibilidade de todo o equipamento e ferramental sob sua guarda.

A todo o pessoal das oficinas mecânicas, pela pronta disponibilidade de todo o maquinário e respectivo ferramental.

Ao Luciano, pelos ensinamentos envolvendo os processos de fotografia e revelação, bem como pela pronta disponibilidade de todo o equipamento e sala escura sob a sua guarda.

A todos os colegas docentes e funcionários da FEG, pelo espírito de incentivo e amizade mantido durante o decorrer dos trabalhos.

A meus pais



AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Augusto B. d'Oliveira, pela orientação e pela cuidadosa revisão deste trabalho.

Aos professores Washington de Sousa, Egberto Vana e Nelson Múrcia, pelas valiosas observações e sugestões feitas durante o desenvolvimento dos trabalhos experimentais.

Aos técnicos Cardoso, Wilson, Laércio e Edson pelo apoio moral e amigo, pela ajuda técnica e pela pronta disponibilidade de todo o equipamento e ferramental sob sua guarda.

A todo o pessoal das oficinas mecânicas, pela pronta disponibilidade de todo o maquinário e respectivo ferramental.

Ao Luciano, pelos ensinamentos envolvendo os processos de fotografia e revelação, bem como pela pronta disponibilidade de todo o equipamento e sala escura sob a sua guarda.

A todos os colegas docentes e funcionários da FEG, pelo espírito de incentivo e amizade mantido durante o decurso dos trabalhos.



RESUMO

A construção de uma fonte de raios-X para radiografias industriais constitui-se em tarefa complicada e onerosa, quando se busca a fiel reprodução de equipamentos comerciais ou de protótipos feitos em laboratórios avançados. Por outro lado, protótipos rudimentares podem ser construídos a baixo custo e com tecnologia simplificada.

Este trabalho descreve a construção de um protótipo de laboratório para produzir raio-X branco. Este opera por descarga capacitiva, cujas tensões de catodo foram até 200 KV e com correntes médias de até 15 mA durante até 30 segundos.

Estudos realizados com penetrômetros permitiram avaliar o seu desempenho. Sugestões são apresentadas no sentido de possibilitar futuros aperfeiçoamentos.



ABSTRACT

The construction of a X-ray source to be used for industrial radiography constitutes a complicated and onerous task, when one aims at a faithful reproduction of commercial equipment or an advanced laboratory prototype. On the other hand, a simple prototype may be built at a reduced price, with simple technology.

This work describes the construction of a laboratory prototype of a X-ray source. This source works by capacitive discharge, with a cathode voltage of up to 200 kV, and electric current of about 15 mA for a period of 30 seconds.

Studies had been made using penetrometers, which allow the prototype's performance to be evaluated. Suggestions are made on possible future developments.



SUMARIO

RESUMO	III
ABSTRACT	IV
SUMARIO	V
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - RESUMO DA TEORIA	3
2.1 - Resumo Histórico	3
2.2 - Conceitos Básicos	5
2.3 - Aspectos Tecnológicos	15
2.3.1 - Ampolas e Fontes de Tensão	15
2.3.2 - Vácuo	20
2.3.3 - Detecção	22
2.3.4 - Proteção Radiológica	29
3 - TRABALHO EXPERIMENTAL	34
3.1 - Escolhas e Decisões de projeto	34
3.2 - Procedimento Prático	40
3.2.1 - Construção dos Dispositivos	40
3.2.2 - Experimentos e Ensaios	51
4 - RESULTADOS OBTIDOS	56
4.1 - Da Geometria do Feixe	56
4.2 - Da dureza	57
4.3 - Das Radiografias	58
5 - CONCLUSOES	67
5.1 - Da Avaliação	67
5.2 - Das Propostas	69
5.3 - Comentários Finais	71
6 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	73



1. INTRODUÇÃO

A radiografia industrial depende basicamente da disponibilidade de fontes de raios-X cujo poder de penetração (dureza) e tempos de exposição são incompatíveis com aqueles fornecidos por equipamentos dentários e hospitalares. Como a demanda de equipamentos para radiografias industriais no Brasil fica muito aquém dos dentários e hospitalares, e como as suas constituições internas e estruturais são muito diferentes, não há interesse de se produzir e comercializar equipamentos de radiografia industrial a custos acessíveis no território nacional. Assim, a compra ou construção desses equipamentos implicam em despesas elevadas e proibitivas para algumas instituições de ensino e pesquisa que pretendam realizar ensaios não destrutivos através de radiografias.

Neste trabalho, são apresentados a construção de um protótipo rudimentar para produzir radiação-X (e todas as suas implicações de ordem experimental) e a avaliação do seu desempenho, buscando adequá-lo para aplicações em radiologia industrial.

Procurou-se desenvolver um protótipo com as seguintes características: simplicidade de funcionamento, resistência mecânica, facilidade e baixo custo de manutenção ou duplicação (de seus componentes ou de todo o protótipo), versatilidade na utilização, adaptação a sistemas de tensão ou de vácuo estranhos, etc.

Devido ao trabalho ter se caracterizado como sendo



tipicamente de instrumentação, foi necessário estabelecer um patamar mínimo de desempenho do protótipo e de qualidade das radiografias, i.é, dureza da radiação, resolução (nitidez), poder de impressão (intensidade e contraste), etc. Como ponto de referência foram tomadas as radiografias típicas obtidas por equipamentos comerciais.

O objetivo do trabalho foi o de criar um primeiro protótipo capaz de operar com dureza e intensidade aceitáveis, e ao mesmo tempo, permitir um grande número de opções para futuros aperfeiçoamentos ou introdução de acessórios internos ou periféricos como novos eletrodos, filamentos, dutos de refrigeração, "pin-holes", filtros, etc.

Assim, o grau de exigência quanto ao aparelho produzido ficou bem abaixo daquele esperado de aparelhos comerciais.

Em 1895, enquanto Roentgen investigava os raios catódicos em ampolas com gases a baixa pressão, notou que uma tela fluorescente brilhava nas proximidades, mesmo que ao lado de uma mesa de madeira e com um anteparo entre as mesmas. A ideia de uma radiação penetrante na matéria proveniente de uma ampola era inédita e por isso deu-se o nome de "raios-X" aquilo que acabou se tornando conhecido. Após vários meses de estudos, Roentgen juntou



2. RESUMO DA TEORIA

2.1- Resumo Histórico

A descoberta da radiação-X por Roentgen é um bom exemplo da combinação de várias condições necessariamente simultâneas para a ocorrência de uma descoberta experimental de profundo impacto na ciência. Além de uma boa dose de sorte (entenda-se sorte como a reunião simultânea de condições de ocorrência e observação do fenômeno, visto que o experimentador não tinha conhecimento ou domínio pleno sobre as mesmas, assim como não objetivava reuni-las), houve a conduta de muita atenção e perseverança (algo de novo, sutil e não detectável pelos sentidos humanos estava ocorrendo), adoção de métodos experimentais coerentes e o poder de imediata e correta interpretação dos fatos. Certamente, a radiação-X deveria estar ocorrendo frequentemente nas bancadas defronte dos pesquisadores daquela época, sem que eles tivessem tomado conhecimento (ou dado o devido valor a possíveis observações acidentais) daquele fenômeno. Pode-se até mesmo fazer conjecturas sobre possíveis danos inexplicáveis e ignorados à saúde daqueles cientistas.

Em 1895, enquanto Roentgen investigava os raios catódicos em ampolas com gases a baixa pressão, notou que uma tela fluorescente brilhava nas proximidades, mesmo que do lado de fora da ampola e com um anteparo entre as mesmas. A idéia de uma radiação penetrante na matéria proveniente de uma ampola era inédita e por isso deu-se o nome de "raios-X" àquilo que acabara de ser descoberto. Após vários meses de estudos, Roentgen juntou



uma primeira coleção de dados conclusivos sobre as características daquela radiação [1]:

- 1) a fluorescência de vários materiais contendo cálcio, bário, etc. eram promovidas pelo feixe;
- 2) as emulsões fotográficas também eram sensíveis ao feixe e permitiam o seu uso como registro permanente das radiações;
- 3) materiais eletrizados perdiam suas cargas quando submetidos ao feixe;
- 4) materiais opacos possuíam transparência ao feixe, esta variando de acordo com o material usado e sua geometria;
- 5) o feixe podia ser colimado por orifícios caracterizando o seu comportamento de trajetória similar ao da luz;
- 6) o feixe não sofria deflexão por campos magnéticos, descartando a hipótese de ser constituído de partículas carregadas;
- 7) os efeitos de reflexão e refração não eram observados (mais tarde, esses efeitos foram observados em pequeno grau);
- 8) a geração do feixe era feita a partir do choque entre um feixe de elétrons e um obstáculo (posteriormente batizado de "alvo"), cuja eficiência de geração dependia de seu peso atômico.

Quando seus resultados (todos eram apenas qualitativos) foram publicados (1896), vários pesquisadores lançaram-se às investigações e em três meses, as aplicações médicas foram anunciadas. Convém lembrar que na ocasião, não havia qualquer cogitação em torno das questões sobre os danos da radiação à saúde e por isso, não havia qualquer cuidado com a proteção radiológica (esta surgiu muitos anos depois, após a verificação de suas lamentáveis consequências).

Os primeiros tubos de raios-X usavam catodo frio e eram evacuados a pressões entre 10^{-2} e 10^{-3} mmHg. A estas pressões, a corrente elétrica se estabelecia por avalanches de ions e por isso, a tensão e a corrente eram vinculadas. Portanto, não era possível escolher de forma independente os valores de tensão (que determina a dureza, i.é, o poder de penetração) e de corrente (que determina a intensidade do feixe da radiação). Se as ampolas fossem seladas (por fusão do vidro que a compunha), o tempo fazia com que as moléculas gasosas do seu interior interagissem com as paredes, baixando a pressão. Assim, para dispará-la e manter o mesmo nível de corrente, era necessário o uso de tensões mais altas, e com a obtenção de raios-X mais duros que o desejado. O controle da tensão e da corrente eram difíceis e portanto, os resultados não eram reprodutíveis. Além disso, corria-se o risco de a fonte de tensão não alcançar o valor de disparo da ampola (que subia a cada dia). Como resultado, as ampolas de catodo frio se apresentavam como sendo de vida curta (note-se que foi usado o termo "vida", e não "vida útil").

Com o aparecimento das ampolas de catodo quente, todos os problemas acima foram superados e por isso, as ampolas de catodo frio foram abandonadas.

2.2- Conceitos Básicos -

A maneira tradicional de se obter raios-X consiste no bombardeamento de um alvo de alto número atômico por um feixe de elétrons de alta energia cinética. A radiação produzida pode ser classificada em dois grupos segundo a sua origem. O primeiro



grupo, chamado de "raios-X característicos", é composto de um conjunto de raios espectrais próprias do material bombardeado. O segundo grupo, chamado de "raios-X contínuos" (também chamados de "radiação de bremsstrahlung", i.e., "frenagem"), é composto de uma distribuição contínua de valores do comprimento de onda da radiação.

O conjunto de raios espectrais resulta do processo de retirada de elétrons de níveis energéticos internos dos átomos que formam o alvo (fig. 1.a). A vacância gerada em cada nível

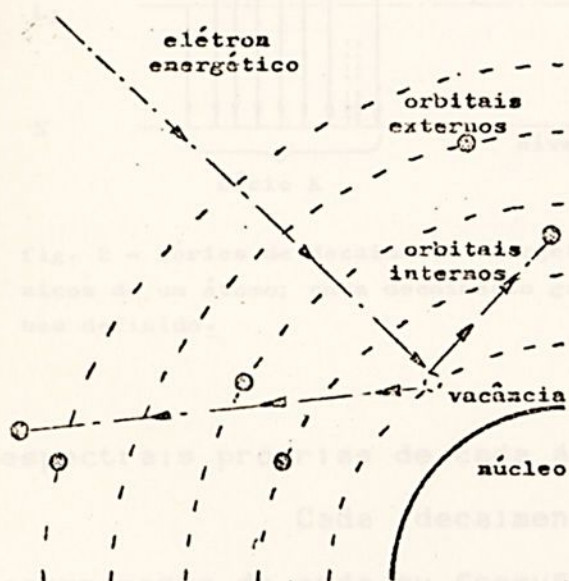


fig.1.a - Um elétron de nível interno é arrancado do átomo e deixa uma vacância no orbital.

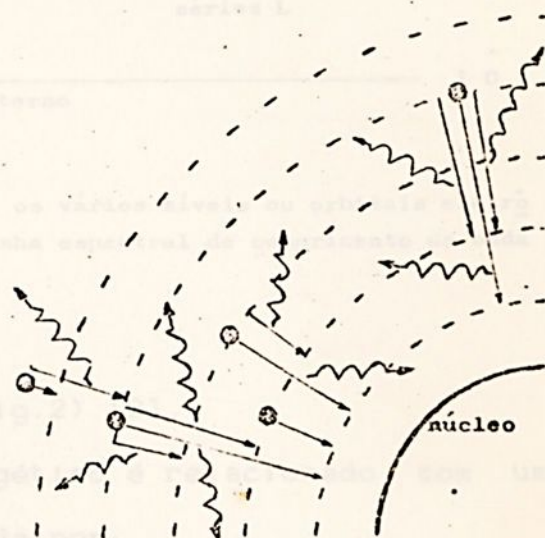


fig.1.b - Os demais elétrons migram em direção aos níveis internos conforme a vacância caminha; cada opção de caminho gera um fóton característico.

interno é desfeita pela migração de elétrons dos níveis mais externos, que os vão preenchendo em decaimentos energéticos bem definidos. Cada opção de retorno ao estado inicial gera um fóton de energia ΔE (fig. 1.b). No caso de átomos reais onde o número de níveis energéticos é grande, o número de raios espectrais aumenta junto com o número atômico e gera as conhecidas séries

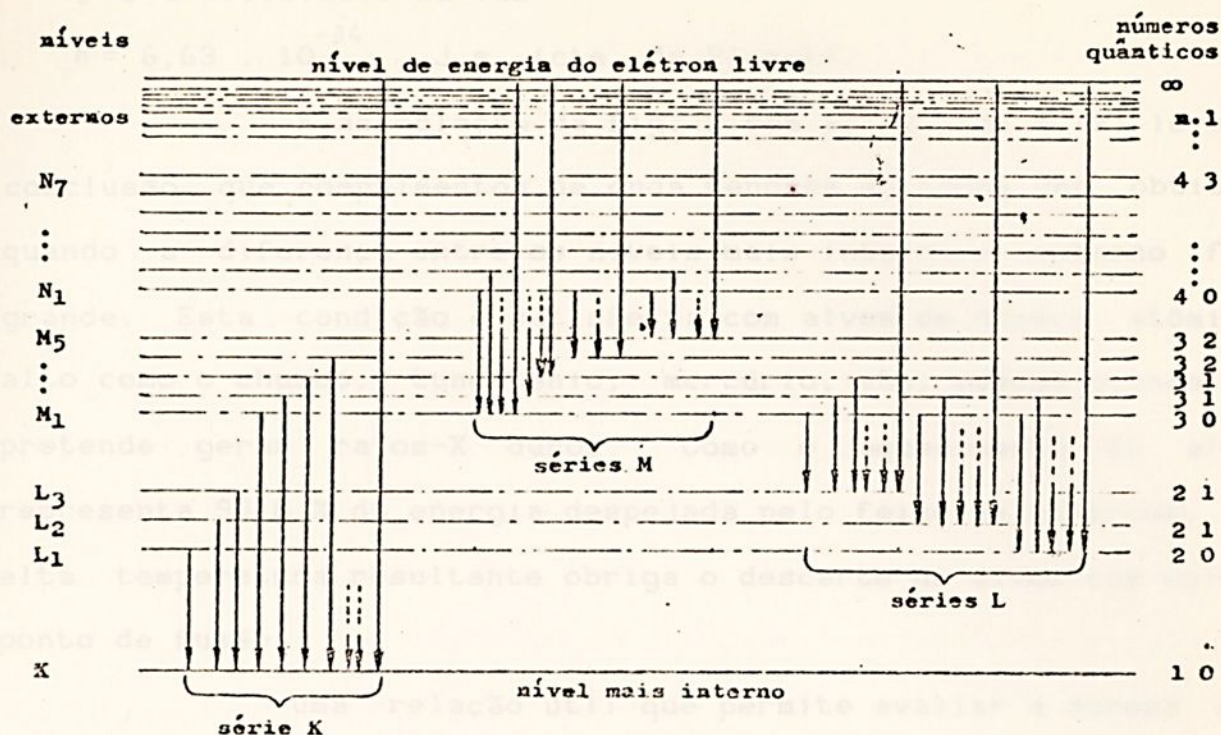


fig. 2 - Séries de decaimento energético entre os vários níveis ou orbitais eletrônicos de um átomo; cada decaimento gera uma linha espectral de comprimento de onda bem definido.

espectrais próprias de cada átomo (fig.2) [2].

Cada decaimento energético é relacionado com um comprimento de onda ou frequência dada por:

$$\Delta E = \frac{h c}{\lambda} \quad ; \quad \lambda = \frac{h c}{E_m - E_n} \quad \text{ou} \quad (1)$$

$$\Delta E = h \gamma \quad ; \quad \gamma = \frac{E_m - E_n}{h} \quad (2)$$

onde:

ΔE é a diferença entre os níveis E_m e E_n

γ é a frequência

λ é o comprimento de onda

c é a velocidade da luz

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s (cte. de Planck).}$$

A associação da fig. 2 com as eq. (1) e (2) leva à conclusão que comprimentos de onda menores só podem ser obtidos quando a diferença entre os níveis mais interno e externo for grande. Esta condição é satisfeita com alvos de número atômico alto como o chumbo, tungstênio, mercúrio, etc, usados quando se pretende gerar raios-X duros. Como o aquecimento do alvo representa 99,8 % da energia despejada pelo feixe de elétrons, a alta temperatura resultante obriga o descarte de alvos com baixo ponto de fusão.

Uma relação útil que permite avaliar a dureza da radiação com o número atômico do átomo-alvo é dada pela lei de Mosley:

$$\sqrt{\frac{\gamma}{R}} = a(z - \delta) \quad (3)$$

onde:

$R = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ e}^{-1}$ é a cte. de Rydberg

z é o número atômico do átomo-alvo

a é uma cte. empírica que depende do número de níveis energéticos envolvidos nos decaimentos

δ é uma cte. relacionada com a carga nuclear efetiva do alvo.

Se o termo γ for isolado em (3), tem-se :

$$\gamma = a^2 (z - \delta)^2 R \quad (4)$$

donde fica sugerido que pequenos incrementos no número atômico implicam em grandes aumentos na frequência, i.e., na dureza da radiação produzida.

Passando agora para a radiação de espectro contínuo, pode-se dizer que a geração se dá quando o elétron energético chega ao alvo e, devido às colisões não quantizadas com os elétrons livres dos átomos, vai perdendo sua energia cinética em valores não discretos (o espectro resultante não define raias nítidas). Entretanto, deve-se observar que não é possível produzir um espectro contínuo de comprimentos de onda menores que o correspondente à energia cinética máxima do elétron. Tal limitação é expressa através de :

$$E_k = h \nu_{max} \quad ; \quad \lambda_{min} = \frac{hc}{E_k} \quad (5 \text{ a,b})$$

onde E_k é o valor da maior energia cinética do elétron incidente sobre o átomo-alvo. AS equações (5) podem ser escritas como:

$$\lambda_{min} = \frac{12,39}{V} \quad (5 \text{ c})$$

onde λ é expresso em $\text{\AA}$ e V é expresso em kV .

A fig. 3 mostra o espectro contínuo para várias quilovoltagens aplicadas, sendo que o eixo horizontal também rece-



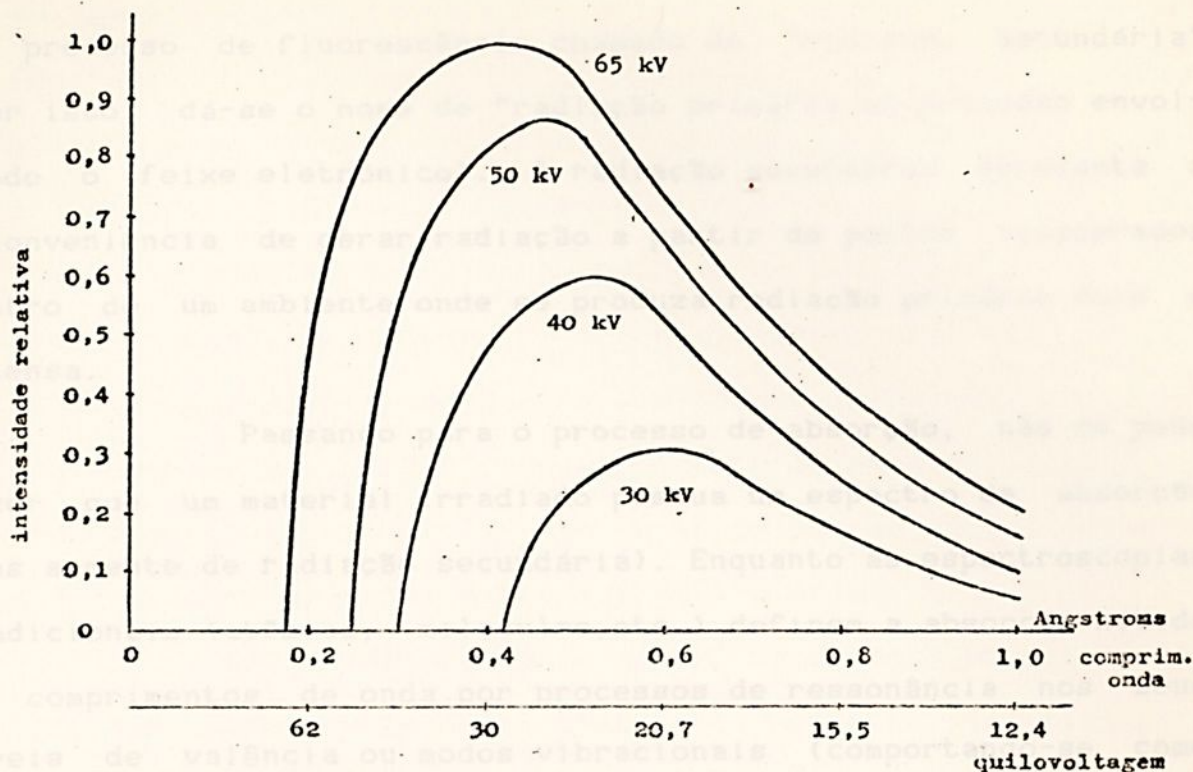


fig.3 - Espectros contínuos típicos de radiação-X em função do comprimento de onda para alguns valores de tensão aplicada entre catodo e alvo.

beu uma escala de voltagem (calculada por (5)). O limite esquerdo de cada curva, i. é, seu comprimento de onda mínimo fica graficamente fixado pelo valor da tensão usada.

Com a análise das afirmações feitas sobre os espectros contínuo e característico, fica claro porque não é possível gerar radiação-X dura, com alvos que sejam constituídos de átomos com número atômico baixo.

Para finalizar a discussão sobre a produção de raios-X, deve-se lembrar que ftons gerados pelo alvo podem chegar a outros materiais, onde todo o processo descrito acima pode ser repetido. A única diferença a ser considerada, é que a radiação-X deixa de ser ocasionada por um feixe de elétrons energéticos, mas passa a ser promovida por ftons, caracterizando

um processo de fluorescência chamado de "radiação secundária" (por isso, dá-se o nome de "radiação primária" ao processo envolvendo o feixe eletrônico). A radiação secundária apresenta a inconveniência de gerar radiação a partir de pontos inesperados dentro de um ambiente onde se produza radiação primária dura e intensa.

Passando para o processo de absorção, não se pode dizer que um material irradiado possua um espectro de absorção (mas somente de radiação secundária). Enquanto as espectroscopias tradicionais (atômica, molecular, etc.) definem a absorção nítida de comprimentos de onda por processos de ressonância nos seus níveis de valência ou modos vibracionais (comportando-se como pequenas antenas sintonizadas), a "espectroscopia" de raios-X só gera uma faixa de absorção larga e contínua, visto que os fótons de raios-X invadem o átomo e excitam indiscriminadamente os vários níveis energéticos de seus elétrons.

Dentre os processos de absorção, pode-se citar três principais, a saber:

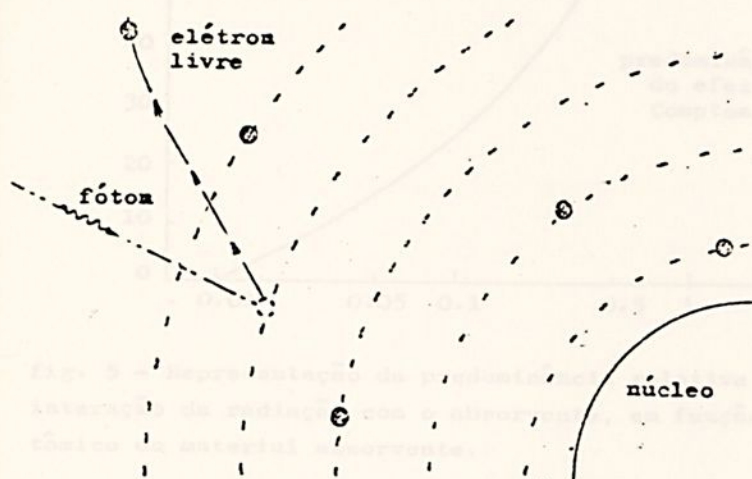


fig. 4 - um elétron é arrancado de seu orbital por um fóton, resultando na ionização da molécula.

a) efeito fotoelétrico (fig.4)- no choque entre um foton e um elétron, o foton é totalmente absorvido, enquanto o elétron é arrancado para fora do átomo com uma energia cinética residual; o preenchimento da vacância gera-

da implica na emissão-X secundária ou na fluorescência.

- b) espalhamento Compton - se o choque do foton ocorrer com um elétron mais externo, a troca de energia é pequena; o elétron é arrancado com energia cinética residual, enquanto um novo foton contendo um comprimento de onda um pouco maior (a diferença corresponde à troca de energia) assume nova trajetória.
- c) produção de pares - só ocorre com ftons incidentes com energia superior a 1,02 MeV (correspondente à massa de um pósitron e um elétron - $E = mc^2$); ao se aproximar do núcleo do átomo-alvo, transforma-se em matéria e antimatéria.

Dos três processos acima, só os dois primeiros são de interesse para efeito deste trabalho, o que se justifica pela figura 5.

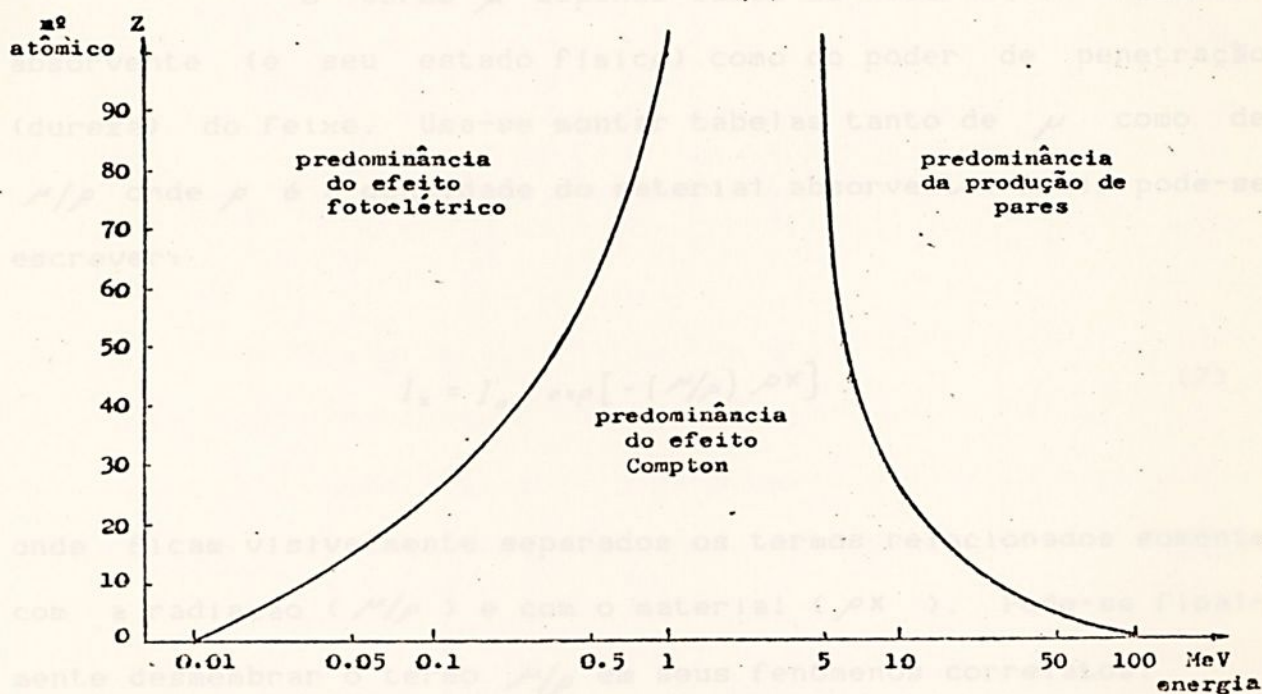


fig. 5 - Representação da predominância relativa entre as três formas principais de interação da radiação com o absorvente, em função da energia do fóton e do número atômico do material absorvente.

Como o interesse prático da absorção deve ser expresso em termos do material usado para a radiografia ou para a blindagem de proteção radiológica, deve-se usar algumas relações de atenuação:

$$I_x = I_o e^{-\mu x} \quad (6)$$

onde:

I_x é a intensidade do feixe emergente

I_o é a intensidade do feixe incidente

x é a espessura do material absorvente

μ é um coeficiente de absorção.

O termo μ depende tanto da natureza do material absorvente (e seu estado físico) como do poder de penetração (dureza) do feixe. Usa-se montar tabelas tanto de μ como de μ/ρ onde ρ é a densidade do material absorvente. Assim pode-se escrever:

$$I_x = I_o \exp[-(\mu/\rho) \rho x] \quad (7)$$

onde ficam visivelmente separados os termos relacionados somente com a radiação (μ/ρ) e com o material (ρx). Pode-se finalmente desmembrar o termo μ/ρ em seus fenômenos correlatos:

$$\mu/\rho = \sigma/\rho + \tau/\rho + \kappa/\rho \quad (8)$$

onde $\hat{\sigma}$, γ e K são coeficientes de atenuação linear atribuídos aos efeitos Compton, fotoelétrico e de produção de pares, respectivamente.

A tabela 1 relaciona μ com o material absorvente, processo de absorção e a energia do foton incidente (expressa em termos da tensão, em kilovolts, usada sobre a ampola). Para se

TABELA 1 - Coeficientes de absorção para a água, chumbo e o concreto, de acordo com os fenômenos de absorção e com a energia do foton incidente. Todas as unidades estão dadas em cm^{-1} .

energia do foton MeV	efeito fotoelétrico		efeito Compton		produção de pares		total		
	H ₂ O	Pb	H ₂ O	Pb	H ₂ O	Pb	H O	Pb	concreto
0,01	4,9	905	0,215	1,74	-	-	5,12	908	58
0,05	0,024	57,3	0,188	1,52	-	-	0,212	58,7	0,820
0,10	,0024	58,7	0,165	1,33	-	-	0,167	59,8	0,396
0,50	-	0,860	0,096	0,78	-	-	0,096	1,64	0,205
1,5	-	0,0099	0,057	0,46	0,0001	0,0018	0,057	0,472	0,122
10	-	0,0092	0,017	0,138	0,0046	0,405	0,0216	0,552	0,054
50	-	0,0016	0,0048	0,039	0,0104	0,860	0,0152	0,9006	0,052

avaliar a eficiência do absorvente sem que a intensidade incidente tenha de ser previamente colhida, usa-se isolar I_x/I_0 no lado esquerdo das equações (6) e (7), para que a atenuação seja conhecida em termos percentuais e em função da espessura e da dureza :

$$\text{transmitância (em \%)} = \frac{I_x}{I_0} \cdot 100\% = e^{-\mu x} \cdot 100\% \quad (9)$$

A equação (9) exprime a transmitância do material absorvente. Para se chegar à eficiência, basta subtraí-la da

unidade:

$$\text{eficiência de atenuação (em \%)} = 100\% - \frac{I_x}{I_0} \cdot 100\% \quad (10)$$

Com os dados sobre a dureza da radiação e o coeficiente de absorção do material, pode-se tanto prever os parâmetros necessários para a produção de radiografias, como também levantar barreiras para fins de proteção radiológica.

2.3- Aspectos Tecnológicos -

2.3.1- Ampolas e Fontes de Tensão-

As fontes de raios-X podem ser confeccionadas segundo vários modos e por isso convém discutí-los.

As ampolas podem ser divididas em dois grupos quanto à forma de geração do feixe de elétrons, i.é, de catodo frio (fig.6) e de catodo quente (fig.7). Quanto à forma de se manter o vácuo no seu interior, a ampola pode ser classificada

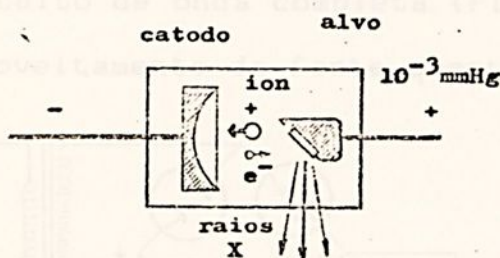


fig. 6 - Ampola de catodo frio.

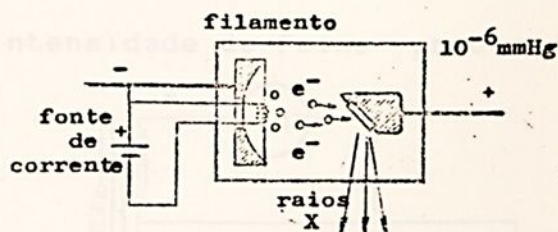


fig.7 - Ampola de catodo quente.

como de funcionamento acoplado ao sistema de vácuo, ou como de funcionamento selado. Todas as ampolas devem ser de pequeno porte, gerar feixes de dureza e intensidade ajustáveis e, depen-

dendo da aplicação, devem fornecer um feixe monocromático (para uso na cristalografia) ou de banda larga (correspondente ao caso das radiografias).

As ampolas de catodo frio só podem operar com fontes de corrente contínua, visto que não há nada que impeça o fluxo de elétrons na direção do alvo para o catodo. Nessas ampolas, a tensão e a corrente assumem valores casados. Já as ampolas de catodo quente podem ser diretamente acopladas à saída do auto transformador e operar em corrente alternada (deve ser considerado que o vácuo normalmente usado é de 10^{-6} mmHg e por isso não se estabelece nenhuma corrente elétrica a partir do alvo frio, mas somente do filamento quente junto ao catodo). A ampola funciona como se fosse uma válvula diodo (retificador de meia onda), e a única preocupação do operador é não permitir o sobreaquecimento do alvo para que este não dê origem à corrente reversa (cujo inconveniente é a geração de raios-X no catodo). Em alguns casos, quando se pretende fazer a ampola operar em onda completa, usa-se adicionar válvulas retificadoras de alta tensão num circuito de onda completa (fig. 8). Sua vantagem está no melhor aproveitamento da fonte quanto à intensidade do feixe produzido.

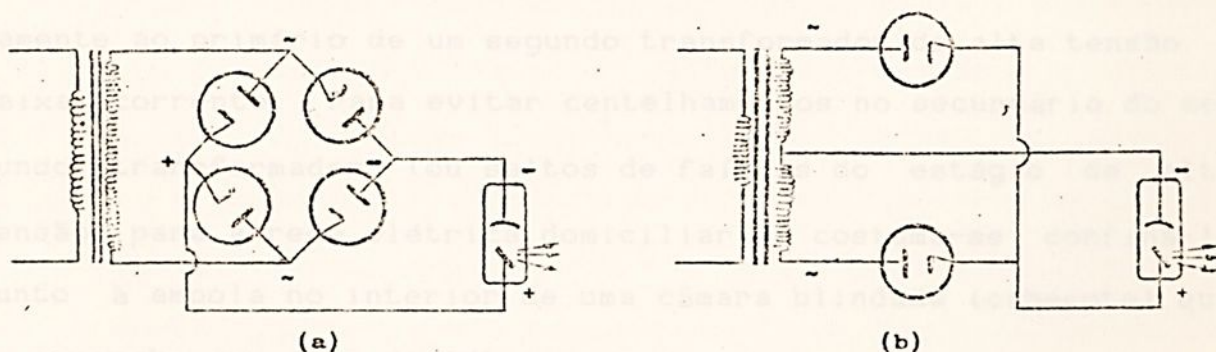


fig.8 - Ampola acoplada a válvulas retificadoras a) em ponte e b) em transformador com secundário duplo, para operar em regime de onda completa.

Outra vantagem está na eliminação da corrente reversa quando o alvo é sobreaquecido.

Os tubos selados possuem a vantagem de operar em qualquer local e dispensam o acoplamento permanente aos sistemas de vácuo. Por outro lado, não se tem acesso ao seu interior para manutenção ou mudança de eletrodos. Já os tubos vinculados aos sistemas de vácuo permitem a constante troca de seus componentes internos (alvo, filamento, etc.), adaptando-os de acordo com as aplicações de momento.

Em quase todos os casos, o catodo possui forma esférica côncava para atuar como colimador dos elétrons, atirando-os sobre a menor região possível do alvo (deseja-se obter uma fonte de radiação pontual). Por sua vez, o alvo costuma sobreaquecer-se, e caso a ampola tenha de permanecer em operação por períodos superiores a poucos segundos, torna-se imperativo introduzir um sistema de refrigeração junto ao alvo (usa-se refrigerar o alvo em todas as ampolas de radiografia industrial).

As fontes de tensão comerciais típicas são constituídas de transformadores de baixa tensão de primário e alta tensão de secundário (usa-se auto-transformadores), ligadas diretamente ao primário de um segundo transformador de alta tensão e baixa corrente. Para evitar centelhamentos no secundário do segundo transformador (ou saltos de faíscas do estágio de alta tensão para a rede elétrica domiciliar), costuma-se confiná-lo junto à ampola no interior de uma câmara blindada (cabeçote) que se preenche com óleo dielétrico.

A fig. 9 mostra o esquema simplificado de um



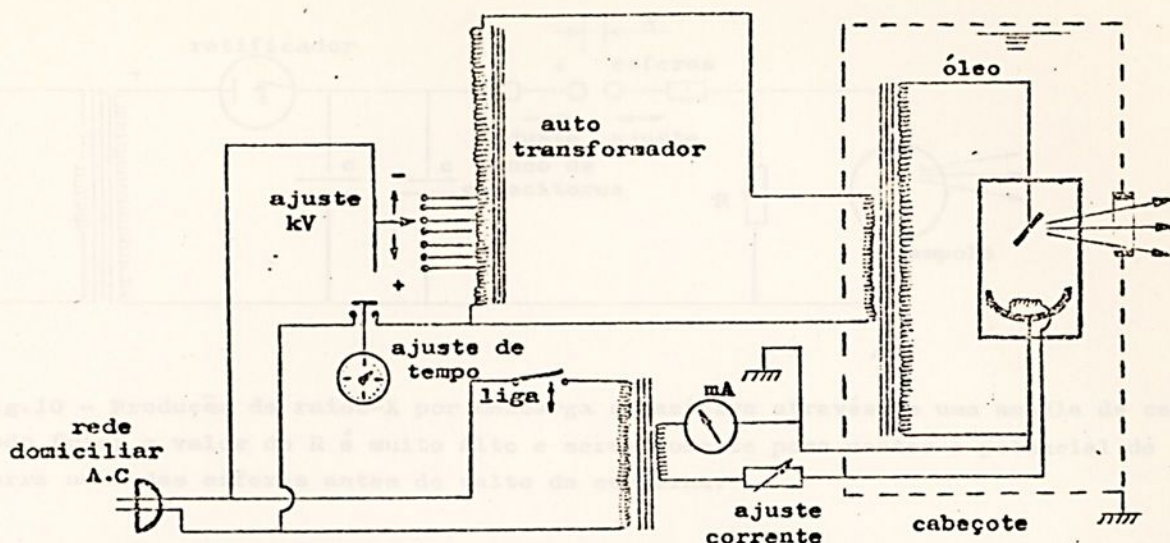


fig.9 - Equipamento comercial de raios-X, com ajustes de tensão, corrente e tempo de exposição; a ampola é de catodo quente e está submetida à tensão A.C.; o óleo garante o isolamento elétrico e a refrigeração do alvo para períodos curtos de exposição.

equipamento comercial típico que opera com uma ampola de catodo quente. Pode-se verificar que a alta tensão ficou sobre o alvo para que o filamento trabalhasse com seus controles de corrente (i.é, intensidade de feixe) em potencial baixo (painel de comandos). Também deve ser observado que o gerador de alta tensão apenas fornece o campo elétrico, enquanto o filamento fornece os termoelétrons que serão acelerados. Existem alguns casos em que o filamento fica num potencial alto e por isso é alimentado por uma bateria c.c. interna ao cabeçote, acoplada à ampola e sem aterramento. Caso a corrente assuma um valor muito elevado, a fonte de alta tensão poderá não suportar a carga e baixar o valor da tensão, i.é, diminuir o poder de penetração. Por isso, as correntes nunca são altas, limitando-se a alguns miliamperes. Finalmente, pode-se observar que o temporizador e o ajuste da tensão são constituídos de chaveamento simples.

A partir de 1940, estudos envolvendo ampolas de

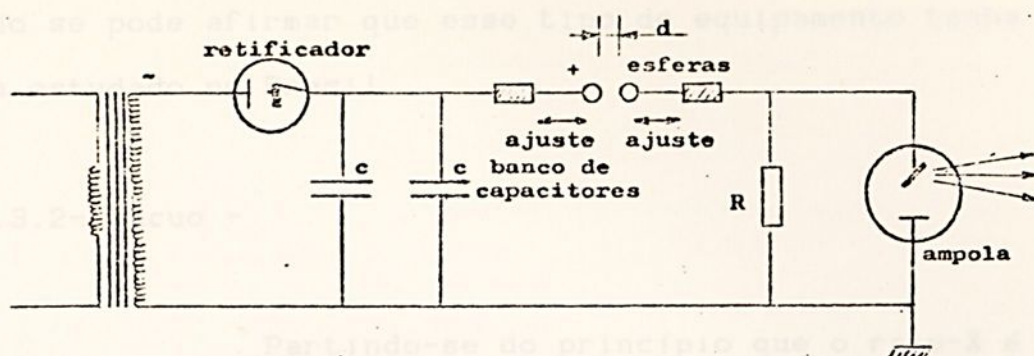


fig.10 - Produção de raios-X por descarga capacitiva através de uma ampola de cátodo frio; o valor de R é muito alto e serve somente para manter o potencial de terra numa das esferas antes do salto da centelha.

catodo frio foram retomados, desta vez com fontes de tensão que operam por descarga capacitiva através de um "spark-gap" ligado em série com a ampola [3] [4]. Um circuito desse tipo é mostrado na fig. 10. O ajuste da tensão de disparo é feito com o distanciamento "d" entre as esferas do "spark-gap" e a corrente de pico é definida em função da carga acumulada no capacitor (o valor do capacitor é o fator determinante da corrente de pico). Esse tipo de gerador de radiação leva a vantagem sobre as fontes convencionais, de permitir a obtenção de radiografias instantâneas de corpos em movimento [3] [4]. A sua desvantagem reside no fato de que para se obter uma boa dureza (alta tensão de cátodo) e uma elevada corrente de descarga (intensidade instantânea do feixe), o seu capacitor deve assumir dimensões que podem ocupar até alguns metros cúbicos (assim como o dispositivo de disparo, condutores, isoladores, etc.). A partir dessa configuração, vários estudos objetivando a otimização da dureza, forma de onda da descarga elétrica, formato de alvos, novas aplicações, etc., foram feitos por mais de uma década [5] [6] [7] [8]. Entretanto,

não se pode afirmar que esse tipo de equipamento tenha sido usado ou estudado no Brasil.

2.3.2- Vácuo -

Partindo-se do princípio que o raio-X é gerado com o bombardeio de um alvo por um feixe de elétrons acelerados, fica claro que o vácuo é um fator decisivo no que se refere ao problema da perda de energia cinética de cada elétron quando este colide com moléculas de gás durante seu percurso. Se a energia cinética é "gasta" durante o percurso, os níveis energéticos mais internos do átomo-alvo não são excitados, implicando na perda do poder de penetração da radiação. A tabela 2 [9] mostra como se relacionam a pressão, o número de moléculas gasosas (ar a 25 °C) confinadas num volume unitário e o caminho livre médio entre as mesmas. Se for considerada uma ampola com uma distância de 1 cm entre eletrodos e uma pressão interna de 10^{-1} mmHg, pode-se afirmar sem muito erro que cada elétron cruzará caminho com cerca de 10^{16} moléculas, com as quais poderia trocar energia. Se for assumido que a seção de choque e o caminho livre médio do elétron sejam da mesma ordem de grandeza daqueles dados às moléculas, pode-se afirmar sem muito erro que 1 cm de percurso implica em cerca de 200 chances de se perder energia. O mesmo raciocínio leva a avaliar 2 chances para uma pressão de 10^{-2} mmHg, e uma única chance para cada 200 metros de percurso quando a pressão é de 10^{-6} mmHg. Por isso, ampolas evacuadas a pressões de alguns Torr podem ser ionizadas e apresentam resistências internas de



TABELA 2 - Relação entre o tipo de vácuo, tipo de escoamento gasoso, pressão, densidade molecular e o caminho livre médio entre duas colisões.

tipo de vácuo	tipo de escoamento	pressão mmHg	densid. molecular molec/cm ³	caminho livre médio cm
baixo	viscoso	760	$2,46 \cdot 10^{19}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$
		1	$3,25 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
alto	intermediário	10^{-1}	$3,25 \cdot 10^{15}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
		10^{-2}	$3,25 \cdot 10^{14}$	0,51
		10^{-3}	$3,25 \cdot 10^{13}$	5,1
		10^{-4}	$3,25 \cdot 10^{12}$	$5,1 \cdot 10$
ultra alto	molecular	10^{-6}	$3,25 \cdot 10^{10}$	$5,1 \cdot 10^3$
		10^{-9}	$3,25 \cdot 10^7$	$5,1 \cdot 10^6$
		10^{-12}	$3,25 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^9$
		10^{-15}	$3,25 \cdot 10$	$5,1 \cdot 10^{12}$

poucos Ohms, sem produzir qualquer radiação independentemente do alvo. Ampolas evacuadas a 10^{-2} mmHg apresentam resistências internas de centenas de kilohms e produzem radiação-X. Ampolas evacuadas a 10^{-6} mmHg não são ionizáveis (resistência tendendo ao infinito) e necessitam de um filamento quente junto ao catodo para a produção de termoelétrons para serem acelerados, visto que não existem mais íons que cheguem ao catodo para gerar elétrons por bombardeamento. Note-se que a resistência interna da ampola diminui com o aumento da pressão justamente devido à produção de íons no seu interior. As ampolas de catodo frio não podem ser evacuadas a pressões abaixo de 10^{-5} mmHg, sob pena de não se possuir íons que gerem elétrons junto ao catodo. Ao mesmo tempo, não podem ser evacuadas a pressões acima de 10^{-2} mmHg, sob pena de os elétrons perderem energia cinética durante o percurso, ao ponto de não gerarem radiação (ou em casos menos graves, produzir

raios-X muito moles e de pouquíssima intensidade). Em casos extremos, onde a pressão é muito alta, a corrente elétrica se estabelece em regime de curto-circuito, gerando arcos que danificam o alvo e colocam a fonte de tensão em pane.

Resumindo o que está descrito acima, ampolas de catodo frio devem operar com vácuos entre 10^{-2} e 10^{-4} mmHg, pois os elétrons são produzidos por avalanches de íons sobre o catodo. Já as ampolas de catodo quente devem operar com qualquer vácuo acima de 10^{-5} mmHg, sendo que a geração de termoe elétrons garante o controle independente da tensão e da corrente (a lei de Ohm não é seguida como no caso das ampolas de catodo frio).

2.3.3- Detecção -

As radiações ionizantes são costumeiramente medidas de duas maneiras. A primeira é a chapa fotográfica, utilizada desde os primórdios dos estudos de radiação (juntamente com as placas de material fluorescente). Posteriormente surgiram os medidores de corrente elétrica no interior de câmaras de ionização (contadores Geiger, etc.). Outros métodos como o calorimétrico, a cintilografia, a expulsão de cargas elétricas confinadas em polímeros, etc., vem sendo apresentados frequentemente para casos específicos de aplicação em pesquisa.

Dando especial atenção aos filmes radiográficos, deve-se ressaltar que são idênticos aos de uso corrente na fotografia (halogenetos de prata mais aditivos), diferindo apenas na sensibilidade às radiações-X, na granulação muito mais fina, a



qual é emulsionada em ambos os lados do acetato. Geralmente, são ortocromáticos e por isso podem ter sua revelação acompanhada visualmente sob luz de segurança vermelha [10]. Como o filme consegue captar apenas perto de 2% da radiação que o atravessa, costuma-se colocar placas fluorescentes (chamadas de "intensificadoras") em ambos os lados do filme, principalmente quando a área a ser radiografada é grande e obriga à colocação do filme longe da ampola. Assim o filme é sensibilizado também dentro do espectro visível (muito mais sensível no verde e azul que no ultra-violeta e região-X). Quanto à sensibilidade do filme, deve ser a máxima possível (para compensar sua baixa eficiência), desde que a revelação não forme grãos grandes, visto que a imagem é obtida por sombreamento: a região irradiada torna-se escura e a região menos irradiada torna-se mais clara ou translúcida. A taxa de escurecimento do filme devido à exposição é chamada "densidade".

A densidade pode ser expressa por:

$$D = \log_{10} (I_0 / I) \quad (11)$$

onde:

D é a densidade,

I_0 é a intensidade do feixe incidente

I é a intensidade do feixe emergente.

O contraste só pode ser considerado como a variação da densidade de um ponto ao outro do filme e por isso, é expresso por:

$$C = D_1 - D_2 \quad (12)$$



onde C é o contraste e os índices 1 e 2 definem as regiões vizinhas consideradas. Portanto, vem :

$$C = \log_{10} (I_1 / I_2) \quad (13)$$

onde I_1 e I_2 representam as intensidades dos feixes emergentes das regiões 1 e 2, respectivamente. A fig. 11 esboça qualitativamente o comportamento da densidade de um filme em função da

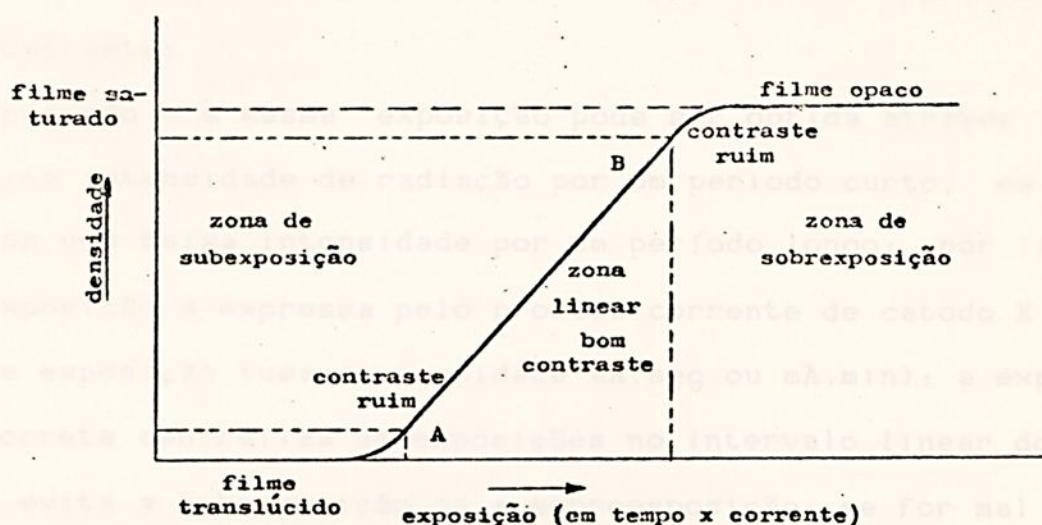


fig.11 - Esboço qualitativo da curva característica de uma emulsão fotográfica, onde a densidade exprime o grau de escurecimento do filme após sua revelação.

exposição. O contraste torna-se máximo e linear na região entre os pontos A e B, tornando-se inexpressivo e não linear nas regiões de subexposição e de sobreexposição. Portanto, ambas as intensidades I_1 e I_2 devem estar na região entre os pontos A e B, o mais distanciado possível entre si. Caso uma delas incorra numa exposição fora desse intervalo, o contraste torna-se comprometido e prejudica a nitidez da imagem.

Nos trabalhos práticos, o procedimento de se obter um bom contraste, i.é, sensibilizar o filme com uma variação de

de exposições que se mantenham dentro da faixa de linearidade do filme (intervalo A-B), envolve o domínio simultâneo de vários parâmetros, a saber:

- a) dureza - caso a quilovoltagem seja muito alta, pode-se obter falta de contraste aliada a uma possível sobreexposição; caso ocorra o extremo oposto, o filme se apresentará subesposto e totalmente sem contraste; a dureza bem escolhida é capaz de afastar as doses de exposição entre si, promovendo o contraste;
- b) exposição - a mesma exposição pode ser obtida através de uma alta intensidade de radiação por um período curto, ou então com uma baixa intensidade por um período longo; por isso, a exposição é expressa pelo produto corrente de catodo X tempo de exposição (usa-se a unidade mA.sec ou mA.min): a exposição correta centraliza as exposições no intervalo linear do filme e evita a subexposição ou a sobreexposição; se for mal dosada o filme poderá se apresentar excessivamente claro ou escuro e com prejuízo do contraste;
- c) distância ampola/filme - interfere diretamente no valor de exposição, visto que a intensidade decai com o inverso do quadrado da distância; seria ideal usar-se a menor possível (para minimizar o problema da falta de sensibilidade do filme), mas a geometria esférica da propagação dos fótons compromete o poder de resolução da radiografia (fig.12); portanto, o distanciamento deve ser o maior possível desde que não implique na subexposição do filme, ou no prejuízo do contraste; costuma-se compensar a distância elevada com



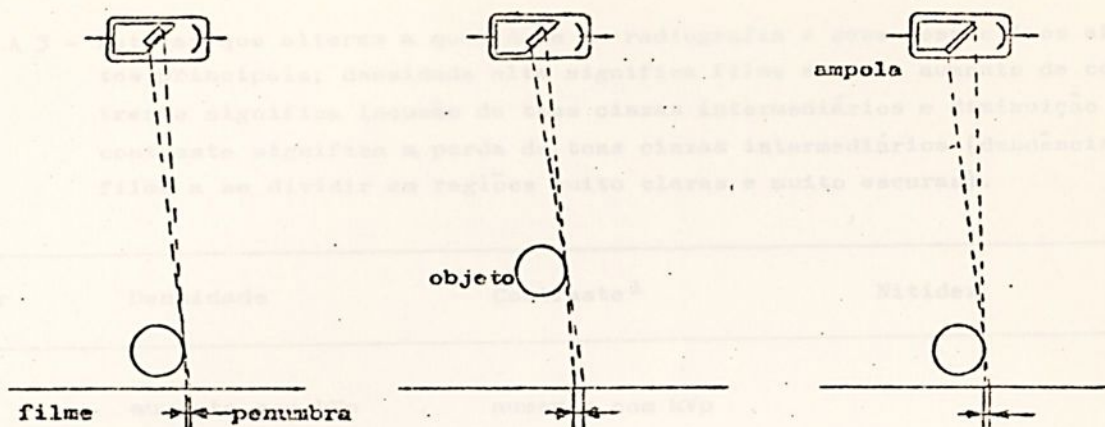


fig.12 - Compromisso entre os parâmetros geométricos (distâncias ampola-objeto-filme, tamanho do alvo e (ou) tamanho do ponto focal do alvo) e a largura da zona de penumbra no filme (nitidez dos contornos).

tempos de exposição muito longos (vários minutos, para radiografias de aço ou cobre);

- d) tipo do filme - trata-se de um problema crítico, visto que cada fabricante fornece seus tipos de filme com sensibilidade, granulação (resolução) e faixa de linearidade com características particulares.

Como não existem modelos matemáticos e fórmulas simplificadas de aplicação que envolvam todos esses parâmetros, costuma-se obter boas radiografias pelo método empírico de tentativa e erro. No caso da radiografia hospitalar, tal procedimento implica na exposição excessiva do paciente às radiações (pesquisas tentam minimizar o inconveniente desenvolvendo bonecos com materiais cujas densidades são similares às dos tecidos humanos). No caso das radiografias industriais, a única preocupação envolve apenas a segurança do operador. Uma forma de se minimizar o número de tentativas é a consulta à tabela 3, onde os vários parâmetros e seus respectivos efeitos são relacionados. Com o

TABELA 3 - Fatores que alteram a qualidade da radiografia e seus respectivos efeitos principais; densidade alta significa filme escuro; aumento de contraste significa incusão de tons cinzas intermediários e diminuição de contraste significa a perda de tons cinzas intermediários. (tendência do filme a se dividir em regiões muito claras e muito escuras).

Fator	Densidade	Contraste ¹	Nitidez
kVp	aumenta com kVp	aumenta com kVp	
mA	aumenta com mA		
tempo de exposição	aumenta com o tempo		
filme	aumenta com a velocidade	varia com a fabricação	diminui com a velocidade
placas intensificadoras	aumenta com o poder de brilho	diminui	diminui
contacto filme placas			diminui com pouco contacto
colimador	diminui		aumenta
objeto	diminui com espessura e densid.	diminui com a espessura	diminui com a espessura
distância alvo-filme	diminui		aumenta
tamanho alvo ou área focal			diminui com o aumento do tamanho

1 - leia-se: escala de contraste.

mesmo objetivo, são construídos ábacos com informações mais precisas sobre os filmes disponíveis no mercado (fig. 13).



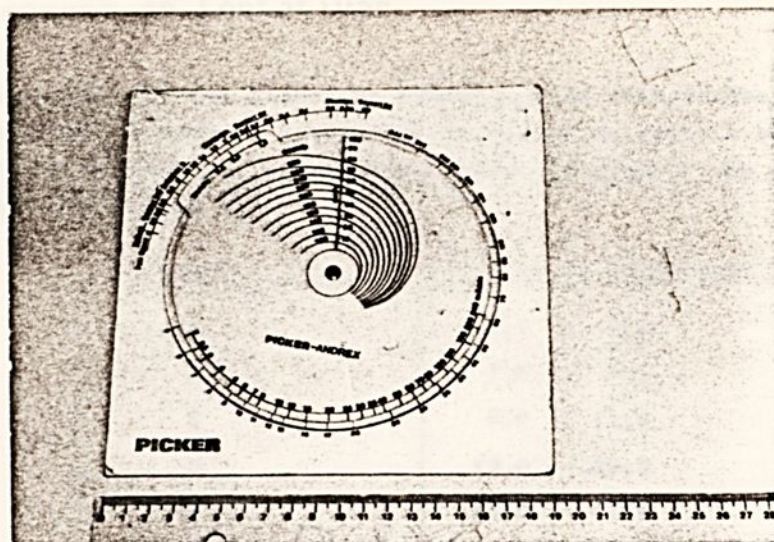


fig. 13 - Um ábaco circular para ajuste da corrente e do tempo de exposição em função do filme, da tensão, da espessura da amostra e da distância entre a ampola e o filme.

Dando mais atenção aos filmes, convém observar que estes não são clasificados conforme os padrões ASA ou DIN, mas sim em grupos de velocidade batizados por letras de A até F. Os filmes do grupo A são os mais lentos, i.é, menos sensíveis e de melhor resolução, enquanto os filmes do grupo F são os mais rápidos e de pior resolução (vide tabela 4). Um exemplo de utilização dos filmes do grupo C é o filme intrabucal odontológico [11], enquanto um exemplo de utilização dos filmes do grupo D é o filme para radiografias industriais de amostras ferrosas de um a dez centímetros de espessura.

Em resumo pode-se afirmar que a obtenção de radiografias (industriais ou não) com boa nitidez exige uma sensibilidade do operador que o coloca na condição de artesão de elevado grau técnico, visto que somente a prolongada convivência com o equipamento lhe permite obter resultados conclusivos após

um número pequeno de tentativas.

TABELA 4 - Classificação dos filmes de acordo com as velocidades; o nível das velocidades é dado em Roentgens; os filmes do grupo A são os mais lentos e menos sensíveis, enquanto os filmes do grupo F são os mais rápidos e mais sensíveis.

grupo	nível de velocidade (R)
A	1,5 - 2,9
B	3,0 - 5,9
C	6,0 - 11,9
D	12,0 - 23,9
E	24,0 - 47,9
F	48,0 - 95,9

2.3.4- Proteção Radiológica -

O grande perigo da radiação-X reside no fato de que o organismo humano não possui mecanismos sensoriais para detectá-la durante a exposição. Como os sintomas relacionados com os efeitos nocivos só se fazem sentir tardiamente, i.é, muitas horas depois de atingida a dose acumulada de efeito letal, os cuidados de proteção baseados em sintomas biológicos constituem ato de suicídio ou homicídio voluntário. O mesmo vale para todas as radiações ionizantes que possam atingir ou penetrar os tecidos humanos.

A tabela 5 [12] mostra um quadro dos sintomas apresentados pelas pessoas submetidas a radiações com dosagem acima do limite tolerável (25 rem), durante um tempo curto e único de exposição. Caso o indivíduo seja submetido a doses pequenas em períodos intercalados no decorrer da vida, o efeito danoso

TABELA 5 - Quadro dos sintomas apresentados por indivíduos submetidos a doses letais de radiação.

tempo decorrido após a irradiação	50 rem	200 rem	400 rem	600 rem
1ª semana	dor de cabeça náusea vômitos	náusea e vô- mitos após 1 a 2 horas	náusea e vô- mitos após 1 a 2 horas	náusea e vô- mitos após 1 a 2 horas
2ª semana			não há sin- tomias especiais	não há sin- tomias especiais Diarréia, náu- seas e vômitos inflamação da bo- ca e garganta
3ª semana		não há sinto- mas especiais	início de que- da de cabelo fadiga e apatia perda de ape- tite	febre, fraqueza morte em cerca de 100% dos casos
4ª semana		queda de ca- belo perda de ape- tite, fadiga e apatia	febre séria inflama- ção da boca e garganta	
5ª semana		infecção na garganta, fra- queza geral, sangramento, diarréia morte em cerca de 15% dos casos	fraqueza geral sangramento e diarréia morte em cerca de 50% dos casos	

ocorre devido à acumulação dessas exposições. As consequências mais comuns são a catarata, anemia, leucemia ou outros tipos de câncer, etc.

Como atitude preventiva, o CNEN aprovou em sua 410ª sessão, realizada em 19 de junho de 1973, a sua resolução CNEN-6/73. Tal resolução encontra-se publicada no Diário Oficial da Federação de 19 de setembro de 1973, seção I-parte II, pags. 3132 a 3175, cujo conteúdo foi adotado pelo Ministério do Trabalho para efeito de aplicação na CLT (vide portaria 3214 de 8 de junho de 1978 - NR 15, anexo 5), hoje explicitada na seção XV da Segurança e Medicina do Trabalho, artigo 200.

No trabalho prático, as atenções devem ser concentradas em:

a) unidades e outras definições -

O Roentgen (R) é uma unidade básica que mede a quantidade de ionização no ar por uma fonte de raios X ou γ . Na faixa de energia de raios-X mais comum (de 50 keV a 2000 keV), uma dose de 1 R equivale a uma energia de 95 ergs/s, ou a $1,61 \cdot 10^{12}$ pares iônicos produzidos em cada cm^3 de ar. Para tecidos humanos, uma mesma dose em Roentgen pode produzir efeitos diferentes, dependendo do tipo de tecido e também do tipo da fonte. Portanto, uma outra unidade chamada rem é definida. O rem (rad equivalent man) expressa o grau de uma lesão biológica sobre o homem provocada pela radiação. O rem é obtido pelo produto da dose absorvida em RADs (1 RAD equivale a 100 ergs por grama de material irradiado) pelo RBE, i. é, efetividade biológica relativa. O RBE é o fator multiplicativo que avalia a lesão em



TABELA 6 - Efetividade biológica relativa (RBE) para alguns tipos de radiação; o produto da dose, em RAD, pelo RBE resulta na dose equivalente para o homem, em rem.

radiação	RBE
X	1
beta	1
protons	5
neutrons lentos	3
neutrons rápidos	10
alfa	20

função do tipo de radiação e é dado pela tabela 6. Para exemplificar, uma dose de 1 RAD com raios α é 20 vezes mais letal que 1 RAD de raios-X (o mesmo vale para medidas em Roentgen).

b) limites de tolerância -

A máxima dose acumulada permissível para o corpo inteiro do trabalhador é de 5 rem em qualquer período de 12 meses. A máxima dose acumulada para toda a vida varia com a idade do trabalhador e segue a expressão

$$D = 5 (N - 18) \quad (14)$$

onde D é a dose em rem e N é a idade do trabalhador. Assim, um indivíduo com 18 anos (ou menos) de idade é proibido de trabalhar com fontes de radiação, enquanto indivíduos com idade avançada devem abandonar definitivamente o trabalho quando alcançarem o limite calculado para a sua idade (60 rem para 30 anos, 160 para 50 anos, etc.). Assim sendo, para que o trabalhador

possa se manter em atividade por um número maior de anos, ele deve respeitar uma taxa anual de 5 rem, caso contrário, seu afastamento definitivo será antecipado. Para períodos inferiores de exposição, as doses permitidas seguem a tabela 7, desde que respeitados os limites da equação (14).

TABELA 7 - Limites de doses para partes do corpo de trabalhadores sujeitos à radiação controlada.

órgão	limite anual (rem)	limite mensal (rem)	limite ¹ semanal (mrem)	limite ¹ horário (mrem)
mãos, antebraços, pés e tornozelos	75	6,25	1570	9,3
ossos, tireóide, pele do corpo inteiro (excluindo-se a pele das mãos e dos outros extremos do corpo)	36	3,0	750	4,5
qualquer outro órgão isolado, excluindo-se gônadas e órgãos hematopoiéticos	15	1,25	310	1,8

1 - os limites semanal e horário não são oficiais e servem apenas para referência

Para indivíduos do público, o limite anual segue o critério mostrado na tabela 8, embora a resolução do CNEN afirme que essas pessoas (por não serem submetidas aos sistemas de controle) não devem ser expostas a qualquer dose por qualquer período.

c) controle -

O CNEN obriga ao operador ou usuário do equipamento, a constante monitoração da dose recebida. Esta é feita com medidores de leitura instantânea (câmaras de ionização) periodicamente submetidos à calibração por órgãos ligados ao CNEN. Outro controle é o dosímetro de uso pessoal, cuja contagem de exposição é feita posteriormente por órgãos oficiais.

A 8 - Limites de doses, para partes do corpo, de indivíduos do público que não trabalham diretamente com aparelhos de radiação.

órgão	limite anual (rem)
mãos, antebraços, pés, tornozelos	7,5
ossos, tireóide, pele do corpo inteiro, excluindo-se a pele das mãos, antebraços, pés e tornozelos	3
corpo inteiro, gônadas, órgãos hematopoiéticos	0,5
qualquer outro órgão isolado	1,5



3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1- Escolhas e decisões de projeto -

Devido a limitações de ordem econômica e dificuldades de importação, vários cuidados foram tomados na construção do protótipo para produção de raios-X:

- a) evitou-se ao máximo a dependência ou recorrência às tecnologias sofisticadas não disponíveis no próprio local onde seria desenvolvido o protótipo;
- b) buscou-se abolir o uso, compra, empréstimo ou construção de peças ou dispositivos complexos, caros, frágeis, ou de difícil reposição;
- c) escolheu-se o princípio de geração de radiação-X mais simples possível, como forma de minimizar o número de variáveis a serem controladas, i.é, facilitar a interpretação dos fatos anômalos que possam ocorrer durante as montagens ou experimentos.

Por conta do exposto acima, as características do protótipo a ser construído foram definidas e justificadas conforme segue abaixo:

- a) ampola de catodo frio - por não dispor de um laboratório com vidraria sofisticada, eletrodos com dilatação térmica compatível com a do vidro, e finalmente por não dispor de equipamento de vácuo para pressões de 10^{-6} mmHg, mas somente até $5 \cdot 10^{-3}$ mmHg (pressão tipicamente usada em ampolas de catodo frio);
- b) fonte de tensão por descarga capacitiva - pelo fato de se ter



- para uso imediato, uma fonte de alta tensão C.C. que opera com um quadruplicador de tensão; esta é capaz de atingir até 450 kV, e manter uma corrente de até 15 mA durante tempo prolongado, além de contar com uma série de dispositivos de segurança do trabalho e de proteção contra curto-circuitos;
- c) dureza superior à produzida pelos equipamentos dentários - por não se ter fácil acesso ao vidro borato ou outro vidro transparente à radiação-X mole; entretanto, corre-se o risco de o vidro comum inviabilizar a obtenção de radiografias de polímeros, já que a dureza acima da correta inibe o contraste da chapa fotográfica (tal risco só poderia ser verificado após a construção da ampola);
- d) pesquisa de alvos passíveis de gerar radiação - pelo custo proibitivo de uma pastilha de tungstênio puro; seriam testados materiais que viessem a conter tungstênio ou outros metais de alto número atômico em suas composições;
- e) peças metálicas usinadas em alumínio ou latão - pela fácil disponibilidade e manuseio desses metais, baixo custo, resistência mecânica, etc;
- f) vedações com "o"rings de nitrilo - por se trabalhar com um vácuo que permite o uso desse material, com a vantagem adicional de se poder desmontar a ampola, válvulas, junções, etc. a qualquer instante em que se desejar (e sem o risco da introdução de pontos de vazamento);
- g) vidraria a partir de copos comuns vendidos em supermercados - embora pareça estranho, esses copos são fabricados com geometria regular o suficiente para aceitar a acomodação dos



"o"rings; possuem paredes com pouca espessura (permite tentar a obtenção de raios-X moles), resistência mecânica à pressão atmosférica e finalmente, dispensam o trabalho de vidraria a quente.

Deve ser observado que o conjunto de características acima permite uma avaliação prévia do que se pode esperar do protótipo.

Inicialmente, pode-se afirmar que haveria um limite inferior para a dureza da radiação. O limite superior da dureza estaria vinculada à tensão máxima do gerador C.C., ou ao possível salto indesejável de centelhas entre os dispositivos externos à ampola. Quanto à intensidade do feixe, a limitação estaria vinculada à corrente de elétrons entre catodo e alvo, cujo aquecimento poderia ser transmitido a partes do vidro (não apropriado para suportar gradientes de temperatura muito acentuados) e aos "o"-rings. Convém esclarecer que a inclusão de dispositivos para refrigeração foi considerada como um fator complicante que poderia ser posto de lado até uma reconsideração.

Em termos gerais, o esquema a ser montado pode ser simplificado conforme a fig. 14. Convém esclarecer que existem um circuito RC e um centelhador mecânico que foram suprimidos do esquema, mas que foram usados frequentemente nos ensaios. Estes são discutidos detalhadamente mais adiante porque sua inclusão no sistema só pode ser explicada através de evidências de ordem experimental. O procedimento experimental a ser adotado resume-se em projetar um feixe de raios-X contra o assoalho (para minimizar a radiação parasita sobre o ambiente de trabalho), onde ficariam



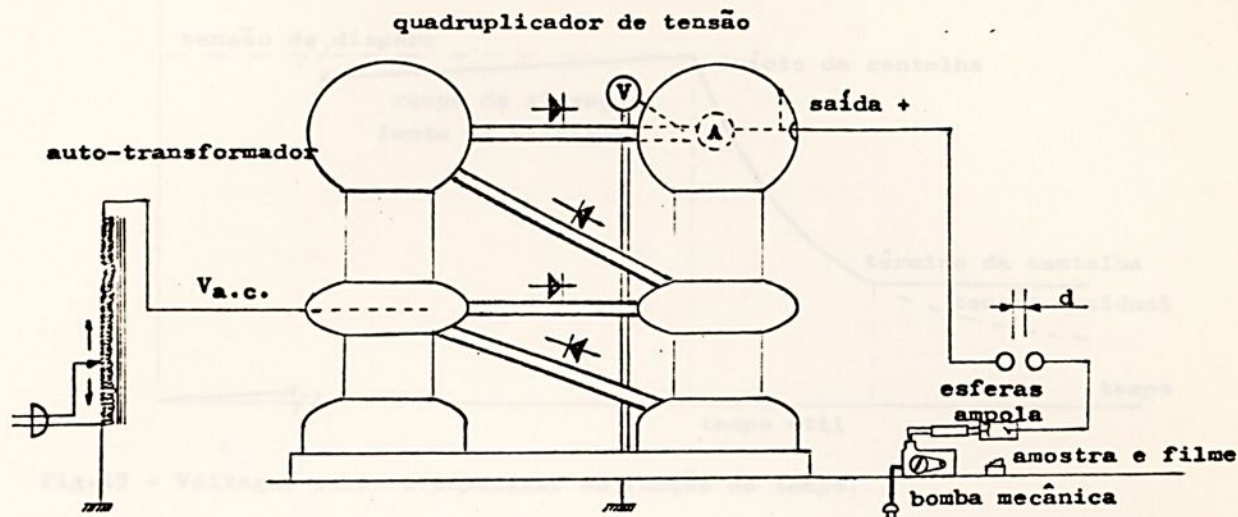


fig.14 - Esquema simplificado do protótipo para produção de raios-X por descarga capacitiva.

acomodados corpos de prova e chapas fotográficas. O ajuste da tensão (dureza) seria feito através da escolha da distância "d" entre as esferas (a esfericidade garante uma uniformidade do campo elétrico entre as mesmas e define uma boa reprodutividade da tensão escolhida para o disparo). Quando a fonte atinge o valor desejado, uma centelha salta entre as esferas, transmitindo ao alvo o valor da tensão da fonte (potencial positivo). Estando o catodo no potencial de aterramento, a d.d.p. entre os eletrodos fica estabelecida. Como a descarga é capacitiva, a corrente inicia-se no seu valor de pico (podendo variar seu valor de acordo com a capacitância, com a resistência interna da ampola e com o valor da tensão de disparo) e vai decaindo exponencialmente até anular-se (fig. 15). O mesmo ocorre com a tensão sobre a ampola, definindo uma queda exponencial da dureza do feixe produzido. Devido ao problema da difícil disponibilidade e alto custo

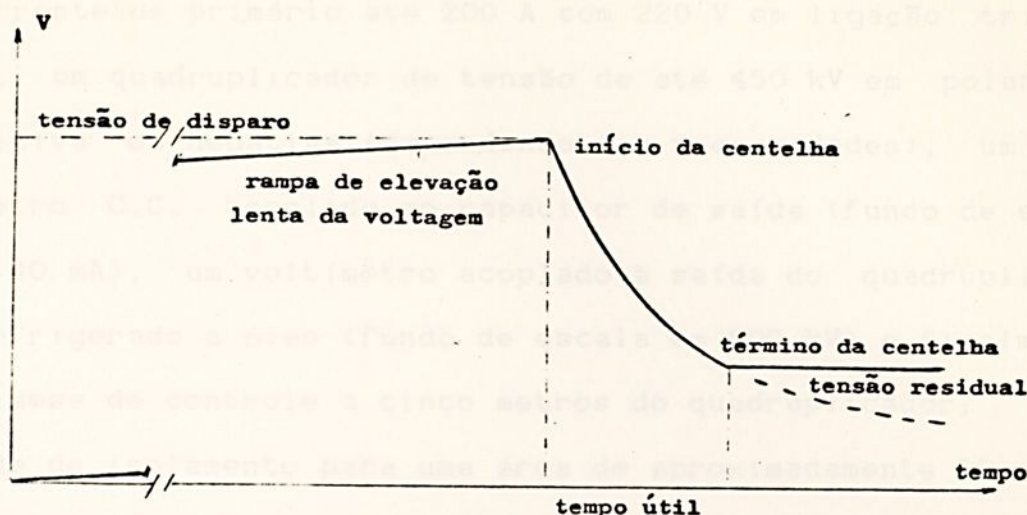


fig.15 - Tensão sobre o capacitor em função do tempo.

dos filmes próprios para radiografias industriais (emulsões do tipo D), foram adotados filmes para radiografia dentária (emulsão tipo C), cuja obtenção é imediata e de custo irrisório. O objetivo dos experimentos seria a avaliação do desempenho do protótipo segundo a dureza, intensidade, contraste (através da observação das radiografias produzidas), e durabilidade dos dispositivos. Uma avaliação preliminar grosseira pode sugerir que a corrente de pico não poderia ser superior a alguns amperes, com uma duração útil (constante de tempo) de no máximo um milissegundo (caso a resistência interna da ampola atinja valores muito elevados, i. é, acima de alguns megohms).

Para viabilizar os experimentos, verificou-se qual era o equipamento disponível e qual era a coleção de dispositivos a serem construídos. Do equipamento disponível para uso imediato, destaca-se:

- a) gerador de alta tensão TUR DRESDEN, modelo TUR GP15/600, constituído de um auto transformador de até 110 kV de saída

(corrente de primário até 200 A com 220 V em ligação trifásica), um quadruplicador de tensão de até 450 kV em polaridade positiva ou negativa (dependendo das necessidades), um amperímetro C.C. acoplado ao capacitor de saída (fundo de escala em 40 mA), um voltímetro acoplado à saída do quadruplicador e refrigerado a óleo (fundo de escala em 600 kV) e finalmente, uma mesa de controle a cinco metros do quadruplicador;

- b) grade de isolamento para uma área de aproximadamente 60 m^2 ;
- c) bomba de vácuo mecânica rotativa NGN modelo PSR/2, com vácuo terminal de $5 \cdot 10^{-3} \text{ mmHg}$;
- d) medidor Edwards, tipo Pirani, modelo 78/2, acoplado a dois sensores modelo PR 10K, com fundo de escala em $1 \cdot 10 \text{ mmHg}$.

A coleção de dispositivos a serem confeccionados ficou constituída de:

- a) ampola de raios-X de catodo frio;
- b) válvula de isolamento para a ampola, com engates compatíveis com os padrões Pirani e Penning, para fácil acoplamento com qualquer sistema de vácuo que contenham um desses medidores;
- c) um circuito RC para alta tensão;
- d) conjunto de corpos de prova de alguns materiais (penetrômetros, telas calibradas, etc.) para os ensaios de averiguação de desempenho;
- e) um centelhador mecânico;
- f) um par de esferas, montadas sobre suporte isolante de PVC rígido, para ajuste da distância "d" (fig. 14);
- g) tubulações, adaptadores, eletrodos sobresalentes e outras peças miúdas.



Os dispositivos citados nos itens c) e e) foram idealizados e construídos durante os ensaios porque visavam a otimização do protótipo, e não constituíam peças fundamentais para o seu funcionamento. Dependendo do caso, o uso do centelhador mecânico é desaconselhável. Do conjunto de dispositivos citados, não serão discutidos os itens f) e g), por constituírem tarefa de execução trivial.

3.2- Procedimento Prático -

Uma vez definido o princípio de funcionamento a ser adotado para o protótipo, foi tomada a tarefa de se construir um conjunto de dispositivos que constituíssem o mínimo necessário e suficiente para que os primeiros ensaios fossem realizados. Paralelamente, foram tomadas algumas providências relativas à proteção radiológica. Tão logo a produção de raios-X tenha sido verificada, foram construídos alguns dispositivos (corpos de prova) que permitissem um enriquecimento dos ensaios quanto à coleta de informações úteis. Em função desses resultados, foi construído um último dispositivo que otimizou os resultados anteriores.

3.2.1- Construção dos dispositivos -

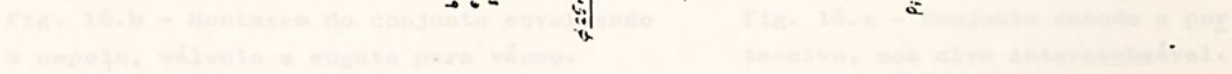
De início, foi construído um sistema "ampola-válvula-engates", o qual ficou montado de forma compacta numa única peça. Em seguida, foi montado um circuito RC para altas tensões e paralelamente, foi confeccionado um jogo de corpos de 4



penetrômetros. Finalmente, foi improvisado um centelhador mecânico que otimizou os resultados até então obtidos. Cada um dos dispositivos acima é apresentado quanto ao seu princípio de funcionamento, necessidade de utilização, e possíveis limitações.

O sistema "ampola-válvula-engates" só foi testado quanto à resistência mecânica e à vedação após a conclusão de todas as suas peças. As figuras 16a), b) e c) mostram em detalhes todo o conjunto das peças individuais e respectiva montagem. Uma peça que merece destaque especial é o alvo, o qual não aparece nos desenhos. Após a construção da ampola, foi escolhido o filamento de uma lâmpada de retro-projetor, presa entre duas pastilhas de vídea. Tal decisão é justificada pela facilidade de obtenção e pelo seu custo irrisório nos casos de substituição. As peças de vidro foram trabalhadas por processo manual de abrasão com pó de diamante (com o auxílio de uma furadeira vertical de bancada). O polimento e o acabamento exigiram cuidados especiais nas regiões de acomodação dos "o"-rings. Todas as peças metálicas foram trabalhadas em alumínio e latão sem exigir o uso de nenhuma máquina operatriz sofisticada. Todas as operações foram realizadas com um torno semi-automático, uma fresadora vertical (que poderia ter sido substituída por uma plaina) e com uma furadeira vertical de bancada. Algum cuidado especial foi dispensado às regiões de acantamento dos "o"-rings. As figuras 17 e 18 mostram o conjunto de peças e o sistema montado, respectivamente. Como a válvula é cilíndrica e abre-se (ou fecha-se) segundo movimentos de rotação e, sendo a ampola vinculada ao corpo externo da válvula, o manuseio da válvula implica na rotação da





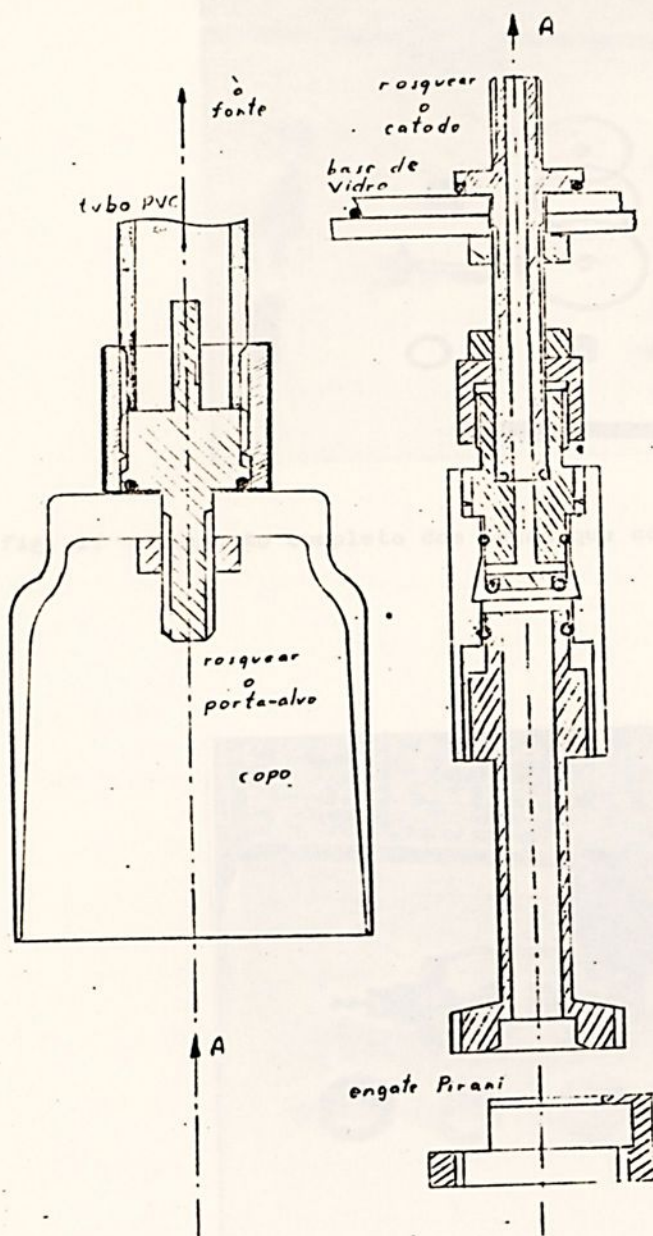


fig. 16.b - Montagem do conjunto envolvendo a ampola, válvula e engate para vácuo.

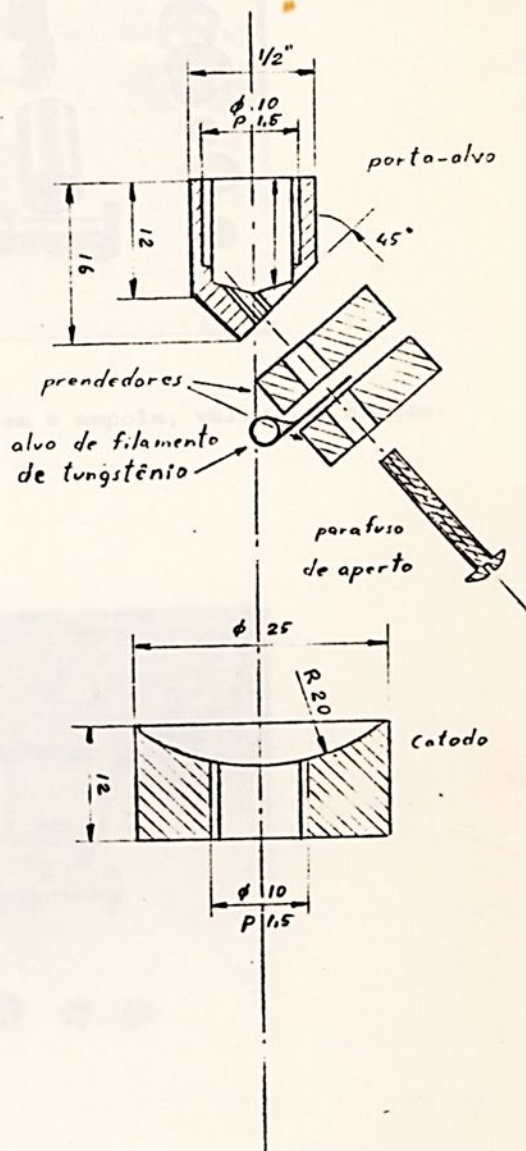


fig. 16.c - Conjunto catodo e porta-alvo, com alvo intercambiável.

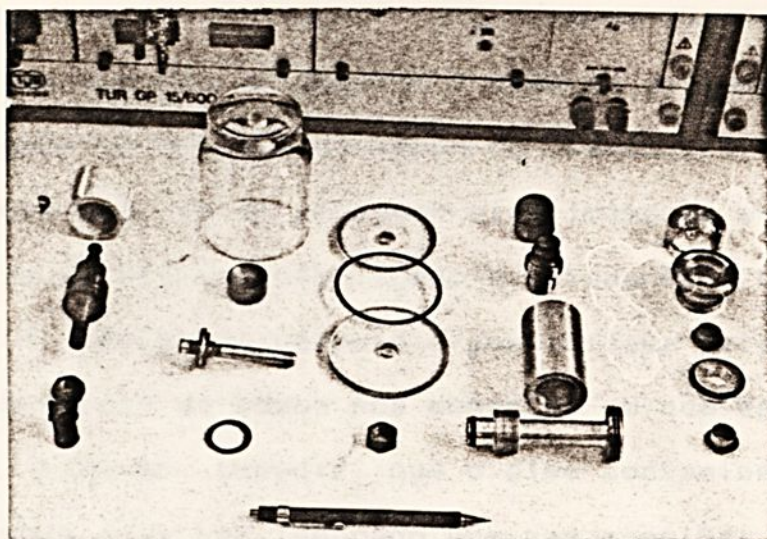


fig. 17 - Conjunto completo das peças que compõem a ampola, válvula e engate.

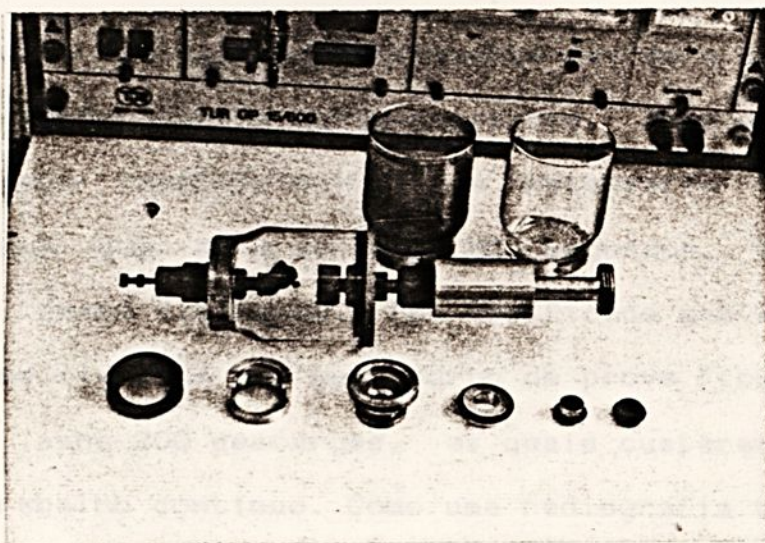


fig. 18 - Montagem das peças da fig. 17, acrescida de peças sobressalentes.

ampola. Por isso, o eletrodo superior recebeu o alvo (potencial positivo elevado) e ficou conectado ao capacitor por um fio flexível. Esse fio ficou "blindado" por um cano de PVC vinculado

ao topo da ampola para impedir que faíscas paralelas ocorressem na superfície externa da ampola. A base do sistema ficou vinculada ao engate de entrada da bomba de vácuo, exigindo o único cuidado adicional de se proteger eletricamente a bomba de vácuo com um fio de aterramento ligado diretamente à base da ampola (catodo). A adoção da válvula é justificada pela necessidade de se isolar a ampola da bomba nos momentos em que esta é ligada ou desligada, visando impedir que o óleo contamine o interior da ampola. Também deve ser lembrado que nas ocasiões em que a ampola é desmontada do restante do equipamento, a válvula impede que o pó e outras impurezas do ambiente invadam o seu interior.

A adoção do circuito RC visou eliminar uma limitação do gerador de alta tensão. Após cada centelha, a fonte de alta tensão se desliga automaticamente devido a um sistema interno de proteção contra curto-circuitos. Para que a tensão de trabalho seja reestabelecida, é necessário um "ritual" de procedimentos que dura cerca de 80 segundos. Para efeito de ilustração desse limitante, foi verificado que a sensibilização de um filme livre de qualquer corpo de prova ficou visivelmente subesposto após 200 descargas, as quais custaram cerca de duas horas de trabalho contínuo. Como uma radiografia típica necessita de dezenas de milhares dessas descargas, esta só apresentaria alguma densidade após vários meses de trabalho contínuo. O número elevado de centelhas necessárias para uma única sensibilização se justifica pela pequena quantidade de energia elétrica que pode ser armazenada no capacitor de saída do quadruplicador de tensão da fonte. O circuito RC possui o poder de alterar completamente o



quadro descrito acima porque possui uma constante de tempo bem definida que pode ser usada para distribuir a corrente de pico de cada centelha em espaços maiores no tempo. Como o resultado dessa distribuição representa uma corrente média baixa e sem picos elevados, o sistema de proteção não desativa a fonte. O circuito RC foi montado com o resistor em série (entre a fonte e a ampola) e com o capacitor em paralelo com a ampola, conforme mostra a figura 19. Enquanto o resistor regula a corrente que flui da fonte ao capacitor (mantendo-a abaixo do valor de desarme da

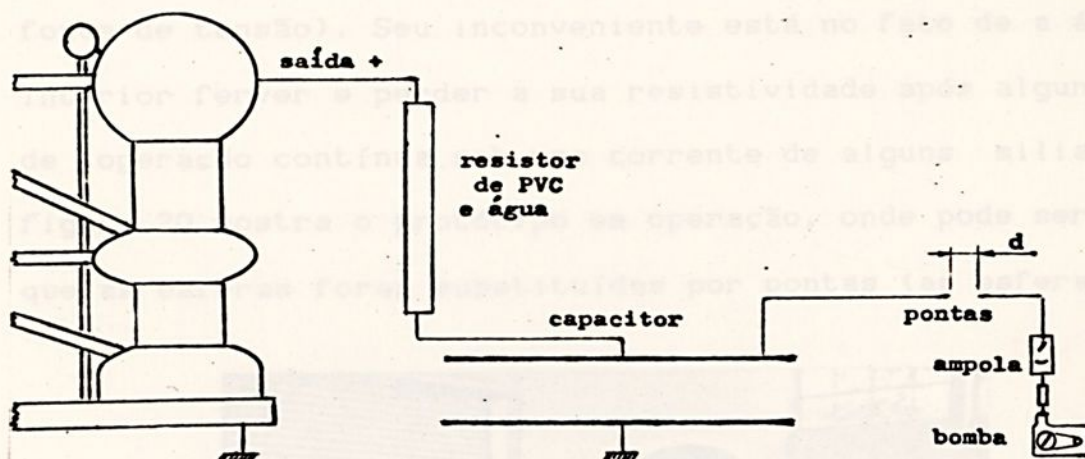


fig.19 - Circuito RC acoplado ao Protótipo; as pontas substituem as esferas.

fonte, i. é, 20 mA), o capacitor acumula a carga a ser enviada aos eletrodos da ampola. No instante em que a centelha é estabelecida, a corrente de pico é fornecida pelo capacitor, e não pela fonte. Assim que a centelha é interrompida, o capacitor volta a carregar-se até alcançar a tensão de novo centelhamento.

O trabalho de obtenção do circuito RC exigiu algu-

ma atenção especial quanto ao problema do salto de faíscas entre as placas do capacitor e na superfície externa do resistor. Portanto, o capacitor foi feito com duas chapas de aço com dois metros quadrados cada, separadas por 60 cm de ar, colocadas em posição horizontal. A capacitância do mesmo foi calculada em torno de 30 pf e seu poder de isolamento suportou até 300 kV, piorando até 250 kV em dias com ar muito úmido ou muito "sujo". O resistor foi feito a partir de um cano de PVC rígido de 3/4 " e quatro metros de comprimento, o qual foi preenchido com água destilada. Sua resistência ficou avaliada em 3,5 M Ω e seu poder de "isolamento" suportou 450 kV (tensão máxima fornecida pela fonte de tensão). Seu inconveniente está no fato de a água do seu interior ferver e perder a sua resistividade após alguns minutos de operação contínua sob uma corrente de alguns miliamperes. A figura 20 mostra o protótipo em operação, onde pode ser observado que as esferas foram substituídas por pontas (as esferas impedem

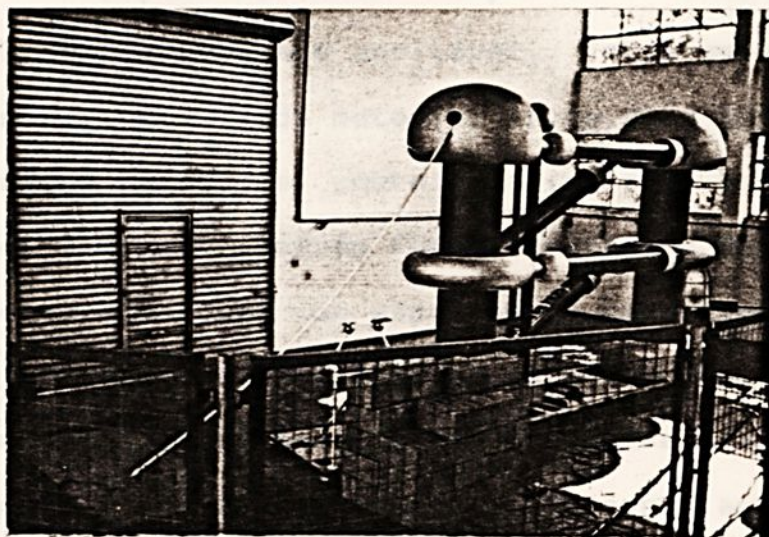


fig. 20 - Circuito RC em operação sob 130 kV, com centelhamento intermitente.

que a corrente de centelhamento se interrompa de forma espontânea). Ao mesmo tempo em que a fonte de tensão é mantida em operação, o circuito RC produz várias centelhas por segundo. A constante de tempo do circuito RC foi avaliada em torno de 100 microsegundos para carga, e em torno de 8 microsegundos para a descarga (a 10 mmHg, a resistência elétrica da ampola vale cerca de 250 K Ω). A corrente média assume um valor estável que é lida no painel de comandos, cujo valor pode ser regulado entre "zero" e 15 mA através do ajuste da tensão de saída da fonte. Nessas condições, radiografias de boa densidade foram produzidas em poucos minutos de exposição, visto que a corrente média assumiu valores compatíveis com aquelas usadas nas ampolas comerciais. Um inconveniente que surgiu desse sistema é o ruído ensurdecador que as centelhas provocam no recinto. Outro inconveniente foi detectado posteriormente quanto à dureza da radiação, o qual é detalhado mais adiante.

Depois de obtida a primeira evidência da produção de raios-X com intensidade aceitável, foram construídos alguns penetrômetros, um de cada material (figs.21 a 24), i. é, acrílico, alumínio, ferro, e cobre. A figura 25 mostra o conjunto desses penetrômetros. Também foram recortados dois pequenos pedaços de telas metálicas com espaçamento conhecido para efeito da avaliação do poder de resolução da ampola. Com esses dispositivos, foram realizados ensaios que fornecessem informações mais precisas sobre a dureza e a intensidade da radiação produzida.

A medida que os ensaios foram fornecendo dados conclusivos, foi confirmada a necessidade de se aumentar a dureza



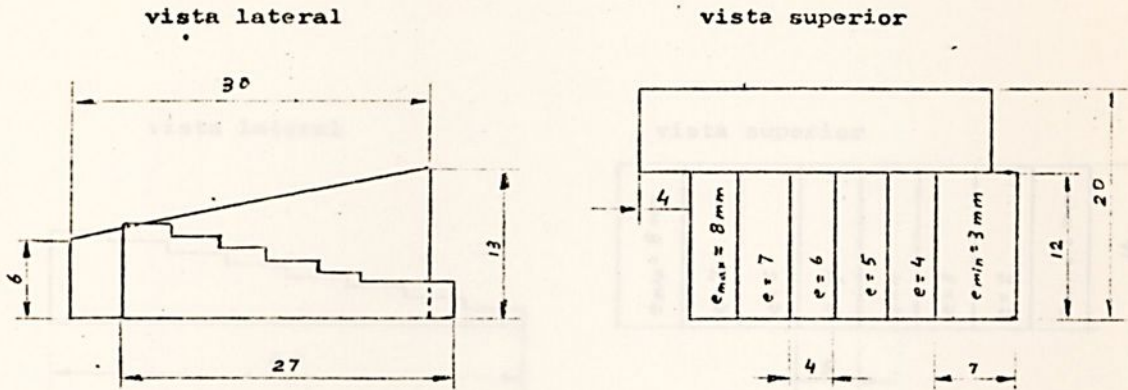


fig. 21 - Penetrômetro de acrílico

fig. 21 - Penetrômetro de acrílico; as assimetrias visam facilitar o reconhecimento das partes após a revelação da chapa fotográfica.

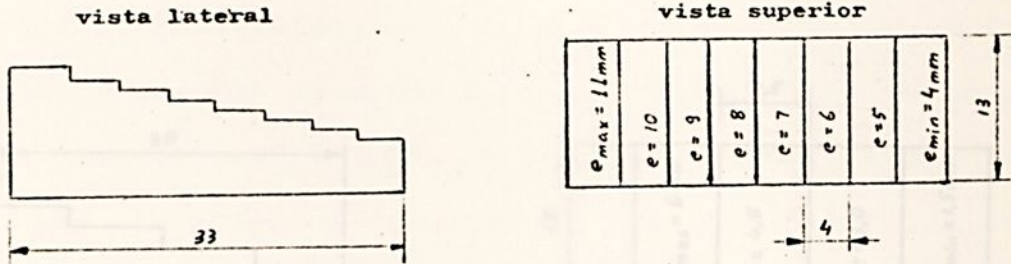


fig. 22 - Penetrômetro de alumínio

da radiação sem o correspondente aumento da tensão na fonte. Embora essa idéia pareça totalmente absurda à primeira vista, ela se justifica plenamente porque não existe nenhum vínculo entre as

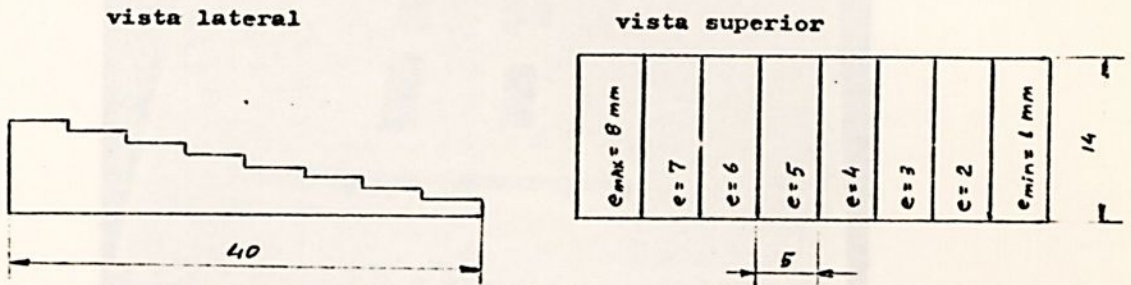


fig. 23 - Penetrômetro de ferro.

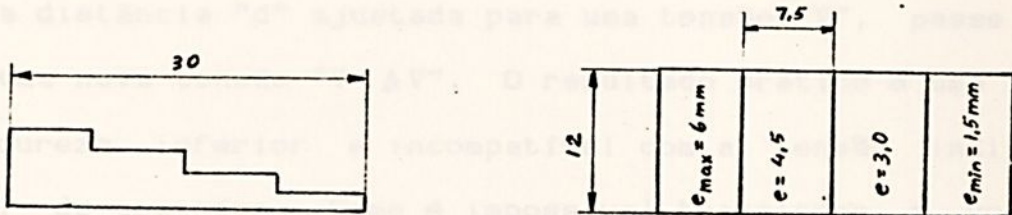


fig. 24 - Penetrômetro de cobre.

tensões da fonte e da placa positiva do capacitor, visto que existe um resistor de 3,5 M Ω entre as mesmas. A análise simplista do esquema da figura 14 não denuncia esse fato porque a intuição diz que a tensão de disparo da centelha é constante e estável, já

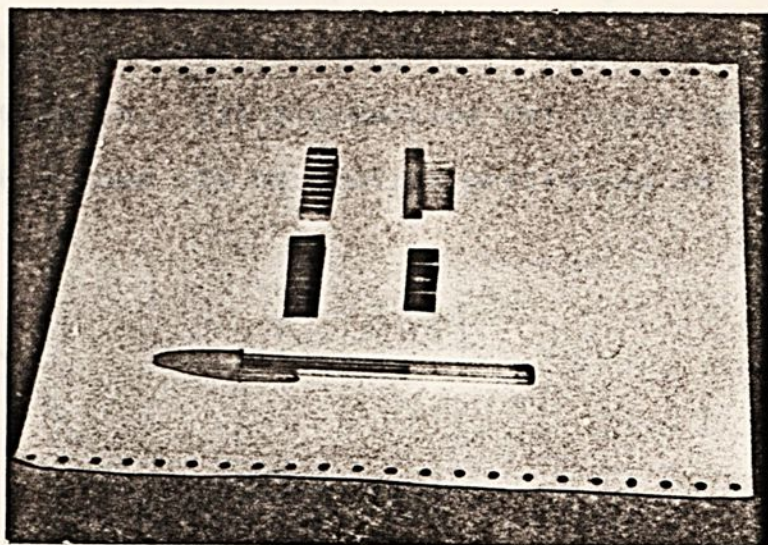


fig. 25 - Conjunto de quatro penetrômetros.

que a distância "d" entre as pontas é fixa durante o experimento. Na verdade, logo na primeira faísca, o ar modifica algumas de suas propriedades físicas, e entre elas, a rigidez dielétrica (que diminui sensivelmente). A nova rigidez dielétrica faz com que a distância "d" ajustada para uma tensão "V", passe a valer para uma nova tensão " $V - \Delta V$ ". O resultado prático é uma radiação com dureza inferior e incompatível com a tensão indicada no painel de comandos. Como é impossível transladar o voltímetro para junto do capacitor (seu peso é de 160 Kgf, com uma altura de três metros e rigidamente acoplado à fonte de alta tensão, incluindo a canalização de óleo para refrigeração), e como não existe sentido prático em se elevar a tensão da fonte para tentar uma compensação porque seu aumento excessivo implica em panes no circuito RC, a solução adotada foi a improvisação de um centelhador mecânico que imponha "tempos de espera" entre as centelhas,

para que o ar possa recuperar a sua rigidez dielétrica inicial e o capacitor assumia de forma garantida o valor de tensão indicado pelo voltímetro. Tal dispositivo foi concebido conforme mostra a figura 26. Como não há sentido prático em se construir um dispo-

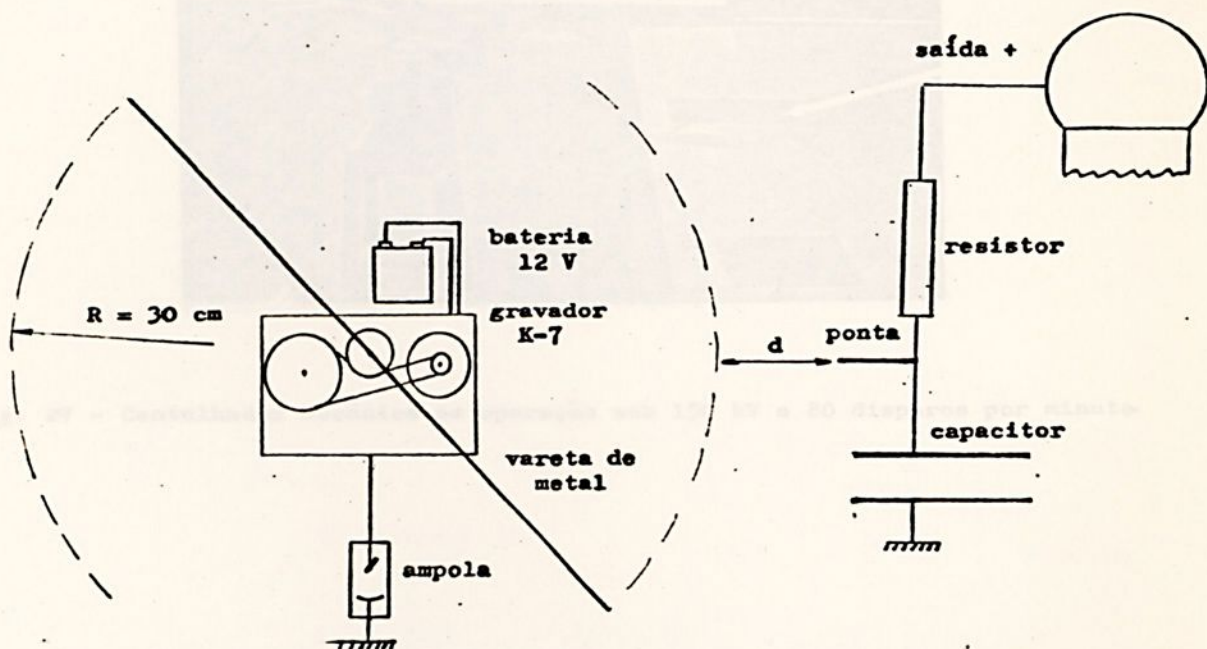


fig. 26 - esquema do centelhador mecânico que busca uniformizar a tensão de disparo e permitir uma "automatização" do protótipo.

sitivo complexo somente para essa função, decidiu-se por bem improvisá-lo a partir de um mecanismo de gravador de fitas K-7 que recebeu duas varetas metálicas em uma de suas polias. O seu motor ficou alimentado por uma bateria automobilística de 12 volts e todo esse conjunto ficou montado sobre uma plataforma isolada. Este cuidado se deve ao fato de que o dispositivo assume o potencial de terra entre uma centelha e outra, mas assume o potencial da fonte durante a ocorrência das centelhas. A figura 27 mostra o protótipo em operação com a adição desse dispositivo. A desvantagem gerada pelo dispositivo descrito acima está no fato

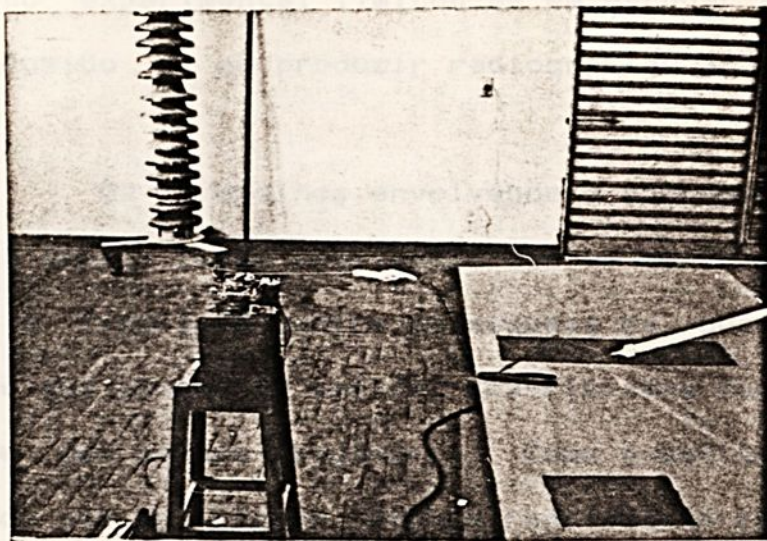


fig. 27 - Centelhador mecânico em operação sob 150 kV e 80 disparos por minuto.

de que o número de faíscas na unidade de tempo cai brutalmente e por isso, o tempo de exposição eleva-se para muitas horas. Por isso, seu uso é desaconselhado quando se pretende produzir raios-X moles devido a questões de economia de tempo. Esse dispositivo concluiu o trabalho de construção ou de montagens porque possibilitou a obtenção de resultados compatíveis com os objetivos pretendidos.

3.2.2- Experimentos e Ensaios -

Uma vez que todos os experimentos e ensaios objetivaram avaliar o desempenho do protótipo quanto à sua dureza, à sua intensidade e sua nitidez, e em segundo plano, a durabilidade de seus elementos orgânicos ou as condições de utilização, o

procedimento experimental limitou-se em estudar a geometria do feixe produzido e em produzir radiografias sob condições bem definidas.

Os trabalhos envolvendo o mapeamento da radiação em torno da ampola foram realizados com um medidor Nortrom modelo NGD-1000. A figura 28 mostra um esquema da geometria do feixe produzido e dos pontos de medida, distribuídos num meridiano e no equador de uma esfera imaginária. Como o medidor não permitiu o ajuste de sua calibração (embora funcionando com linearidade e

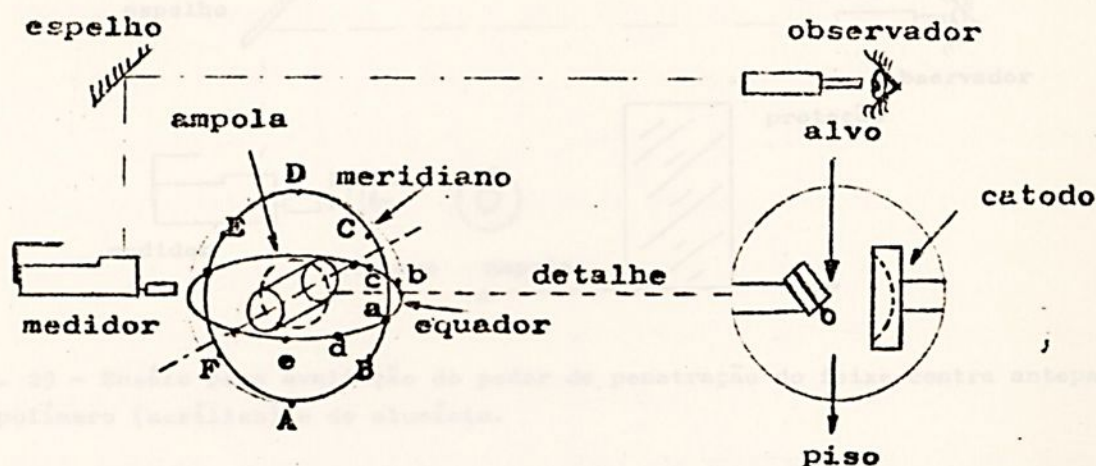


fig. 28 - Esquema do ensaio para avaliação da geometria do feixe; o raio da esfera é de 12 cm; os pontos de A a F pertencem ao meridiano e os pontos de a a c pertencem ao equador; o ponto c é próximo à base (catodo).

reprodutividade), as medidas foram normalizadas e expressas em porcentagem. A ampola foi mantida a 40 kV e 2 mA, enquanto o medidor percorreu os pontos escolhidos. Os pontos "b" e "c" ficaram localizados dentro de um cone de "sombra" produzido pelo catodo e por isso deveriam apresentar uma leitura inferior das demais, caso o feixe fosse panorâmico (emissão em todas as

direções segundo a geometria esférica). Caso o feixe fosse direcionado (comportamento pouco provável devido à escolha do alvo), os pontos A, B e F deveriam apresentar uma intensidade superior àquela encontrada nos demais.

Com relação ao estudo do poder de penetração do feixe, muito pouco foi feito, já que um estudo mais confiável foi feito através de radiografias. Conforme mostra a figura 29, o estudo visou apenas caracterizar a dureza do feixe frente a anteparos de densidade diferentes (acrílico e alumínio), sem que

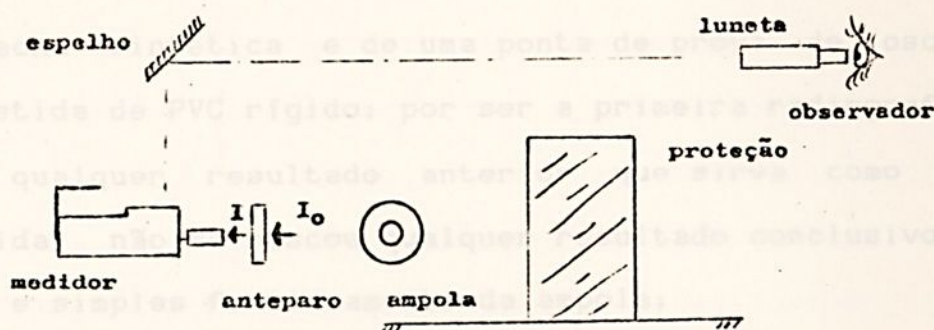


fig. 29 - Ensaio para avaliação do poder de penetração do feixe contra anteparos de polímero (acrílico) e de alumínio.

filmes fossem desnecessariamente utilizados. Este estudo não apresenta resultados conclusivos quanto ao desempenho do protótipo e não mereceu maior atenção porque não havia a disponibilidade de um outro equipamento de radiografia que permitisse comparações diretas.

Os ensaios que constituíram a parte mais importante do experimento de avaliação giraram em torno da produção das radiografias, primeiro por definirem claramente o desempenho do protótipo e segundo por serem o registro permanente do experimen-

to. Estas foram feitas segundo três montagens semelhantes que diferiram entre si apenas quanto ao uso dos dispositivos auxiliares citados anteriormente, i. é, o circuito RC e o centelhador mecânico. Em todos os casos a montagem da ampola e o posicionamento dos filmes sofreram poucas alterações. As tensões, intensidade de corrente e o tempo de exposição variaram de acordo com a montagem e com a dureza desejada.

As radiografias foram feitas segundo a ordem abaixo e com objetivos específicos, a saber:

- a) um alicate acompanhado de um borne de latão revestido com borracha sintética e de uma ponta de prova de osciloscópio revestida de PVC rígido; por ser a primeira radiografia e não ter qualquer resultado anterior que sirva como ponto de partida, não se buscou qualquer resultado conclusivo além do puro e simples funcionamento da ampola;
- b) dois penetrômetros um de acrílico e um de alumínio acompanhados de dois pequenos pedaços de tela, um com 6 fios por centímetro (passo de 1,6 mm) e outro com 2,3 fios por milímetro (passo de 0,44 mm); buscando avaliar simultaneamente a dureza, densidade e contraste à tensão usada, e também a nitidez quanto ao poder de resolução, visto que as telas possuem espessura desprezível e equivalem a objetos radiografados a grandes distâncias;
- c) penetrômetro de alumínio acompanhado de uma pequena esfera de papel-alumínio amassado e de uma pequena broca de aço rápido de 2,8 mm de diâmetro; buscando obter uma dureza adequada para esses materiais;



- d) dois penetrômetros, um de ferro e outro de cobre; visando buscar um limite superior para a dureza do feixe;
- e) dois penetrômetros, um de alumínio e outro de ferro; para testar a eficiência do centelhador mecânico;
- f) penetrômetro de acrílico acompanhado de um borne recoberto de borracha sintética; visando estabelecer o limite inferior da dureza do feixe;
- g) pequeno pássaro morto acompanhado de uma caneta esferográfica, posicionados em dois fimes independentes; visando ilustrar um exemplo da aplicação para raios-X moles e tirando proveito do aspecto panorâmico do feixe para produzir duas radiografias distintas simultaneamente.

Outros ensaios envolvendo radiografias foram suprimidos da listagem acima por não terem produzido resultados conclusivos, embora tenham conduzido o experimentador a ensaios bem sucedidos. Os ensaios que se utilizaram do centelhador mecânico foram realizados de forma "automatizada", i.é, com a possibilidade do operador permanecer em recinto distante daquele onde se encontra o protótipo.



4 RESULTADOS OBTIDOS

Devido ao fato de todo o trabalho ser avaliado através de radiografias, toda a discussão em torno dos resultados é baseada em chapas fotográficas. Estas são mostradas de acordo com a ordem cronológica de obtenção e são acompanhadas de alguns dados e comentários sobre as condições em que elas foram produzidas. Antes porém, é feita alguma discussão sobre o comportamento geométrico do feixe de raios-X. Também é feita uma observação rudimentar do decaimento da intensidade do feixe em função de algumas barreiras.

4.1- Da Geometria do Feixe -

De acordo com as condições da figura 28, o medidor acusou praticamente a mesma leitura em todos os pontos marcados no equador e no meridiano. Os pontos "b" e "c" ficaram localizados dentro de um cone de "sombra" produzido pelo catodo e por isso apresentaram uma leitura 25% inferior das demais. Este resultado já era esperado, dada a forma não convencional do alvo. Assim, ficou definitivamente descartada a idéia errônea de que o feixe teria uma direção preferencial de propagação. O feixe se caracterizou como sendo "panorâmico", visto a sua propagação pelo espaço numa geometria quase esférica. As desvantagens resultantes são a necessidade de uma blindagem cilíndrica para a ampola, a fim de eliminar a farta produção de radiação secundária no ambiente de trabalho e a não concentração de raios-X sobre o corpo de prova (a energia usada é desperdiçada em outras direções).



Para ilustrar a última desvantagem, cabe lembrar que as ampolas de radiação panorâmica precisam de um tempo de exposição cinco vezes maior que as ampolas de feixe direcionado. Em compensação, duas ou mais radiografias podem ser produzidas simultaneamente com a ampola colocada ao centro dos corpos de prova (vide adiante o exemplo da caneta e do pássaro).

4.2- Da Dureza -

No estudo sobre o poder de penetração do feixe com o uso do medidor Nortron, foram obtidas algumas informações sobre o decaimento da intensidade perante anteparos de um polímero (acrílico comercial) e de alumínio. O esquema usado foi o mostrado na figura 29, onde as condições e os resultados são mostrados na tabela 9.

Embora extremamente simplistas, os resultados acusam o primeiro indício do problema da dureza abaixo da esperada para as tensões usadas (a solução que criava o dispositivo

TABELA 9 - Efeito de atenuação de anteparos de acrílico e de alumínio para várias espessuras, contra feixes de algumas durezas e intensidades.

V (kV)	i (mA)	material	espes. (mm)	I ₀ (mR/h)	I (mR/h)	atenuação
36	2	acrílico	2	40	30	25 %
36	2	acrílico	10	40	30	25 %
36	2	alumínio	3	40	-	100 %
36	5	alumínio	0,8	200	70	65 %
36	5	alumínio	3	200	-	100 %
40	4	alumínio	3	200	-1	-100 %

mecânico de centelhamento ainda não havia sido concebida). O estudo só forneceu resultados conclusivos quanto à eficiência do funcionamento da ampola acoplada ao circuito RC, como intensidade do feixe em função do tipo de faísca (intermitente ou contínua), estabilidade do feixe em função do tempo, decaimento percentual de acordo com o tipo e a espessura da barreira para indicar a baixa dureza, etc.. Por isso, tão logo ficou evidenciada a possibilidade da boa sensibilização de filmes, esse estudo foi posto de lado em favor dos ensaios com radiografias.

4.3- Das Radiografias -

A primeira radiografia que apresentou um contraste aceitável é mostrada na fig. 30. Foi produzida sob uma tensão de 85 kV e 6 mA durante um minuto e meio e com o filme posto a 8 cm do vidro da ampola. O circuito RC foi usado pela primeira vez,

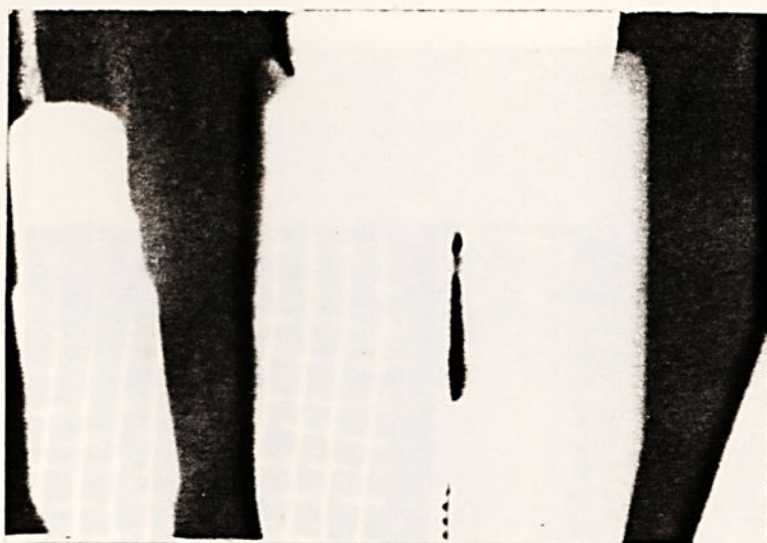


fig. 30 - Radiografia a 85 kV e 6 mA por 1,5 min, onde se pode ver o núcleo do engate (latão) envolto pela borracha sintética (canto esquerdo).

sendo que sua necessidade foi confirmada por uma tentativa anterior em que 200 descargas à mesma tensão geraram uma radiografia extremamente subesposta. Na radiografia da figura 30, pode-se distinguir parte de um alicate e duas conexões elétricas de latão, uma delas recoberta por borracha sintética (a de contorno largo e bem definido) e a outra recoberta de PVC rígido. Na ocasião, a baixa dureza não pode ser comprovada pois não havia nenhuma peça de alumínio que denunciasse a irregularidade. Quanto à resolução, a chapa demonstra que a melhoria da nitidez seria uma tarefa muito fácil, primeiro porque já se apresentava boa e segundo, porque o filme havia sido posto a apenas 8 cm da ampola (condição bastante desfavorável para a nitidez). A partir desta radiografia, foi tido como viável o trabalho com os penetrômetros.

A figura 31 mostra uma radiografia visando avaliar

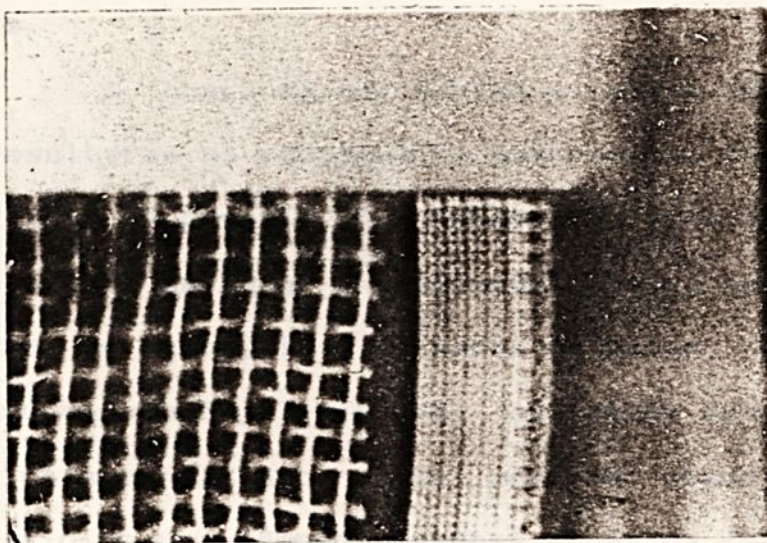


fig. 31 - Penetrômetro de alumínio (canto superior esquerdo), tela de 6 fios por cm, tela de 2,3 fios por mm e penetrômetro de acrílico (canto direito).

simultaneamente a dureza para o acrílico e para o alumínio, bem como o poder de resolução para duas telas metálicas, que sendo de espessura desprezível, definem o poder de resolução da ampola para corpos de prova espessos postos a grandes distâncias. Da radiografia, fica claro que a dureza era extremamente alta para o polímero e inaceitavelmente baixa para o alumínio. Devido ao fato de ter sido feita com 60 kV e 2 mA por 20 segundos, a radiografia mostrou-se subespota, de um lado por ter sido feita com uma exposição pouco intensa por poucos segundos, e de outro lado por sugerir que o vidro já venha começando a exercer um efeito de atenuação. A baixa dureza do feixe para o alumínio deu um indício mais forte de que um novo dispositivo que aumentasse a dureza da radiação deveria ser construído. O poder de resolução foi tomado como definitivamente aceitável (melhor que dois décimos de milímetro) e não foi mais levado em consideração nas radiografias posteriores.

A busca de uma dureza e intensidade adequadas ao alumínio resultaram na radiografia mostrada na figura 32, obtida com 100 kV a 10 mA durante 20 minutos. O filme ficou posto a 10 cm da ampola para melhorar a resolução. Na parte de cima vê-se o penetrômetro de alumínio e na parte de baixo, a broca de aço rápido. Embora não seja evidente, há também uma pequena bolinha de papel-alumínio amassado, o qual pode ser observado com clareza com o auxílio de uma lâmpada intensa atrás da chapa (encontra-se junto ao lado menos espesso do penetrômetro). Esta radiografia fornece um resultado conclusivo, porém desconcertante. A voltagem, corrente e o tempo de exposição usados são típicos para se





fig. 32 - Penetrômetro de alumínio com variação de contraste nos dois primeiros degraus (4 e 5 mm); a broca é de 2,8 mm e mostrou-se completamente opaca.

obter uma radiografia exatamente como a obtida acima, porém para o ferro (muito mais denso que o alumínio). Fica evidente que a dureza real é totalmente incompatível com a tensão indicada no voltímetro. Esta afirmação é confirmada pelo aspecto completamente opaco da pequena broca. Conclui-se que o resistor ligado em série com a ampola ainda estaria carregando o capacitor e mantendo uma d.d.p. entre os seus terminais no momento em que a nova centelha venha a ocorrer (obviamente a uma tensão abaixo daquela lida no voltímetro). Tal inconveniente só pode ser explicado pela hipótese da mudança da rigidez dielétrica do ar existente na região do centelhamento. Esta radiografia confirma a necessidade da construção do dispositivo mecânico de centelhamento.

Uma outra radiografia que confirma a necessidade da construção do centelhador mecânico é a mostrada na figura 33, obtida com 200 kV e 5 mA durante dois minutos. Deve ser lembrado



fig. 33 - Penetrômetros de ferro e cobre a 200 kV e 5 mA por dois minutos ; o contraste só foi detectado no degrau de 1 mm do penetrômetro de ferro.

que 200 kV a 10 mA.min são suficientes para atravessar cerca de dois centímetros de ferro. A radiografia mostra uma subexposição para apenas dois milímetros de ferro. Quanto ao cobre, o seu aspecto completamente opaco não contraria a interpretação acima. Na mesma ocasião ficou caracterizado que tensões acima de 150 kV provocavam panes no circuito RC devido ao rápido aquecimento do seu resistor.

Com o uso do centelhador mecânico, foram obtidas radiografias como a mostrada na figura 34. Esta apresenta importância especial porque foi obtida com a mesma voltagem usada na radiografia da figura 32. Quanto à intensidade e ao tempo de exposição, não se pode fazer comparações, pois esta foi obtida com doze horas contínuas de exposição e com cerca de 90 descargas por minuto, cuja corrente média não pode ser lida no painel de comandos. Após as doze horas de exposição, todo o sistema mostrava-se sem qualquer indício de sobreaquecimento. A

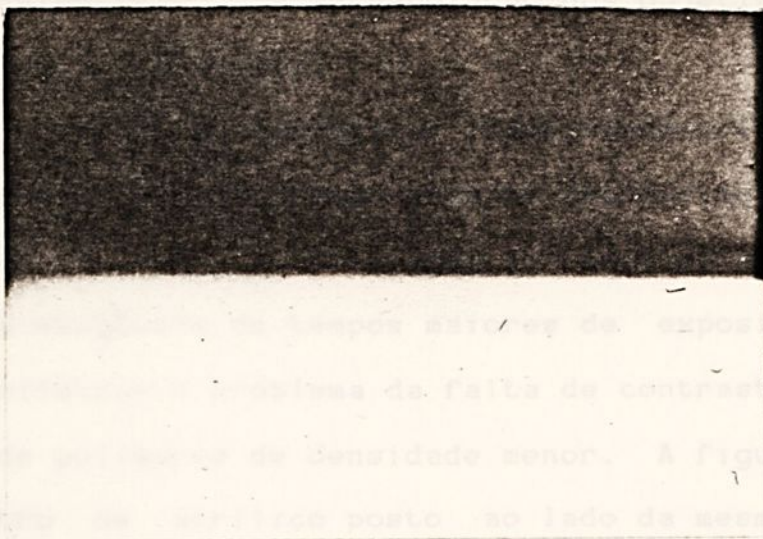


fig. 34 - Radiografia obtida com o centelhador mecânico a 100 kV; O penetrômetro de alumínio (canto de cima) apresentou a escala completa de contraste e o penetrômetro de ferro (abaixo) mostrou-se completamente opaco.

falta de nitidez da radiografia não gerou preocupação porque esta foi posta excessivamente próximo da ampola. A falta de dureza do feixe com respeito ao ferro ainda levantou duas últimas hipóteses:

- a) a existência da d.d.p. entre a fonte e o capacitor não fora totalmente eliminada e um voltímetro ligado ao capacitor é a única solução rápida para o problema;
- b) o filme usado é dentário (do tipo C) e, além de ser pouco sensível para esse uso, não contou com o auxílio das placas intensificadoras.

A primeira hipótese pode ser testada na primeira oportunidade que vier a surgir em futuro próximo. O mesmo acontece com a questão do filme e da placa intensificadora, que podem ser testadas após a sua simples aquisição. Ambas as hipóteses não foram verificadas por pura falta de condições financeiras e por

serem consideradas uma extrapolação dos objetivos inicialmente propostos para o trabalho.

Outras tentativas objetivando o limite inferior de dureza para a radiação esbarraram no decréscimo da intensidade do feixe devido ao poder de filtragem do vidro da ampola. O resultado foi a exigência de tempos maiores de exposição, não sendo possível eliminar o problema da falta de contraste para as radiografias de polímeros de densidade menor. A figura 35 mostra o penetrômetro de acrílico posto ao lado da mesma conexão recoberta por borracha sintética da primeira radiografia. A tensão

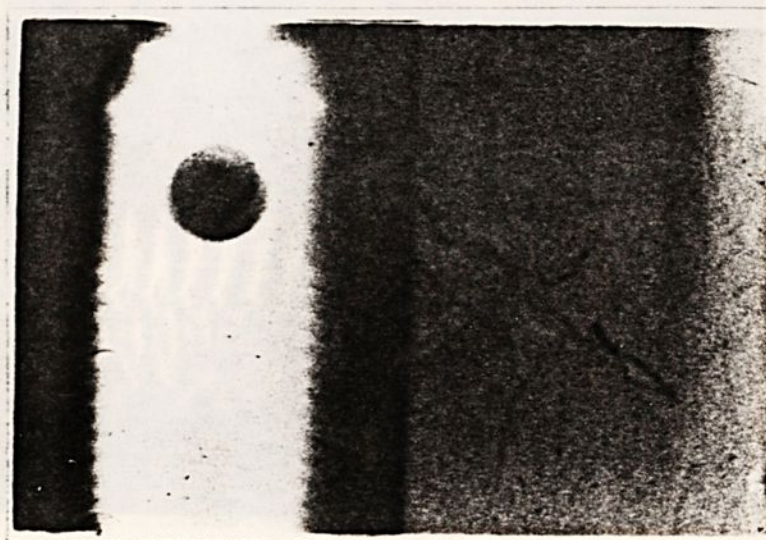


fig. 35 - Penetrômetro de acrílico (à direita) e o engate da fig. 30; o aspecto totalmente opaco da borracha sintética garante o limite inferior da dureza.

usada foi de 50 kV com uma hora de exposição comandada pelo centelhador mecânico. Esta chapa (e outras visando polímeros) poderia ter sido feita pelo processo de descargas seriadas e por tempos curtos de exposição (da ordem de um a dois minutos), i.é, dispensando o centelhador mecânico. A eliminação do centelhador não foi feita para que a tensão sobre a ampola tivesse seu valor

melhor determinado. Com base na diferença de contrastes entre os dois corpos de prova (pois são de densidades bastante diferentes) numa mesma radiografia, fica definitivamente provado que polímeros, materiais cerâmicos e outros materiais não metálicos podem ser radiografados pela ampola com alguma qualidade de contraste, sendo esta melhor para materiais mais densos e limitada para materiais menos densos.

Um exemplo que mostra materiais de baixa densidade radiografados simultaneamente numa mesma exposição é visto nas figuras 36 e 37, onde podem ser vistos parte de uma caneta (BIC

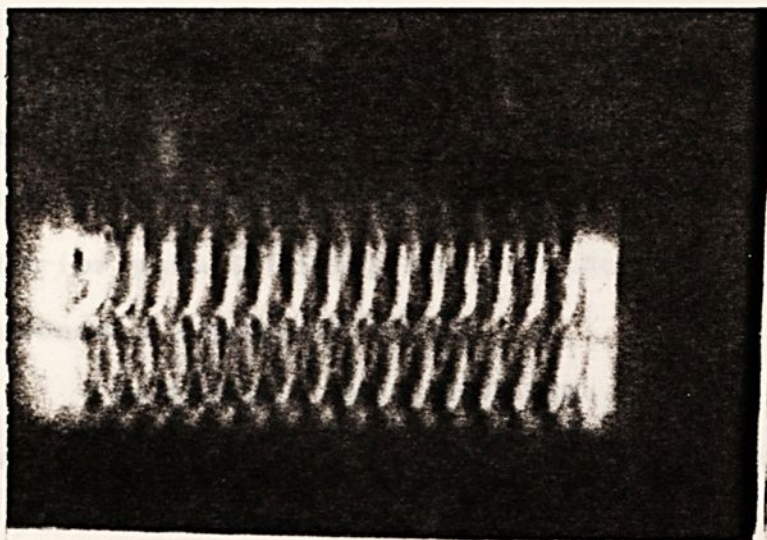


fig. 36 - Parte do corpo de uma caneta de plástico onde se pode ver as molas (quatro) que compõem o seu mecanismo interno; foi obtida com 50 kV.

de 4 cores) e a cabeça de um pequeno pássaro, respectivamente. Essas radiografias foram obtidas com uma tensão de 50 kV e confirmam o prejuízo do contraste provocado pela dureza acima do desejado, e pela pouca exposição devido à atenuação do vidro da ampola.



fig. 37 - Radiografia de um pequeno pássaro morto, obtida em exposição simultânea com a radiografia da fig. 36.

Radiografias com tensões abaixo de 50 kV ficaram totalmente subespostas devido à atenuação do vidro e não puderam ser aproveitadas. Assim fica definitivamente estabelecido um limite inferior para a dureza da radiação produzida pela ampola, que corresponde à tensão de 50 kV.

Em resumo, os resultados aqui apresentados permitem avaliar o protótipo quanto aos seus atuais limites superior e inferior para a dureza, sendo que o limite superior foi imposto pelo circuito elétrico, que pode ser melhorado. Os efeitos de exposição e contraste parecem ter ficado sob controle, podendo ser melhor obtidos através de ensaios mais cuidadosos, mas que extrapolam os objetivos mais imediatos do trabalho.

5 CONCLUSÕES

Como este trabalho foi desenvolvido em torno de questões ligadas à instrumentação, é oportuno que se faça uma crítica de confronto entre o que foi efetivamente feito e o que poderia (ou poderá) ser feito. Este raciocínio permite estruturar uma coleção de dados capazes de orientar futuros trabalhos de otimização e aperfeiçoamento do protótipo em pauta. Portanto, faz-se uma avaliação objetiva do trabalho quanto aos objetivos alcançados e não alcançados. Em seguida, faz-se uma apresentação das propostas que podem ser levadas a efeito oportunamente. Finalmente, é feita uma crítica sobre o espírito filosófico que norteou e definiu o projeto, a conduta e as decisões tomadas durante o desenvolvimento do trabalho.

5.1- Da avaliação -

Dando atenção especial à ampola, pois esta é o ponto central do trabalho, pode-se concluir que correspondeu plenamente às expectativas. Foi classificada como sendo de feixe panorâmico por ter sido usado um filamento comum de tungstênio como alvo. Seu feixe ficou prejudicado quanto à intensidade num fator 5, mas seu poder de resolução não deixou nada a desejar. Por ser de catodo frio, a avalanche de íons positivos que se precipitaram sobre o catodo produziram um efeito de "sputtering" que resultou na evaporação do metal e respectiva deposição na superfície interna do vidro. Esta é observada a olho nú, que se denuncia pelo espelhamento resultante. Seu inconveniente está na possibilidade de permitir correntes superficiais parasitas entre



os eletrodos e também torna a ampola opaca à própria radiação. Por isso, deve ser desmontada para remoção do material ou troca do vidro. A não adoção de dispositivos de refrigeração impediu que ela pudesse ser usada com correntes acima de 10 mA por períodos superiores a um minuto. Assim, exposições elevadas só podem ser feitas com a intercalação de períodos de operação com períodos de espera para resfriamento. O centelhador mecânico pode ser usado como forma de manter a ampola em temperatura baixa, visto que ele é o responsável pelo baixo valor da corrente média entre os eletrodos. O vidro usado impediu a produção de radiografias com tensões abaixo de 50 kV. O seu limite superior de dureza não ficou determinado porque a fonte de tensão apresentou panes acima de 200 kV. Uma pane que ocorreu com muita frequência na ampola foi a destruição do "o"-ring que veda a base do catodo devido a correntes de fuga do interior da ampola para a atmosfera. O inconveniente dessa pane está no fato de que com o aumento da pressão no interior da ampola, a radiação deixa de ser produzida sem que o operador se dê conta do problema. Este defeito é tardiamente denunciado, após a revelação do filme. Sua resistência mecânica à pressão atmosférica e ao manuseio superaram as expectativas e casos de quebra só ocorreram em situações de extremo sobreaquecimento e de maus tratos abusivos.

Em relação à fonte, o circuito RC resolveu plenamente o problema das exposições intensas em períodos curtos, colocando a ampola em condições de trabalhar em pé de igualdade com as ampolas comerciais. Por outro lado, o material empregado e as suas dimensões impediram que tensões acima de 100 kV fossem



usadas indiscriminadamente e que tensões acima de 200 kV fossem experimentadas sem a ocorrência de algum tipo de pane. Assim, o protótipo não pode ser usado com tensões tipicamente usadas em radiologia industrial de alta dureza, mesmo que a fonte de alta tensão possa atingir até 450 kV.

Em resumo pode-se dizer que o protótipo se presta para a produção de radiografias de polímeros, alumínio e de outros materiais com densidades próximas às desses materiais. Materiais mais densos como o ferro e o cobre só poderão ser radiografados após um dimensionamento mais adequado do circuito RC e do centelhador mecânico.

5.2- Das propostas -

O protótipo aqui apresentado foi construído e ensaiado unicamente com as condições locais de trabalho e com um mínimo de dispêndio financeiro. Trabalhos de aperfeiçoamento e de otimização não foram realizados porque implicariam em grande dispêndio de tempo e dinheiro para gerar resultados previsíveis e que apenas reafirmariam a grande parte dos resultados já obtidos. Além disso, as radiografias já obtidas podiam ser melhoradas unicamente com a repetição das exposições sob condições melhor controladas. Os mesmos resultados indicam uma série de opções que podem ser adotadas para que o protótipo otimize o seu desempenho:

a) construção de um circuito RC e de um centelhador com todas as suas dimensões triplicadas e com dispositivos de refrigeração que permitam trabalhos com tensões de até 450 kV sem a ocorrência de panes;



- b) construção de ampolas com dimensões um pouco maiores para evitar o salto de faíscas externas durante o uso com tensões em torno de 450 kV; uma alternativa é a sua imersão em óleo isolante;
- c) adoção de um catodo com alto ponto de fusão para eliminar o efeito de "sputtering" e consequente espelhamento do vidro; a adoção do catodo quente é desrecomendada pelo simples fato de sua confecção exigir tecnologias de alto vácuo e de vidraria cuja implantação envolve custos muito elevados, enquanto a ampola de catodo frio pode ser adotada com extrema simplicidade e com poucas desvantagens;
- d) revestimento com materiais vítreos de todas as superfícies metálicas internas (exceto o alvo e a região central do colimador) para minimizar o fluxo de elétrons para pontos que não sejam o próprio alvo (foram detectados pontos de geração de raios-X junto à base do porta-alvos);
- e) construção de uma "capela" em uma edificação exclusiva para experimentos que envolvam radiação de alta dureza;
- f) estudos do desempenho da ampola para várias tensões, pressões internas (de 10^{-2} a 10^{-5} mmHg) e tipos de gases, bem como para medidas de coeficientes de atenuação de vários materiais;
- g) aquisição de todo o material que deixou de ser usado por motivos econômicos, com tungstênio em placa para alvo, filmes do grupo D, placas intensificadoras, sistema de vácuo para 10^{-5} mmHg, vidro transparente aos raios-X moles, etc.
- h) construção de uma fonte potente de pequenas dimensões para a realização de trabalhos em campo aberto;



- i) confecção de "ábacos" similares aos distribuídos pelas instituições comerciais, para uso com ampolas de descarga capacitiva (panorâmica e direcional);
- j) realização de trabalhos de aplicação para efeito de divulgação científica.

Caso seja decidida a aplicação de recursos financeiros suficientes, será viável a realização da grande maioria das propostas acima descritas, propiciando um apreciável volume de trabalho com resultados promissores.

5.3- Comentários finais -

Em linhas gerais, o trabalho realizado caracterizou-se por uma "tecnologia de artesanato" que evitou buscar materiais e equipamentos caros de outras instituições (exceto o medidor Pirani), mantendo uma postura de autonomia e de minimização de gastos. Com isso, decisões radicais como o uso de filmes dentários, filamentos comuns atuando como alvo e a supressão de placas intensificadoras são justificadas, mesmo que estes fossem de caráter extremamente crítico para o sucesso do trabalho.

Em várias radiografias, é patente o sacrifício da nitidez em favor da densidade e vice-versa. O mesmo ocorreu com a dureza e o contraste, resultando na falta de chapas que reunissem todas as qualidades simultaneamente. Tal resultado se justifica pelo objetivo de se avaliar a qualidade das mesmas segundo parâmetros que deviam ser evidenciados. A obtenção de radiografias com "qualidade de competição" frente às "concorrentes comerciais" não constituíram objetivo desse trabalho e ficou adiada para



trabalhos posteriores.

Com relação à tensão máxima utilizada, a restrição de se obter bons resultados somente com tensões abaixo de 200 kV se deve somente a questões de limitação econômica, de proteção radiológica, e principalmente à falta de sistemas de refrigeração (ampola e parte elétrica). Por outro lado, as condições em que o protótipo se encontra já permitem o seu uso imediato para a realização de pesquisas ou ensaios com materiais com densidade igual ou menor que a do alumínio, como ligas leves, polímeros, cerâmicas, materiais orgânicos e fibrosos, etc.

(5) V. P. Schall, Zeitschrift für angewandte Physik II Band, pg. 83 (1950).

(6) V. P. Schall, Zeitschrift für angewandte Physik, V Band, pg. 495 (1953).

(7) V. P. Schall and R. L. Hermann, Zeitschrift für angewandte Physik, VI Band, pg. 29 (1954).

(8) V. P. Schall, Zeitschrift für angewandte Physik, VIII Band, pg. 495 (1956).

(9) A. H. J. van der Ziel, North Holland and Co. Amsterdam, 1958.

(10) A. H. J. van der Ziel, pg. 45, Iris (1955).

(11) A. H. J. van der Ziel, pg. 45, Iris (1955).

(12) Eduardo de Almeida, pg. 6, Fundacentro (1979).

- [1] H. Semat em Introduction to Atomic and Nuclear Physics, pg. 121, Hinehart & Company (1955).
- [2] Yavorky and A. Detlaf em Handbook of Physics, pg.946, MIR (1975).
- [3] C. M. Slack and L. F. Ehrke, Journal of Applied Phisycs vol.12, pg. 165 (feb. 1941).
- [4] V. W. Schaaffs, Zeitschrift für angewandte Physik I Band, pg. 462 (1949).
- [5] V. R. Schall, Zeitschrift für angewandte Physik II Band, pg.83 (1950).
- [6] V. E. Fünfer, Zeitschrift für angewandte Physik, V Band, pg.426 (1953).
- [7] V. W. Schaaffs und K.-H. Herrmann, Zeitschrift für angewandte Physik, VI Band, pg. 23 (1954).
- [8] V. W Schaaff, Zeitschrift für angewandte Physic, VIII Band, pg. 299 (1956).
- [9] A. Roth em Vacuum Tecnology, pg.3, North Holland and Publishing Co. (1979).
- [10] R. Viebic, Formulário Fotográfico, pg. 45, Iris (1975).
- [11] A. H. Wuehrmann e L. R. Manson-Hing em Radiografia Dentária, pg. 22, Guanabara Koogan (1977).
- [12] Eduardo Giampaoli em Radiações, pg. 6, Fundacentro (1979).



