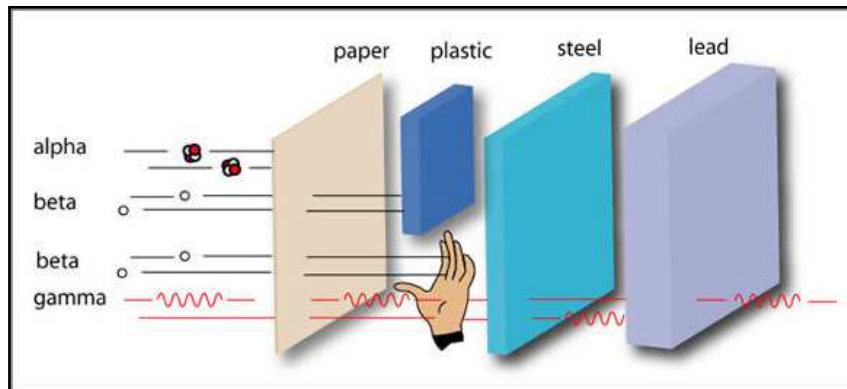


RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA

RADIAÇÕES IONIZANTES E RADIONUCLÍDEOS



Helena Matias
(Coordenadora da Comissão de Segurança)

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	2
1. Estrutura atômica, emissão de radiação e decaimento	2
2. Fontes de radiação	4
3. Interação da radiação com a matéria e bloqueio da radiação	5
3.1 Interação com partículas α	5
3.2 Interação com partículas β	6
3.3 Interação com radiação γ	7
4. Detecção de radioatividade	7
4.1 Detetores de ionização	8
4.2 Detetores de cintilação	9
4.3 Detetores fotográficos	10
4.4 Equipamentos de detecção de radiações e suas aplicações	10
5. Exposição a radiações ionizantes	12
5.1 Exposição a radiação externa	14
5.2 Exposição a radiação interna	14
5.3 Manipulação de fontes de radioatividade	15
5.4 Proteção pessoal e risco de exposição a radiações ionizantes	16
5.4.1 Radionuclídeos de baixa energia (< 250 keV) – ex: ^3H , ^{14}C , ^{33}P e ^{35}S	17
5.4.2 Radionuclídeos de elevada energia – ex: ^{32}P e ^{125}I	18
5.4.3 Controlo de exposição - Serviço individual de dosimetria	19
5.5 Recolha e tratamento de resíduos radioativos	20
5.5.1 Resíduos sólidos	20
5.5.2 Resíduos líquidos	21
5.6 Procedimento de descontaminação radioactiva	22
5.6.1 Geral	22
5.6.2 Superfícies (bancadas ou chão)	23
5.6.3 Pele	24
5.7 Utilização do laboratório de radionuclídeos	25
BIBLIOGRAFIA	27
ANEXOS	
Anexo 1 - Glossário de unidades	28
Anexo 2 - Equivalência de unidades em radiação:	28
Anexo 3 - Tabela de parâmetros relativos aos elementos radioativos mais utilizados	29
Anexo 4 - Cálculo da dose de radiação pessoal recebida por um trabalhador ao manipular compostos marcados com ^{32}P (exemplo)	31
Anexo 5 - Valores de isenção de notificação às autoridades para utilização de alguns radionuclídeos mais utilizados (conforme a Diretiva do Conselho 96/29/Euratom)	32
Anexo 6 - Classificação radiotóxica de radionuclídeos – elementos mais representativos (conforme a Diretiva do Conselho 84/467/Euratom)	33

INTRODUÇÃO

Este manual pretende transmitir alguns conhecimentos gerais sobre radiações ionizantes, utilização de radionuclídeos em contexto laboratorial, conceitos de segurança e medidas de proteção que devem ser adotadas durante a manipulação de substâncias radioativas.

A aquisição e manipulação de compostos marcados com radionuclídeos requer uma licença oficial emitida pelas entidades responsáveis pela utilização de radiações ionizantes (Campus Tecnológico e Nuclear, CTN-IST) e saúde pública (Direcção Geral de Saúde). **O ITQB NOVA possui licença restrita para aquisição de pequenas quantidades anuais de compostos marcados com ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , e ^{35}S a serem manipulados apenas em laboratórios específicos.** Assim, todos os grupos de investigação que pretendam utilizar pela primeira vez radionuclídeos devem dirigir-se ao responsável de segurança para Risco de Exposição a Radiações Ionizantes (ver <http://www.itqb.unl.pt/about-us/organization/health-and-safety>) ou à Comissão de Segurança (ver <http://www.itqb.unl.pt/internal/safety/safety> ou por e-mail para itqb.safety@itqb.unl.pt) antes de iniciar um projeto de investigação a fim de se informarem sobre os requisitos a cumprir e as restrições inerentes à licença concedida ao ITQB NOVA.

1. ESTRUTURA ATÓMICA, EMISSÃO DE RADIAÇÃO E DECAIMENTO

Toda a matéria é composta por átomos. Cada átomo possui um núcleo carregado positivamente e por uma “nuvem” de eletrões que se movem à sua volta. O núcleo contém dois tipos de partículas: protões e neutrões. A caracterização de cada átomo é feita através do número atómico, designado pela letra Z, referente ao número de protões, e pelo número de massa, designado pela letra A, referente à soma das partículas nucleares, protões (Z) e neutrões (N). Os átomos que têm o mesmo número Z e números diferentes de N, têm também o mesmo número de eletrões e, consequentemente, as mesmas propriedades químicas; são chamados isótopos. Átomos que têm números diferentes de Z e de N mas cujo número de massa A é o mesmo são chamados isobares. A quantidade de energia de núcleos com a mesma composição pode variar. Estes núcleos podem estar em estados excitados, sendo, nestes casos, chamados isómeros. Os átomos de todos os elementos podem ser denominados nuclídeos. Para a designação inequívoca de um nuclídeo usa-se a notação ^A_ZX ; quando X é substituído pelo símbolo químico do elemento, Z pode ser omissa.

Em teoria, variando Z e N pode ser formado um número infinito de combinações. No

entanto, o número de combinações conhecidas é limitado (cerca de 1900). O valor máximo de Z é 107 e o de N é 159. Entre as várias possibilidades de combinações apenas 267 correspondem a átomos estáveis, sendo as restantes instáveis. Os núcleos com combinações instáveis tendem a adquirir configurações estáveis emitindo radiação de elevada energia. Estes átomos denominam-se radionuclídeos ou radioisótopos e a estabilidade depende, principalmente, da razão N/Z .

A composição e o estado energético do núcleo determinam a sua estabilidade ou instabilidade e também o modo de decaimento. Um núcleo pode ter excesso de prótons, neutrões ou energia. Cada estado origina um modo específico de decaimento. Os principais modos são:

- a) Um núcleo com excesso de neutrões pode atingir um estado energético mais estável emitindo uma partícula β^- (acompanhada de um neutrino, $\bar{\nu}$), tendo como resultado a transformação de um neutrão em próton. A partícula β^- é fisicamente semelhante a um eletrão e é a emissão de radiação que torna o processo de decaimento detetável.
- b) Quando existe falta de neutrões (o que é equivalente a um excesso de prótons) o núcleo pode atingir um estado energético mais estável de duas formas: captura de eletrões (indicado por EC ou ϵ) ou emissão de positrões. No primeiro caso o núcleo captura um eletrão da camada mais interna (K); consequentemente, um próton do núcleo é transformado em neutrão e liberta-se um neutrino. Como resultado uma orbital fica desocupada e é preenchida imediatamente por outro eletrão das camadas mais externas resultando na emissão de energia sob a forma da radiação eletromagnética. Esta energia é relativamente elevada e o fóton resultante é bastante penetrante. A radiação eletromagnética gerada é denominada radiação X característica (a energia que a caracteriza é específica do átomo que a originou). Esta radiação torna o processo de decaimento detetável e é responsável pelo risco de exposição a radiações.

No segundo caso o núcleo emite uma partícula β^+ (acompanhada de um neutrino). Esta partícula, chamada positrão ou antipartícula, é semelhante a um eletrão com carga positiva. Do mesmo modo que a partícula β^- , a partícula β^+ é facilmente detetada.

- c) Os núcleos pesados, especialmente aqueles que têm excesso de prótons, tornam-se estáveis emitindo uma partícula que consiste em dois prótons e dois neutrões, denominada partícula α . De facto, esta partícula é idêntica a um núcleo de hélio: He^{2+} . Trabalhar com núcleos emissores de partículas α envolve um risco muito mais elevado do que com núcleos emissores de partículas β ou radiação γ . Tal é devido ao efeito de embate por se tratar de partículas com massa relativamente elevada; como consequência os emissores de partículas α podem dispersar-se espontaneamente causando um risco extra de contaminação interna.

Adicionalmente, e como regra, os emissores de partículas α são considerados mais radiotóxicos do que os emissores de partículas β ou de radiação γ .

- d) Quando um núcleo decai pelos métodos acima mencionados, nem sempre se transforma de imediato num elemento estável. O decaimento α ou β é, normalmente, seguido de emissão de radiação eletromagnética que remove o excesso de energia. Este tipo de radiação é denominado radiação γ e o processo designado decaimento γ . O núcleo emite um fóton, fóton- γ . Geralmente, a radiação γ é facilmente detetável por se tratar de energia relativamente elevada.

Para além do decaimento γ existe um segundo processo pelo qual o núcleo pode perder energia, a conversão interna (indicado por IC). Este processo envolve a transferência direta da energia do núcleo para um eletrão, geralmente, da camada mais interna. O eletrão, com energia elevada, é ejetado da sua órbita e pode ser detetado do mesmo modo que as partículas β . Deixa vaga uma orbital a qual é imediatamente ocupada por outro eletrão e emissão de raios-X, também detetável.

2. FONTES DE RADIAÇÃO

As fontes de radiação podem ser naturais (ex. radionuclídeos, radiação cósmica, etc.) ou artificiais (ex. geradores de raios X, reatores nucleares, etc.) e existem, também, duas formas distintas de as usar: fontes seladas ou fontes abertas.

Define-se fonte selada como sendo aquela em que o material radioativo se encontra encapsulado ou aderente a um material sólido de suporte, de tal forma que, quer o suporte quer o material exterior, oferecem resistência suficiente e impedem, sob condições normais de utilização, qualquer dispersão de substâncias radioativas no meio ambiente. Estas fontes têm diversas aplicações. O tipo de radiação, a sua energia e a atividade da fonte variam de acordo com aplicação. São exemplos:

- Radiografia industrial
- “Fotografia” de soldaduras em tubagens;
- Medição da espessura de materiais como o aço, vidro, borracha e outros (também chamada gamagrafia)
- Medição do fluxo em tapetes de transporte, tubagens e do nível de enchimento de contentores;
- Medição da espessura de materiais finos ou leves como o papel, do tabaco em cigarros e

de diversos tipos de folhas/chapas/placas.

Os métodos analíticos que usam fontes seladas incluem a fluorescência de raios-X, os detetores iônicos de cromatógrafos e os padrões externos usados nos contadores de cintilações. Em medicina e na indústria alimentar as fontes de radiação são usadas em gamaterapia, braquiterapia e na esterilização de materiais e de alimentos. Na vida diária são usadas nos detetores de fumo que integram os sistemas de proteção contra incêndio dos edifícios.

São consideradas fontes abertas todas as restantes fontes em que o material se pode dispersar livremente no meio ambiente. São usadas fontes radioativas abertas em investigação médica, em radioterapia, em investigação química e biológica e na indústria para seguir fluxos em processos industriais. Na maioria dos casos são usadas quantidades extremamente pequenas de materiais radioativos (do ponto de vista químico) mas estas substâncias podem ter atividades elevadas. Estas aplicações exigem que sejam tomadas precauções de proteção quer em relação à exposição a radiação externa quer à possibilidade de contaminação interna. É, ainda, necessário aplicar medidas específicas de proteção ambiental e pessoal.

3. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA E BLOQUEIO DA RADIAÇÃO

3.1 Interação com partículas α

As partículas α são, geralmente, muito energéticas (MeV). Devido ao seu tamanho, quando atravessam os materiais, as partículas transferem a sua energia principalmente para os eletrões ejetando-os da camada que ocupam. Outro eletrão de uma camada mais externa preenche de imediato o espaço livre. Este processo pode conduzir, eventualmente, à falta de eletrões nas camadas eletrónicas mais externas originando um átomo carregado positivamente, um ião. Estas interações ocorrem com frequência elevada, conduzindo a ionizações consecutivas nos átomos mais próximos e estas à formação de novos iões. Devido ao facto de possuírem uma massa elevada quando comparada com a do eletrão, as partículas α deslocam-se quase sempre em linha reta. O alcance máximo de partículas α com energia de 5 MeV é de apenas 3 cm no ar e em materiais sólidos ou líquidos decresce aproximadamente 1000 vezes ($\sim 30 \mu\text{m}$). Como o alcance destas partículas é muito curto não é necessário usar barreiras de proteção de radiação externa. Mesmo a pequena distância, as partículas α não atravessam a camada de células que constitui a epiderme ($\sim 70 \mu\text{m}$). No entanto, se for ingerida uma fonte de radiação α , a contaminação interna

é muito grave (formam-se lesões provocadas por ionização a curta distância que são difíceis de reparar), indetetável e muito difícil de eliminar.

3.2 Interação com partículas β

A radiação β , emissão de partículas β^- ou β^+ , pode ser absorvida segundo cinco tipos de interação possíveis: colisões elásticas com elétrons, colisões inelásticas com elétrons, emissão de radiação X (*Bremsstrahlung*), emissão de radiação de Čerenkov e radiação de aniquilação (apenas para partículas β^+).

As partículas β são, fisicamente, idênticas a elétrons. Da colisão elástica com os elétrons fortemente ligados a um núcleo resulta apenas o desvio da trajetória da partícula β , sem que ocorra qualquer transferência de energia. Assim, as partículas continuam a mover-se com a mesma energia mas segundo trajetórias aleatórias.

As colisões inelásticas entre partículas β e elétrons são as mais importantes e também as mais eficazes relativamente à transferência de energia, provocando a ionização dos materiais tal como sucede por interação com partículas α . Por serem partículas muito pequenas, a densidade de ionização é cerca de 1000 vezes inferior à que resulta da interação com partículas α com a mesma energia, mas o seu alcance é inversamente proporcional (cerca de 1000 vezes superior).

Sempre que uma partícula β passa muito perto do núcleo de um átomo, a sua trajetória é defletida pela carga nuclear, perdendo energia que é libertada sob a forma de radiação eletromagnética (radiação X, também denominada *Bremsstrahlung*). Quanto maior for a energia das partículas β e maior for a carga dos núcleos (Z) com que interatuam, mais importante é a contribuição deste efeito quando comparado com o que resulta da colisão inelástica com elétrons. Por exemplo, a utilização de uma barreira de chumbo ($Z=82$) como proteção da radiação β emitida por ^{32}P ($E_\beta=1.7$ MeV) faria com que cerca de 3% da energia deste radionuclídeo fosse convertida em radiação X. Para evitar este efeito devem ser usados materiais com número atómico baixo na construção de barreiras de proteção de radiação β como por exemplo o Perspex (vidro acrílico).

Quanto maior é a energia das partículas, maior é a sua velocidade. Quando as energias são superiores a 250 keV a velocidade das partículas β aproxima-se da velocidade da luz no vácuo. Se uma partícula β com energia elevada emergir do núcleo, a sua velocidade pode ser superior à velocidade da luz no meio envolvente (a qual está relacionada com o índice refrativo do material). Nesta situação a partícula emite energia sob a forma de fótons com comprimento de onda na gama visível-ultravioleta; esta radiação é conhecida como radiação de Čerenkov. A quantidade de energia emitida é muito pequena; dificilmente as partículas β são desaceleradas por este tipo de interação.

RADIAÇÕES IONIZANTES E RADIONUCLÍDEOS

Embora a radiação de Čerenkov não tenha propriedades ionizantes, a detecção dos fótons permite identificar a existência de radiação.



Foto do tanque de arrefecimento do Reator de Testes Avançados (Idaho National Laboratory) mostrando radiação de Čerenkov

(https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation, consultado em Setembro de 2017)

A radiação de aniquilação resulta da interação de uma partícula β^+ com um eletrão. Neste processo ambas as partículas desaparecem e são convertidas em dois fótons γ , cada um com a energia de 0.511 MeV. Surge, assim, um novo tipo de radiação que pode interagir com a matéria. Sempre que o trabalho envolva a utilização de fontes de emissão de partículas β^+ , as barreiras de proteção a utilizar deverão conferir também proteção contra radiação γ .

3.3 Interação com radiação γ

As radiações X e γ são fótons, e os fótons não possuem carga nem massa. Atravessam o meio sem se deterem porque se movem à velocidade da luz. Ao contrário das partículas α ou β , as quais vão gradualmente perdendo velocidade e energia ao interagirem com o meio, um fóton γ perde toda a sua energia numa única interação e cessa de existir ou transforma-se num fóton de energia mais baixa. A interação de um fóton com a matéria tem uma certa probabilidade de ocorrência e segue a mesma formulação que descreve o decaimento radioativo.

4. DETECÇÃO DE RADIOATIVIDADE

A interação da radiação ionizante com a matéria conduz, principalmente, à dissipação da energia de uma forma que não é percebida pelos nossos sentidos: não se vê, ouve, sente ou cheira. Quando se sente o seu efeito (sensação de queimadura ou dor) é tarde demais porque já ocorreram danos biológicos irreversíveis. Por esta razão, a escolha dos equipamentos de detecção de radiações depende da finalidade a que se destinam: identificação da fonte, contagem quantitativa, determinação do nível de radiação e registo de contaminação radioativa.

A detecção de radiação é baseada na interação da própria radiação com o material do detetor originando a sua ionização e excitação. As interações ionizantes conduzem à formação de íons. O processo de excitação é devido à interação da radiação com um eletrão das camadas eletrónicas mais externas de um átomo, o qual passa a ocupar uma orbital de energia mais elevada. O retorno ao estado fundamental (perda de energia) dá origem à emissão de fótons de baixa energia, na gama da radiação visível. Este fenómeno é denominado cintilação.

Existem dois tipos de detetores de ionização: detetor cheio com um gás ou em estado sólido (semicondutor). Existem também dois tipos de detetores de cintilação: cintiladores em estado sólido e cintiladores em estado líquido.

4.1 Detetores de ionização

O detetor de ionização com gás tem, normalmente, a forma de um cilindro metálico cheio com gás Xe, na maioria dos casos, sujeito a um campo elétrico formado entre dois elétrodos (positivo e negativo). A captura de uma partícula pelo detetor origina a formação de um ou mais pares eletrão-íon. Quando a voltagem entre os elétrodos é suficientemente elevada, a carga total de todos os íons produzidos é transferida para os elétrodos. O pulso elétrico assim originado é proporcional ao número de íons formados e, também, à energia transferida pelas partículas que entraram no detetor. Este processo constitui o princípio de funcionamento das câmaras de ionização, dos contadores proporcionais e dos contadores Geiger-Müller (GM). A distinção entre os métodos de detecção é feita pela aplicação de voltagens crescentes entre os elétrodos de cada um dos detetores. A vantagem de utilização da câmara de ionização e do contador proporcional deve-se ao facto de estes equipamentos poderem dar informação sobre a distribuição de energias da radiação detetada (radiações α e β); permitem traçar um espectro das energias. O contador GM é muito simples e não dá qualquer informação sobre o espectro de energias. Neste equipamento pode ocorrer "efeito de saturação" em que as novas interações não são detetadas durante um curto espaço de tempo τ , denominado de "tempo morto". Com contagens elevadas este tempo morto pode conduzir a contagens menores e, proporcionalmente, à detecção de menor atividade. Se as contagens forem extremamente elevadas a detecção de interações pode ser nula.

Os detetores de ionização em estado sólido funcionam segundo princípio idêntico mas são construídos com materiais semicondutores contendo germânio (tipo Ge) ou silício (tipo Si) aos quais se adicionam pequenas quantidades de lítio (tipo Ge(Li) ou tipo Si(Li)). Quando comparados com os detetores de ionização com gás, precisam de menos energia para libertar eletrões, a sua

densidade é cerca de 1000 vezes mais elevada e apresentam melhores características para a detecção de radiações γ (em particular os detetores de Ge(Li)).

4.2 Detetores de cintilação

O funcionamento dos detetores de cintilação baseia-se na capacidade de emissão de fotões de baixa energia (comprimento de onda na gama do azul-violeta/ultravioleta) quando alguns materiais, moléculas ou iões retornam ao estado fundamental após interagirem com radiações excitantes. O sinal luminoso tem que ser convertido num impulso elétrico. Tal é feito usando um tubo fotomultiplicador: tubo de vidro sob vácuo, com uma janela por onde entra a radiação, e coberto interiormente por uma fina camada de Cs/Na/K ou Cs/Sb; dentro do tubo os eletrões são acelerados e multiplicados pela diferença de potencial constante aplicada a uma cascata de elétrodos. Nos detetores de cintilação o pulso elétrico é proporcional à energia transferida e tal significa que pode ser obtido o espectro energético da radiação.

Os detetores de cintilação em estado sólido são constituídos, essencialmente, por cristais de NaI(Tl). Estes cristais podem ser obtidos com grandes dimensões e terem uma densidade elevada o que os torna excepcionalmente adequados para a medição de radiação γ . Também podem ser fabricados plásticos contendo moléculas orgânicas "cintilantes" dissolvidas ou compostos orgânicos como o antraceno. Em contraste com o NaI(Tl), este material não é higroscópico e pode ser usado sem a proteção de uma barreira contra a humidade. Este tipo de detetores é muito adequado para a detecção de radiação β . O ZnS é um composto cintilante clássico, usado frequentemente em combinação com plástico, em monitores de radiação α .

Para além de NaI(Tl) outros materiais com elevada densidade, com por exemplo CsI, CdWO₄ ou o LaBr₃(Ce) podem também ser usados na detecção de radiação γ , ecrãs de cintilação e monitores de contaminação, enquanto que os materiais orgânicos de baixa densidade (plásticos cintilantes, antraceno, etc.) são mais apropriados para a detecção de radiação β .

Para além dos materiais já mencionados, e que cintilam quase de imediato após interação com as radiações, existem substâncias como o CaF₂ e o LiF que apenas cintilam depois de aquecidos acima de 200 °C. Estes materiais são usados em detetores de termoluminescência (TLD) e são excepcionalmente adequados para dosimetria pessoal porque à temperatura ambiente a energia acumulada dissipa-se muito lentamente; depois de terem sido aquecidos (leitura) podem ser usados novamente; podem ser usados para doses de radiação grandes ou pequenas, o número de cintilações é proporcional à dose para uma gama alargada de valores; são relativamente baratos. Apresentam a desvantagem de permitirem apenas uma única leitura que é apagada com o

aquecimento (a energia liberta-se de uma única vez). Este sistema tem vindo a ser substituído por cristais de Al_2O_3 contendo inclusões de elementos especiais, como o carbono, capazes de capturar e armazenar a energia das radiações incidentes. Estes detetores emitem luminescência proporcional à energia acumulada quando estimulados opticamente (OSL) por um laser de luz verde. São tão estáveis quanto o TLD, mas é 10x mais sensível (deteta radiações de energia mais baixa) e tem a vantagem de permitir a repetição da leitura antes de serem definitivamente apagados.

Um líquido cintilante consiste num solvente orgânico contendo um composto cintilante dissolvido, que é adicionado à amostra radioativa. Devido à grande proximidade entre as moléculas em solução a transferência de energia é máxima, tornando este método particularmente apropriado para a deteção de emissores de partículas β de energia muito baixa (ex.: ^3H , ^{14}C , ^{35}S e ^{45}Ca) e de emissores de partículas α (ex.: ^{210}Po e ^{226}Ra). Para ajudar a dissolver soluções aquosas nestes solventes são adicionados outros compostos, as estas misturas é dado o nome de cocktail de cintilação (existem diversas formulações comerciais). A eficiência da contagem de cintilação líquida pode ser diminuída pela presença de outros compostos em solução que também absorvam energia (p. ex.: compostos contendo oxigénio, azoto ou halogéneos orgânicos), formação de floculação, heterogeneidade das soluções ou amostras coradas (p. ex.: sangue e urina). Consoante o tipo de problema verificado, o efeito é denominado "quench" químico ou ótico.

4.3 Detetores fotográficos

Constituem o tipo mais antigo de dispositivos usados para a deteção de radiações (surgiram há mais de 1 século) e são baseados na utilização de filmes fotográficos. No método tradicional, o suporte é impregnado com uma emulsão fotográfica contendo prata halogenada, a qual é sensível a radiações ionizantes, que escurece por reação fotoquímica. Este método é, ainda, utilizado com frequência em equipamentos de raios X de diagnóstico médico, radiografia industrial e auto-radiografia em laboratórios de investigação. Actualmente, este tipo de aparelhos estão, progressivamente, a ser substituídos por sistemas digitais equipados com ecrãs de deteção por cintilação, que originam imagens de melhor qualidade com possibilidade de análise por computador, são 100% reutilizáveis, não envolvendo formação de resíduos químicos poluentes, e podem ser armazenados em suporte digital, necessitando de menos espaço físico de arquivo.

4.4 Equipamentos de deteção de radiações e suas aplicações

O tipo de equipamento a utilizar deve ser determinado pela finalidade pretendida, ou seja, se é necessário identificar a fonte, fazer uma contagem quantitativa da radiação, determinar o nível de radiações ambientais ou verificar a existência e/ou localização de uma possível

RADIAÇÕES IONIZANTES E RADIONUCLÍDEOS

contaminação radioativa. Nos dois quadros seguintes encontra-se sumariado o tipo de equipamentos existentes, materiais de que são feitos, radiações detetadas e finalidade da sua aplicação.

EQUIPAMENTOS, MATERIAIS DETETORES E TIPO RADIAÇÃO DETETADA

Princípio Material detetor	Ionização		Cintilação	
	Equipamento	Radiação detetada*	Equipamento	Radiação detetada*
Gás	•Câmara de ionização •Contador proporcional •Contador GM	β (α , fotões)		
Líquido			•Contador líquido de cintilações (LSC)	β (α)
Sólido	•Semicondutor (materiais usados: Ge, GE-Li, Si, Si-Li)	fotões	•Cristais cintilantes (ex. NaI) •ZnS •Plásticos cintilantes	fotões (β) α (β) β (α)

* O equipamento é menos apropriado para detetar as radiações indicadas entre parêntesis.

DETETORES E SUAS APLICAÇÕES

	Medição de radiação β	Medição de radiação γ
Detetores de ionização		
Contador GM (janela fina)	Contaminação	Dose
Detetor GM (janela grossa)	Dose	Dose
Contador proporcional (janela fina, Z elevado)	Contaminação	Contaminação (por emissores γ de baixa energia como o ^{125}I); Dose
Ge(Li)	--	Identificação de núclídeos
Detetores de cintilação		
NaI(Tl)	--	Contaminação; Identificação de núclídeos
Antraceno/ZnS	Contaminação	--
TLD	Dose	Dose
Cintilação líquida	Contaminação	Radiação γ de baixa energia

5. EXPOSIÇÃO A RADIAÇÕES IONIZANTES

A exposição a radiações ionizantes, quer sejam provenientes de aparelhos, de fontes seladas ou não seladas, tem efeitos muito graves sobre a saúde das pessoas, especialmente porque pode causar alterações genéticas ou necrose celular, a sensação de queimadura não é sentida de imediato (o eritema é um efeito retardado; não surge imediatamente como acontece após o contacto com fontes de calor) e o seu efeito é cumulativo ao longo da vida.

No ITQB NOVA o perigo de exposição a radiações ionizantes provém quase exclusivamente da aplicação de técnicas usadas em investigação biológica nas quais são usados compostos com marcação seletiva, nomeadamente ^{14}C e ^{32}P ou, de forma esporádica, ^3H , ^{33}P ou ^{35}S , envolvendo quantidades e concentrações muito baixas de radionuclídeos. Nestas condições o perigo de exposição radioativa associado à sua manipulação é significativamente reduzido. No entanto, alguns radionuclídeos possuem características de penetração que os tornam potencialmente muito perigosos se não forem tomadas as precauções necessárias. Uma manipulação cuidadosa, bem como o controlo e a limpeza rigorosa das áreas de trabalho, são consideradas proteção suficiente em condições normais de trabalho, impedindo ao mesmo tempo a acumulação de radioatividade de

fundo (*background*). Para além das fontes abertas, existem alguns equipamentos que geram radiações ionizantes (ex.: difractor de raios X e contador de cintilações) mas cujo acesso e utilização está restrito a pessoal autorizado, com formação adequada.

Em todas as operações que envolvam radiações ionizantes o desrespeito pelas normas de segurança poderá causar graves danos pessoais e inutilizar por completo os resultados experimentais.

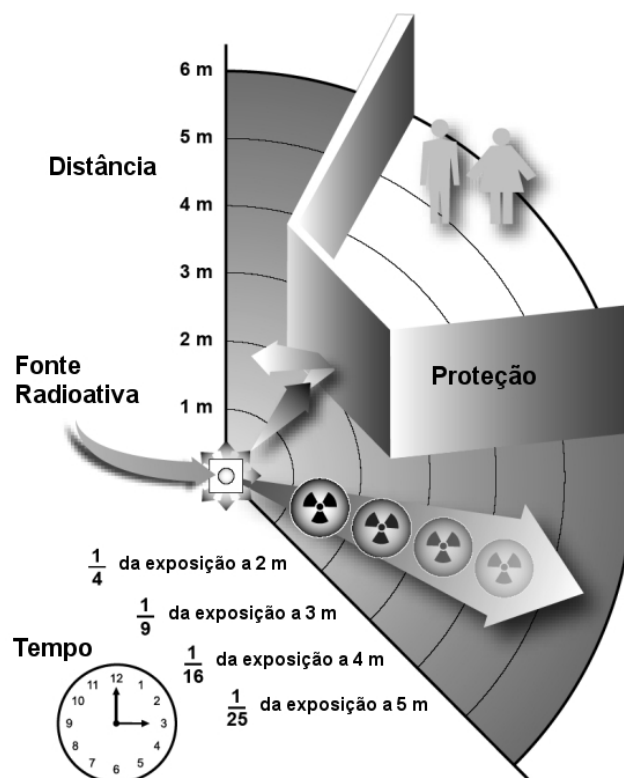
Segundo a Diretiva 96/29/Euroatom, de 13 de Maio, e a legislação portuguesa (Dec.-Lei nº 222/2008 de 17 de Novembro) são aplicáveis, ao pessoal que trabalha no ITQB NOVA e aos postos de trabalho, os limites de exposição e categorias definidos nas seguintes alíneas:

- a) **Limites de dose para trabalhadores expostos e estudantes com mais de 18 anos** – o limite de dose efetiva é de 100 mSv num período de 5 anos consecutivos, não podendo este valor ultrapassar uma dose efetiva máxima de 50 mSv em cada ano. Sem prejuízo do acima indicado,
 - i. o limite de dose equivalente para o cristalino (olho) é fixado em 150 mSv por ano;
 - ii. o limite de dose equivalente para a pele é fixado em 500 mSv por ano (dose média numa superfície de 1 cm² de pele, independente da área exposta);
 - iii. o limite de dose equivalente para as extremidades é fixado em 500 mSv por ano.
- b) **Proteção especial durante a gravidez e lactação** – A partir do momento em que uma mulher grávida informe a empresa do seu estado, deve ser concedida ao nascituro uma proteção equivalente à dispensada a qualquer membro do público em geral, garantindo que a dose equivalente recebida pela criança em gestação seja tão reduzida quanto possível e que não exceda 1 mSv durante o período da gravidez. Logo que informe o titular da instalação do seu estado, a mulher lactante não pode desempenhar funções que envolvam um risco significativo de contaminação radioactiva do organismo.
- c) **Limite de dose para membros do público** – o limite de dose efectiva é de 1 mSv por ano. Sem prejuízo do acima indicado,
 - i. o limite de dose equivalente para o cristalino (olho) é fixado em 15 mSv por ano;
 - ii. o limite de dose equivalente para a pele é fixado em 50 mSv por ano (dose média numa superfície de 1 cm² de pele, independente da área exposta);
 - iii. o limite de 1 mSv pode ser excedido num determinado ano, desde que a dose média ao longo de 5 anos consecutivos não exceda 1 mSv por ano.
- d) **Classificação dos trabalhadores expostos e dos locais de trabalho** – Os locais de trabalho existentes no ITQB NOVA são classificados como “áreas vigiadas” e os

trabalhadores expostos pertencem à "categoria B". Nesta categoria são incluídos todos os trabalhadores que, em situação normal de trabalho, não são suscetíveis de receber uma dose efectiva superior a 6 mSv por ano, ou uma dose equivalente superior a três décimas de um dos limites anuais previstos na a) para o cristalino, para a pele ou para as extremidades.

5.1 Exposição a radiação externa

A exposição a radiação externa refere-se à radiação recebida de qualquer tipo de fonte de radiação ou material radioativo exterior ao corpo. Os princípios básicos para reduzir a exposição a radiações externas são a distância (a intensidade da radiação é inversamente proporcional ao quadrado da distância), o tempo (reduzir ao mínimo possível o tempo de manipulação) e a proteção. O material de blindagem usado na barreira de proteção e a sua espessura devem ser seleccionados de acordo com a fonte de radiação (consultar as folhas de segurança do radionuclídeo – MSDS).



5.2 Exposição a radiação interna

A exposição a radiação interna resulta da inalação, ingestão ou incorporação (através de cortes ou feridas) de substâncias radioativas e é mais difícil de detetar que a radiação externa.

Alguns radionuclídeos como sejam o ^{45}Ca e o ^{125}I fixam-se especificamente em tecidos como os ossos e a tiroide, respetivamente. Outros radionuclídeos, dependendo da forma química usada, podem incorporar-se em determinadas células ou estruturas celulares. É o caso dos ácidos nucleicos, com qualquer tipo de marcação isotópica, que podem incorporar-se no DNA celular, e do ^3H , que pode permutar facilmente com outros átomos de hidrogénio. Para além do mecanismo de troca pode também ocorrer difusão. Os vapores de trítio (por ex. água tritiada) permeia materiais como o Parafilm® e as luvas de látex, incorpora-se rapidamente em fluidos biológicos como sejam o suor, a saliva e as lágrimas, e difunde-se através da pele contribuindo para um risco elevado de contaminação interna.

5.3 Manipulação de fontes de radioatividade

O melhor método para prevenir contaminações é confinar os materiais radioativos em recipientes selados e sistemas fechados. Todos os recipientes contendo fontes de material radioativo, bem como os seus locais de armazenamento, devem estar assinalados e etiquetados (radionuclídeo, data de aquisição e atividade). Os radionuclídeos deverão ser guardados em local específico, devidamente assinalado com o sinal de aviso de "Risco Radioativo",



e nunca misturados com outros materiais ou reagentes. A manipulação de radionuclídeos deve ser feita numa zona delimitada do laboratório, devidamente assinalada e protegida com um tabuleiro de bordos elevados e/ou papel de bancada plastificado na superfície inferior (Benchkote®). Apenas os laboratórios autorizados podem comprar e manipular compostos radioativos. As informações sobre a licença atribuída ao ITQB NOVA devem ser solicitadas à Comissão de Segurança ou à pessoa responsável para Riscos de Exposição a Radiações Ionizantes.

Todo o material utilizado deve ser devidamente marcado (etiquetado) e separado para posterior tratamento. O local de trabalho deve conter material e equipamento destinados unicamente à manipulação de substâncias radioativas (micro-centrífuga, pipetas automáticas, etc.). Caso tal não seja possível, ou tenha de se recorrer a equipamento comum, a radiação deve ser minuciosamente controlada e proceder-se à descontaminação dos materiais ou equipamento usado assim que acabar o trabalho. Durante o período de trabalho, os materiais e equipamento devem estar obrigatoriamente assinalados com etiqueta de segurança própria e/ou aviso legível para alertar os utilizadores de possível risco de exposição.

Se houver necessidade de transportar materiais radioativos para fora da zona de trabalho devem usar-se sempre caixas herméticas que constituam barreiras adequadas ao tipo de radiação transportada e rigorosamente isentas de qualquer contaminação exterior (verificar cuidadosamente). O transporte deve ser feito **sem luvas**, para evitar a contaminação de objetos (portas, gavetas, botões, interruptores, teclados, etc.). A utilização de contenção dupla é considerada uma boa prática laboratorial. Evitar que os recipientes se partam ou entornem mantendo-os seguros com garras e suportes de laboratório. Manter os recipientes fechados quando não estão a ser usados. No final do trabalho experimental as batas devem ser verificadas com um monitor de radiação assim como as bancadas (utilizar um contador Geiger ou fazer um esfregaço, dependendo da energia da fonte de radiação utilizada); as zonas controladas não devem apresentar uma contaminação superior à de fundo (zona limpa ou *background*).

No caso de contaminação accidental da bancada ou do chão, colocar o aviso de contaminação radioativa (se aplicável), afastar as pessoas que se encontrem no mesmo espaço e iniciar a descontaminação da superfície.

A pessoa responsável pela contaminação é, também, responsável pela descontaminação!

No caso de acidente muito grave, a zona afetada deve ser evacuada, isolada e delimitada a fronteira de segurança, colocando sinais de contaminação radioativa. A pessoa responsável pelo acidente ou o responsável pelo laboratório, em caso de impossibilidade do primeiro, deve então contactar o responsável pela segurança do ITQB NOVA, para que sejam acionados os mecanismos devidos para resolução do problema, e manter-se disponível para prestar os esclarecimentos necessários.

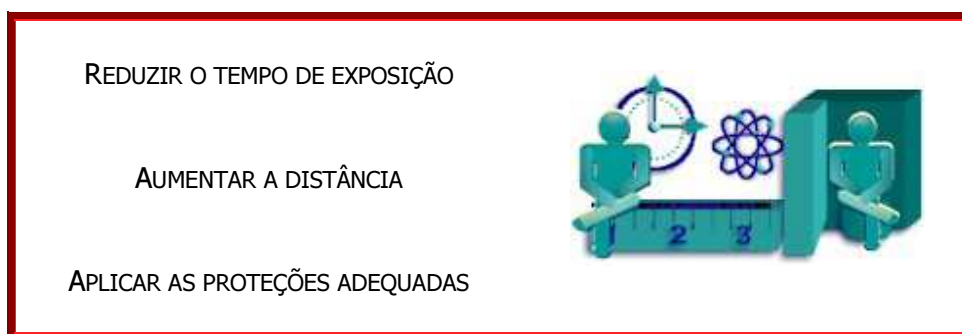
5.4 Proteção pessoal e risco de exposição a radiações ionizantes

A ficha de segurança (MSDS) de cada radionuclídeo/composto marcado deve ser lida com muita atenção antes de iniciar o trabalho. Todo o material, equipamento e reagentes necessários para a realização da experiência devem ser verificados e colocados na zona de trabalho antes de iniciar a mesma. Se é a primeira vez que está a trabalhar com compostos radioativos deve fazer um ensaio prévio das experiências, usando os mesmos reagentes mas sem radioatividade incorporada. Durante a manipulação de agentes radioativos, ou sempre que esteja numa zona de trabalho onde estes sejam utilizados, deve usar bata, óculos, luvas e dosímetro individual (se necessário). Nestes locais é proibido comer, beber, fumar ou mexer em cosméticos, devendo abster-se de praticar qualquer uma destas ações até ter terminado a experiência e de se ter certificado que não é portador de contaminação radioativa. Deve remover adornos (anéis,

RADIAÇÕES IONIZANTES E RADIONUCLÍDEOS

pulseiras, relógio, cachecol, etc.) que possam danificar as luvas ou ficarem contaminados. Para uso pessoal, caso seja imprescindível, devem ser usados lenços de papel que serão rejeitados como resíduo radioativo. **Nunca pipetar à boca soluções radioativas!** Todas as ações que possam conduzir à formação de aerossóis ou que envolvam compostos voláteis devem ser realizadas dentro de uma *hotte*. As luvas devem ser mudadas frequentemente, lavando as mãos entre cada muda de luvas. Deve haver atenção redobrada para não tocar com as luvas ou outros materiais contaminados em puxadores de portas ou gavetas, nos livros de registo, canetas ou em outros objetos que devam ser conservados sem radioatividade.

Em resumo, para além das regras de boas práticas laboratoriais acima mencionadas, a “chave de ouro” para trabalhar com radiações ionizantes, independentemente do tipo a que pertençam, é aplicar o princípio¹ de usar a menor dose de radioatividade que seja possível respeitar sempre os seguintes conceitos:



5.4.1 Radionuclídeos de baixa energia (< 250 keV) – ex: ^3H , ^{14}C , ^{33}P e ^{35}S

No caso de radionuclídeos que são emissores de partículas β de baixa energia (^3H , ^{14}C , ^{33}P e ^{35}S) não há necessidade de usar barreiras de proteção nem dosímetros individuais, uma vez que não são sensíveis à energia emitida por estes radionuclídeos. Por exemplo, a radiação emitida por ^3H propaga-se apenas 6 mm no ar, 6 μm na água e não tem capacidade de atravessar a camada de células mortas da epiderme. No entanto, constitui um risco de contaminação interna por este radionuclídeo poder ser facilmente incorporado em fluidos corporais (suor, lágrimas, saliva, ingestão, etc.). No ar, a radiação β do ^{14}C propaga-se 24 cm, a do ^{35}S propaga-se 26 cm e a do ^{33}P propaga-se 50 cm. Em todos os casos, a largura da bancada constitui uma distância de proteção suficiente para quem trabalha com estes radionuclídeos, desde que tenha o cuidado de manusear

¹ Em inglês: ALARA principle – keep dose As Low As Reasonably Achievable

os materiais contaminados a meio ou na metade posterior da zona de trabalho. Os materiais, de vidro e plástico, usados no laboratório possuem, também, capacidade de atenuação da radiação e protegem do risco de exposição. As luvas de látex podem ser permeáveis a alguns compostos contendo estes radionuclídeos requerendo atenção especial. A contaminação interna é detetável na urina e devem ser realizados testes médicos específicos sempre que forem ultrapassados os limites de utilização constantes das folhas de segurança (5 mCi/mês para ^{14}C e ^{35}S ou 100 mCi/mês para ^3H ; não há indicação de limite para ^{33}P) ou em caso de exposição accidental (estes casos devem ser, obrigatoriamente, reportados ao Departamento de Medicina Ocupacional e à Comissão de Segurança).

5.4.2 Radionuclídeos de elevada energia – ex: ^{32}P e ^{125}I

Os radionuclídeos de elevada energia (emissores de partículas β ou radiação γ) exigem que se trabalhe com barreiras de proteção de materiais e espessuras adequadas. A barreira de proteção a usar depende da energia do radionuclídeo e da concentração a manipular, devendo ser calculada caso a caso. Assim, para o ^{32}P , emissor de partículas β cuja radiação se propaga 7 m no ar, em regra é suficiente usar uma barreira de Perspex (vidro acrílico) de 1 cm de espessura. Se se estiver a trabalhar com concentrações elevadas deste radionuclídeo deve, ainda, verificar se existe radiação X a atravessar a barreira de Perspex. Em caso positivo deve ser colocada uma segunda barreira de chumbo com 0.3 a 0.6 cm de espessura, entre a barreira de Perspex e o utilizador ou usar Perspex plúmbeo para bloquear os raios X (verificar eficácia de proteção antes de iniciar os trabalhos).

A utilização de ^{125}I , emissor de radiação γ e X, exige a utilização de uma barreira de chumbo ou vidro acrílico plúmbeo. Neste caso foi provado por cálculo de eficiência de bloqueio de radiação que uma folha de chumbo de 0.02 mm reduz a radiação emitida para metade do seu valor original (HVL) e uma folha de 0.07 mm reduz para um décimo do valor inicial (TVL).

A utilização de ^{32}P ou ^{125}I requer a utilização de dosímetro individual (e anel se for necessário); os materiais radioactivos devem ser mantidos o mais longe possível do manipulador e protegidos por barreira adequada; o tempo de exposição deve ser o mais curto possível.

No final do trabalho deve controlar-se com o monitor de radiação a bancada e as mãos depois de lavadas. No caso de ^{125}I , deve também controlar-se a zona da tiroide. A bata ou outro revestimento de proteção que tenha sido usado deve ser removido antes de sair da sala.

5.4.3 *Controlo de exposição - Serviço individual de dosimetria*

De acordo com a legislação, é obrigatório estabelecer um plano de proteção radiológica que abranja todos os trabalhadores expostos e respetivas áreas de trabalho (Dec.-Lei nº 222/2008 de 17 de Novembro). Para dar cumprimento a esta obrigação **todos os grupos** que utilizem frequentemente radionuclídeos de elevada energia (^{32}P , conforme a atual licença do ITQB NOVA) ou equipamentos que emitam radiações ionizantes (ex.: difractómetro de raios-X) devem contactar com a Comissão de Segurança (itqb.safety@itqb.unl.pt) para serem incluídos no programa de monitorização de exposição. O processo de licenciamento de novos equipamentos (compra e/ou instalação) ou de fontes de radiação ionizante, que requeiram controlo ou monitorização de exposição radiológica, deve ser feito pela pessoa que fique responsável pelo equipamento/fonte, em conjunto com a Comissão de Segurança.

De acordo com o programa de monitorização radiológica implementado no ITQB NOVA, o serviço de proteção individual baseia-se nas seguintes regras:

1. Todas as pessoas que trabalham assiduamente com radionuclídeos de elevada energia ou equipamentos emissores de radiações ionizantes, incluindo estagiários e visitantes, e que permaneçam no ITQB NOVA por períodos iguais ou superiores a 6 meses devem contactar a Comissão de Segurança para serem inscritas no programa de monitorização radiológica;
2. Cada utilizador receberá um dosímetro personalizado o qual será monitorizado com periodicidade trimestral pela firma responsável pelo serviço de monitorização de exposição pessoal;
3. Sempre que uma pessoa inscrita no programa termine o trabalho experimental ou se ausente do ITQB NOVA por um período igual ou superior a 6 meses, deve contactar a Comissão de Segurança para suspender o seu plano de monitorização;
4. A inscrição no programa, distribuição e recolha trimestral dos dosímetros são da responsabilidade da Comissão de Segurança;
5. Os dosímetros são pessoais e intransmissíveis. É necessário fornecer informações pessoais de identificação à Comissão de Segurança antes de ser incluído no programa de proteção radiológica. A empresa que fornece os dosímetros cobrará extraordinariamente os custos associados ao extravio ou dano dos mesmos durante o período de uso. Este pagamento adicional é da inteira responsabilidade do utilizador.

5.5 Recolha e tratamento de resíduos radioativos

A produção de resíduos radioativos constitui um problema para a sociedade, especialmente nos casos em que estão envolvidos radionuclídeos com tempos de meia vida longos. A recolha, armazenagem e gestão destes materiais só pode ser feita por entidades devidamente credenciadas (CTN-IST, em Portugal), é dispendiosa e requer a existência de instalações com características técnicas especiais. Assim, para minimizar o impacto da contaminação radioativa no meio ambiente, existem algumas regras que devem ser implementadas:

1. Só deve ser considerado o recurso a utilização de compostos contendo radionuclídeos se não houverem outras técnicas alternativas que permitam obter os resultados pretendidos;
2. Usar a menor quantidade possível de radionuclídeos, manter o valor de dose de exposição o mais baixo possível (princípio ALARA), escolher as técnicas mais eficientes e os equipamentos mais seguros;
3. Ter o cuidado de separar os resíduos contaminados dos não contaminados (verificar luvas, papéis, etc. com o monitor de radiação antes de os colocar no recipiente de resíduos radioativos);
4. Se for possível, deve optar por compostos marcados com radionuclídeos com tempo de meia vida curto e que podem ser armazenados temporariamente para decaimento antes de serem eliminados;
5. Reduzir o máximo possível a produção de resíduos radioativos líquidos porque não podem ser compactados e exigem maior cuidado na manipulação para evitar derrame.
6. Separar os resíduos radioativos sólidos e líquidos e manter um registo de toda a radioatividade usada (radionuclídeo, atividade total usada e data de quando os resíduos foram transferidos para a caixa de decaimento).

5.5.1 Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos (plástico, papel, material de laboratório, frascos vazios do contador de cintilações, etc.) devem ser colocados em sacos de plástico ou recipientes apropriados, mantidos em caixas fechadas feitas de materiais que confirmem proteção contra as radiações emitidas. Os resíduos contaminados com radionuclídeos devem ser separados em 3 grupos de acordo com o tempo de meia vida destes, curto ($t_{1/2} \leq 15$ dias), médio ($15 \text{ dias} < t_{1/2} < 90$ dias) ou longo ($t_{1/2} \geq 90$ dias). Os dois primeiros grupos podem ser mantidos em armazenamento temporário até a sua atividade decair para valores que permitam a sua incorporação nos resíduos comuns. No entanto,

mesmo para materiais com radioatividade muito baixa, o tempo de armazenamento não deve ser inferior a 10 tempos de meia vida do radionuclídeo presente (equivalente à redução de atividade por um fator de 1000), podendo então ser juntos aos restantes resíduos sólidos. Contudo, os resíduos sólidos a eliminar com os resíduos comuns não podem conter qualquer etiqueta de perigo de exposição a radiações ionizantes, apresentar emissão de radiação detetável superior a 370 kBq num volume total de lixo não inferior a 0.1 m³ (100 litros), nem incluir nenhum artigo com atividade superior a 3.7 kBq (Dec.-Lei nº 180/2002).

Usar etiquetas não permanentes de perigo de exposição a radiações ionizantes para identificar os recipientes que contenham resíduos contaminados por radionuclídeos com tempo de meia vida curto e que se destinem a armazenamento temporário para decaimento até que possam ser descartados como resíduos comuns. Antes de serem colocados no contentor de resíduos radioativos do laboratório, os sacos e caixas contendo resíduos sólidos devem ser identificados com uma etiqueta de resíduo radioativo indicando o nome do laboratório, o radionuclídeo, a atividade e a data (ver abaixo). Os contentores dos laboratórios devem ser entregues no depósito de armazenagem temporária após obter permissão da Comissão de Segurança para o fazer. A remoção dos resíduos contaminados é agendada periodicamente pelo ITQB NOVA.

		
Resíduo Radioativo		
Isótopo:	Atividade:	(Bq)
Data:	/	/ 20
Lab:	Nome:	

As embalagens protetoras de plástico e chumbo usadas para transporte dos compostos radioativos também são consideradas resíduos químicos tóxicos e radioativos sólidos. Devem ser guardadas em depósito temporário até serem recolhidas. Algumas empresas já comercializam os compostos radioativos em embalagens reutilizáveis ou recolhem as embalagens vazias mediante o estabelecimento de um protocolo para este fim.

5.5.2 Resíduos líquidos

Os resíduos líquidos deverão ser separados, tal como os resíduos sólidos, de acordo com o tempo de meia vida dos radionuclídeos mas também tendo em atenção o tipo de solvente

(orgânico ou aquoso). Usar o recipiente adequado (plástico resistente ou vidro), identificar com o nome do laboratório, radionuclídeo/solvente, atividade e data (ver etiqueta acima) e colocar em contentores fechados e feitos de materiais que confiram proteção contra a radiação emitida. Os contentores dos laboratórios deverão ser entregues no depósito de armazenamento temporário após obter permissão da Comissão de Segurança para o fazer. A remoção dos resíduos contaminados é agendada periodicamente pelo ITQB NOVA. Os resíduos líquidos que possuam contaminação radioativa muito baixa, sem contaminação química e solúveis em água (por ex. as águas de lavagem do material de laboratório), que tenham estado em armazenamento temporário pelo menos 10 tempos de meia vida do radionuclídeo (atividade máxima detetável de 3.7 kBq/dm^3), poderão ser lançados em esgoto com caudal elevado e sem sifão após controlo e autorização dada pela Comissão de Segurança. Se for necessário, para evitar o crescimento bacteriano nos resíduos líquidos é aconselhável adicionar lixívia ou outro agente desinfetante adequado (respeitar as concentrações indicadas pelos fabricantes e de acordo com os materiais a tratar).

Os cocktails de cintilação orgânicos ou não solúveis em água (que formem precipitados ou floculação) devem ser recolhidos em frascos (plástico resistente ou vidro), identificados com o nome do laboratório, radionuclídeo/solvente, atividade e data e eliminados como resíduo radioativo e/ou químico.

5.6 Procedimento de descontaminação radioactiva

5.6.1 Geral

- A. Isolar os **objetos/área contaminados** de forma a prevenir que a contaminação alastre. Verificar o nível de contaminação dos objetos/área e identificar potenciais riscos de exposição a radiações ionizantes.
- B. Todo o trabalho de **descontaminação** deve ser feito com luvas, avental ou bata (de preferência impermeável e descartável) e utilizando utensílios protetores como sejam tenazes longas e barreiras de proteção, se for necessário, para minimizar o contacto direto com os objetos contaminados, proteger e manter o distanciamento entre a pessoa que está a limpar e a fonte de radiação. A limpeza deve ser sempre realizada da zona com menor para a de maior contaminação, excepto quando houver perigo de exposição a doses elevadas de radiação.
- C. O **material de vidro** corrente (copos, placas de Petri, frascos, erlenmeyers, tubos, etc.) deve ser deixado de molho em solução descontaminante durante 24 h (água e

sabão ou produtos comerciais indicados para este fim). Se for necessário, o material que contenha contaminação biológica deve ser previamente desinfetado. A lavagem pode ser complementada pela utilização de banho de ultra-sons. Enxaguar e verificar o nível de contaminação do material; repetir o processo de descontaminação caso o material ainda apresente alguma radioatividade. Finalmente poderá ser lavado com o restante material de laboratório.

- D. **Frascos de cintilação** – reutilizáveis ou descartáveis devem ser decantados na *hotte* para um frasco de resíduos de cintilação reservado para esse efeito. Retirar os filtros de papel dos frascos e colocá-los no saco de resíduos sólidos contaminados. Os frascos de cintilação descartáveis devem ser recolhidos num saco à parte e descartados como resíduo sólido contaminado mas separados dos restantes resíduos. Os frascos de cintilação reutilizáveis devem ser mergulhados em solução descontaminante própria durante 24 h. Seguir o processo de lavagem acima indicado. Atenção: Não deitar líquido da cintilação para o esgoto das tinas de descontaminação; a formação de precipitados em contacto com a água pode entupir os sifões e canalizações.
- E. **Equipamento** – Todos os equipamentos onde forem processadas amostras contendo radioatividade devem ser monitorizados e prontamente descontaminados para minimizar a possibilidade de fixação do contaminante sobre as superfícies. A limpeza deve ser feita com produtos adequados, evitando os que sejam abrasivos, e métodos pouco agressivos. Quanto mais danificadas estiverem as superfícies mais difícil é eliminar contaminações futuras.

5.6.2 Superfícies (*bancadas ou chão*)

Alertar o pessoal do laboratório e evacuar a zona afetada se houver perigo de exposição a radiações ionizantes. Reunir todos os agentes de limpeza necessários, utensílios (barreira de proteção, caixa para resíduos, tenazes compridas, etc.), roupa de proteção e monitor de radiações antes de iniciar a descontaminação. Delimitar a área contaminada com um marcador de cor viva. Limpar de fora para dentro a área marcada para que a contaminação não alastre para as zonas limpas. Caso se trate de um derrame de solução radioativa, retirar o excesso de líquido com papel absorvente antes de iniciar a descontaminação da superfície. No caso de se tratar de uma substância sólida, usar material absorvente (ex. papel) humedecido com uma solução aquosa de glicerina a 5% para apanhar todo o pó e evitar que se forme contaminação aérea (os pós finos voam com facilidade). Repetir o procedimento as vezes for necessário para absorver o derrame.

Finalmente lavar abundantemente com água e um produto específico para contaminação radioativa ou sabão. Se for necessário, usar um produto de limpeza mais abrasivo para remover contaminações de superfícies rugosas. Neste caso deve proceder-se com cuidado porque as superfícies ásperas têm tendência para fixar a contaminação e aumentar o nível de radiação de fundo e o perigo de exposição a radiações ionizantes.

Controlar a contaminação da água do balde usada na lavagem com um monitor de radiação ou outro método adequado. A água de limpeza deverá ser tratada como o resíduo líquido, respeitando a contaminação máxima a eliminar (possibilidade de diluição) e o tempo de decaimento aconselhável em armazenamento temporário.

No caso de ^3H e de ^{14}C , não é detetável com monitor de radiações, deve utilizar-se o método do esfregaço (wipe test). Escolher um suporte adequado (a fibra de vidro ou os discos de poliestireno apresentam elevadas eficiências de contagem), passar o esfregaço por toda a superfície contaminada e contar por cintilação líquida. Para o ^3H e outros radionuclídeos dos grupos de radio-toxicidade 2, 3 ou 4 (ver Anexo) a atividade não deverá ser superior a 40 Bq/cm^2 em zonas confinadas ou 4 Bq/cm^2 nas bancadas. Se a atividade do teste continuar acima dos valores indicados deve repetir-se o procedimento de descontaminação e registar-se os resultados no livro de registos do laboratório. Actividades superiores a estes valores não são admissíveis.

Os compostos iodados podem formar vapores de iodo aumentando o risco de exposição a radiações ionizantes. O derrame de uma solução contendo iodo radioativo deve ser neutralizado (assegurar que o pH do resíduo nunca é inferior a 4) e tratado com um excesso de uma solução de tiosulfato de sódio para estabilizar o iodo (25 g de tiosulfato sódio e 2 g de iodeto de sódio para um litro de hidróxido de sódio 1 N); só depois se deve continuar com a descontaminação por lavagem.

5.6.3 *Pele*

As áreas contaminadas devem ser abundantemente lavadas com água morna e sabão, de forma suave para evitar a abrasão da pele. Esfregar durante 2 a 3 minutos, mantendo uma boa quantidade de espuma e evitar que a pele seque. Passar por água tépida. Após lavagem, controlar a zona de pele contaminada com o monitor de radiação. Se ainda houver sinais de radioatividade repetir o procedimento anterior até obter a descontaminação total. Em alguns caso pode ser recomendável usar uma escova suave ou cortar as unhas o mais curto possível. Parar antes de começar a provocar abrasão da pele ou de aparecerem áreas sensibilizadas. No final da descontaminação aplicar um bom creme hidratante.

Caso se trate de um acidente grave ou a área afectada seja muito extensa (corpo) retirar a pessoa do local contaminado; colocar a vítima sob um chuveiro de emergência para lavar rapidamente ou diluir o contaminante; remover a roupa contaminada e isolá-la para avaliação posterior (se necessário deverá ser eliminada como resíduo radioativo); prestar especial atenção à descontaminação dos olhos, ouvidos, nariz e boca (podem ser usados cotonetes para ajudar a limpar os ouvidos e nariz); providenciar um cobertor ou roupa seca e sentar a vítima para evitar que desmaie devido ao choque provocado pelo contacto com a água fria ou ao stress relativo à situação.

Procurar assistência médica especializada urgentemente e, caso se suspeite de contaminação interna, considerar a necessidade de fazer análises bioquímicas periódicas.

5.7 Utilização do laboratório de radionuclídeos

O laboratório de radionuclídeos (sala 5.N10), totalmente equipado para o manuseamento de compostos radioativos e suporte de experiências com marcação radioisotópica, está disponível para ser usado por investigadores cujos laboratórios não possuem zonas de trabalho licenciadas. O acesso a esta sala é restrito; os interessados deverão pedir permissão de acesso à Comissão de Segurança. Sendo um espaço de utilização comum com risco de exposição a radiações ionizantes, é obrigatório observar todas as recomendações indicadas nos capítulos anteriores (capítulos 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6) cumulativamente com as seguintes regras:

1. A sala de radionuclídeos deve ser mantida limpa e arrumada. Antes de iniciar o trabalho e no final das experiências verificar se a sala está devidamente arrumada e se não existem áreas contaminadas. A limpeza e descontaminação da sala deve seguir as indicações do capítulo 5.6. No final do trabalho os valores obtidos nas diversas zonas e equipamento usado devem ser anotados no livro de registo da sala. Qualquer anomalia deverá ser prontamente comunicada à Comissão de Segurança ou ao responsável por Riscos de Exposição a Radiações Ionizantes.
2. Todos os resíduos sólidos e líquidos gerados no laboratório de radionuclídeos devem ser tratados e separados conforme as indicações constantes neste manual (ver capítulo 5.5) assim como de acordo com o estipulado no Manual de Segurança e Saúde no Trabalho do ITQB NOVA (resíduos urbanos, químicos, biológicos, etc.).
3. Apenas os materiais contaminados devem ser descartados como resíduos radioativos em sacos de plástico (resíduos sólidos) ou frascos de plástico (resíduos líquidos) devidamente fechados e identificados com a etiqueta para resíduos radioativos (ver

etiqueta em § 5.5.1).

4. Os contentores para deposição de resíduos radioativos devem ser mantidos fechados.
5. Vidro de laboratório partido, pipetas e outros objetos perfurantes contaminados devem ser colocados dentro de recipientes de plástico antes de serem depositados nos contentores. Não é autorizado colocar estes objetos em sacos de plástico por haver risco de perfuração.
6. É proibido deitar nos esgotos qualquer tipo de material sólido e líquidos que possam precipitar em contacto com água. Os cocktails de cintilação devem ser recolhidos em frascos adequados (plástico ou vidro) e colocados no contentor de resíduos radioativos até serem removidos para o depósito de armazenagem temporária.
7. Os contentores de resíduos radioativos, as tinas de descontaminação e as superfícies de trabalho, devem ser lavados regularmente.
8. É da responsabilidade dos grupos que usaram a sala a limpeza da mesma assim como a remoção de todo o tipo de resíduos, incluindo os resíduos radioativos, para os respetivos locais de armazenagem e nos dias estipulados para tal (ver capítulo do Manual de Segurança e Saúde no Trabalho do ITQB NOVA referente à entrega de resíduos perigosos). Sendo esta sala de acesso restrito, não é permitida a entrada ao pessoal da limpeza excepto quando acompanhado por um investigador autorizado.
9. Todos os trabalhos de reparação e manutenção de equipamentos realizados dentro do laboratório de radionuclídeos quer por pessoal do Departamento de Manutenção quer por técnicos especializados deve ser acompanhado por um investigador autorizado.

BIBLIOGRAFIA

Este manual foi escrito tendo por base os seguintes documentos:

- G. Brouwer, J. van den Eijnde, *Practical Radiation Protection*, Uitgeverij Syntax Media, Arnhem, Holanda (2008).
- *Guide to the Safe Handling of Radioactive Material in Research*, PerkinElmer, USA (2007).
- Luxel+ Dosimeter (detailed specifications), Landauer Inc. (2005).
- R. Trindade, I. Paiva, L. Portugal, *Manual de Procedimentos para a Gestão de Resíduos Radioactivos – Recomendações Gerais*, Cadernos da DGIES, nº 5, Lisboa (2005).
- Diretiva do Conselho 96/29/Euroatom de 13 de Maio (EU, 1996).
- Decreto-Lei nº 222/2008 de 17 de Novembro (Diário da República, INCM).

Todos os elementos retirados da internet estão devidamente assinalados com os respectivos endereços e data de consulta.

A legislação citada encontra-se atualizada à data de publicação deste documento.

ANEXOS

Anexo 1 - Glossário de unidades

Unidades	Radioatividade (A)	Dose absorvida (D)	Dose equivalente (H)	Exposição (aplica-se, exclusivamente, a radiações γ e X no ar)
Convencionais	Curie (Ci) cpm (contagens por min.) cps (contagens por seg.)	rad (radiation absorbed dose)	rem (roentgen equivalent in man)	Roentgen (R)
SI	Becquerel (Bq)	Gray (Gy)	Sievert (Sv)	Coulomb/kg (C/kg)

Dose absorvida – É definida como a energia absorvida por unidade de massa e denomina-se frequentemente por dose. Uma dose de 1 Gy origina danos graves por exposição a radiação.

Dose equivalente – É definida como a dose média absorvida por um tecido ou órgão multiplicada por um factor que está relacionado com a energia da radiação. Pode ser calculada usando a expressão $H_T = W_R \times D$, onde T indica o tecido (ou órgão), R o fator multiplicativo (seleccionado para o tipo de energia da radiação) e D a dose média recebida pelo tecido (ou órgão). W_R tem o valor de 1 para radiação β ou γ e de 20 para a radiação α .

Anexo 2 - Equivalência de unidades em radiação:

$$1 \mu\text{Ci} = 37000 \text{ Bq} = 37000 \text{ cps} = 2220000 \text{ cpm}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 100 \text{ R} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ mrem} = 1 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 10 \mu\text{Sv}$$

$$1 \text{ R} = 258 \mu\text{C/kg} \quad (\text{Nota: unidade usada apenas para radiação X e } \gamma)$$

Anexo 3 - Tabela de parâmetros relativos aos elementos radioativos mais utilizados

Nuclídeo	Radiação principal	Tempo de meia-vida	Limite por ingestão μCi	Radiotoxicidade¹ Sv/Bq (órgão crítico)	Proteção (propagação no ar, só para radiação β)	Notas
^3H	Beta 18.6 keV	12.3 anos	80000	1.8×10^{-11} (todos os tecidos / água)	Não é necessário (6 mm)	-----
^{14}C	Beta 156 keV	5730 anos	2000	5.8×10^{-10} (tecido adiposo / ossos)	Não é necessário (24 cm)	-----
^{32}P	Beta 1700 keV	14.3 dias	600	2.4×10^{-9} (ossos / sistema gastrointestinal)	Perspex (vidro acrílico) com 1 cm espessura; pode ser necessário adicionar proteção contra radiação X (6.8 m)	A radiação β produz raios X quando interage com materiais de elevado número atômico. O chumbo ou outros metais não devem ser usados como barreira de proteção.
^{33}P	Beta 248.5 keV	25.3 dias	6000	2.4×10^{-10} (ossos / sistema gastrointestinal)	Perspex (vidro acrílico) com 0.3 cm de espessura (50 cm)	Deve ser usado perspex mais espesso para melhor resistência mecânica
^{35}S	Beta 167 keV	87 dias	1000	7.7×10^{-10} (gónadas)	Não é necessário (26 cm)	-----
^{45}Ca	Beta 257 keV	163 dias	2000	7.6×10^{-10} (ossos)	Perspex (vidro acrílico) com 0.3 cm de espessura (49 cm)	Deve ser usado perspex mais espesso para melhor resistência mecânica

RADIAÇÕES IONIZANTES E RADIONUCLÍDEOS

^{51}Cr	Gama 320 keV	28 dias	40000	3.8×10^{-11} (cólon descendente)	Chumbo HVL* = 2 mm TVL** = 6.6 mm	-----
^{57}Co	Gama 122 keV	271 dias	4000	2.1×10^{-10} (inalação – pulmões)	Chumbo HVL* = 6 mm TVL** = 18 mm	-----
^{125}I	Gama 27 keV	60 dias	40	1.5×10^{-8} (tiroide)	Chumbo HVL* = 0.02 mm TVL** = 0.07 mm	A volatilização constitui o maior perigo. O trabalho com compostos voláteis de iodo cuja atividade exceda 1 mCi deve ser feito dentro da <i>hotte</i> , exceto se tiver sido estabelecido um programa especial de monitorização biológica para o utilizador.
^{131}I	Beta 606 keV Gama 364 keV	8 dias	30	2.2×10^{-8} (tiroide)	Chumbo HVL* = 3 mm TVL** = 11 mm	Ver ^{125}I

¹ – Coeficiente de dose efetiva para trabalhadores (ingestão) – Diretiva do Conselho 96/29/Euratom

*HVL – (Half Value Layer) Espessura da barreira protetora necessária para reduzir a intensidade da radiação para 50% do valor não blindado.

**TVL – (Tenth Value Layer) Espessura da barreira protetora necessária para reduzir a intensidade da radiação para 10% do valor não blindado.

Os dados compilados nesta tabela foram consultados em Setembro de 2017 nos seguintes endereços:

<http://www.augusta.edu/services/ehs/radsafe/rmanual1/nuclid.php>

http://hpschapters.org/northcarolina/nuclide_information_library.php3

Anexo 4 - Cálculo da dose de radiação pessoal recebida por um trabalhador ao manipular compostos marcados com ^{32}P (exemplo)

Dose a que pode estar sujeita a mão de uma pessoa ao pipetar uma solução de ^{32}P de um frasco contendo 250 μCi enquanto se mantém sobre o recipiente aberto (ou qualquer outra parte do corpo se colocado por cima da embalagem), considerando uma distância de 30 cm (aplicação da regra do polegar):

$$\dot{D} = 100 * A \text{ (}\mu\text{Gy/h)}$$

(Nota: Esta regra aplica-se a tecidos moles e a emissores de partículas β com energias entre 200 keV e 2 MeV dentro da zona de propagação do emissor)

$$A \text{ (MBq)} \Rightarrow 250 \mu\text{Ci } (^{32}\text{P}) = 250 * 37000 = 9.25 \text{ MBq}$$

$$\dot{D} = 100 * 9.25 = 925 \mu\text{Gy/h}$$

O vidro de laboratório normal com menos de 5mm de espessura não serve de proteção contra as radiações β emitidas por ^{32}P .

Se entornar o recipiente, não deve limpar com as mãos mesmo que esteja a usar luvas. Usar uma pinça ou tenaz comprida para segurar um pedaço de papel absorvente, ensopar o líquido e descartar no contentor de resíduos radioativos. Se a distância à fonte diminuir para 5 cm a dose de radiação a que ficará sujeito aumenta 36x, ou seja para 33.3 mGy/h, constituindo uma dose considerável de radiação.

Anexo 5 - Valores de isenção de notificação às autoridades para utilização de alguns radionuclídeos mais utilizados (conforme a Diretiva do Conselho 96/29/Euratom)

Nuclídeo	Atividade Bq	Concentração de atividade Bq.g ⁻¹
³ H	10 ⁹	10 ⁶
¹⁴ C	10 ⁷	10 ⁴
³² P	10 ⁵	10 ³
³³ P	10 ⁸	10 ⁵
³⁵ S	10 ⁸	10 ⁵
⁴⁵ Ca	10 ⁷	10 ⁴
⁵¹ Cr	10 ⁷	10 ³
⁵⁷ Co	10 ⁶	10 ²
¹²⁵ I	10 ⁶	10 ³
¹³¹ I	10 ⁶	10 ²

No caso de misturas de mais do que um radionuclídeo, o limite de isenção para notificação das autoridades aplica-se se a soma das razões dos nuclídeos relativamente à quantidade total presente, dividida pelo valor de isenção for menor que 1. A regra do somatório aplica-se também a concentrações de actividade desde que os diversos nuclídeos estejam contidos na mesma matriz.

$$\sum \frac{A_k}{A_{E,k}} \leq 1 \quad \text{ou} \quad \sum \frac{C_k}{C_{E,k}} \leq 1$$

Sendo:

A_k a actividade do radionuclídeo k

$A_{E,k}$ o valor de isenção para o radionuclídeo k

C_k a concentração de actividade do radionuclídeo k

$C_{E,k}$ o valor de isenção para o radionuclídeo k

Os valores de isenção aplicam-se ao inventário total de substâncias radioativas que pertençam a uma única pessoa ou que sejam usados numa única experiência num dado momento.

As práticas isentas não podem expor o público a doses superiores a 10μSv/ano (valor global).

Anexo 6 - Classificação radiotoxicológica de radionuclídeos – elementos mais representativos
(conforme a Diretiva do Conselho 84/467/Euratom²)

Grupo 1 – Radiotoxicidade muito elevada

²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²²⁸ Ra	²²⁷ Ac	²²⁸ Th	²³⁰ Th	²³² U
²³⁸ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴¹ Am	²⁴⁴ Cm	²⁵² Cf

Grupo 2 – Radiotoxicidade elevada

⁶⁰ Co	⁶⁸ Ge	⁹⁰ Sr	¹⁰⁶ Ru	^{110m} Ag	¹²⁴ I	¹²⁵ I
¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹⁴⁴ Ce	¹⁵¹ Sm	¹⁵² Eu	²¹⁰ Bi

Grupo 3 – Radiotoxicidade moderada

¹⁴ C	²² Na	²⁴ Na	³² P	³³ P	³⁵ S	³⁶ Cl
⁴³ K	⁴⁵ Ca	⁴⁶ Sc	⁵⁴ Mn	⁵² Fe	⁵⁵ Fe	⁵⁹ Fe
⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶³ Ni	⁶⁷ Cu	⁶² Zn	⁶⁵ Zn	⁶⁷ Ga
⁷² Ga	⁷³ As	⁷⁶ As	⁷⁵ Se	⁸² Br	⁸⁴ Rb	⁸⁶ Rb
⁸² Sr	⁸⁵ Sr	⁸⁹ Sr	⁸⁸ Y	⁹⁰ Y	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb
¹³² Te	¹²³ I	¹³² I	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	¹⁴¹ Ce
¹⁴⁷ Pm	¹⁵³ Sm	¹⁵³ Gd	¹⁶⁶ Ho	¹⁷⁰ Tm	¹⁶⁹ Yt	¹⁸² Ta
¹⁸⁵ W	¹⁸⁷ W	¹⁸⁸ W	¹⁸⁶ Re	¹⁹¹ Os	¹⁹² Ir	¹⁹⁸ Au
¹⁹⁷ Hg	²⁰³ Hg	²⁰⁴ Tl	²³⁷ Pu			

Grupo 4 – Radiotoxicidade baixa

³ H	¹¹ C	¹⁸ F	⁵¹ Cr	⁵⁶ Mn	⁶⁴ Cu	⁶⁸ Ga
^{99m} Tc	^{113m} In	¹⁶⁵ Dy	¹⁹³ Pt	²⁰¹ Tl		

² Embora esta Diretiva tenha sido revogada ainda é possível encontrar em alguns documentos indicações referentes aos diferentes grupos de radio toxicidade.