

OR7902457

1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

12/12/77

DOSIMETRIA COM FILMES

José Luiz B. Leão
Instituto de Radioproteção e Dosimetria
Divisão de Monitoração de Pessoal

1 9 7 7

Trabalho apresentado no 19 Ciclo de Palestras
Sobre Física Médica - CNEN - Rio de Janeiro
Junho/1976.

INDICE

- I. INTRODUÇÃO
- II. EMULSÕES FOTOGRÁFICAS
 - II.1 - EMULSÃO
 - II.2 - GELATINA
 - II.3 - BASE
- III. DOSIMETRIA FOTOGRÁFICA
- IV. IMAGEM LATENTE
- V. EFEITO SCHWARCHILD OU FALHA DA LEI DA RECIPROCIDADE
- VI. IMAGEM LATENTE DE RAIOS-X E GAMA
- VII. DENSIDADE ÓTICA
- VIII. CURVA CARACTERÍSTICA DENSIDADE-EXPOSIÇÃO
- IX. SOLARIZAÇÃO
- X. DEPENDÊNCIA DA RESPOSTA PELA ENERGIA DA RADIAÇÃO
- XI. ESTABILIDADE DOS MATERIAIS FOTOGRÁFICOS

FIGURAS

BIBLIOGRAFIA

DOSIMETRIA COM FILMES

I. Introdução

Os métodos fotográficos sempre estiveram intimamente ligados ao próprio desenvolvimento científico e tecnológico no domínio da energia nuclear. Representam, por isso mesmo, um campo de pesquisas já bastante explorado, ao contrário do que presentemente ocorre com a dosimetria do estado sólido. Por conseguinte, são ainda muito úteis as compilações mais ou menos recentes abordando os aspectos básicos do processo fotográfico. (Ver bibliografia).

O presente trabalho limitar-se-á apenas à apresentação dos princípios relacionados com as aplicações dosimétricas mais comuns das emulsões fotográficas.

II. Emulsões Fotográficas

Um filme fotográfico é composto de uma base ou suporte de acetado ou plástico, recoberta (em um ou ambos os lados) por uma camada gelatinosa sensível (a emulsão), contendo cristais de halogeneto de prata (grãos) de dimensões microscópicas. A figura 1 exemplifica um filme radiográfico de camada dupla.

II.1. Emulsão

O exame microscópico dos grãos da emulsão evidencia uma estrutura cristalina. De fato, os cristais de brometo de prata apresentam estrutura cúbica regular, semelhante à aquela do cloreto de sódio, comportando íons prata positivamente carregados (Ag^+) e íons bromo negativamente carregados (Br^-), de acordo com a figura 2.

Os cristais de brometo de prata, em uma emulsão fotográfica, não são cristais perfeitos; um certo número de imperfeições sempre se faz presente. Existem íons prata no cristal que não ocupam as posições da rede mostradas na figura 2, mas se encontram localizados nos espaços situados entre as mesmas (Defeito de Frenkel). Estes íons são denominados íons pra

ta intersticiais e são vistos na figura 3.0 número total destes íons é naturalmente muito pequeno se comparado com o número total de íons prata no cristal.

Outros tipos de imperfeições são representados por distorções na uniformidade da estrutura do cristal: moléculas "estranhas" alojadas no interior do cristal ou sobre sua superfície, produzidos através de reações com os componentes da gelatina; ou distorções ou deslocamentos do arranjo regular dos íons. Estas imperfeições podem ser consideradas em conjunto e constituem regiões do cristal potencialmente favoráveis ao desenvolvimento da "imagem latente" (regiões de imagem latente).

Embora os cristais de Ag Br possam se apresentar sob diferentes formas (usualmente triangular ou hexagonal e, ocasionalmente, em forma de bastões), conforme mostrado na figura 4, dependendo da técnica de preparação da emulsão, a rede cristalina e as suas constantes jamais se alteram.

O diâmetro dos grãos não é uniforme, variando de $<0,01\mu\text{m} > 5\mu\text{m}$. Nas emulsões lentas (de granulação fina), observa-se uma distribuição mais uniforme das dimensões. Mas, via de regra, as formas e as dimensões dos grãos são bastante variadas; o diâmetro médio dos grãos pode ser representado por valores da ordem de $0,02\mu\text{m}$ nas emulsões mais lentas, de alta resolução, até cerca de $2\mu\text{m}$ nas emulsões rápidas e de raios-X.

Em geral, a espessura da camada da emulsão está situada entre 4μ e 2mm .

II.2 Gelatina

A gelatina é empregada em fotografia desde 1871. Trata-se de um produto orgânico (uma proteína), sem composição química constante e definida, que se extrai dos ossos e outros resíduos animais mediante processos especiais. É um composto de natureza anfótera e bastante higroscópico - Quando imerso em água fria é capaz de aumentar várias vezes o seu volume por efeito de absorção do líquido.

A gelatina atua basicamente como colóide protetor para o Ag Br; como agente ligante capaz de absorver gran

des quantidades de água, permitindo que os agentes químicos da solução reveladora tenham acesso aos grãos; como acceptor para o halogênio liberado no processo fotográfico e como sensibilizador para os grãos.

II.3 Base

Uma vez preparada, a emulsão é aplicada sobre um suporte previamente tratado com reagentes superficialmente ativos a fim de estabelecer a aderência. A base do filme consiste usualmente em uma camada de triacetato de celulose com espessura de 100 a 200 μm .

Primitivamente o nitrato de celulose, uma substância muito inflamável, foi usada como base. A designação "safety film", que ainda hoje se encontra gravada no rótulo da embalagem das películas, refere-se ao tipo de suporte não inflamável, para distinguí-lo do nitrato de celulose.

Além do suporte de acetato, há ainda um outro material plástico, o poliéster, empregado como suporte de películas radiográficas, películas para artes plásticas e de filmes de "Single - 8" amador.

III. Dosimetria Fotográfica

As emulsões de raios-X, empregadas na dosimetria com filmes, consistem de $\sim 50\%$ em peso de Ag Br (contendo pequena percentagem de AgI) e de $\sim 50\%$ de gelatina, e são aplicadas sobre ambos os lados do suporte formando camadas com 5 a 20 μm de espessura cada (quando saturada com água, ela pode se tornar 5 vezes mais espessa), correspondendo a cerca de 1 a 5 mg/cm^2 de Ag Br ou 10^9 a 10^{12} grãos/ cm^2 . Uma camada muito delgada de gelatina (0,5 - 1 μm) protege a emulsão.

São dois basicamente os processos envolvidos na produção de um escurecimento (densidade) visível e mensurável no filme, em consequência de sua exposição à luz ou radiação ionizante:

1. Processo físico-químico conduzindo à formação de uma imagem latente passível de revelação.
2. Procedimento químico de conversão do grão exposto à radiação em prata metálica (revelação) e remoção do halo

geneto de prata que não sofreu exposição a fim de estabilizar o filme processado (fixação).

Segue-se então a etapa da quantificação da relação entre a densidade ótica medida e a exposição sofrida pelo filme.

IV. Imagem Latente

Quando uma emulsão fotográfica é exposta à radiação luminosa ou ionizante, uma transformação muito sutil se processa no grão de halogeneto de prata, conduzindo à formação do que se denomina de "imagem latente": um agregado microscópico de átomos de prata metálica distribuídas não apenas na superfície do grão de halogeneto de prata, mas também no interior dos cristais.

Na fase da revelação constata-se que o agente revelador atua inicialmente sobre um número limitado de pontos isolados da superfície dos grãos expostos. Estes pontos acham-se distribuídos pelos cristais segundo as leis do acaso e parecem corresponder aos pontos dos cristais preferencialmente afetados pela radiação, significando assim que a imagem latente se concentra em determinados "centros" dos cristais de Ag Br. Conclui-se que os cristais apresentam uma sensibilidade extremamente elevada nesses centros, o que, em outras palavras, implica na existência de "centros sensíveis" nos grãos da emulsão original.

Os centros sensíveis são formados por quantidades ínfimas de Ag_2S . Este fato foi verificado por Sheppard no decorrer dos seus estudos sobre a função da gelatina no estabelecimento da sensibilidade da emulsão. Ao isolar a substância responsável pela sensibilidade, ele verificou tratar-se de compostos de enxofre, presentes como impurezas na gelatina, especialmente o isotiocianato de alila. Este material produz tiocarbonida alílica em presença de álcali, e esta, um composto complexo com o brometo de prata. Ainda na presença do álcali, o complexo pode resultar em sulfeto de prata (Ag_2S). Aparentemente, esta é a seqüência de reações que ocorrem na manufatura de uma emulsão rápida e desta maneira a presença do Ag_2S é necessária quando se deseja um material fotográfico de

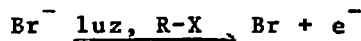
alta sensibilidade.

Muitas foram as teorias que procuraram esclarecer o modo de atuação dos pontos sensíveis de Ag_2S durante a exposição para dar lugar à imagem latente. Mas foi somente em 1938 que R.W.Gurney e N.F. Mott explicaram de modo satisfatório e mecanismo de formação da imagem latente. A teoria proposta é a seguir resumida:

Pela exposição à luz, os elétrons arrancados dos átomos de bromo (elétrons de fotocondutividade) deslocam-se livremente através do cristal e são detidos apenas se capturados nos pontos sensíveis de sulfeto de prata, onde desenvolvem uma carga elétrica negativa. Esta carga negativa irá atrair os íons livres de prata positivamente carregados (condutividade iônica), os quais irão migrar para o ponto sensível, sendo, então, neutralizados pelos elétrons que lá se encontram, formando átomos de prata neutros (prata metálica). O ponto sensível crescerá assim pelo acúmulo de átomos de prata até se tornar suficientemente grande para atuar como um núcleo no processo de revelação.

Os estágios envolvidos no mecanismo de Gurney - Mott podem ser sumarizados como se segue:

a) Absorção de um quantum de luz pelo cristal de brometo de prata, com a consequente liberação de um elétron do íon brometo.

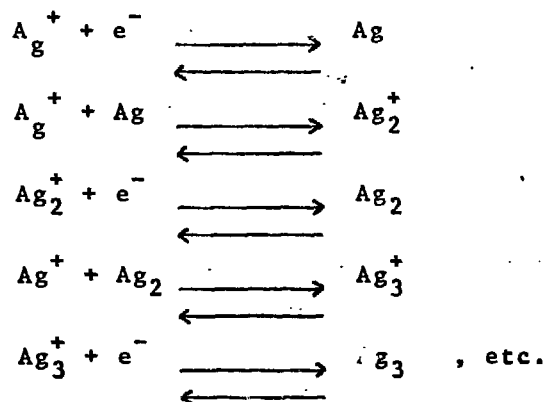


O elétron liberado movimentam-se pelo cristal até ser capturado em uma região de imagem latente ou armadilha, a qual adquire carga negativa (estágio da condução eletrônica).

b) A armadilha carregada negativamente atrai um íon prata intersticial e neutraliza a sua carga, o que resulta na deposição local de um átomo de prata e, consequentemente, no retorno da armadilha à sua condição primitiva (estágio da condução iônica)



c) O ciclo inteiro se repete nas demais armadilhas e várias vezes na mesma armadilha; cada ciclo envolvendo a absorção de um quantum e a adição de um átomo de prata ao agregado.



O agregado de átomos, Ag_n , é a imagem latente. A presença destes poucos átomos em uma única região de imagem latente torna o grão inteiro suscetível à ação redutora do revelador.

Os processos iônico e eletrônico responsáveis pela formação da imagem latente podem ocorrer sempre que uma quantidade suficiente de energia for transferida ao sistema. Em fotografia e em dosimetria, os tipos de transferência de energia que mais interessam são, naturalmente, aquelas decorrentes da exposição à luz e à radiação ionizante. Entretanto, no processo de fabricação da emulsão ou durante a sua estocagem pode se produzir uma imagem latente espúria (imagem latente produzida sem exposição), denominada de véu (fog) da emulsão. No caso da emulsão pronta, a ação de certos agentes como, por exemplo, a pressão física, temperaturas elevadas, altas umidades relativas e agentes químicos presentes na atmosfera, pode favorecer o desenvolvimento de grãos passíveis de revelação.

V. Efeito Schwarzschild ou Falha da Lei da Reciprocidade

A lei da reciprocidade de Bunsen-Roscoe (1862), inicialmente enunciada para reações fotoquímicas, estabelece que o efeito fotográfico (radiográfico) é constante para um dado produto da intensidade da radiação (I) pelo tempo de exposição (t), sendo independente dos valores absolutos de quaisquer das quantidades. Aplicado à radiografia isto significa que a intensidade revelada em um filme depende somente do produto da intensidade X ou gama que atinge o filme pelo tem

po de exposição.

Se a densidade ótica (efeito fotográfico) depende apenas da exposição, e não da taxa de exposição, duas irradiações diferentes, tomadas como exemplo, a primeira com duração de 6 segundos, efetuada com taxa de 1R/min., e a segunda com duração de 6/100 segundos e taxa de 100R/min., resultando em um mesmo valor de exposição, ou seja, 100mR, devem produzir o mesmo valor de densidade. Em outras palavras, é suficiente indicar o número de mA.s sem especificar a intensidade (mA) da corrente no tubo de raios-X, nem a duração da exposição.

As emulsões fotográficas não integram de forma rígida as exposições, em particular à luz visível. A teoria de Gurney-Mott permite explicar porque:

Sob intensidades de luz extremamente altas, a produção de fotoelétrons no cristal se torna tão elevada que o processo iônico associado, isto é, a migração de íons prata para os centros sensíveis não pode se desenvolver com velocidade suficiente de modo a assegurar a acomodação de todos os elétrons. De acordo com o mecanismo de Gurney-Mott, o elétron capturado deve ser neutralizado pelo movimento de um íon prata intersticial em direção à região em que ele se encontra antes que ocorra a captura de um segundo elétron, caso contrário o segundo elétron será repelido e talvez capturado em outro local. Por isso, quando os elétrons atingem um dado centro sensível mais rapidamente do que os íons poderiam fazê-lo, alguns elétrons são repelidos e o centro não se desenvolve com eficiência máxima. Em consequência da captura dos elétrons repelidos em outras armadilhas, a prata da imagem latente irá tender a se dividir ineficientemente entre diversas regiões de imagem latente.

De maior importância prática, pelo menos quanto à exposição com a luz visível, é a pronunciada falha da reciprocidade que se observa para intensidades de luz muito baixas. Ela resulta do fato de que vários átomos de prata são requeridos para produzir uma imagem latente. Um único átomo de prata em uma região de imagem latente é relativamente instável, dissociando-se facilmente em um elétron e um átomo de

prata positivo. Assim, se houver um intervalo de tempo maior entre a formação do primeiro átomo de prata e a chegada do segundo elétron de condução, o primeiro átomo de prata já terá sofrido dissociação, significando com isto que a energia do quantum de luz que o produziu foi perdida.

VI. Imagem Latente de Raios-X e Gama

Quando da exposição à luz, os eventos primários se produzem próximo à superfície do cristal. Entretanto, três classes de centros de sensibilidade adquirem importância à medida que a imagem latente "cresce", ou, em outras palavras, à medida que a exposição se prolonga ou que a intensidade luminosa aumenta. São estes:

- centros superficiais
- centros intermediários (aproximadamente a 10 distâncias reticulares da superfície).
- centros profundos

No caso da luz, intervém a capacidade de penetração no cristal, função do comprimento de onda, enquanto que para os raios-X todas as três classes de centros possuem igual interesse.

As diferenças mais notáveis entre a exposição dos grãos fotográficos aos raios-X e à luz visível provêm da diferença nas quantidades de energia envolvidas. A absorção de um único quantum de luz transfere uma quantidade muito pequena de energia ao cristal, suficiente apenas para liberar um único elétron do íon brometo (Br); vários quanta sucessivos de luz são necessários para tornar um único grão revelável.

O fotoelêtron ou o elétron Compton proveniente da absorção de um quantum de raios-X, ao atravessar um grão fotográfico, pode transmitir centenas de vezes mais energia ao grão do que a absorção de um quantum de luz e, se a sua trajetória na emulsão for suficientemente longa, muitos grãos tornam-se passíveis de revelação.

Todas as exposições com raios-X, no que concerne ao grão individualmente considerado, são extremamente cur

tas, pois o grão é exposto de forma completa pela passagem de um elétron energético. O tempo real que um elétron induzido pelos raios-X permanece no interior do grão depende da velocidade do elétron, das dimensões do grão e da geometria do impacto. Para fins de ilustração, pode-se considerar um tempo da ordem de 10^{-13} segundos como representativo para o evento.

No caso da luz, o "tempo de exposição" para um único grão é o intervalo entre a chegada do primeiro e do último quantum necessário para produzir uma imagem latente estável.

A exposição completa do grão fotográfico em um único evento e em tempo muito curto implica no cumprimento da lei da reciprocidade para exposição com raios-X. É o que se verifica com os filmes radiográficos comerciais, sob condições normais de processamento, em uma ampla região de intensidades de raios-X. A possibilidade de integrar satisfatoriamente as exposições aos raios-X, gama e beta, por uma extensa região de intensidades, é uma das vantagens do filme empregado como do símetro de radiação.

VII. Densidade Ótica

É naturalmente possível empreender a determinação direta da prata presente na emulsão revelada, através dos métodos de (a) análise química, (b) ativação por neutrons, (c) fluorescência de raios-X, ou (d) contagem dos grãos de prata ao microscópio. Na prática, contudo, essas técnicas são apenas esporadicamente empregadas e quase sempre nos casos das densidades que não podem ser facilmente medidas por meios fotométricos.

Em densitometria ótica determina-se ou a opacidade I_0/I ou o seu valor recíproco, a transparência I/I_0 , onde I_0 representa a intensidade da luz incidente sobre o filme escurcido e I a intensidade da luz transmitida. A densidade ótica, definida pelo logarítimo da opacidade,

$$D = \log I_0/I,$$

é, entretanto, a grandeza mais comumente usada. Este valor é aproximadamente proporcional ao número de grãos revelados por

unidade de área do filme e permite a adição direta das densidades de dois ou mais filmes quando superpostos.

A tabela 1 mostra a relação entre alguns valores de transparência (ou transmitância), opacidade e densidade.

<u>Transparência</u>	<u>Opacidade</u>	<u>Densidade</u>
1	1	0
1/2	2	0,301
1/4	4	0,601
1/8	8	0,903
1/10	10	1,0
1/100	100	2,0
1/1000	1.000	3,0

Tabela 1: Relação entre alguns valores típicos de transparência, opacidade e densidade.

Segundo a tabela, um aumento na densidade de 0,3 reduz a luz transmitida à metade do seu valor inicial. Uma variação de 1,0 na densidade implica em uma variação na luz transmitida de um fator de 10.

Uma densidade de valor 1,0 é dada por cerca de 1/10mg de prata por centímetro quadrado de área do filme,

$$D = 1,0 \approx 0,1 \text{ mg Ag/cm}^2$$

A densidade ótica é medida usualmente com um densitômetro fotoelétrico especialmente adaptado, uma vez que a lei de Beer não é válida para as emulsões fotográficas. Quando um feixe de luz paralelo incide sobre um filme escurecido, parte da luz transmitida é espalhada de modo difuso pela emulsão, enquanto a parte restante atravessa a emulsão livre de espalhamento (luz especular). O valor da razão entre a luz espalhada e a luz especular depende da forma, dimensões e distribuição dos grãos, densidade ótica, espessura da emulsão e outros fatores como a quantidade de água contida - A densidade ótica de uma emulsão úmida pode ser bastante diferente da densidade correspondente à mesma emulsão quando seca.

O quociente entre as densidades óticas nas medidas que incluem a luz espalhada e a especular (densidade difusa) e aquelas sob geometria que permite excluir a porção espalhada (densidade especular) é chamado coeficiente de Callier (Q). O valor de Q é normalmente baixo para filmes de granulação muito fina ($Q \approx 1$), mas pode alcançar um valor de 1,7 nas emulsões rápidas, de granulação grossa. O coeficiente de Callier é maior nas densidades menores, sendo função também do tipo da emulsão. Como o diâmetro médio dos grãos revelados depende da energia do fóton, o coeficiente de Callier para um mesmo filme pode variar substancialmente com a energia da radiação. A maioria dos densitômetros possui um vidro difusor em contato com o negativo e as leituras assim obtidas correspondem portanto à densidade difusa. O meio difusor mais satisfatório é uma esfera integradora. O olho humano observa somente a porção não-espalhada. Deste modo é perfeitamente possível que as densidades óticas de dois filmes, que aparentam exibir a mesma densidade visual, venham a se mostrar completamente di

ferentes quando medidas com um densitômetro, o qual também "vê" a luz espalhada, e vice-versa.

VIII. Curva Característica Densidade-Exposição

A densidade de um filme exposto, revelado e fixado, depende principalmente da quantidade de prata metálica depositada. É muito difícil medir diretamente a massa de prata responsável pelo escurecimento do filme e o método mais comum de "pesar" a prata depositada consiste em determinar a atenuação sofrida por um feixe de luz ao atravessar o filme. O modo mais difundido, de maior aceitação e mais conveniente de representar a resposta de um filme à luz ou raios-X, é através da sua curva característica (fig. 5). Este tipo de representação, usado desde 1890, é também conhecido como curva sensitométrica ou curva de Hurter e Driffield (curva H-D), e expressa a relação entre o logaritmo da exposição (eixo horizontal) e a densidade resultante (eixo vertical). A curva encerra cinco regiões distintas:

- Na primeira região, AoA, a densidade ótica(D) virtualmente não aumenta com o logaritmo da exposição (log X) - região de inércia.

- Na região AB, a densidade é proporcional à exposição - região de sub-exposição (toe).

- A região BC, é constituída essencialmente por uma linha reta onde a densidade é proporcional ao logaritmo da exposição - região da exposição correta.

- Na região CD, a densidade praticamente não aumenta com a exposição - região de superexposição (shoulder).

- Na região DE, a densidade ótica diminui apesar dos valores da exposição se tornarem cada vez maiores - região de solarização.

A curva característica permite ao usuário conhecer imediatamente os parâmetros fundamentais de uma emulsão.

A declividade (α) da curva característica de um material fotográfico, em um dado ponto da mesma, é representada pela declividade da tangente geométrica à curva no ponto e se denomina gradiente da curva. Tem como expressão:

$$\alpha = \frac{dD}{d(\log X)}$$

Realizando o prolongamento da porção linear da curva, BC, até sua interseção com o eixo das abcissas, obtém-se o valor X_i , chamado inércia. A reta BC pode ser expressa pela equação

$$D = \gamma (\log X - \log X_i),$$

onde γ é o fator de contraste caracterizado pela declividade da linha reta. Quantitativamente, o valor de gama, o gradiente máximo da curva característica, é dado por

$$\gamma = \frac{D_2 - D_1}{\log X_2 - \log X_1}$$

A maior exatidão possível nas aplicações dosimétricas é obtida com o uso de emulsão que possui um elevado valor de gama e quando as densidades óticas estão compreendidas na região correspondente ao gradiente máximo. O contraste da emulsão expressa nada menos que a capacidade do filme em distinguir duas exposições aproximadamente iguais.

O valor do gama aumenta com o tempo de revelação, tendendo a atingir, de modo exponencial, um certo valor infinito teórico (γ_∞); este parâmetro é calculado a partir da equação da cinética de revelação e corresponde a um tempo de revelação infinitamente longo. O gama infinito, fator de contraste limite, é uma das propriedades mais importantes dos materiais fotográficos. Entretanto, um valor demasiadamente elevado do gama infinito resulta em uma faixa de resposta menos ampla para o filme, comprometendo assim um outro requisito dosimétrico ainda que não tão importante.

A projeção da região BC sobre o eixo das abcissas é chamada latitude da emulsão. É a região de exposições ao longo da qual o filme pode ser aplicado sem receios.

A velocidade da emulsão (sensibilidade) depende do tamanho e da densidade dos grãos de brometo de prata. Nas aplicações práticas dos filmes radiográficos utilizam-se velocidades relativas, isto é, as velocidades são expressas em termos da velocidade de um dado filme em particular, cuja velocidade relativa é arbitrariamente tomada como igual a 100. As

sim, por exemplo, se o filme A, para atingir uma determinada densidade ótica de referência (geralmente $D=2$) consumir metade do tempo de exposição necessário ao filme B, tomado como "padrão", para alcançar o mesmo valor de densidade, o filme A é dito apresentar uma velocidade relativa de 200. Este filme é cinco vezes mais rápido que um filme C cuja velocidade relativa é 40 para a mesma densidade.

Com a finalidade de obter altas velocidades, as películas de uso corrente são dotadas de emulsão dupla.

Outra propriedade importante a assinalar é que a curva característica é independente da energia da radiação gama e beta, com exceção, naturalmente, das partículas beta de energias muito baixas, incapazes de penetrar por completo na camada da emulsão.

IX. Solarização

O fenômeno da solarização (figura 5) pode se constituir em uma possível fonte de erros na prática da dosimetria fotográfica. É atribuído a uma desexcitação dos centros sensíveis determinada pela reconversão em brometo de prata, da prata formadora daqueles centros, sob a ação dos átomos de bromo (provenientes da decomposição do AgBr da emulsão) que se difundem para a superfície dos grãos, quando a exposição atinge valores muito elevados. Como resultado forma-se uma camada protetora de halogeneto de prata sobre as faces externas do cristal e, conseqüentemente, os centros sensíveis (centros de revelação), constituídos por aglomerados de átomos de prata, tornam-se inacessíveis ao agente revelador, reduzindo desta maneira o grau de "revelabilidade" do grão..

Se a revelação for efetuada mais demoradamente, a solarização é reduzida por efeito de destruição da camada protetora.

Quando da escolha das emulsões para emprego em dosimetria, é necessário estar seguro de que a região de solarização se encontra distante das doses de radiação esperadas.

X. Dependência da Resposta pela Energia da Radiação

Apenas certas emulsões, extremamente sensíveis podem ser aplicadas na região do infravermelho próximo ou médio. Com o aumento da energia do fóton, a sensibilidade da emulsão torna-se maior no espectro visível, devido à crescente absorção no AgBr. Na região do ultravioleta, há perda de sensibilidade, produzida pela absorção na gelatina. Para a região do UV, empregam-se emulsões contendo quantidade reduzida de gelatina.

Röntgen (1897) já havia observado que o efeito fotográfico dos raios-X dependia também da energia envolvida. Esta dependência pela energia do fóton provém da alta concentração de átomos de número atômico (Z) elevado na camada sensível (AgBr). Na figura 6, observa-se a contribuição calculada dos vários mecanismos de absorção sobre o valor do coeficiente de absorção total do AgBr, em função da energia do fóton. Na figura 7, a curva anterior foi dividida por aquela do ar, de modo a se obter a resposta do AgBr, por unidade de exposição, em função da energia do fóton. Na curva, podem ser vistas as descontinuidades de absorção $K\alpha$ do bromo e da prata a 13,5 KeV e 25,5 KeV respectivamente, além de uma região plana de mínimos compreendida entre $\sim 0,8$ e ~ 4 MeV.

Embora a razão calculada entre a resposta máxima por unidade de exposição, que ocorre a 40 KeV, e a resposta mínima seja da ordem de 150 (figura 7), os valores reais observados na prática são bastante inferiores e situam-se de modo geral entre 12 e 50. Esta diferença considerável é atribuída não só à presença da gelatina na emulsão como aos demais materiais de Z reduzido que constituem o filme (base, envólucro).

Muitos esforços substanciais têm sido feitos para reduzir a dependência da resposta de energia inerente aos filmes fotográficos. Na realidade, esta dependência torna-se menos pronunciada com a) o aumento do diâmetro do grão; b) a inclusão de determinados aditivos (Cd, Au e compostos de enxofre), c, a "diluição" do AgBr na camada da emulsão, resultando em um aumento da contribuição da gelatina aos elétrons fotograficamente efetivos; e d) com a revelação completa da ima

gem interna, suprimindo-se a revelação de superfície. Combinando-se todos estes fatores, já se produziram experimentalmente filmes apresentando uma dependência da energia significativamente inferior àquela dos filmes usualmente conhecidos. Infelizmente, estes filmes não são necessariamente muito estáveis e/ou sensíveis.

XI. Estabilidade dos Materiais Fotográficos

Obviamente algumas das propriedades dos filmes fotográficos de elevada importância na fotografia convencional (como, por exemplo, a resposta espectral), são pouco significativas para a dosimetria com filmes. Em contrapartida, fatores tais como a estabilidade em função do tempo e das condições de estocagem, que normalmente não interessam ao fotógrafo comum, requerem uma atenção especial se o filme se destinar a funcionar como um dosímetro integrador a longo prazo.

A limitada estabilidade de armazenamento é uma das desvantagens mais cruciais do filme fotográfico e restringe drasticamente o seu emprego em muitas áreas de aplicação, especialmente em dosimetria pessoal.

A estocagem prolongada de filmes recém-produzidos, particularmente em ambientes úmidos e quentes, produz os seguintes efeitos:

a. Vêu ou "fogging" (crescimento da densidade ótica "background") - parcialmente devido à radiação "background" natural, mas causado principalmente pela formação de centros de prata reveláveis induzidos termicamente ou vêu químico acelerado termicamente;

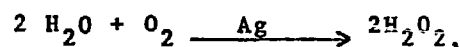
b. Alterações irreversíveis na sensibilidade e outras características de resposta;

c. "Aderência" da camada da emulsão ao invólucro do filme, com destruição parcial ou total da emulsão, ocorrendo quando o mesmo é aberto na câmara escura para fins de processamento.

d. Crescimento microbiológico na gelatina, um excelente meio de cultura para várias bactérias e fungos, o que também pode resultar em destruição total da camada sensível.

Constitui uma observação bastante comum o fato de um filme dosimétrico casualmente esquecido, por exemplo, no interior do porta-luvas de um automóvel estacionado sob o sol do verão, ser capaz de apresentar uma densidade ótica bastante elevada que se confunde com uma exposição à radiação gama. O mecanismo do veu termico e o papel desempenhado pela umidade não estão ainda hoje perfeitamente elucidados, mas ao que parece um veu termico de pouca monta ocorre à temperaturas abaixo de 45 - 50°C para períodos reduzidos de estocagem, enquanto que acima deste nível de temperatura ele rapidamente se acelera (figura 8) e um veu termico máximo deve ocorrer para valores de umidade relativa da ordem de 50%. Para valores mais elevados de umidade, os efeitos de desvanescimento irão provavelmente contrabalançar a formação da imagem latente espúria.

Muito mais problemático que esses efeitos, normalmente fáceis de detetar, é o efeito de desvanescimento (fading) da imagem latente, que tem lugar após a exposição do filme. O desvanescimento é parcialmente devido à dissociação termica dos centros de revelação, mas, principalmente, produzido pela ação química combinada do oxigênio e da umidade sobre os pontos correspondentes à imagem latente. Pode-se imaginar o processo envolvido, de um modo supersimplificado, como sendo representado por uma reação catalizada pela prata,



na qual o peróxido de hidrogênio resultante destrói o agente catalizador, isto é, a prata dos centros de revelação (agregados constituídos por aproximadamente 4 a 10 átomos de prata). Este processo é responsável por cerca de 90% do desvanescimento total.

Os centros de revelação estão localizados, de modo geral, na superfície do microcristal (grão) mesmo quando a ionização original teve lugar no interior do grão. As emulsões de granulação muito fina, com grande área de superfície, frequentemente apresentam maior grau de desvanescimento que aquelas de granulação grossa.

Sendo um processo químico, o "fading" é fortemente acelerado por elevações na temperatura de estocagem. A

cinética não é simples, porém o desvanescimento da densidade ótica, induzida pela radiação, pode ser descrito aproximadamente por meio de uma função linear do logarítmo do tempo. Os efeitos superpostos do desvanescimento e do véu podem conduzir a uma densidade ótica de "equilíbrio" em filmes dosimétricos, independentemente da exposição dos mesmos à radiação. Este efeito é mostrado na figura 9. A figura 10 apresenta os resultados obtidos com o filme Kodak Personnel Monitoring Type 2, o qual sofre um desvanescimento de 60% no prazo de 4 semanas, sob umidade relativa de 75 - 95% (Becker, 1972). Com este mesmo tipo de filme, observa-se um desvanescimento de 100%, ocorrido no intervalo de 6 dias, em ambiente extremamente úmido (figura 11), registrando-se inclusive leitura negativa para a dose gama aparente, uma semana após o início da experiência, devido ao desvanescimento do próprio véu de "background" (Christensen et al, 1973).

Paralelamente à dependência pela umidade e pela temperatura, a taxa de desvanescimento depende também do nível da dose e da energia do fóton. Este fato foi verificado experimentalmente com filmes de raios-X de emulsão lenta, expostos respectivamente aos raios-X de baixa energia e à radiação de uma fonte de ^{60}Co : um mês após a exposição aos raios-X nenhum "fading" foi observado, mas um desvanescimento de 30% havia ocorrido neste mesmo período com os filmes irradiados com o ^{60}Co (Herz, 1969).

Para o filme Kodak Personnel Monitoring Type 3, selado em invólucro de PVC, a experiência mostra que um desvanescimento superior a 90% ocorre sob umidade relativa (u.r.) de 96%, um mês após a exposição do filme a 500 mR com radiação do ^{60}Co . Com u.r. de 83% o desvanescimento constatado, decorridos 20 dias após a mesma exposição, é da ordem de 30%. Ainda na u.r. de 83%, porém com exposição de 1.500mR, o valor do desvanescimento no mesmo período cresce para $\sim 60\%$. Entretanto, 30 dias após as exposições de 500 e 1.500 mR, o efeito do desvanescimento é, em ambos os casos, maior que 70% e os valores medidos não diferem entre si por mais de $\sim 10\%$ (I.R.D.-1975).

Em princípio, é possível reduzir o "fading" através de modificações da emulsão ou da supressão dos centros

de revelação localizados na superfície (a imagem interna é mais estável). Mais efetiva é a exclusão do oxigênio, ou, muito melhor ainda, da umidade. Infelizmente, a gelatina é uma substância altamente higroscópica; capaz de absorver grandes quantidades de água. A 75% de u.r., ela pode conter 20% de água em peso.

Alguns fabricantes de filmes dosimétricos procuraram eliminar a umidade, selando os filmes secos com folhas de polímeros. A permeabilidade dos polímeros ao vapor d'água varia grandemente e depende de diversos fatores, tais como a sua densidade, cristalinidade, orientação e interligação / (crosslinking) das moléculas, e dos aditivos. A etil celulose, por exemplo, é mais permeável que certos tipos de teflon por um fator superior a 10^4 . Muitos polímeros são obviamente muito "transparentes" ao vapor d'água, mas mesmo a película mais "impermeável" tem uma permeabilidade mensurável. A taxa de transmissão do vapor d'água depende da temperatura e do gradiente da pressão de vapor através da película. A transmissão do vapor d'água é mais pronunciada se um filme completamente seco estiver contido no interior do invólucro, sob condições de umidade e temperatura muito elevadas (climas tropicais).

A barreira mais eficiente contra o vapor d'água se constitui numa folha composta de plástico - alumínio - papel, do tipo empregado na confecção das embalagens de certos medicamentos e normalmente usado pela indústria fotográfica para proteger os pacotes de filmes novos. Na folha protetora, a película do metal atua como a barreira real, enquanto a presença do polímero permite que se efetue o fechamento do invólucro a quente, utilizando-se a extremidade reservada para este fim (margem de ~ 5 mm). O dosímetro fotográfico Kodak-Pathé Tipo 1 foi o único a utilizar este tipo de invólucro para proteção individual do filme (o qual consistia de uma base de papel coberta com diferentes emulsões para a dosimetria das radiações X e gama).

Supõe-se, via de regra, quando do recebimento dos pacotes de filmes novos adquiridos da Kodak, que os filmes

foram previamente dessecados antes da fase de empacotamento e selagem. De fato, os filmes são selados após um período de permanência em equilíbrio à temperatura de 21°C e 40 - 50% de u.r. Por tal razão, os filmes devem ser mantidos no interior de um dessecador até à época da realização de qualquer acondicionamento adicional posterior. Contudo, mesmo uma selagem extremamente cuidadosa em folha de plástico-alumínio-papel não será suficiente para evitar a ocorrência de desvanescimento substancial, devido à exposição prolongada às condições ambientais dos climas tropicais mais rigorosos. Os dosímetros Kodak Personnel Monitoring Type 3, selados com esta modalidade de folha protetora e nos porta-filmes (badges) de PVC, mantidos durante 50 dias em ambiente com umidade relativa de 96% e temperatura de ~ 20°C evidenciaram um desvanescimento de cerca de 10%, ilustrando, assim, o alto grau de proteção proporcionado pelo invólucro (IRD - 1975).

B I B L I O G R A F I A

- Mees, C.E. and James T.H., editors. - The Theory of the Photographic Process (1966), 3rd ed. Mac millan, New York.
- Herz, R.H. - The Photographic Action of Ionizing Radiation (1969), Interscience, New York.
- Becker, K. - Photographic Film Dosimetry (1966) - Focal Press, London.
- Kozlov, V.F. - Photographic Dosimetry of Ionizing Radiations (1966) - Israel Program for Scientific Translations Ltd, Jerusalem.
- Eastman Kodak Company - Radiography in Modern Industry (1969), 3rd ed., New York.
- Instituto de Radioproteção e Dosimetria - Relatório Anual Detalhado (1975), Rio de Janeiro.
- Becker, K. - Solid State Dosimetry (1973), CRC Press, Ohio.
- Eastman Kodak Company - Kodak Personal Monitoring Films (1971), New York.
- Encyclopedia Britannica - Photography (1955), vol. XVII
- Ehrlich, M. - The Use of Film Badges for Personnel Monitoring (1962), Safety Series n° 8, IAEA, Vienna.

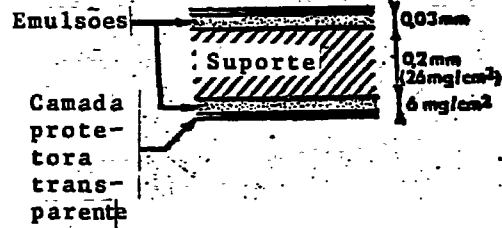


Fig. 1 - Corte transversal de um filme radiográfico de camada dupla.

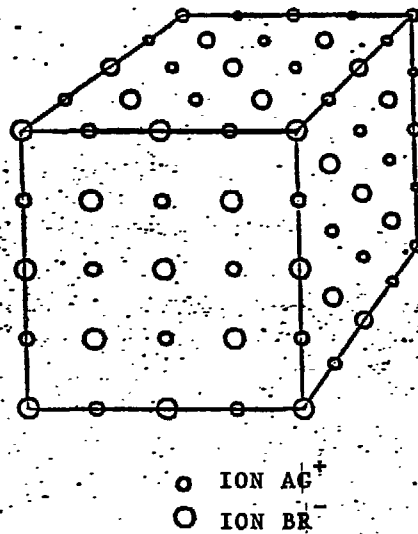
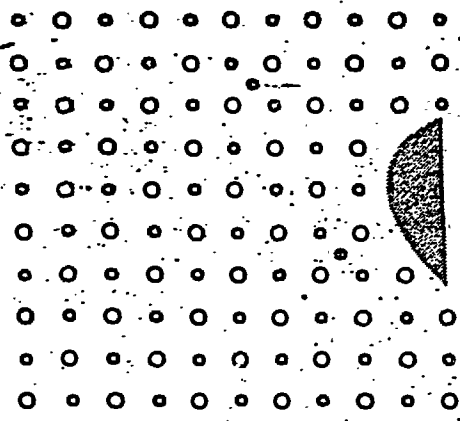


Fig. 2 - Arranjo retangular de ions prata (Ag^+) e brometo (Br^-) em um cristal de brometo de prata.



◐ ION Ag^+ ◉ ION PRATA INTERSTICIAL
 ○ ION Br^- ◑ REGIÃO DE IMAGEM LATENTE

Fig. 3 - "Representação no plano" da camada de ions de um cristal similar ao da figura 2. A região de imagem latente é mostrada esquematicamente e dois ions prata intersticiais são indicados na figura.

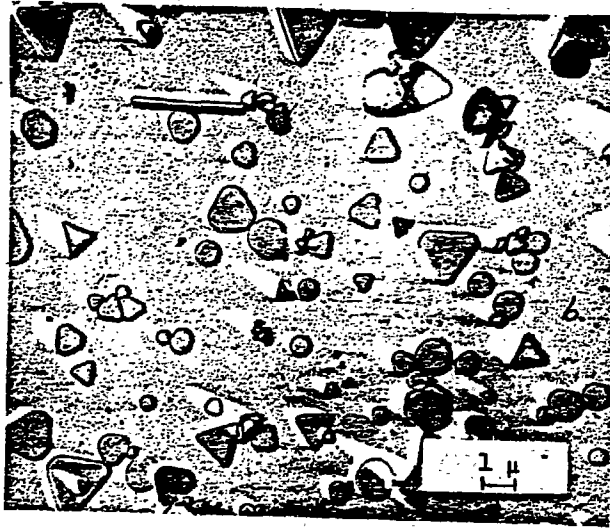


Fig. 4 - Grãos da emulsão mais sensível de um filme de raios-X.

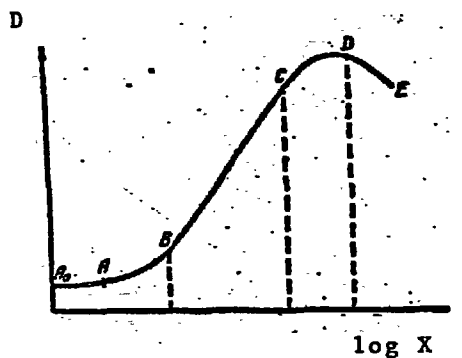


Fig. 5 - A densidade D em função do logaritmo da exposição X

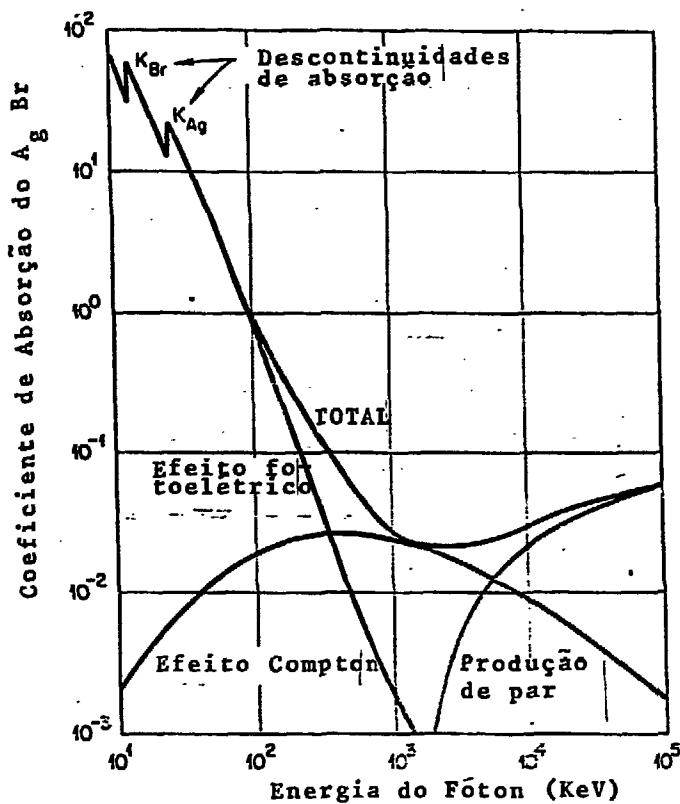


Fig. 6 - Coeficientes de absorção calculados para os diferentes mecanismos de absorção do fóton e absorção total de energia no brometo de prata (Mauderli, 1957)

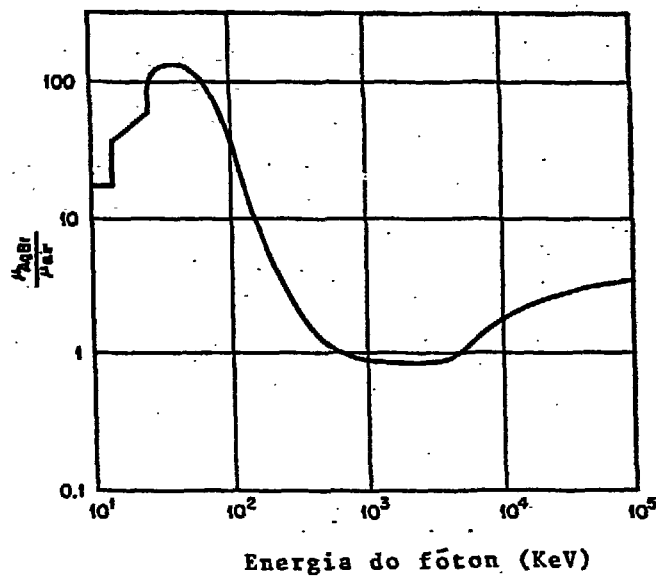


Fig. 7 - Dependência (calculada) da interação do fóton com o Ag Br puro, pela energia da radiação (Becker, 1966)

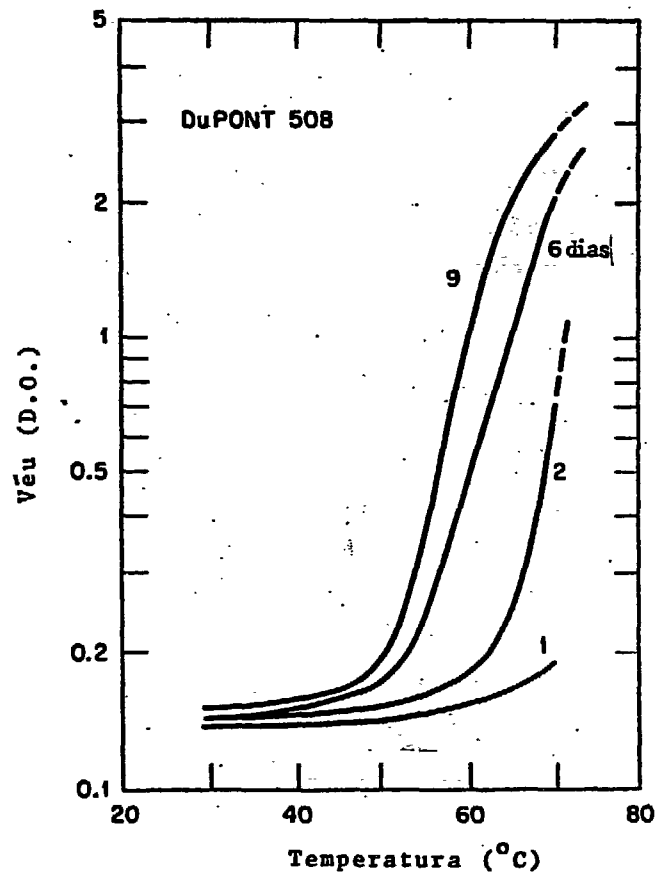


Fig. 8 - Vêu térmico produzido em filmes, sem irradiação prévia, devido a estocagem por diferentes intervalos de tempo a temperaturas elevadas (Kathrén, 1966)

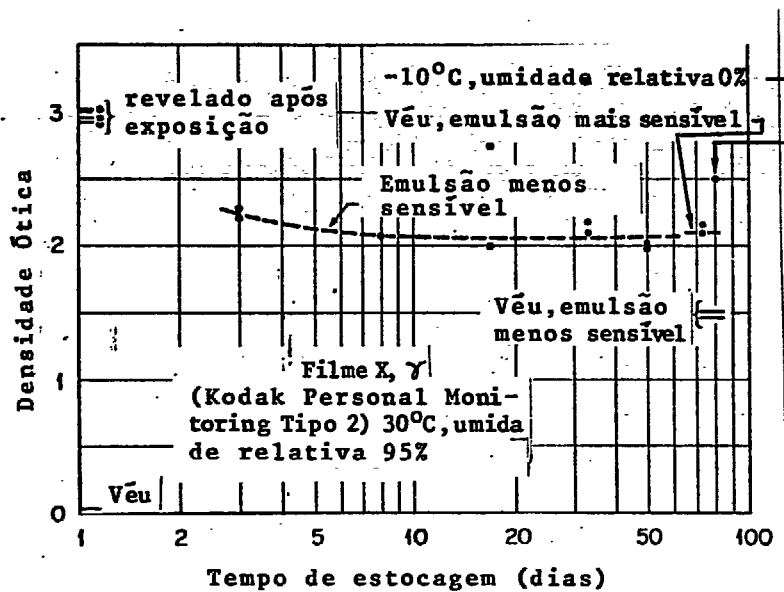
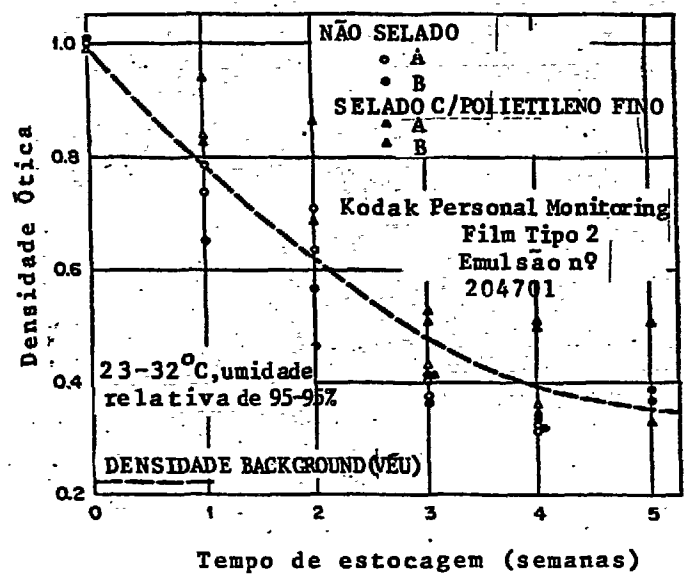


Fig. 9 - Desvanescimento e formação do vêu na emulsão menos sensível do filme Kodak PM Tipo 2 durante três meses de estocagem sob clima tropical simulado (30°C, U.R. de 95%). (Becker)



- .A - Estocagem em abrigo ao ar livre
- .B - Estocagem no laboratório

Fig. 10 - Densidade ótica de filmes Kodak Personal Monitoring Tipo 2 (emulsão mais sensível) expostos a radiação gama (1R - ^{60}Co) em função do tempo decorrido entre a exposição e o processamento (simultâneo) dos filmes. (Becker, 1972).

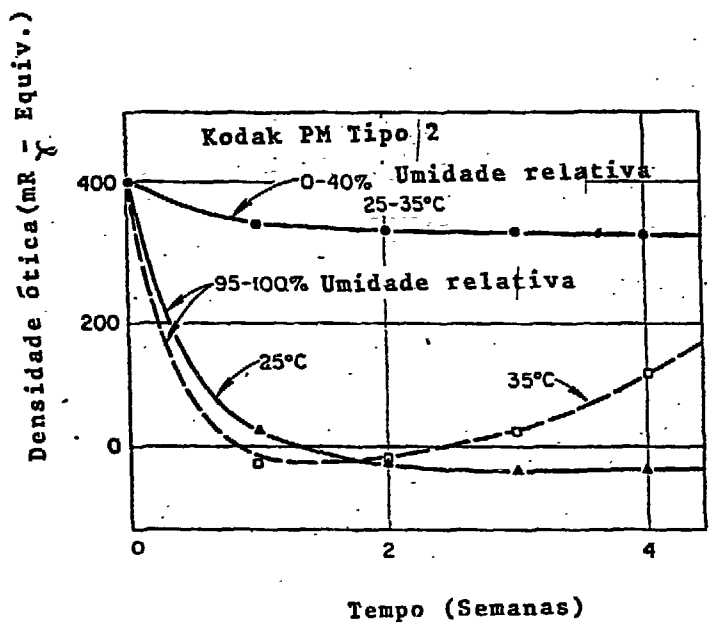


Fig. 11 - Desvanescimento da densidade ótica, expressa em termos de mR aparentes de radiação gama, no filme Kodak PM Tipo 2, provocado por estocagem a 25°C e 35°C e sob diferentes condições de umidade relativa (Christensen et al., 1973)

