

IEA-INF-8



GAMAGRAFIA

WLADIMYR SANCHEZ e AZOR CAMARGO PENTEADO FILHO



INFORMAÇÕES IEA N.º

8

Junho — 1967

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SÃO PAULO — BRASIL

G A M A G R A F I A

Wladimyr Sanchez e Azor Camargo Penteadó Filho

DIVISÃO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE REATORES
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil

Informações nº 8
Junho - 1967

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof. Uriel da Costa Ribeiro

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof. Dr. Luis Antonio da Gama e Silva

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

Prof. Dr. José Moura Gonçalves	}	pela USP
Prof. Dr. José Augusto Martins		
Prof. Dr. Rui Ribeiro Franco	}	pela CNEN
Prof. Dr. Theodoro H. I. de Arruda Souto		

Divisões Didático-Científicas

Divisão de Física Nuclear -

Chefe: Prof. Dr. Marcello D. S. Santos

Divisão de Radioquímica -

Chefe: Prof. Dr. Fausto Walter de Lima

Divisão de Radiobiologia -

Chefe: Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Divisão de Metalurgia Nuclear -

Chefe: Prof. Dr. Tharcísio D. S. Santos

Divisão de Engenharia Química -

Chefe: Lic. Alcídio Abrão

Divisão de Engenharia Nuclear -

Chefe: Eng^o Pedro Bento de Camargo

Divisão de Operação e Manutenção de Reatores -

Chefe: Eng^o Azor Camargo Penteado Filho

Divisão de Física de Reatores -

Chefe: Prof. Paulo Saraiva de Toledo

Divisão de Ensino e Formação -

G A M A G R A F I A

Wladimir Sanchez e Azor Camargo Penteado Filho

RESUMO

A técnica de gamagrafia na indústria, além de tornar possível a rejeição de materiais seriamente defeituosos, contribui, também, para o aperfeiçoamento da fabricação dos mesmos. Na indústria a gamagrafia encontra aplicação muito grande em soldas, materiais fundidos e forjados. No laboratório ela também é importante na inspeção não destrutiva de materiais delicados e na análise de conjuntos lacrados. Visto que tanto os raios-X quanto os raios γ podem preencher essa finalidade, uma escolha entre essas duas fontes de radiação deve ser feita. Na realidade não existe uma competição entre os raios-X e os raios γ em testes não destrutivos porque ambos os métodos se complementam. As vantagens e desvantagens técnicas e econômicas de ambos os métodos são discutidas. Em soldas e fundições o Ir-192 .. apresenta grande qualidade de imagem para espessuras de 6 a 50 mm de ferro. Para materiais leves e de pequena espessura utiliza-se o Tm-170 e Yb-169. Para peças de ferro ou aço de espessura acima de 50 mm os defeitos devem ser localizados por meio da radiação dura do Co-60. Para a obtenção de gamagrafias de boa qualidade discutem-se as seguintes técnicas: escolha do filme e fonte radioativa, tempo de exposição, radiação espalhada, distância fonte-filme e efeitos intensificadores. A sensibilidade relativa do método, expressa em porcentagens da espessura total do material ensaiado, é indicada pelos IQI.

RESUME

La gammagraphie appliquée à l'industrie permet d'une part de rebuter des pièces defectueuses mais aussi d'autre part perfectionner leur fabrication. Dans l'industrie la gammagraphie rencontre de multiples applications en soudures, fonderie, forgeage. Au laboratoire la gammagraphie est importante pour les tests non destructifs de matériaux délicats et

analyse d'ensemble non demontable. Etant donné que les rayons X comme les rayons gamma peuvent détecter ces défauts un choix entre ces deux sources de rayonnement doit être fait. Dans la réalité il n'y a pas compétition entre les deux méthodes car elles se complètent. Les avantages et desavantages techniques et économiques sont discutés. Pour les soudures et la fonderie l'Ir 192 donne une très bonne qualité d'image pour des épaisseurs de 6 à 50 mm de fer. Pour des matériaux légers on utilise le Tm 170 et Yb 169. Pour les matériaux d'épaisseur supérieure à 50 mm les défauts sont analysés avec les radiations dures du Co-60. Afin d'obtenir des gammagraphies de bonne qualité on discute les techniques suivantes: choix du film et de la source, temps d'exposition, radiation diffusée, distance source film, effets intensificateurs. La sensibilité relative de la méthode exprimée en pourcentage de l'épaisseur totale du matériaux essayé est indiqué par les IQI.

ABSTRACT

Gamma-radiography in industry makes possible the rejection of seriously defective materials and contributes to the improvement their manufacture. In industry gammagraphy finds a great use in the inspection of welds, cast and rivetted materials. It is also important in the laboratory for nondestructive testing of fragile articles and sealed assemblies. Since both X-rays and gamma-rays can fulfill this purpose, a choice has to be made between these radiation sources. There is no competition between X-ray and gamma-ray in nondestructive testing because both methods complement each other. The technical and economical advantages and disadvantages of both methods are discussed. In welds and cast the Ir-192 has extremely good irradiation qualities for sheets from 6 to 50 mm thick of iron. For lighter materials Tm-170 and Yb-169 can be used. For iron thickness greater than 50 mm the defects must be located with hard gamma-ray of Co-60. For obtaining good pictures the following techniques are discussed: the proper selection of photographic films and choice of the correct radiation source, exposure time, prevention of secondary radiation by reflected gamma-rays, the correct distance between the radiation source and film and the intensifying effect of screens. Radiographic relative sensivity is expressed in percentages of the total thickness of the object examined is shown by IQI.

UTILIZAÇÃO, VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA GAMAGRAFIA

Radiografia ou processo radiográfico é um método de ensaio não destrutivo que usa a propriedade de penetração da radiação para examinar o interior de materiais e conjuntos lacrados quando não fôr possível uma inspeção visual.

Os dois tipos principais de radiação usados nesses processos são os raios-X e os raios gama.

No processo de inspeção radiográfica a radiação penetrante (raio-X ou raio gama) interage com os átomos do material submetido a ensaio. Uma pequena parte dessa radiação é absorvida, outra espalhada e o restante, atravessando êsse material, deixará impressa sua estrutura num filme radiográfico usado como detetor.

Em ambos os processos (raios-X ou raios gama) pode-se radiografar desde finas fôlhas de vegetais até, aproximadamente, 20 cm de aço.

A variedade de objetos a ser ensaiada e as condições nas quais êsse ensaio pode ser feito determinam, na maioria das vezes, a escolha entre um processo e outro. Em geral essa escolha é feita levando-se em conta uma série de fatores tais como:

- a) densidade do material - desde materiais orgânicos até urânio ou irídio;
- b) espessura do material - desde finas fôlhas de alumínio até cerca de 20 cm de aço ou mais de um metro de concreto armado;
- c) tempo para o trabalho - se fôr produção em série ou processo mais lento;
- d) acesso ao material a ser radiografado - se o objeto pode vir até a fonte radiográfica ou se a fonte

deve ir ao objeto;

- e) forma geométrica do objeto que será ensaiado;
- f) vantagens de um processo sobre o outro - economia, facilidade de manuseio e operação, versatilidade, etc.

As análises da espessura e da densidade do material de terminam a energia da radiação ou a tensão da máquina de raio-X ne cessária para a inspeção radiográfica.

A tabela abaixo mostra no caso do uso de raio-X as ten sões convenientes em função da espessura de determinados materiais.

Tensão (kV)	Alumínio	Aço	Bronze
50	1,2 a 2,5 cm		
140	2,5 a 7,6 cm	2,0 a 2,5 cm	1,2 a 2,5 cm
200	7,6 a 12,5 cm	2,5 a 7,6 cm	2,0 a 3,0 cm
260		5,0 a 9,0 cm	2,5 a 5,0 cm
300		5,0 a 12,5 cm	5,0 a 10,0 cm
1000		10,1 a 20,3 cm	7,6 a 12,5 cm
2000		12,5 a 25,0 cm	
20000			

Uma vez que os raios gama, emitidos pelos radioisótopos, são física e radiograficamente equivalentes aos raios-X, pode-se efetuar uma comparação entre os dois processos, conforme a tabela:

Isótopo	Energia dos raios gama	Equivalência com raio-X
COBALTO-60	1.17 MeV 1.33 MeV	2.000 kV
IRÍDIO-192	0,3 até 0,6 MeV	400 kV
TÚLIO-170	0,084 MeV	100 kV

O Cobalto-60 tem uma meia-vida de 5,3 anos. Radiograficamente significa que se pode dispôr das fontes por longo tempo sem a preocupação de substituí-las por perda de efetividade.

O Irídio-192 tem meia-vida de 75 dias. Costuma-se substituir as fontes, dependendo naturalmente das atividades iniciais, 2 ou 3 vêzes por ano para que os tempos de exposição não se tornem longos devido ao decaimento radioativo.

O Túlio-170 apresenta uma meia-vida de 127 dias. A substituição da fonte é praticamente idêntica a do Irídio.

Face ao decaimento radioativo as fontes perdem gradativamente sua eficiência. A reativação das fontes de Co-60, Ir-192, etc., no reator, restituirá a sua efetividade. Fontes de produtos de fissão como, por exemplo, o Cs-137, não são passíveis de reativação em reatores. Com isótopos de meia-vida curta é conveniente que exista sempre uma ou duas fontes de reserva, ativadas no reator, para as convenientes substituições.

As máquinas de raio-X evidentemente não apresentam problemas de decaimento radioativo porque podem manter sempre um feixe de intensidade aproximadamente constante.

A quantidade de radiação apresentada em qualquer fonte é indicada pela unidade chamada "Curie". Quando afirmamos que uma fonte possui uma atividade de 1 Curie isto quer dizer que ela está decaindo em ritmo de 37 bilhões de desintegrações por segundo. Entretanto, isto não indica ao técnico a quantidade de radiação necessária para se obter uma boa gamagrafia. Considerando-se as energias envolvidas em cada desintegração obtem-se a dose que pode ser expressa em "röntgen". Essa unidade é utilizada na prática de gamagrafia e em proteção radiológica.

A "dose-rate" representa a dose na unidade de tempo, por exemplo, röntgen por segundo ou röntgen por hora. A um metro de distância 1 Curie de Co-60 fornece 1.35 röntgen por hora (1,35

rhm). Nas mesmas condições uma fonte de Irídio-192 fornece 0.55 röntgen por hora e uma fonte de Tulio-170 fornece 0.0025 röntgen por hora.

Para radiografar é necessário fazer-se a escolha do método a ser utilizado, conhecendo-se quais as vantagens e desvantagens de um processo sobre o outro. Para tanto apresentamos um confronto entre os dois métodos, isto é, raio-X e raio gama.

1. Pode-se ajustar convenientemente a tensão e portanto a energia da radiação da máquina de raio-X, tornando-a útil para radiografar uma variedade de materiais, pois de acordo com suas características obtem-se uma energia ótima. Cada isótopo ao contrário, durante todo o tempo, sua radiação de energia característica não apresenta mudanças no poder de penetração.

2. As máquinas de raio-X e as fontes radioativas apresentam problemas de proteção radiológica. O cumprimento fiel das normas de proteção radiológica reduz grandemente as possibilidades de acidentes nos dois processos. A máquina de raio-X, apenas quando em funcionamento, apresenta problemas desta ordem, ao passo que a fonte radioativa emitindo continuamente necessitará permanecer em sua blindagem durante todo o tempo em que não estiver sendo utilizada.

3. Não é necessário qualquer fonte elétrica para a obtenção de radiografias com radioisótopos; isto possibilita a obtenção de gamagrafias em locais desprovidos de energia elétrica.

4. As máquinas de raio-X produzem radiação mais intensa, possibilitando tempos de exposição menores do que com o uso dos radioisótopos. O emprego de fonte de alta atividade tem tornado mínima esta diferença, mas existem aplicações em que somente a rapidez da máquina de raio-X torna o trabalho conveniente. O problema pode ser amenizado levando-se em consideração

que uma fonte radioativa emite radiação isotropicamente. Com isso expõe-se várias peças ao mesmo tempo colocando-as em círculo ao redor da fonte.

5. É mais fácil controlar a exposição com o uso de radioisótopo do que com máquina de raio-X. Com a fonte radioativa o operador preocupa-se somente com o tempo de exposição e no caso da máquina de raio-X o operador terá que verificar a tensão, corrente elétrica, linhas de compensação, tempo de exposição, etc.

6. Quanto ao aspecto de manutenção os radioisótopos apresentam vantagem sobre as máquinas de raio-X. As fontes radioativas não implicam despesas com a queima de tubos de raio-X, transformadores de alta tensão, controladores de tempo, etc.

7. Simplicidade de aparelhagem é outro fator de vantagem para os radioisótopos. As máquinas de raio-X são usualmente complexas. Uma fonte radioativa necessita apenas de uma blindagem de chumbo para o seu armazenamento. Se esta blindagem for colocada sobre rodas, a fonte poderá facilmente ser transportada para qualquer parte.

8. Há maior facilidade na colocação de uma fonte radioativa em locais de difícil acesso. Devido a seu pequeno tamanho, uma fonte radioativa pode ser facilmente levada aos materiais que serão ensaiados. Por sua vez, devido a sua complexidade, a máquina de raio-X exige, na maioria das vezes, que os materiais sejam levados a ela. A pequena dimensão da fonte facilita a obtenção de gamagrafias de peças de formas geométricas complexas.

9. Quanto ao investimento inicial, considerando-se que para cada caso de aplicação uma comparação específica deve ser efetuada, pode-se afirmar que as fontes radioativas e equipamentos auxiliares (blindagem e irradiadores) são bem mais baratas em relação aos aparelhos de raio-X.

Conclui-se, então, que a gamagrafia pode ser empregada em tôdas as atividades industriais onde se emprega os raios-X para radiografia. E ainda mais, pode ser empregada em lugares e condições não acessíveis a êste.

No caso das fontes produzidas pelo I.E.A. a limitação principal relaciona-se com a atividade máxima a ser atingida pelas mesmas, devido ao ritmo de operação atual (1967) do reator que fornece um fluxo integrado de, aproximadamente, $9.10^{17} \text{ g}_{\text{th}} \cdot \text{t}$ por semana, disponível para a ativação. No entanto, prevê-se para 1968 que êsse valor seja consideravelmente aumentado.

TÉCNICAS DAS EXPOSIÇÕES DE GAMAGRAFIA

O principal problema de ordem prática para conseguir-se gamagrafia de boa qualidade é correlacionar convenientemente os seguintes fatores: a) natureza e intensidade da fonte radioativa, b) características dos materiais a serem gamagrafados, c) disposição dos materiais no sistema de exposição, d) seleção do filme radiográfico e e) técnicas de exposição e revelação dos filmes.

As fontes para gamagrafia podem ser obtidas por irradiação em reator (fontes radioativas artificiais) ou através de elementos que são radioativos em seu estado natural como, por exemplo, o rádio. Numerosos tipos de fontes artificiais podem ser obtidos. A eficiência destas fontes em ensaios não destrutivos depende de alguns fatores tais como intensidade da radiação, atividade específica, energia média das desintegrações, meia vida do emissor radioativo. O uso de uma fonte de pequena dimensão proporciona maior qualidade radiográfica.

A radiação emitida pela fonte deve ter um poder de penetração apropriado para o objeto a ser ensaiado. A energia dos raios gama é escolhida de acordo com a espessura e densidade do corpo de prova. A meia vida é importante por determinar o tempo du

Conclui-se, então, que a gamagrafia pode ser empregada em tôdas as atividades industriais onde se emprega os raios-X para radiografia. E ainda mais, pode ser empregada em lugares e condições não acessíveis a êste.

No caso das fontes produzidas pelo I.E.A. a limitação principal relaciona-se com a atividade máxima a ser atingida pelas mesmas, devido ao ritmo de operação atual (1967) do reator que fornece um fluxo integrado de, aproximadamente, $9.10^{17} \text{ g}_{\text{th}} \cdot \text{t}$ por semana, disponível para a ativação. No entanto, prevê-se para 1968 que êsse valor seja consideravelmente aumentado.

TÉCNICAS DAS EXPOSIÇÕES DE GAMAGRAFIA

O principal problema de ordem prática para conseguir-se gamagrafia de boa qualidade é correlacionar convenientemente os seguintes fatores: a) natureza e intensidade da fonte radioativa, b) características dos materiais a serem gamagrafados, c) disposição dos materiais no sistema de exposição, d) seleção do filme radiográfico e e) técnicas de exposição e revelação dos filmes.

As fontes para gamagrafia podem ser obtidas por irradiação em reator (fontes radioativas artificiais) ou através de elementos que são radioativos em seu estado natural como, por exemplo, o rádio. Numerosos tipos de fontes artificiais podem ser obtidos. A eficiência destas fontes em ensaios não destrutivos depende de alguns fatores tais como intensidade da radiação, atividade específica, energia média das desintegrações, meia vida do emissor radioativo. O uso de uma fonte de pequena dimensão proporciona maior qualidade radiográfica.

A radiação emitida pela fonte deve ter um poder de penetração apropriado para o objeto a ser ensaiado. A energia dos raios gama é escolhida de acordo com a espessura e densidade do corpo de prova. A meia vida é importante por determinar o tempo du

rante o qual poderá a fonte permanecer em uso.

As fontes radioativas produzidas no IEAR-1 são até o momento de Cobalto-60, Irídio-192, Túlio-170, Európio-152/154, Lutécio-177, Ytérbio-169 e fontes mistas de Cobalto-60 e Európio-152/154.

A radiação gama é de natureza eletromagnética, resulta da transição entre os níveis energéticos dos núcleos dos átomos e geralmente acompanha a emissão de partículas beta e alfa dos materiais radioativos. Sua natureza é semelhante a do raio-X, lembrando-se entretanto que este último resulta de transições entre os níveis energéticos dos elétrons orbitais.

Os raios gama são absorvidos ao atravessarem o material em ensaio, decaindo em intensidade segundo a equação:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

I = intensidade dos raios gama após atravessar uma espessura x de material;

I_0 = intensidade dos raios gama, sem a presença do material;

μ = coeficiente de absorção linear do material de espessura x atravessado pela radiação.

O decréscimo de intensidade deve-se aos efeitos: fotoelétrico, Compton e "formação de pares positron-eletron".

A predominância de um efeito sobre o outro depende do número atômico do corpo de prova e da energia dos raios gama usados.

Com a finalidade de atenuar as distorções, os elementos

do sistema de exposição (fonte, filme e corpo de prova) devem ser arranjados de maneira a se adquirir uma projeção central, isto é, a fonte deverá estar na perpendicular traçada a partir do meio do material a ser radiografado.

A distância fonte-filme e o problema das projeções são fatores importantes na interpretação radiográfica. Quando a distância fonte-filme for pequena a imagem projetada no filme será distorcida. Aumentando-se esta distância e utilizando-se uma fonte de menor dimensão possível, a fim de considerá-la pontual, as projeções obtidas no filme radiográfico aproximam-se dos valores reais do objeto. A fig. 1 mostra a distorção da imagem de uma válvula devido à variação da distância fonte-filme.

Uma vez conhecidas as dimensões da fonte radioativa será feita a escolha conveniente da distância fonte-filme, através do critério do "bom senso". Uma distância fonte-filme muito grande, reduzirá o efeito de penumbra nos bordos dos materiais mas poderá aumentar consideravelmente o tempo de exposição, conforme a lei do inverso do quadrado da distância fonte-filme. Um compromisso entre esses dois fatores opostos deverá ser levado em conta.

Na prática é impossível a fabricação de filmes radiográficos em que a emulsão fique completamente homogênea, isto é, sem agregados de grãos. Mesmo com exposições uniformes haverá sempre regiões mais ou menos impressionadas. Por este motivo defeitos que acarretam pequenas diferenças em densidade radiográfica (enegrecimento do filme), não poderão ser convenientemente analisados mesmo com auxílio de bom negatoscópio.

Neste caso reduzindo-se a distância fonte-filme e afastando-se convenientemente o filme do objeto é possível, por meio de projeção, aumentar a reprodução do defeito. Entretanto, isto ocasionará empobrecimento da imagem radiográfica.

Para gamagrafia de objetos com grandes diferenças de espessura, uma boa técnica é o emprêgo de dois filmes superpostos

com velocidades diferentes. Um filme rápido deteta as falhas da parte mais espessa enquanto que o filme lento encarrega-se da parte mais fina.

A grande variedade de condições e a heterogeneidade de materiais encontrados em radiografias industriais, levaram os fabricantes à produção de várias espécies de filmes.

Em cada aplicação de gamagrafia industrial deve-se fazer uma série de considerações para a melhoria da qualidade fotográfica. Essas considerações incluem a análise dos seguintes fatores:

1. composição, forma e dimensão do objeto que é submetido a ensaio;
2. energia da radiação usada;
3. tipo de informação desejada, isto é, uma inspeção superficial ou um exame pormenorizado de algumas partes importantes;
4. contraste, tempo de exposição e densidade radiográfica.

A curva característica de um filme mostra a relação entre a exposição aplicada, a emulsão fotográfica e o resultante enegrecimento da chapa. A medida quantitativa do enegrecimento do filme é chamada densidade radiográfica.

A forma da curva característica é afetada muito pouco quando são usados raios-X ou raios gama. Entretanto a sensibilidade do filme, em termos da dose requerida para produzir uma dada densidade, é fortemente afetada pela energia da radiação.

É aconselhável consultar os fabricantes de filmes sobre as curvas características de seus produtos toda vez que surgir o problema da escolha de filme, pois elas informam sobre contraste, velocidade e tempo de exposição.

O cálculo do tempo de exposição do filme à ação da radiação é bastante simplificado com o uso de gráficos de exposição.

Em nossas experiências o material tomado como padrão foi o ferro (densidade $7,87 \text{ gramas/cm}^3$) para a radiação gama do Cobalto-60 e Irídio-192. O alumínio (densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$) foi tomado como padrão para a radiação gama mole do Túlio-170 e Ytérbio-169.

Para cada espessura do padrão, uma série de exposições foi feita e os resultados analisados em um densitômetro fotoelétrico ANSCO.

Dois tipos de exposições foram realizados:

1. Exposições diferentes foram conseguidas retirando-se o filme em tempos diferentes para uma mesma espessura do material;
2. Os filmes eram removidos ao mesmo tempo mas sobre cada filme existia uma espessura diferente do material.

Foi obtida a mesma densidade radiográfica para o mesmo fator de exposição comprovando os dois métodos.

Os gráficos de exposição são apresentados de duas maneiras diferentes, mas ambos têm a mesma finalidade. É conveniente lembrar que estes gráficos somente são eficientes quando são reproduzidas as condições referentes à natureza da fonte, tipo de filme, espessura e natureza da tela intensificadora e mesmas condições de revelação. O não cumprimento dessas especificações dará ao técnico em gamagrafia a impressão de que o método de ensaio é deficiente.

Um tipo de gráfico é o que relaciona a espessura do material padrão com a exposição dada em curies x horas para uma distância fonte-filme fixa. Essa distância em nossas experiências

foi fixada em 36 polegadas.

Vejam^{os} um exemplo de utilização d^{esses} gr^{áficos} de ex^{posição}: uma solda de t^{ôpo} realizada entre duas chapas de ferro, de densidade $7,87 \text{ g/cm}^3$ necessita ser ensaiada pela t^{écnica} da gama^{grafia}. Disp^{õe-se} para isto de uma fonte de 20 curies de Ir-192 e deseja-se conhecer todos os elementos b^{ásicos} para a gama^{grafia} da mesma. A espessura real a ser atravessada pelos raios gama é de meia polegada (espessura da chapa mais o ref^{ôrço} da solda). Qual ser^á o tempo de exposiç^{ão} de forma a ser obtida uma densidade de 1,5 na regi^{ão} da solda?

O gr^{áfico} 2 mostra que para a espessura de 1/2 polegada de ferro, a exposiç^{ão} é de 3,4 curies x hora para obter densidade de 1,5. O tempo ser^á ent^{ão}:

$$t = \frac{3,4 \text{ curies x hora}}{20 \text{ curies}} = 0,17 \text{ horas} \sim 10 \text{ minutos}$$

No caso de necessidade de uma reduç^{ão} da dist^{ância} fonte-filme em virtude de espaç^o insuficiente ou de reduç^{ão} no tempo de exposiç^{ão}, calcula-se as novas exposiç^{ões} por meio da lei do in^{verso} do quadrado da dist^{ância}. Essa lei indica que o tempo requerido para uma dada gama^{grafia} é proporcional ao quadrado da dist^{ância} fonte-filme.

Para a pr^{ática} de gama^{grafia} torna-se indispens^{ável} o conhecimento de outras leis f^{ísicas}, tais como:

1. a intensidade de uma fonte radioativa para uma dada exposiç^{ão} é inversamente proporcional ao tempo de ex^{posição}. De outra maneira, pode-se dizer que, para uma s^{érie} de condiç^{ões} o produto da intensidade da fonte pelo tempo de exposiç^{ão} deve ser constante pa^{ra} se obter o mesmo efeito fotogr^{áfico}.
2. a intensidade de uma fonte radioativa para uma dada

exposição é diretamente proporcional ao quadrado da distância fonte-filme.

As curvas características dos filmes usados nas experiências são mostradas na fig. 4 (ref. 8). A inclinação da curva característica é alterada ao longo da extensão da mesma sendo o contraste do filme maior onde maior é a sua inclinação. A parte da curva utilizada em gamagrafia industrial é a que tem a forma aproximadamente retilínea, geralmente compreendida entre as densidades 0,7 e 2,0 (onde são melhor utilizados os negatoscópios).

Com um gráfico de exposição para um determinado filme, podemos, através das curvas características, adaptá-lo para qualquer tipo de filme. O exemplo, a seguir, indica uma das utilizações das curvas características.

O filme tipo M tem contraste maior que o filme tipo AA na densidade 1,5 e além disso tem grão mais fino. Suponhamos que devido a essas razões deseja-se fazer a gamagrafia com um filme M com densidade 1,5 e na mesma região da peça anterior. Vemos pelas curvas características que:

log da exposição, para densidade 1,5 sobre o filme AA é 1,76

log da exposição, para densidade 1,5 sobre o filme M é 2,40

Diferença entre os logaritmos é 0,64

Número correspondente a essa diferença de logaritmos é 4,37

O tempo de exposição para densidade 1,5 sobre o filme AA deverá ser multiplicado por 4,37 para se obter densidade 1,5 sobre o filme M.

Outro tipo de gráfico de exposição, relaciona a espessura do padrão com o fator de exposição. Numéricamente o fator de exposição é dado por:

$$Fe = \frac{A \times t}{d^2}$$

Fe = fator de exposição

A = atividade da fonte em milicuries

t = tempo de exposição em minutos

d = distância fonte-filme em cm

Um exemplo ilustrativo mostrará a utilidade de tal tipo de gráfico. Suponhamos que se deseja uma gamagrafia de uma solda de t \hat{o} po, realizada entre duas chapas de ferro de espessura ... 1 1/2 polegadas (espessura da chapa mais o ref \hat{o} rço da solda) com uma densidade radiográfica de 1,5. Para \hat{e} ste ensaio disp \hat{o} e-se de uma fonte de Co-60 de atividade 10 curies, um filme Kodak tipo M, um par de telas intensificadores de chumbo, de espessura 0,01 de polegada.

Pelo gráfico de exposição (figura 5) vemos que para 1 1/2 polegada de ferro, devemos ter um fator de exposição igual a 62. Desta maneira

$$62 = \frac{10.000 \times \text{minutos}}{d^2}$$

Observa-se que podemos fixar uma das duas variáveis, tempo de exposição e distância fonte-filme. Se o tempo de exposição não f \hat{o} r muito importante pode-se escolher uma distância fonte-filme adequada para aprimorar a qualidade da gamagrafia. Suponhamos que a distância fonte-filme seja 50 cm.

$$t = \frac{62 \times 2500}{10.000} = 15,5 \text{ minutos}$$

O tempo de exposição para dois materiais diferentes \hat{e} aproximadamente igual quando o produto da densidade pela espessura f \hat{o} r constante. Colocando-se em um gráfico as duas variáveis, espessura e densidade, a espessura de um material de densidade conhecida pode ser determinada em t \hat{e} rmos da espessura equivalente do ferro tomado como padr \hat{o} .

Quando um feixe de raios gama atinge o objeto em ensaio, alguns dos raios são absorvidos enquanto que outros continuam a sua trajetória e os demais espalhados. Os eletrons dos átomos que formam o corpo de prova espalham a radiação em todas as direções. Os comprimentos de onda de grande parte da radiação são aumentados no processo de espalhamento. Qualquer componente do sistema de exposição como, por exemplo, chassis metálicos, suportes de sustentação, paredes, etc., podem servir como fonte espalhadora de radiação. Essa radiação espalhada reduz a qualidade da gamagrafia, empobrecendo sua definição e contraste, tornando-a bastante embaçada.

Evitando-se que esta radiação espalhada atinja o filme, obtem-se uma melhoria na qualidade da gamagrafia.

Um anteparo duplo de folhas de chumbo em contato com o filme, diminuirá o efeito da radiação espalhada sobre o mesmo. As "telas" de folha de chumbo são, sem dúvida, as mais baratas e constituem método universal de combate à ação da radiação espalhada.

A ação fotográfica dos raios gama sobre o filme depende da qualidade de radiação absorvida pelas camadas da emulsão fotográfica. Essa quantidade é muito pequena e estimada em cerca de 1% da radiação primária. O restante passa através da emulsão e não é utilizado se o teste for feito sem auxílio de intensificadores (telas de chumbo ou substâncias fluorescentes). Se durante a exposição o filme for deixado em contato com duas telas (uma de cada lado) que fluorescem sob a ação dos raios gama (telas fluorescentes) ou emitem eletrons (folhas de chumbo) um efeito fotográfico suplementar (intensificação) será obtido nas diversas camadas da emulsão fotográfica.

As telas fluorescentes consistem fundamentalmente de uma fina fôlha de papelão impregnada de minúsculos grãos de sais (usualmente o tungstato de cálcio), os quais sob a ação dos raios gama emitem luz fluorescente para a qual o filme de raio-X é sensível.

Em gamagrafias industriais duas espécies de telas são frequentemente usadas:

1. telas de alta definição (grãos finos)
2. telas de alta velocidade cuja ação intensificadora é o dôbro da anterior.

As telas fluorescentes causam, entretanto, um empobrecimento na definição radiográfica. Elas devem ser usadas quando se deseja reduzir tempos de exposição longos, onde a sua ação intensificadora poderá competir com o decréscimo de definição. A ação intensificadora depende da natureza da tela, da energia da radiação e do tipo de filme usado. Em geral o fator de intensificação varia de 5 a 50 vezes.

As telas intensificadoras de chumbo consistem de fôlhas finas e homogêneas, geralmente coladas sobre papelão. Elas são, na maior parte das vezes, usadas aos pares, uma na frente e outra atrás do filme. A espessura da camada de chumbo da parte frontal deve ser adaptada à qualidade da radiação empregada, de modo que a radiação primária passe por ela e a secundária seja absorvida ao máximo. As telas frontais usadas nas presentes experiências foram de 0,005 polegadas para o Irídio e 0,010 polegadas para o Cobalto. As telas trazeiras foram de 0,005, 0,010 e 0,015 polegadas.

A ação das fôlhas de chumbo pode ser especificada nos

itens abaixo:

1. As telas frontais absorvem mais a radiação mole e a radiação espalhada do que a radiação primária que forma a imagem fotográfica.
2. Sob a ação dos raios gama as folhas de chumbo emitem eletrons (radiação beta para a qual a emulsão do filme de raio-X é sensível e também os raios-X secundários resultantes). Desta forma cada folha de chumbo produz um fluxo suplementar de radiação.

Os efeitos produzidos pelas telas de chumbo nos filmes podem ser analisados da seguinte maneira:

- a) Facilidade de análise de pormenores com a atenuação da radiação espalhada;
- b) Diminuição do tempo de exposição.

A análise dos resultados obtidos com os intensificadores fluorescentes e de chumbo, indicou que as folhas de chumbo devem ser sempre usadas desde que não haja premência de tempo de exposição. Sua relativa lentidão, em comparação com as telas fluorescentes, compensa a melhor qualidade de imagem obtida.

Foram também feitas experiências com folhas intensificadoras de ouro, prata, cádmio e aço inoxidável, mas optamos pelo chumbo, devido ao seu baixo custo e facilidade no mercado.

Resultados satisfatórios foram conseguidos nas experiências onde houve combinação de "tela" fluorescente e folha de chumbo. As "telas" fluorescentes foram usadas como tela frontal e as de chumbo como tela trazeira. Produz-se com esta técnica um misto de intensificação e redução da radiação espalhada, melhorando, assim, a qualidade radiográfica.

Em geral para se avaliar a qualidade da imagem obtida sobre o filme, um equipamento chamado "penetrômetro" ou "indicador de qualidade de imagem" (IQI), deve ser usado. Ele deve ser colocado na região de maior interesse do trabalho, e ser orientado de modo a ficar aproximadamente perpendicular à radiação incidente.

O penetrômetro ou IQI, é simplesmente uma forma geométrica feita de material semelhante ao espécime a ser testado e usualmente contém uma estrutura simples tal como furos, fios ou degraus. Sua espessura está numa proporção definida para a espessura do corpo de prova.

Uma técnica radiográfica pode ser considerada satisfatória se o "penetrômetro" e as suas estruturas aparecerem claramente na radiografia.

Deve-se salientar que mesmo que um certo fio, furo ou degrau bem fino do penetrômetro apareça na radiografia, uma cavidade de mesmo diâmetro e espessura poderá ficar invisível. O penetrômetro tem limites bem definidos. Fornece uma mudança brusca embora pequena na espessura do metal. Uma cavidade natural tem geralmente bordos atenuados o que acarreta uma mudança gradual na espessura. Desta maneira a imagem do penetrômetro é bem mais definida do que a imagem da cavidade. Semelhantemente, uma falha bem fina, mesmo de extensão considerável, pode passar despercebida na gamagrafia desde que o feixe proveniente da fonte radioativa passe perpendicular ou obliquamente ao plano da fenda. Isto ocorre devido a transição gradual de densidade radiográfica.

Quando raios-X, raios gama, luz visível ou eletrons chocam-se com a emulsão radiográfica realiza-se uma mudança nos haletos de prata que a constituem. Essa mudança é conhecida com o nome de imagem latente.

Quando o filme exposto é colocado no revelador, os cristais dos haletos de prata que foram atingidos pela radiação,

são reduzidos a prata metálica que se agrega em torno dos átomos iniciais, formando a fotografia do objeto em ensaio.

O processo de revelação consiste em lavar o filme nos seguintes banhos:

1. Revelador - que reduz os haletos de prata expostos na emulsão em prata metálica, deixando os grãos que não foram expostos incólumes. A temperatura do revelador deve ser mantida constante durante os processos de revelação. Agitações periódicas dos filmes dentro do tanque revelador devem ser realizadas para assegurar revelação uniforme. O tempo de vida útil da solução reveladora deve ser cuidadosamente verificado.
2. Stopper - freia a ação do revelador.
3. Fixador - que dissolve os haletos de prata não revelados, mas deixa a prata metálica da imagem, intacta. Ele ainda endurece o filme de tal forma que o mesmo resistirá a uma secagem de ar quente sem se deformar. São aconselháveis agitações periódicas do filme dentro do fixador.
4. Lavagem em água corrente: usada para remover os processamentos químicos da emulsão, assegurando uma imagem permanente.
5. Agente estimulador - ativa a secagem e elimina as manchas de água que podem trazer muita confusão na interpretação radiográfica.

As radiografias depois de secas são levadas ao negatoscópio e analisadas com o auxílio de uma lupa.

Como a maioria dos objetivos radiográficos consiste

em examinar espécimes não homogêneos, a visibilidade de pormenores na radiografia deve ser um fator essencial. O quadro abaixo (referência 22), relaciona os fatores que influem na qualidade da imagem radiográfica.

SENSIBILIDADE RADIOGRÁFICA			
Qualidade da imagem que é função de		Qualidade do filme (e de sua revelação) que dependem de	
Contraste, o qual depende de:	Definição, que depende de:	Contraste, o qual depende de:	Definição, que depende de:
1. Diferenças na espessura	1. Dimensões da fonte	1. Tipo de filme	1. Espessura das camadas da emulsão
2. Natureza da radiação	2. Quantidade de radiação espalhada	2. Idade do filme	2. Tamanho dos grãos de prata
3. Espalhamento da radiação	3. Distância fonte-filme	3. Tipo de revelador	3. Concentração dos grãos de prata
4. Tipo de intensificadores	4. Distância objeto filme	4. Idade do revelador	4. Grau de revelação
	5. Mudanças bruscas de dimensões do objeto	5. Grau de revelação	
	6. Contato entre filme e "screen"	6. Tempo, temperatura e agitação	
	7. Tipo de "screen" intensificador		

BIBLIOGRAFIA

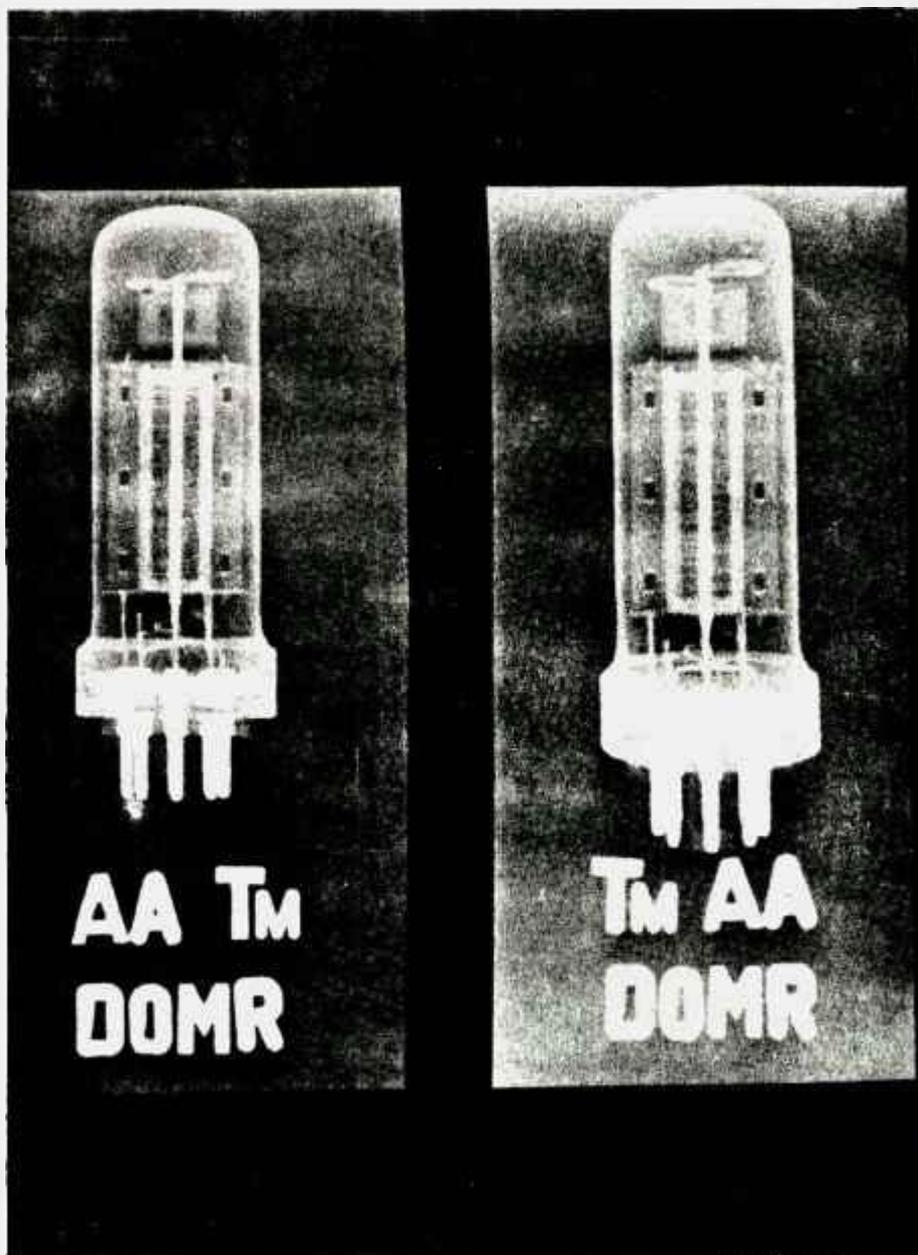
1. Robert Mac Master - Nondestructive Testing Handbook - Volume II.
2. M. Baimler - Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy - 1958 - Volume 19 - P/2120.
3. S.V. Rumyantsev - Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy - 1958 - Volume 19 - P/2235.
4. A. Daane, J. Powell - Portable Tm X-ray Unit - Nucleonics 12 - n. 5, 35 (1954).
5. Tadashi Oshida - Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy - 1958 - Vol. 19 - P/1347.
6. Forno L. Green - Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy - 1958 - Vol. 19 - P/829.
7. P. Day - K. Capture Branch in Tm-170 - Phys. Rev. 102, 1572 (1956).
8. Radiography in Modern Industry - Vol. 2 - Eastman Kodak Co.
9. M. Kato - Gamma Radiography of Light Alloys Using Tm-170 - AEC-tr-4482 - P/161.
10. C.D. Trowbridge - Uses of Radioisotopes for Radiography of Weldments and Castings - TID 7511 - P/128.
11. J.A. Reynolds - The Role of Isotopes in Industrial Radiography - TID 7571 - P/229.
12. Grover M. Taylor - Radiation Techniques - TID-7600 - P/11.

13. Adair Morrison - Radiography with Co-60 - Nucleonics - Dezembro 1949 - P/19.
14. Rex G. Fluarty - Interaction of Isotopic Radiation with Matter - Nucleonics - July 1948 - P/46.
15. Adair Morrison - Stray-Radiation Measurement with X-Ray Film - Nucleonics - Setembro 1948 - P/47.
16. R. West - Low-Energy Gamma Ray Sources - Nucleonics - Fevereiro 1953 - P/20.
17. P.A. Ruauet - Les nouvelles techniques d'utilisation des radioéléments en gammagraphie des soudures au gas de France - Bulletin ATEN 1965, Maio-Junho - P/3.
18. T. Watanabe - A machine of gamma-ray Radiography with two counters AEC-tr-4482 - P/172.
19. T. Fuji - Absorption of Gamma-Rays in Steel - A consideration for Radiography - AEC-tr-4482 - P/192.
20. Industrial Radiography - Gevaert.
21. G. Ito - Nondestructive Inspection of Welded Joint of Boiler Drum with Radioisotopes - AEC-tr-4482 - P/161.
22. Isotopes and Radiation Technology - Vol. 2 - nº 1 - P/57.
23. Irwin J. Gruverman - Iodine-125 Makes a better Low-energy gamma radiography source - Nucleonics 21(5): 96-7 (1963).
24. S. Romyantsev - Industrial Radiology.
25. A. Capó - Equipos de Gamagrafia Industrial Construidos en la Argentina CNEA A-1962.

26. C. Papadopoulos - Gamagrafia - Curso de Aplicacion de Radioisotopos - 1962.
27. S.D. Rieder - Experience with Thulium Radiography at the MTR - IDO-16333 - 1957.
28. W.V. Mayneord - Radiography with Tm-170 e Xe-133 - Brit. J. Radiol. 29, 277-85 (May 1956).
29. J.E. Roberto - A gamma Radiograph - Brit. J. Radiol. 29, 629 (Nov. 1956).
30. J.G. Kereiakes - Portable Isotopic Radiographic Units - Am. J. Roentgenol. 76, 168 (1956).
31. Faster pipe weld testing uses Iridium-192 - Nucleonics 17, nº 1, 98-9 (Jan 1959).
32. Symposium on Physics and Nondestructive Testing ANL-6346 - 1960.
33. L.N. Matsy - Eu-155 e Ce-144 as source of radiation for gamma radiography of metals - AEC-tr-4139 - 1961.

AGRADECIMENTOS

Os autores aproveitam a oportunidade para agradecer ao Sr. Daniel Hilsdorf, técnico operador do reator, sua valiosa colaboração nas revelações das gamagrafias, preparação de soluções reveladoras, ampliações, cópias e reduções de negativos.



Gamagrafia AA TM - Distância fonte-filme 25 polegadas
Gamagrafia TM AA - Distância fonte-filme 15 polegadas
Ilustração da distorção da imagem de uma válvula projetada no
filme radiográfico devido a distância fonte-filme.

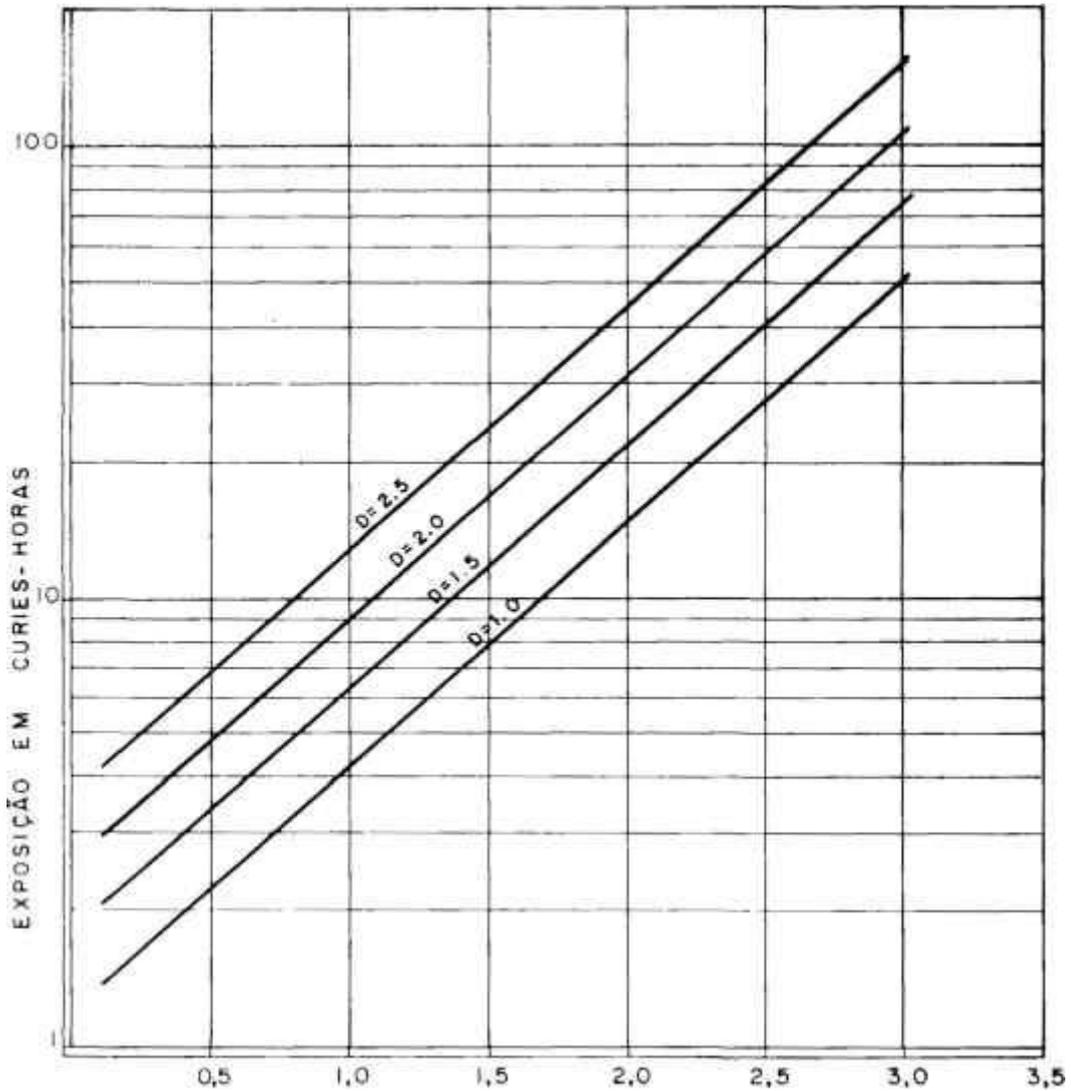
Fig. 1

Distancia Fonte Filme 36 pol.

IRIDIO-192 Filme Kodak Tipo AA

Revelador Kodak 8 minutos 18°C

Tela Intensificadora de Chumbo dianteira 0,005 pol.
posterior 0,005 pol.

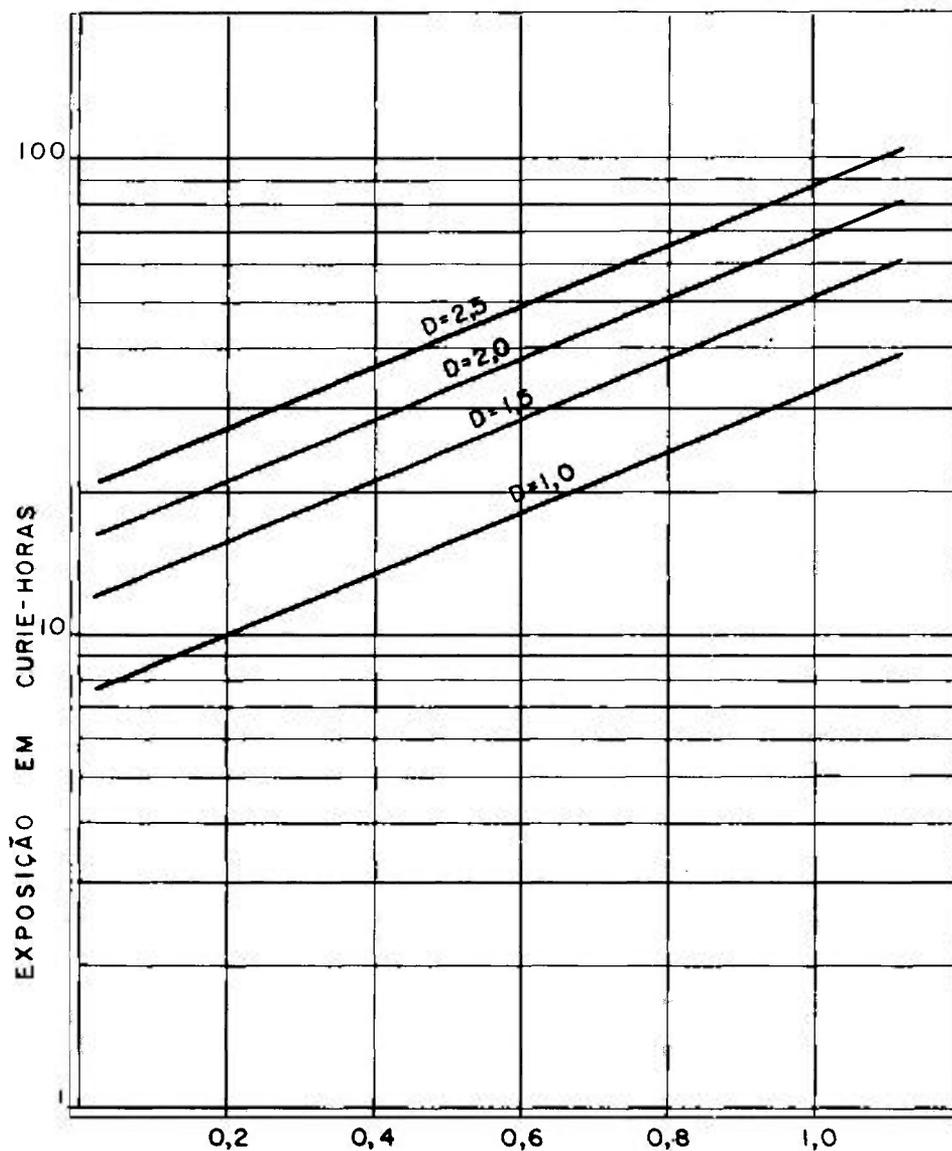


Ferro Densidade 7,87 g/cm³

Espessura, polegadas

Fig. 2

Distancia Fonte Filme 20 pol.
TULIO-170 Filme Kodak Tipo AA
Revelador Kodak 8 minutos 18° C
Tela Intensificadora de Chumbo diantelra 0,002 pol.
posterior 0,005 pol.



Aluminio Densidade 2,7 g/cm³ Espessura, polegadas Fig. 3

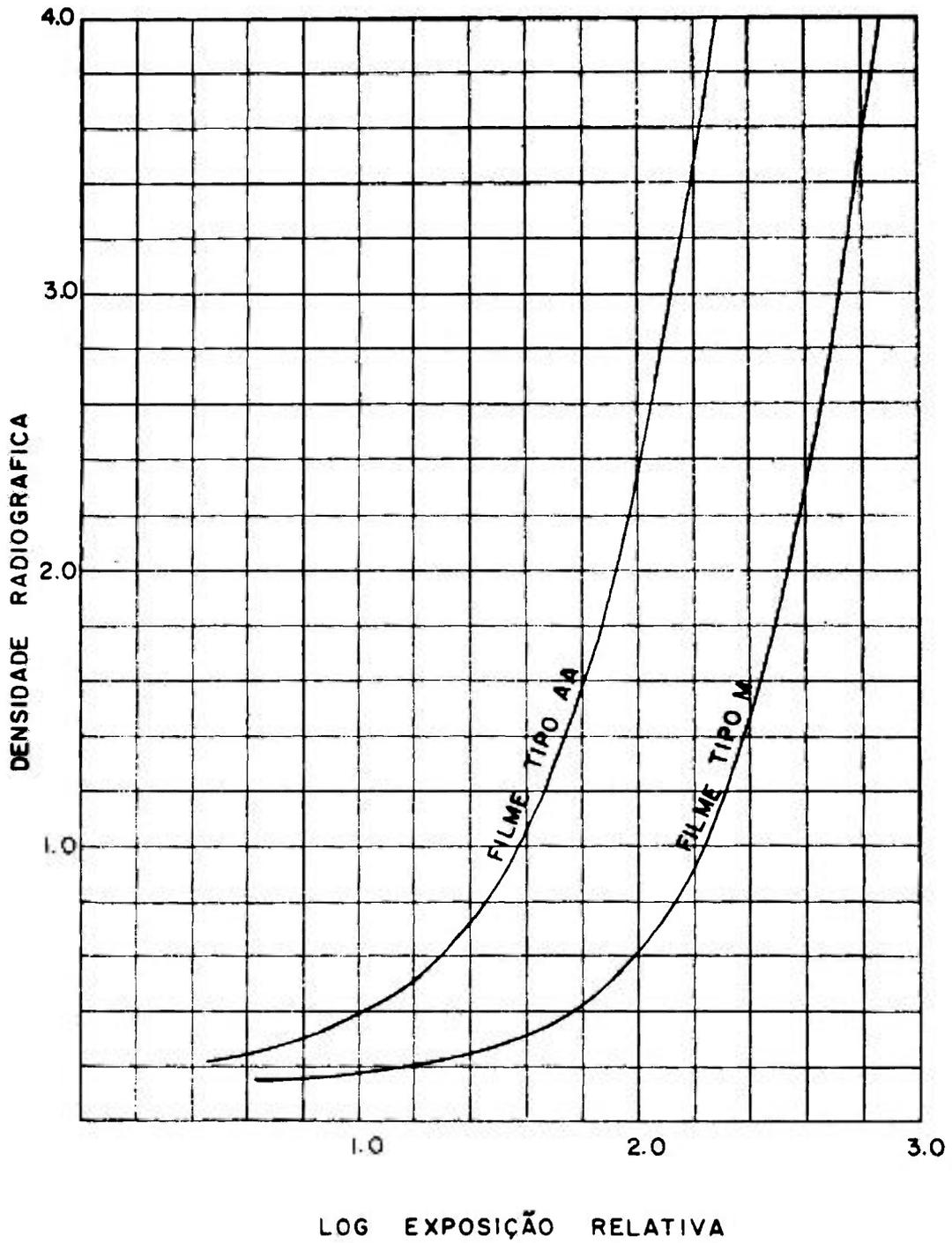
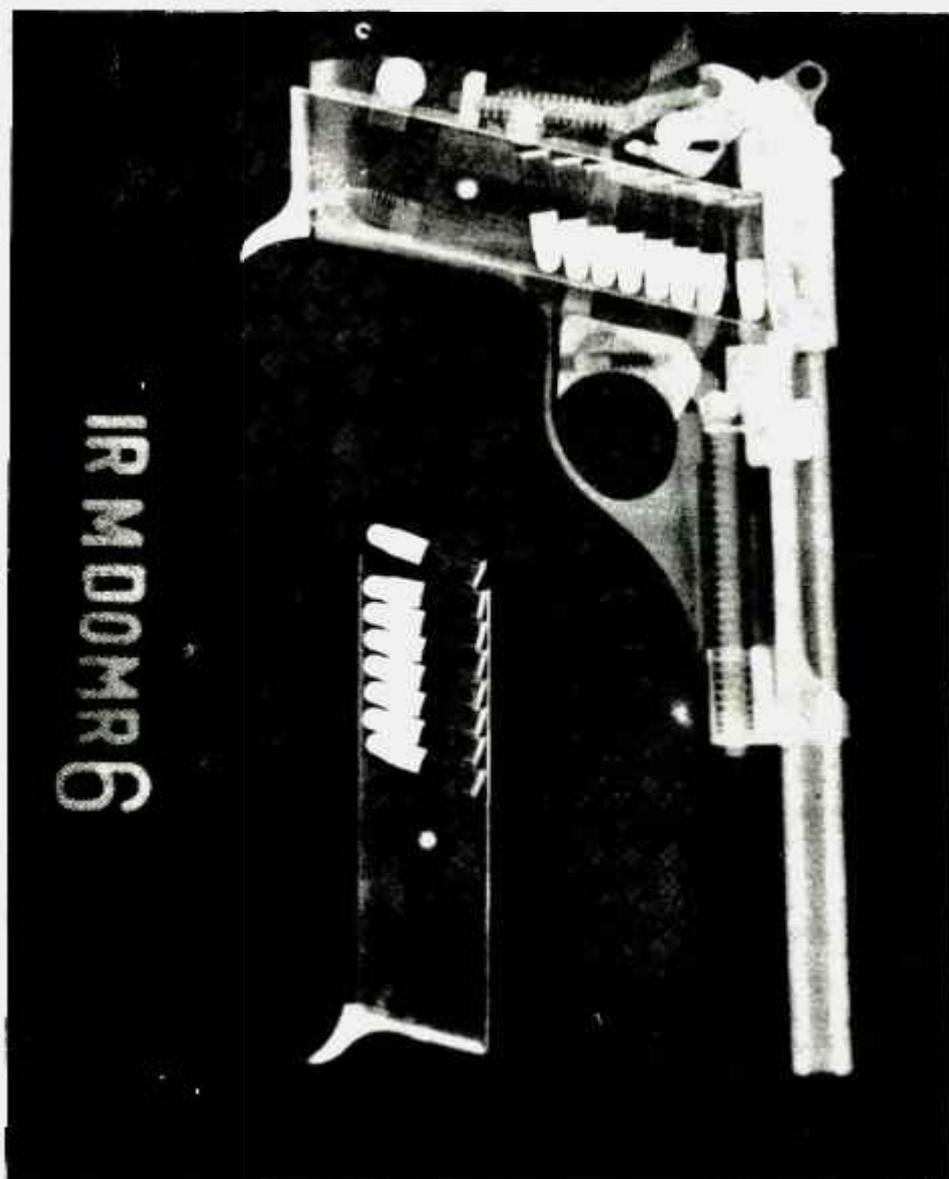
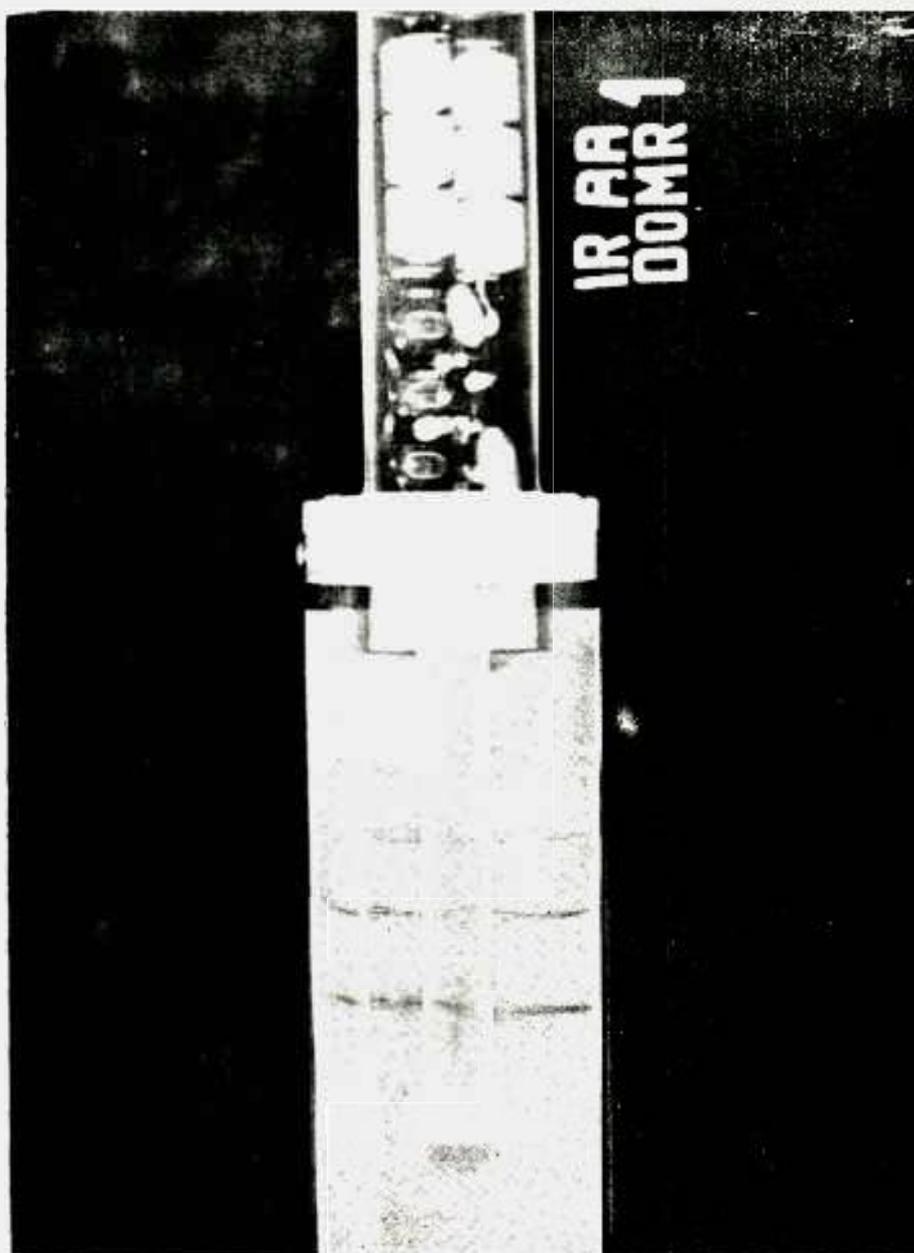


FIG.4



Gamagrafia de um revolver
Distância fonte-filme: 36 polegadas
Fonte de Iridio-192 - Filme tipo M
Fator de exposição: 110
Tela intensificadora de chumbo
Dianteira 0,005 polegada
Posterior 0,005 polegada

Fig. 6



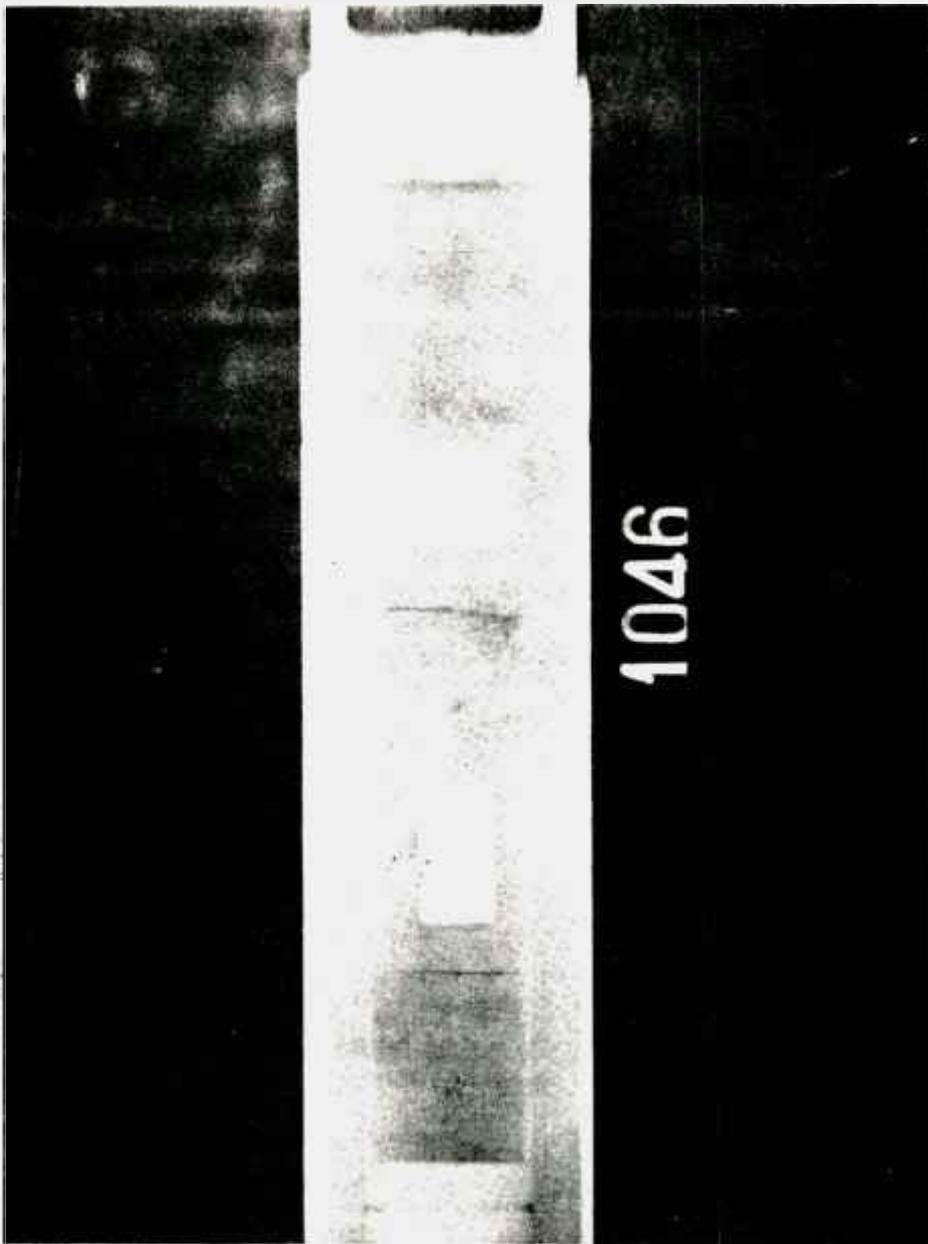
Gammaografia de um detetor de neutrons (contador proporcional)
Distância fonte-filme: 36 polegadas
Fonte de Iridio-192 - Filme tipo AA
Fator de exposição: 39
Tela intensificadora de chumbo
Dianteira 0,005 polegada
Posterior 0,005 polegada

Fig. 7



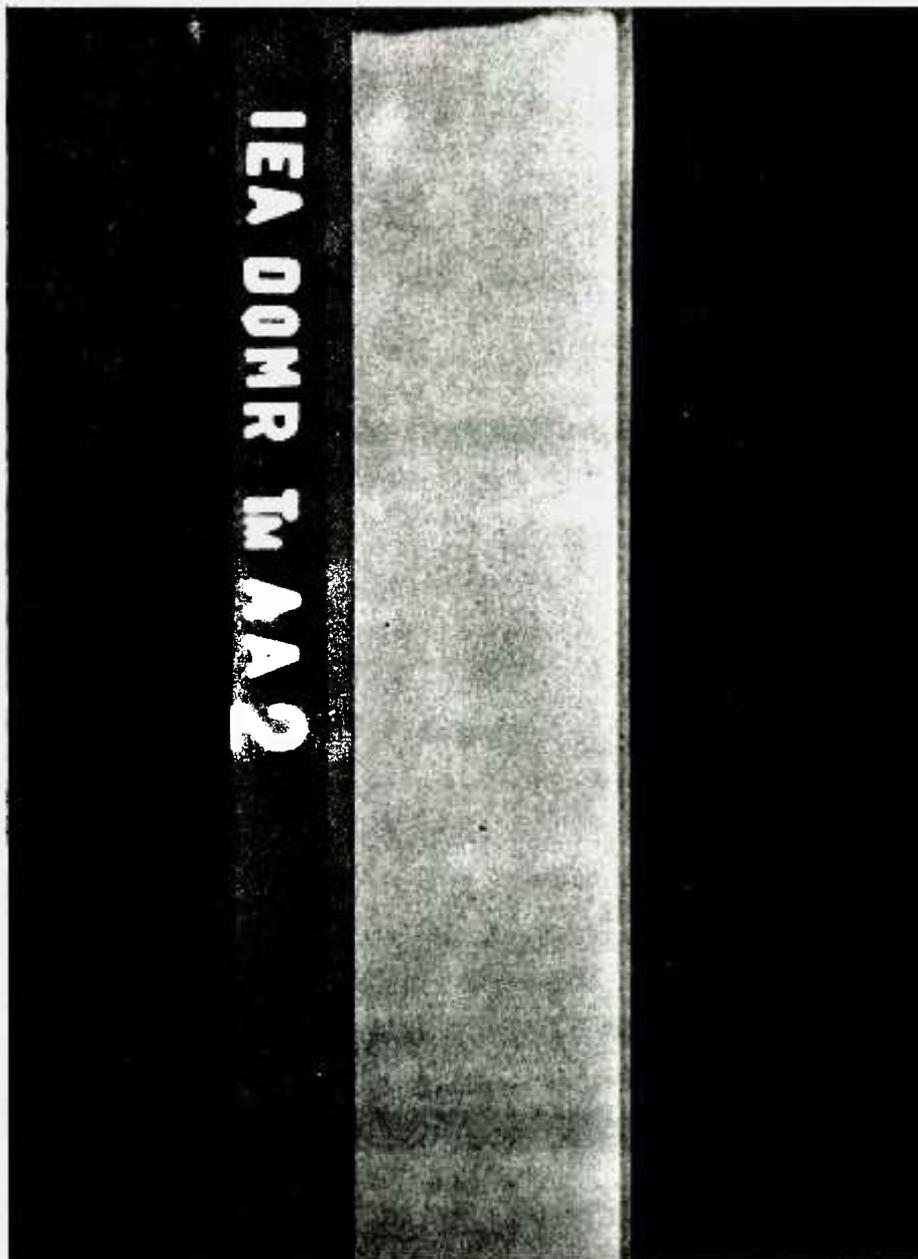
Gamagrafia de mão humana
Distância fonte-filme: 40 cms
Fonte de Ytérbio-169 - Filme Blue Brand
Dose 4 miliröntgens
Tela intensificadora fluorescente
Tempo de exposição: 30 segundos

Fig. 8



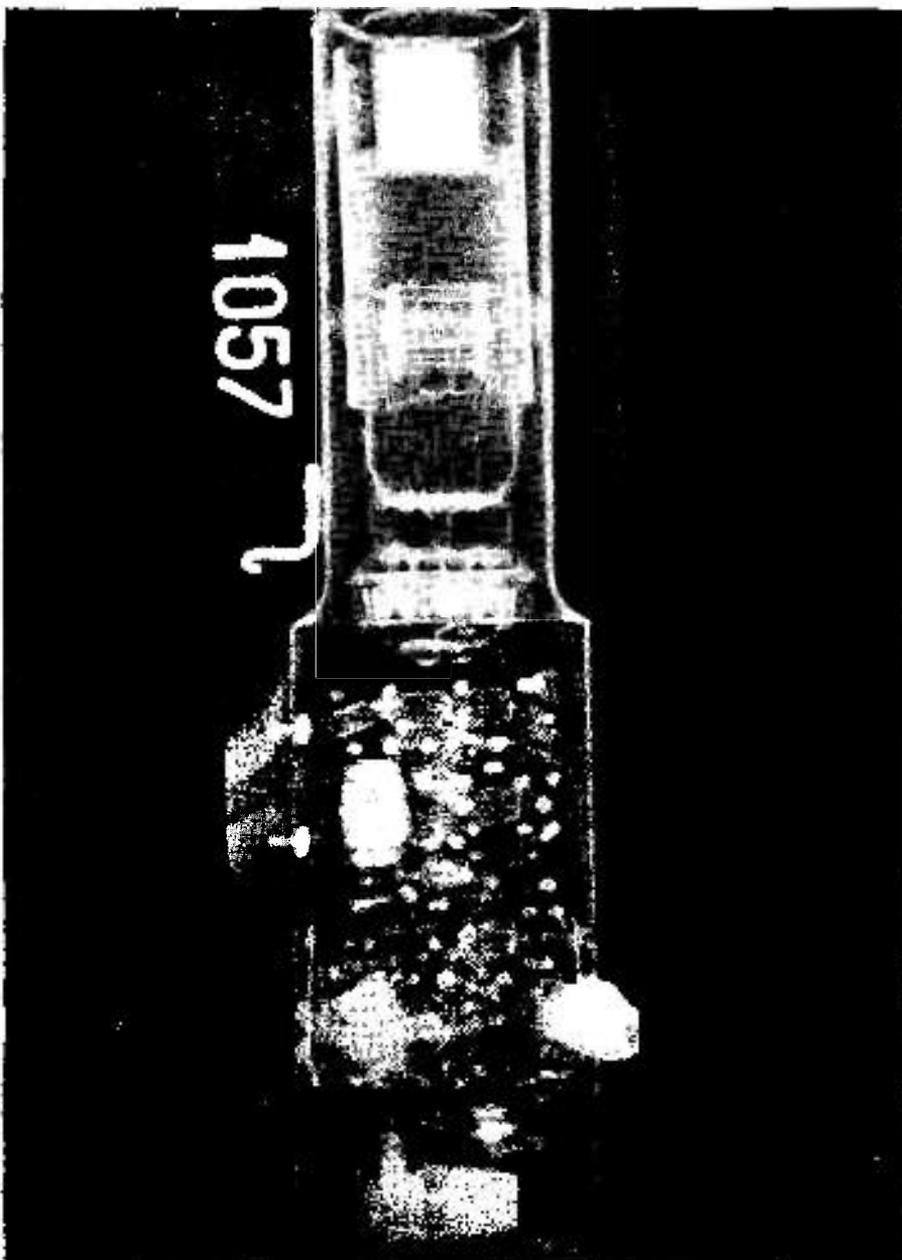
Gamagrafia de uma fonte de Antimônio-Berílio, posicionada em um elemento refletor de Grafite.
Distância fonte-filme: 30 polegadas
Fonte de Iridio-190 - Filme tipo AA
Fator de exposição: 120
Tela intensificadora de chumbo
Dianteira 0,005 polegada
Posterior 0,005 polegada

Fig. 9



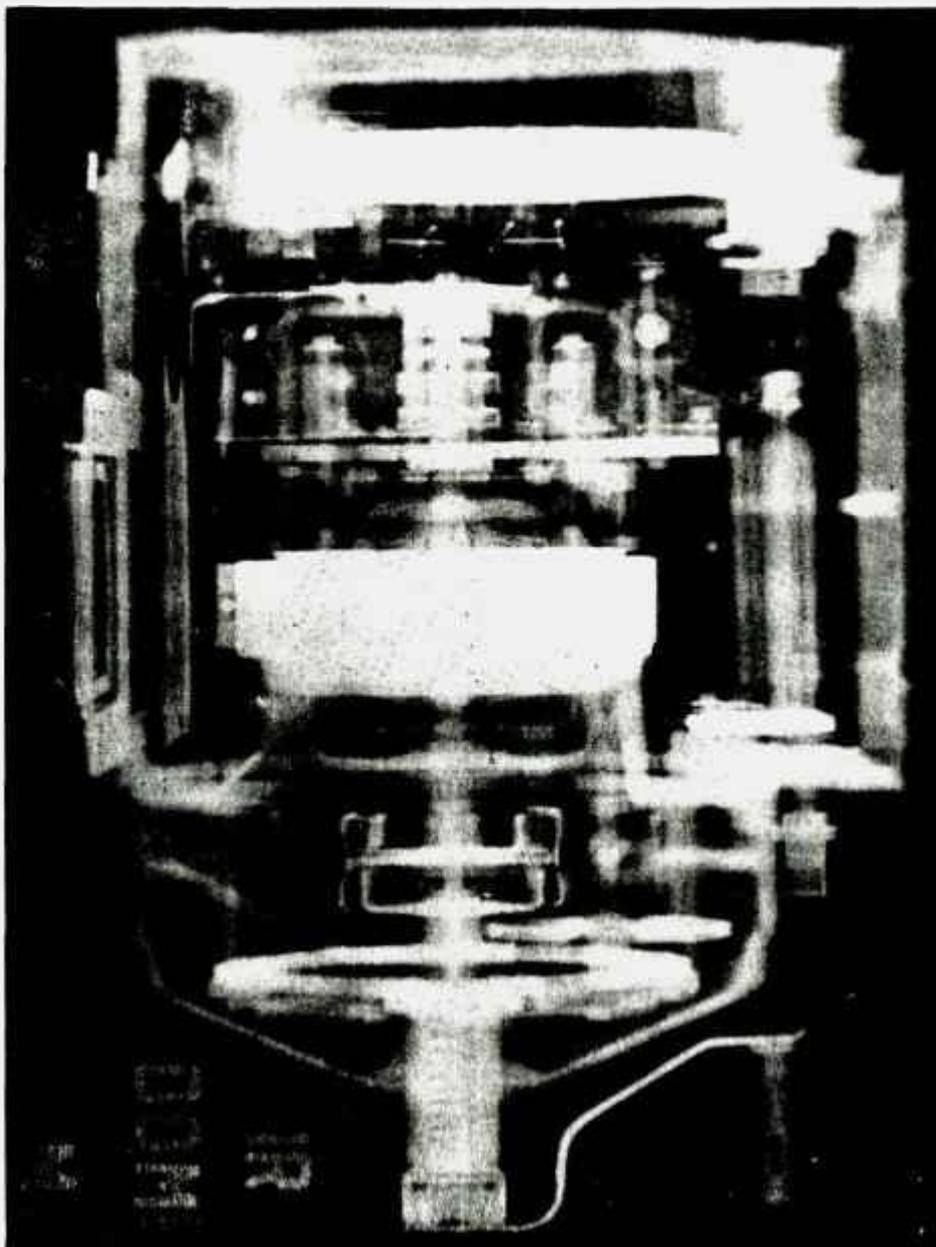
Gamagrafia de uma placa combustível tipo Argonauta
Distância fonte-filme: 36 polegadas
Fonte de Túlio-170 - Filme tipo AA
Exposição: 66 curies x hora
Tela intensificadora fluorescente

Fig. 10



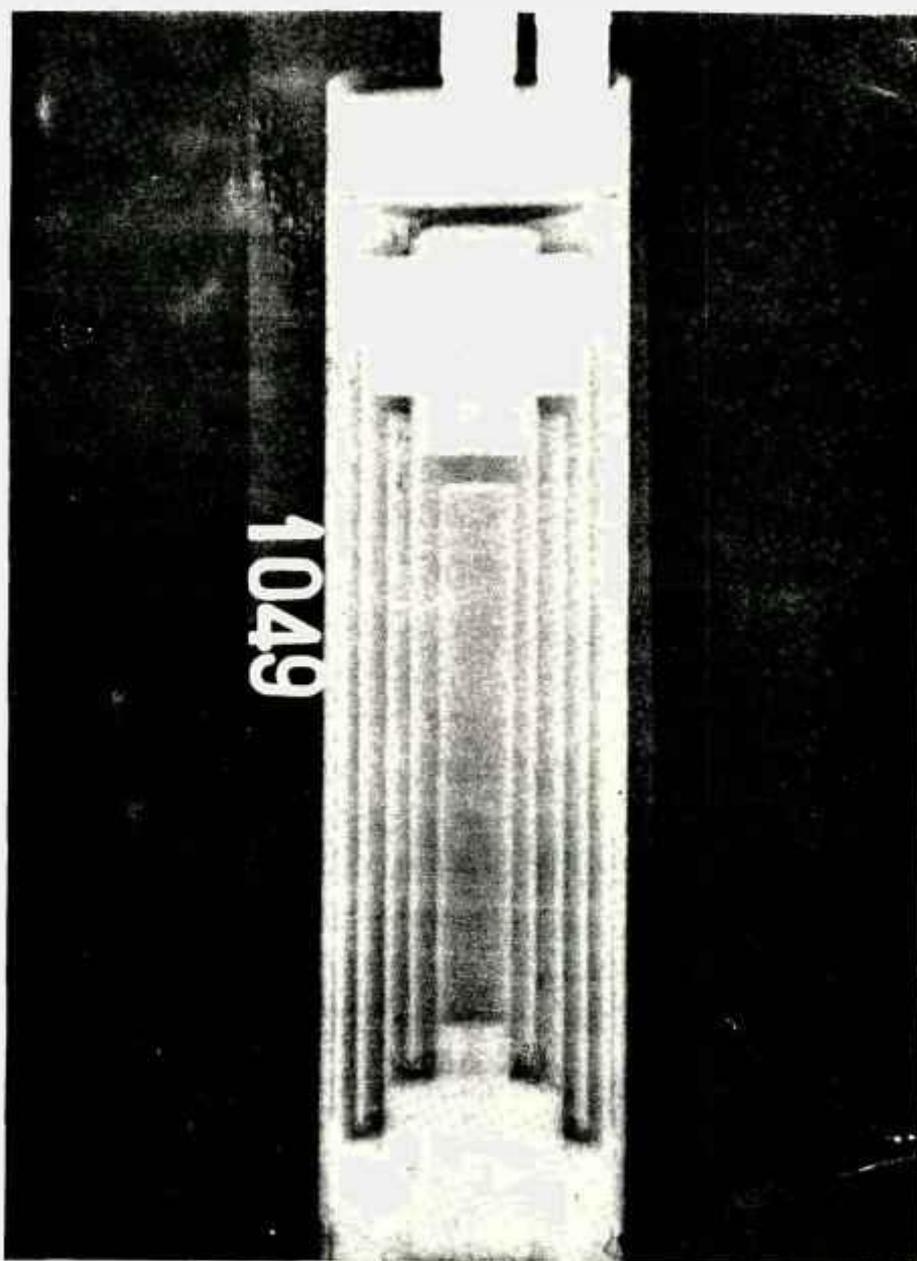
Gamagrafia de um detetor de radiação. (Cintilador)
Distância fonte-filme: 36 polegadas
Fonte de Irídio-192 - Filme AA
Fator de exposição: 35
Tela intensificadora de chumbo
Dianteira 0,005 polegada
Posterior 0,005 polegada

Fig. 11



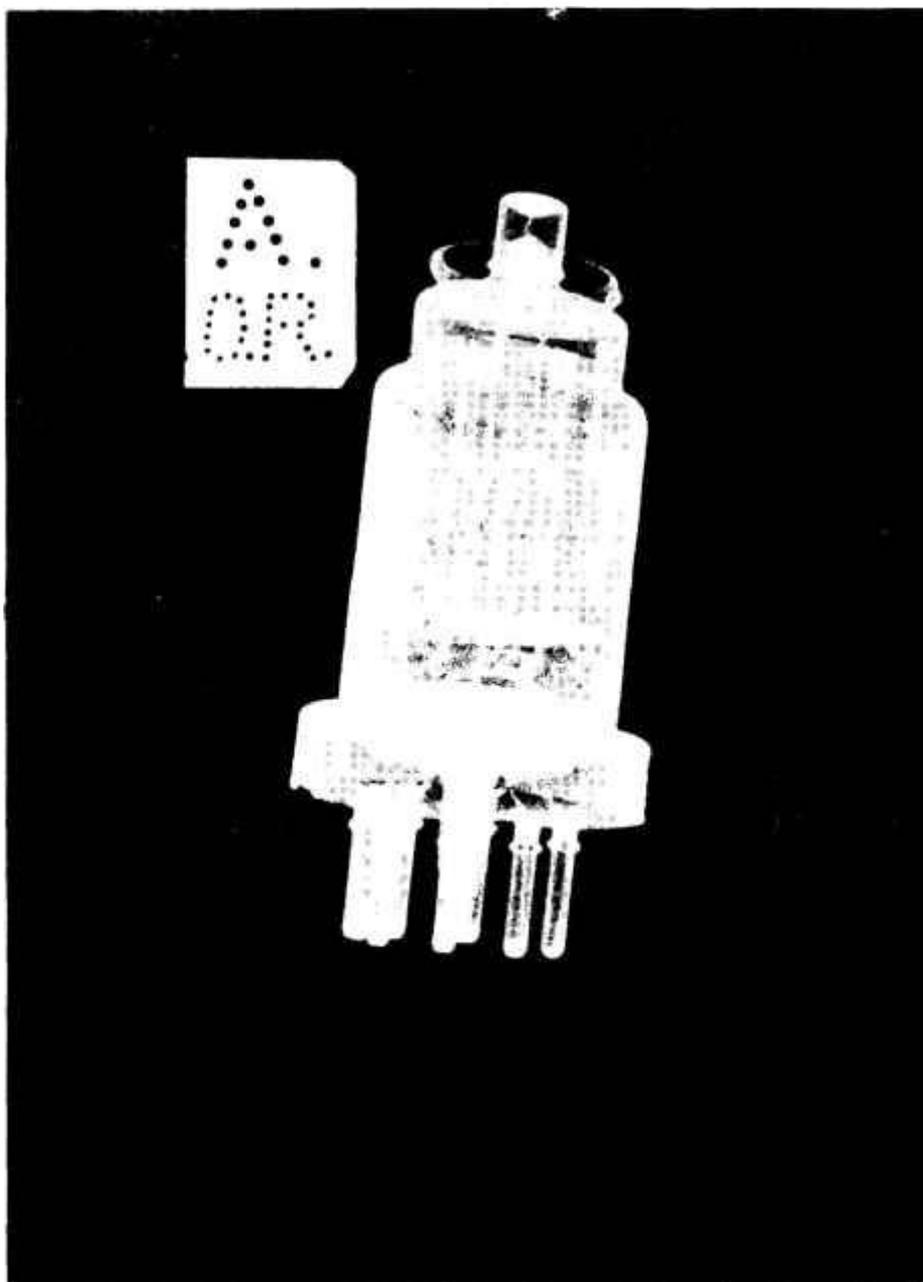
Gamagrafia de um megômetro
Distancia fonte-filme: 50 polegadas
Fonte de Irídio-192 - Filme M
Fator de exposição: 576
Tela intensificadora de chumbo
Dianteira 0,005 polegada
Posterior 0,005 polegada

Fig. 12



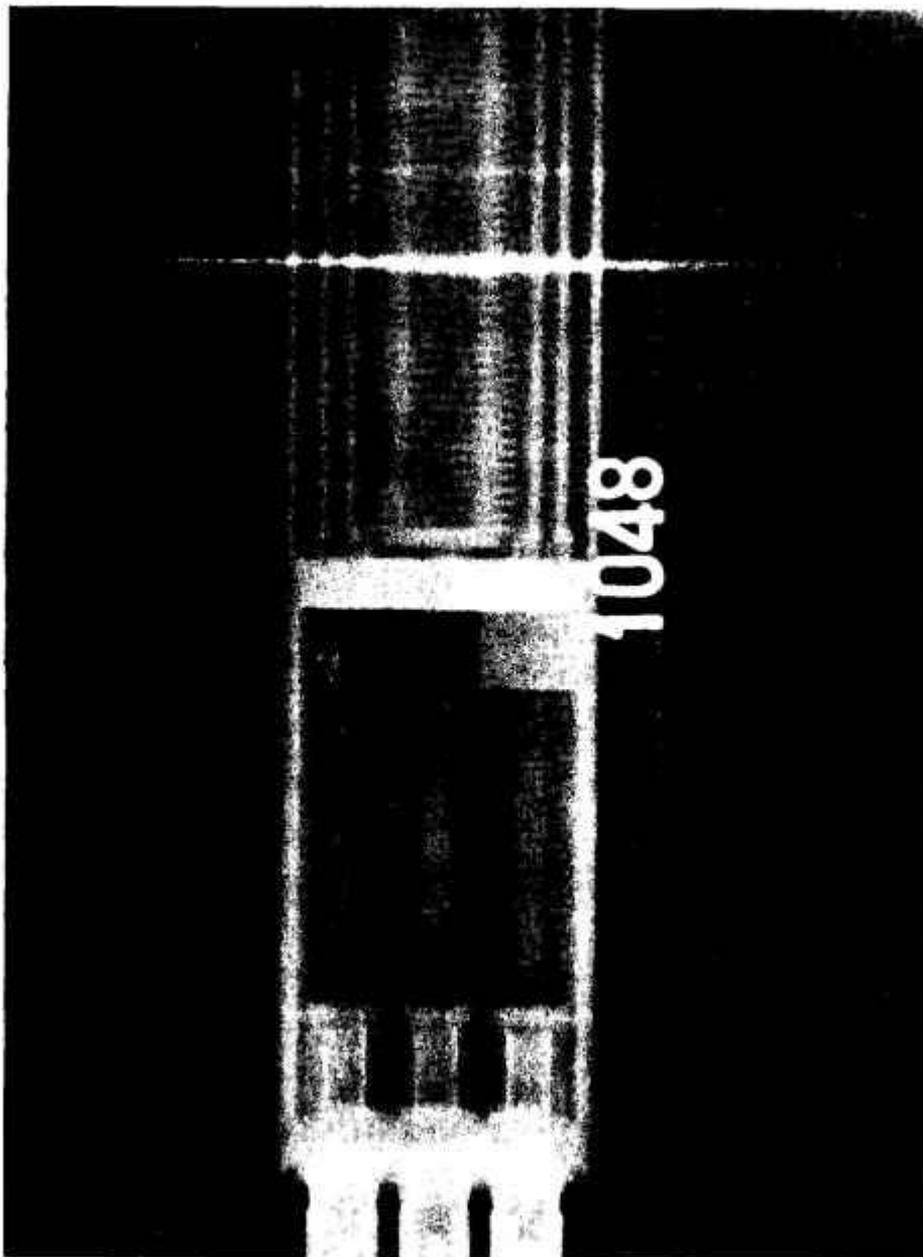
Gamagrafia de uma câmara de ionização
Distância fonte-filme: 36 polegadas
Fonte Irídio-192 - Filme AA
Fator de exposição: 40
Tela intensificadora de chumbo
Dianteira 0,005 polegada
Posterior 0,005 polegada

Fig. 13



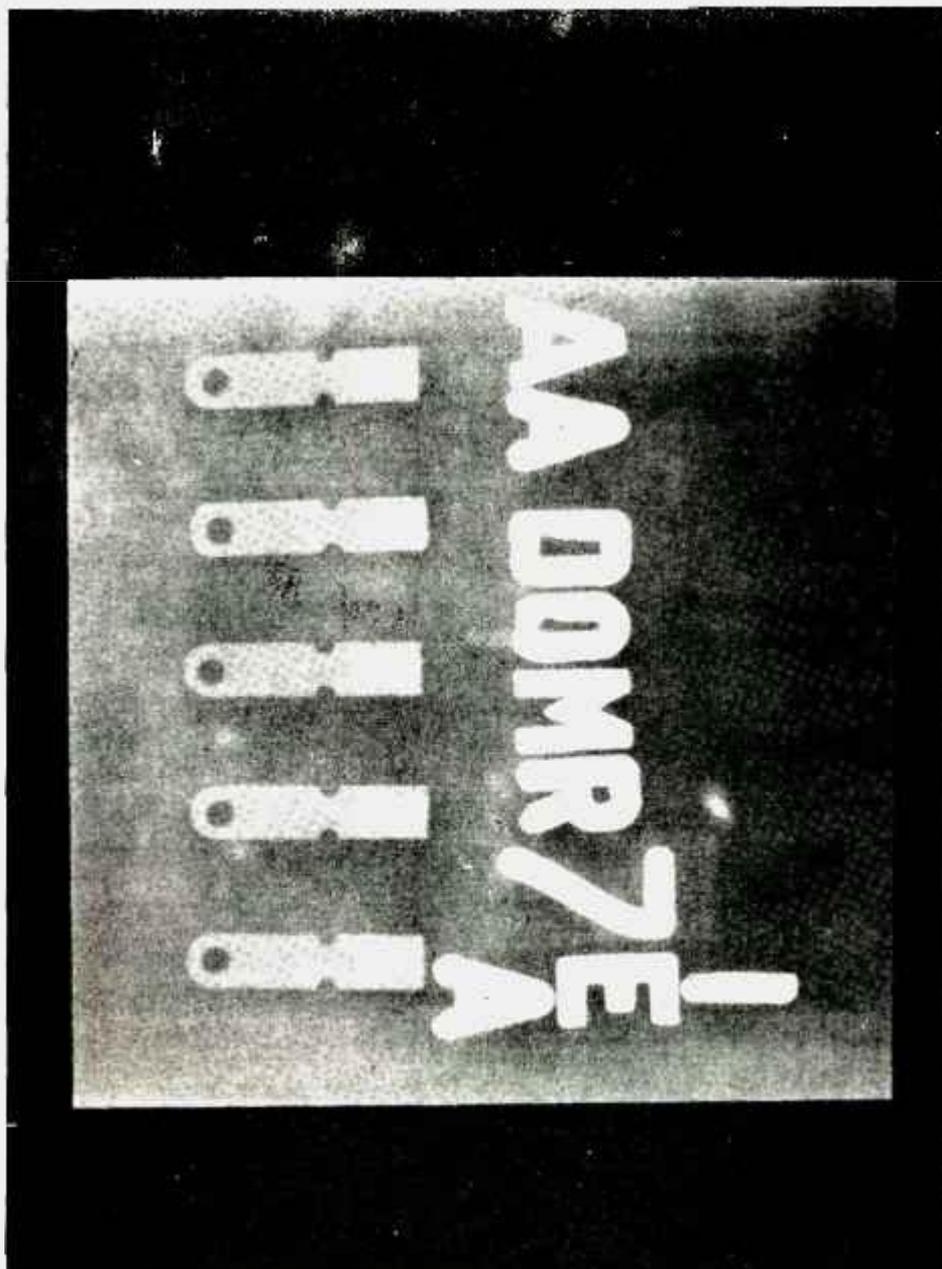
Gammaografia de uma válvula 6J7
Fonte Túli-170 - Filme AA
Distância fonte-filme: 40 cm
Tela intensificadora fluorescente
Exposição = 36 curies x hora

Fig. 14



Gamagrafia de uma câmara de ionização compensada
Distância fonte-filme: 36 polegadas
Fator de exposição: 40
Fonte de Irídio-192 - Filme AA
Tela intensificadora de chumbo
Dianteira 0,005 polegada
Posterior 0,005 polegada

Fig. 15



Gamagrafia de fontes de Iridio produzidas pela DOMR
Distancia fonte-filme: 16 polegadas
Fator de exposiçao: 25
Fonte de Iridio-192 - Filme AA
Tela intensificadora dianteira fluorescente
Tela intensificadora posterior chumbo

Fig. 16