

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA

LEONARDO PESSOA DA SILVA

**ANÁLISE DA EFETIVIDADE DE LUVAS POLIMÉRICAS NA PROTEÇÃO
RADIOLÓGICA CONTRA CONTAMINAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS DO IODO**

Porto Alegre

2019

Leonardo Pessoa da Silva

**ANÁLISE DA EFETIVIDADE DE LUVAS POLIMÉRICAS NA PROTEÇÃO
RADIOLÓGICA CONTRA CONTAMINAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS DO IODO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Física.

Orientadora: Dr.^a Fernanda Chiarello Stedile
Coorientador: Físico Daniel Seraphim

Porto Alegre

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à minha mãe Rosalina e ao meu pai João pelo profundo e contínuo apoio, incentivo, amizade e pela base a qual sempre me apoiei completamente. Vocês são a minha inspiração maior, e o alicerce para todas as construções da minha vida. Obrigado à minha companheira Thamara, por fazer meus dias felizes, por ser minha melhor amiga, e por me ensinar todos os dias a ser uma pessoa melhor. Sou grato ao meu grande amigo de graduação Pedro Henrique por todas as horas de estudo incansáveis e crescimento que tivemos juntos ao longo desses anos de graduação. Obrigado ao professor Marcus Castegnaro por ser um exemplo pra mim, e também por toda a paciência, orientação e amizade. Obrigado à minha orientadora Fernanda Stedile, por quem tenho profunda admiração, sempre sendo um grande exemplo de professora, orientadora e pesquisadora. Agradeço, finalmente, ao físico Daniel Seraphim, meu coorientador, que me ajudou e orientou de forma fundamental nessa nova etapa da vida na qual me direciono para novos caminhos.

Essa pesquisa foi viabilizada pelos entes



RESUMO

A proteção radiológica é o fator de grande importância em qualquer prática utilizando fontes de radiação, visto que sua ausência pode afetar a saúde e a vida de pessoas direta ou indiretamente envolvidas. Por conseguinte, a análise realizada visou determinar a efetividade da proteção radiológica proporcionada por diferentes tipos de luvas poliméricas utilizadas para evitar a contaminação de radioisótopos do iodo. Para tal análise, se utilizou a técnica de Espectroscopia de Retroespalhamento Rutherford (RBS) para detecção de iodo na parte interna de luvas poliméricas contaminadas externamente com solução de iodeto de sódio em soro fisiológico. Além disso, para o caso das luvas que apresentaram difusão de iodo perceptível à técnica, foi possível estimar atividades de contaminações internas à luva para o caso de a solução de contaminação ser de iodeto de sódio com o radioisótopo ^{131}I .

Palavras-chave: proteção radiológica; luva; látex; vinil; nitrilo; Espectroscopia de Retroespalhamento Rutherford; Iodo-131.

ABSTRACT

Radiological protection is a major factor in any practice using radiation sources, as its absence can directly affect the health and life of people directly or indirectly involved. Therefore, the analysis aimed to determine the effectiveness of radiological protection offered by different types of polymeric gloves to avoid contamination of iodine radioisotopes. For this analysis, Rutherford Backscatter Spectroscopy (RBS) technique was used to detect iodine on the inside of polymeric gloves externally contaminated with sodium iodide solution in saline. In addition, for gloves that showed diffusion of iodine perceptible to the technique, it was possible to estimate internal contamination activities of the glove if the contamination solution was sodium iodide solution with ^{131}I .

Keywords: radiological protection; gloves; latex; vinyl; nitrile; Rutherford Backscattering Spectroscopy; Iodine-131.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 PROCESSOS DE DECAIMENTO RADIOATIVO	8
1.2 TEMPO DE MEIA-VIDA.....	10
1.3 RAIOS X	12
1.4 ANTIPARTÍCULAS E RADIAÇÃO DE ANIQUILAÇÃO	13
1.5 MEDICINA NUCLEAR	14
1.5.1 CINTILOGRAFIA	14
1.5.2 TERAPIA COM RADIONUCLÍDEOS	15
1.6 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE	16
1.7 PROTEÇÃO NA MANIPULAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS	17
2 OBJETIVOS	18
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	18
3.1 ESPECTROSCOPIA DE RETROESPALHAMENTO RUTHERFORD - RBS	18
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	21
4 ANÁLISE	24
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
REFERÊNCIAS.....	35

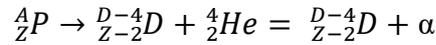
1 INTRODUÇÃO

Os últimos anos do século XIX foram ricos em descobertas na área de físico-química de radiações. No intervalo de cinco anos, houve grandes avanços fundamentais para o entendimento e para a aplicação atual de radiações. Em 1895, William Röntgen descobriu os raios X. Henri Becquerel descobriu a radioatividade no ano seguinte e Pierre e Marie Curie aprofundaram as pesquisas e descobriram os elementos rádio e polônio nos dois anos consecutivos. Em 1899, Ernest Rutherford, através de experiências com feixes de radiação e campos magnéticos, elucidou a natureza da radioatividade, fazendo a separação entre radiação α , β e γ [1][2]. Na mesma linha de conhecimentos, em 1939, embora os devidos créditos não tenham sido atribuídos corretamente, a física Lise Meitner descobre e explica o processo de fissão nuclear do ^{235}U [3]. Essas descobertas abriram caminho para um mar de novos estudos e aplicações da radiação nas mais diversas áreas, como por exemplo na medicina, em diferentes setores da indústria, na esterilização (de materiais cirúrgicos, remédios, alimentos, materiais de valor histórico, etc.), na produção de energia, datação radioativa, cristalografia, entre outros [4]-[8]. No entanto, a utilização de fontes radiativas não trouxe somente benefícios sociais, vindo acompanhada de malefícios, como as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki pelo governo dos Estados Unidos da América (1945), e também de diversos acidentes radiológicos e nucleares, como o caso do acidente em Goiânia envolvendo uma fonte de césio-137 (1987), a explosão de uma usina nuclear na cidade de Chernobyl na antiga União Soviética (1986), ou o vazamento de material radioativo na usina nuclear de Fukushima no Japão (2011) [9]-[11]. Eventos catastróficos como esses destacam ainda mais a necessidade de haver um sistema eficiente e seguro de proteção radiológica na utilização de fontes de radiação ionizante.

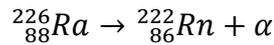
1.1 PROCESSOS DE DECAIMENTO RADIOATIVO

Embora existam diversos modelos bem sucedidos na tentativa de explicar propriedades nucleares, as teorias de estrutura do núcleo ainda não formam um modelo unificado de predição e explicação de fenômenos de instabilidade. Embora os núcleos sejam sistemas complicados, formados por uniões de prótons e nêutrons unidos por forças pouco entendidas até o presente momento [12], é seguro afirmar que núcleos não estáveis são aqueles que probabilisticamente estão suscetíveis a transitarem para um estado de menor energia através de decaimento, que é a liberação energética em forma de radiação particulada ou eletromagnética, ou em forma de fissão gerando fragmentos de menor massa, nêutrons e radiação gama. Devido às grandes diferenças de energias entre os estados nucleares, a radiação emitida terá capacidade de ionizar outros átomos e, portanto, será dita radiação ionizante. A seguir, descreveremos os principais processos de decaimentos radioativos conhecidos (adaptado de [4]).

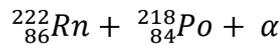
Emissão alfa (α): No decaimento α , um núcleo instável P decai para um núcleo filho mais estável D através da ejeção de um núcleo de ${}^4\text{He}$ energético chamado de radiação alfa, como na seguinte reação:



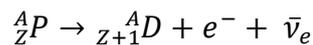
Geralmente as partículas alfa têm energia cinética entre 4 e 9 MeV, com alcance no ar de 1 a 10 cm e alcance em tecido vivo entre 10 e 100 μm . Um exemplo típico desse tipo de transição é o decaimento do ${}^{226}\text{Ra}$ em ${}^{222}\text{Rn}$ que também é radioativo e, por sua vez, decai em ${}^{218}\text{Po}$ como nas reações:



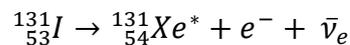
e



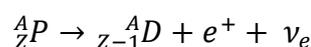
Emissão beta menos (β^-): No decaimento β^- , um núcleo P rico em nêutrons, ou seja, possuindo mais nêutrons do que o necessário para um equilíbrio estável entre núcleons, transforma um nêutron em um próton, um elétron e um antineutrino do elétron. Nesse processo, o elétron e o antineutrino do elétron $\bar{\nu}_e$ serão ejetados do núcleo. Esse elétron terá um espectro contínuo de possíveis energias e comporá a radiação β^- juntamente com outros elétrons ejetados de outros núcleos, formando, assim, o espectro. A reação genérica de decaimento beta menos pode ser expressa pela reação:



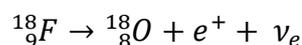
Um exemplo típico desse tipo de reação é o decaimento de ${}^{131}\text{I}$ em um estado excitado do ${}^{131}\text{Xe}$, o qual irá decair emitindo radiação gama para alcançar seu estado estável:



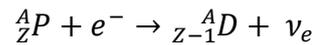
Emissão beta mais (β^+): Esse processo é muito semelhante ao decaimento beta menos, entretanto, ele ocorre na carência de nêutrons no balanço nuclear com transformação de um próton em um nêutron, um pósitron e^+ (a antipartícula do elétron) e um neutrino do elétron ν_e , havendo emissão do pósitron e do neutrino também em um espectro contínuo de possíveis energias:



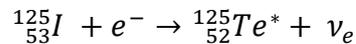
Um exemplo de elemento emissor de pósitrons é o ${}^{18}\text{F}$, que decai com reação:



Captura eletrônica: Esse tipo de decaimento ocorre também na carência de nêutrons necessários para o balanço nuclear, e acontece através da captura de um elétron, geralmente de orbitais mais internos do próprio átomo, para o interior do núcleo. Lá, o elétron encontra um próton, formando um nêutron e um neutrino do elétron, o último, sendo ejetado para fora do núcleo. A equação do decaimento por captura eletrônica é:



Um exemplo desse tipo de decaimento é a captura eletrônica feita pelo ${}^{125}\text{I}$, formando um estado excitado do ${}^{125}\text{Te}$ que posteriormente decairá em seu estado fundamental através de decaimento γ e conversão interna:



Decaimento gama e conversão interna: Os decaimentos α , β^- , β^+ e conversão interna podem produzir um núcleo filho em um estado excitado, como citado anteriormente. O núcleo filho irá alcançar seu estado de menor energia através de um dos seguintes processos:

- a) Emitindo a energia de excitação na forma de um ou mais fótons de alta energia γ , em um processo chamado de decaimento gama (γ).
- b) Transferindo a energia de excitação para algum de seus elétrons (usualmente da camada K = nível 1s), ejetando esse elétron em um processo chamado conversão interna. A lacuna deixada fará com que elétrons das camadas mais externas preencham essa camada vazia emitindo raios X característicos e/ou elétrons Auger.

Em nenhum dos dois casos há mudança no número de prótons ou na massa nuclear.

1.2 TEMPO DE MEIA-VIDA

A ocorrência de decaimento de um único átomo é estatístico, não havendo a possibilidade de prever o momento de transição em um instante específico. Entretanto, levando em consideração que todos os núcleos de radioisótopos (isótopos radioativos) iguais possuem a mesma probabilidade de decaimento, pode-se afirmar que a atividade (A), definida como a taxa de decaimento em função do tempo $\frac{dN}{dt}$ é proporcional ao número de átomos radioativos N ponderada por uma constante de desintegração λ associada à instabilidade do radionuclídeo específico, como na equação (1),

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

que pode ser escrita da forma

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (2)$$

integrando ambos os lados da equação teremos

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \quad (3)$$

$$\ln N = -\lambda t + C \quad (4)$$

$$N = e^{-\lambda t} e^C \quad (5)$$

Considerando que no instante $t = 0$ teremos o número de átomos igual a N_0 , então $e^C = N_0$ e portanto

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

De acordo com a equação (6), a quantidade de núclídeos restantes (que ainda não decaíram em outro tipo de núclídeo) é igual à quantidade inicial de núcleos exponencialmente diminuída em função do tempo transcorrido. Se definirmos o tempo de meia-vida $t_{1/2}$ como o tempo necessário para que metade dos radionuclídeos presentes na amostra decaiam, tem-se

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (7)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (8)$$

A equação (8) garante que o tempo de meia-vida seja inversamente proporcional à constante de desintegração, dependendo, portanto, apenas do núclídeo em questão. Na Tabela 1, foram selecionados alguns radionuclídeos e seus tempos de meia vida para destacar a grande extensão abrangida por essa grandeza física.

Tabela 1 - Alguns exemplos de radionuclídeos e seus tempos de meia-vida. Os números entre parênteses representam as incertezas associadas ao último algarismo significativo do $t_{1/2}$ de cada isótopo, quando conhecidas.

Nuclídeo	Meia vida $t_{1/2}$
${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,04 \times 10^8$ (1) <i>anos</i>
${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 (7) <i>anos</i>
${}^{131}_{53}\text{I}$	8,0252 (6) <i>dias</i>
${}^{243}_{94}\text{Pu}$	4,956 (3) <i>horas</i>
${}^{223}_{90}\text{Th}$	0,60 (2) <i>segundos</i>
${}^{216}_{82}\text{Pb}$	300 <i>nanosegundos</i>

Fonte: IAEA Nuclear Data Section, Isotope Browser

1.3 RAIOS X

A descoberta de Röntgen em novembro de 1895 foi aplicada na medicina muito rapidamente, visto que em março do ano seguinte os raios X já estavam sendo utilizados em radiografias em campos de batalha para a identificação de fraturas. A descoberta, o domínio da técnica, a percepção do potencial medicinal e a divulgação da radiografia da mão da esposa de W. Röntgen, tornaram o físico e engenheiro um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento da física médica contemporânea, visto que a radiação em questão é uma das principais ferramentas atuais da área [1].

Os raios X são ondas eletromagnéticas com frequência superior àquelas correspondentes à radiação ultravioleta, sendo compostas, portanto, de fótons de alta energia. A origem desses fótons está associada à mudança de níveis de energia de elétrons. Logo, não são radiações de origem nuclear. Existem dois tipos diferentes de fenômenos de produção desses raios:

a) raios X de frenamento: são chamados assim pois ocorrem quando elétrons de alta energia são condicionados à aceleração (majoritariamente centrípeta) devido à interação com átomos, especialmente com os seus núcleos, de determinado alvo. O processo de frenamento de diversos elétrons com condições de interação diferentes entre si levam ao surgimento de um espectro contínuo de raios X com energia máxima igual à energia cinética do elétron antes da interação.

b) raios X característicos: São picos de emissão com energias bem específicas advindas da relaxação (o contrário de excitação) de elétrons que foram excitados para orbitais mais energéticos do átomo. A energia de um fóton será a diferença energética entre os dois orbitais envolvidos no processo, e portanto, os raios X emitidos serão característicos de cada tipo de átomo alvo.

Os raios X característicos e os raios X de frenamento poderão aparecer em um mesmo espectro caso a energia de elétrons incidentes em um alvo seja grande o suficiente para provocar a excitação inicial de elétrons nos orbitais dos átomos do alvo.

1.4 ANTIPARTÍCULAS E RADIAÇÃO DE ANIQUILAÇÃO

Em 1927, pensando sobre uma das soluções da equação que leva seu nome, Paul Dirac teorizou a possibilidade de existirem elétrons com carga positiva na natureza. Em 1931, Carl David Anderson detectou essa nova partícula, chamada de pósitron ou antielétron, exatamente com as propriedades previstas por Dirac. O fato é que os resultados dessa equação são características profundas e universais da teoria quântica de campos para todo tipo de partícula, significando que para cada tipo de partícula existente, deve existir uma antipartícula associada de mesma massa mas oposta carga elétrica. O resultado é tão geral que mesmo partículas eletricamente neutras como o nêutron possuem antipartículas associadas com mesma massa mas com diferentes números quânticos. Algumas partículas neutras, entretanto, são suas próprias antipartículas, como por exemplo o fóton. [13]

Partículas e antipartículas não podem coexistir por muito tempo, pois, quando se encontram, elas se aniquilam liberando dois fótons com energias idênticas dadas pela soma das energias de repouso e energias cinéticas das partículas logo antes da colisão. Esses fótons também são usualmente chamados de radiação gama (embora não tenham vindo de um processo de decaimento radioativo). A direção e sentido de emissão desses fótons devem respeitar a conservação de momentum total do sistema a qual muitas vezes é nula, gerando, portanto, dois fótons idênticos emitidos na mesma direção com sentidos opostos.

1.5 MEDICINA NUCLEAR

A medicina nuclear é uma especialidade médica que consiste na utilização de compostos radioativos, na forma de radiofármacos¹, para diagnóstico e tratamento de doenças. O composto radioativo, ao ser administrado no paciente, acumula-se temporalmente em regiões específicas do corpo devido a fatores como metabolismo celular, fluxo sanguíneo e funções específicas dos órgãos. Assim, através de dispositivos de imagens sensíveis à radiação, é possível se obter registro da biodistribuição dos radiofármacos in vivo. A medicina nuclear permite também a realização de tratamentos através da utilização de quantidades maiores de radiofármacos, gerando assim, atividades maiores (em relação a atividades de diagnóstico), através de nuclídeos como o ¹³¹I, utilizado na iodoterapia, indicado em casos de hipertireoidismo ou câncer de tireóide. O ¹³¹I também é utilizado para a aquisição de imagens diagnósticas.

A radiação gama é a radiação de principal interesse na obtenção de imagens na medicina nuclear, seja advinda do decaimento de um núcleo instável, usando gama-câmara, ou por aniquilação elétron-pósitron, em tomografia por emissão de pósitrons.

1.5.1 CINTILOGRAFIA

A cintilografia é uma das principais ferramentas da medicina nuclear para avaliação de patologias de diversos tipos, com destaque para a oncologia, na investigação de tumores e suas metástases e em endocrinologia para análise da tireóide. Essa técnica é utilizada através de gama-câmaras, que são equipamentos específicos para obtenção de imagens planares (em duas dimensões) e também imagens em três dimensões em tomografia computadorizada de emissão de fóton único (cuja sigla em inglês é SPECT). Muitas vezes, as imagens tomográficas com radiação gama são feitas em conjunto com tomografias computadorizadas com fontes externas de raios X em um mesmo aparelho para obtenção de imagens complementares de metabolismo (SPECT) e anatomia (tomografia computadorizada), gerando a técnica de SPECT/computed tomography (CT) [4]. A Figura 1 ilustra o funcionamento de uma gama-câmara.

Para que seja possível realizar um exame de cintilografia é necessária a administração de um radiofármaco emissor de radiação gama, como o ¹³¹I, ¹²³I ou o ^{99m}Tc no paciente. A Agência Internacional de Energia Atômica (cuja sigla em inglês é IAEA) recomenda, baseada em uma tabela da Associação Européia de Medicina Nuclear (EANM) [4], atividades mínimas de radiofármacos para a realização de exames diagnósticos com valores entre 3 e

¹ A maioria dos radiofármacos é uma combinação de um nuclídeo radioativo, que permite a detecção externa, e uma molécula biologicamente ativa ou fármaco que age como carreador e determina a localização e biodistribuição. Para alguns radiofármacos (ex: iodo, gálio, tálio), os próprios átomos radioativos conferem a propriedade de localização desejada [16].

110 MBq (10^6 decaimentos por segundo) dependendo do exame aplicado. Algumas outras variáveis podem influenciar na escolha da atividade da fonte como, por exemplo, peso e idade do paciente [4].

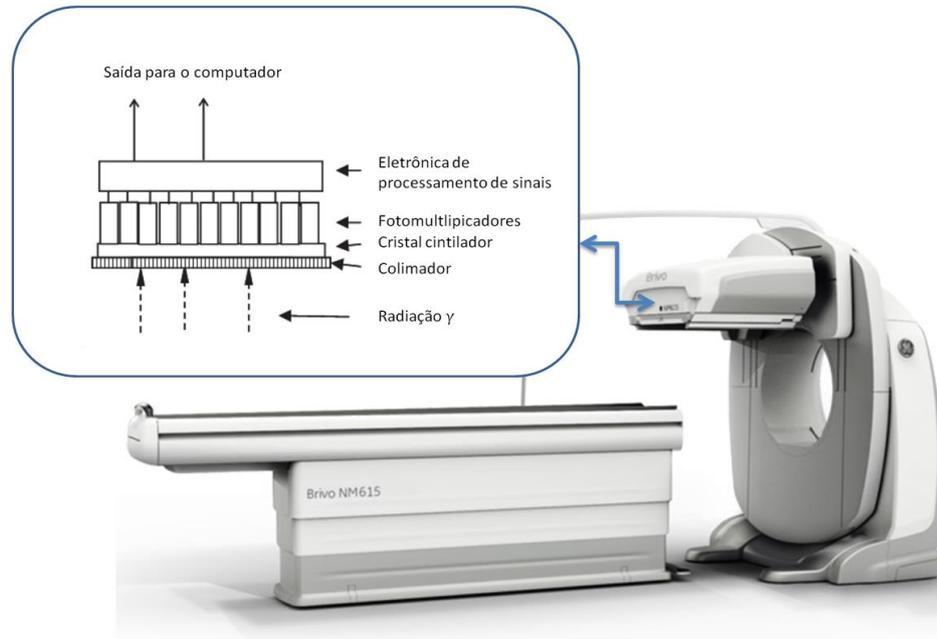


Figura 1 – Ilustração esquemática de uma gama-câmara. Adaptado de [20] e [4]

1.5.2 TERAPIA COM RADIONUCLÍDEOS

A utilização de radiofármacos não se limita apenas à obtenção de imagens diagnósticas. Radionuclídeos vêm sendo utilizados no combate ao câncer e a outras doenças desde os anos 40, e alguns dos nuclídeos utilizados originalmente ainda continuam em uso, como o ^{131}I e o ^{32}P . A terapia com radionuclídeos busca utilizar o metabolismo e as funções específicas dos órgãos para direcionar o radiofármaco principalmente para a região do corpo que apresenta patologia previamente diagnosticada, havendo uma preferência de absorção de energia nessa região e logo, morte celular desse tecido disfuncional. Em terapias, as atividades são bastante superiores às usadas em diagnóstico. Como exemplos, temos tratamento de problemas de funcionamento na tireóide (como hipertireoidismo ou tireotoxicose) com atividades entre 200 e 800 MBq e também tratamento de câncer na tireóide com atividades entre 1100 e 4500 MBq, ambos usando o radioisótopo ^{131}I na forma de solução de iodeto de sódio em soro fisiológico [4].

1.6 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE

O conceito de Dose Absorvida foi introduzido na área das radiações ionizantes para representar a energia média depositada pela radiação incidente em um volume elementar de matéria. Posteriormente, para descrever melhor a absorção de energia por tecidos biológicos, definiu-se a Dose Equivalente, que é a dose absorvida média em todo o tecido ou órgão, ponderada com respeito à qualidade da radiação². Para ponderar a sensibilidade de cada órgão ou tecido específico, criou-se, também, a grandeza Dose Efetiva, a qual leva em consideração também fatores de ponderação dos órgãos ou tecidos. A Dose Absorvida pode ser expressa em rad (1 rad = 100 erg/g de material irradiado), ou em Gray (1 Gy = 1 J/kg = 100 rad), unidade do S.I. A Dose Equivalente e a Dose Efetiva são expressas em Sievert (1 Sv = 1 J/kg) [14].

A irradiação de material biológico pode resultar em transformações químicas em moléculas específicas (água, proteína, açúcar, DNA, etc.), as quais podem levar posteriormente a transformações biológicas. Os efeitos das radiações ionizantes em tecidos biológicos são classificados em dois tipos: efeitos determinísticos e estocásticos [14].

Os **efeitos determinísticos** são aqueles que surgem a partir de um valor de dose limiar e sua gravidade aumenta conforme o aumento de dose absorvida pelo tecido. Estes efeitos incluem inflamação e ulceração da pele, náusea, vômito, anorexia, diarreia, queda de cabelos, anemia, hemorragia, infecções, etc. Esses efeitos são atribuídos, principalmente, à morte celular ou perda de capacidade de reposição de células de vida biológica relativamente curta [14].

Os **efeitos estocásticos** são totalmente probabilísticos, de forma que a probabilidade de ocorrência é função da dose (equivalente ou efetiva), não existindo limiar, como é o caso do câncer. Efeitos hereditários, decorrentes da alteração do material hereditário contido nos gametas (e possível transmissão para os descendentes) devido à irradiação das gônadas também são efeitos estocásticos. Assim, sob o ponto de vista de proteção radiológica, considera-se, por prudência, que qualquer dose de radiação está associada a uma probabilidade de ocorrência de efeitos nocivos à saúde, não importando quão baixa seja essa dose [14].

² Para uma mesma Dose Absorvida, produtos de fissão, partículas alfa e nêutrons geram maior Dose Equivalente, enquanto radiações de menor massa (ou massa nula), como radiação beta, raios X e raios gama geram menor Dose Equivalente. Isso acontece pois as partículas de maior massa normalmente possuem uma maior taxa de deposição de energia em função do caminho percorrido [14].

1.7 PROTEÇÃO NA MANIPULAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, responsável por regular, licenciar e fiscalizar a produção e uso de radionuclídeos, além de promover e apoiar pesquisa sobre esse tema [15]. A CNEN estabelece uma série de normas que tornam possível o bom funcionamento de procedimentos que utilizem material radioativo. A Norma CNEN-NN-3.01 estabelece os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante. A Norma CNEN-NE-3.02 estabelece os requisitos relativos à implantação e ao funcionamento de serviços de radioproteção. A Norma CNEN-NN-3.05 dispõe sobre os requisitos de segurança e proteção radiológica em serviços de medicina nuclear *in vivo* [16]. As três normas citadas fornecem informações claras e precisas sobre as medidas necessárias para implementação, manutenção e aprimoramento da proteção contra exposição e contaminação radioativa em diferentes âmbitos. Nas normas 3.02 e 2.05, a CNEN declara necessária a utilização adequada de equipamentos de proteção individual contra contaminação radioativa, mencionando luvas como um dos equipamento de proteção, havendo especificação para luvas descartáveis no caso de medicina nuclear. Em nenhum dos dois documentos existe a especificação de restrição ou indicação da composição das luvas, indicando, portanto, que qualquer luva em bom estado poderá ser utilizada nas práticas. Da mesma forma, a resolução RDC Nº 67, de 8 de outubro de 2007 da ANVISA, que dispõe sobre boas práticas de manipulação de preparações magistrais e oficinais para uso humano em farmácias³, afirma que as luvas utilizadas devem ser estéreis e trocadas a cada duas horas de trabalho de manipulação e sempre que sua integridade estiver comprometida. Entretanto, esse documento também não faz menção à preferência de material para fabricação da luva⁴. A resolução Nº 38, de 4 de junho de 2008 da ANVISA, que dispõe sobre a instalação e o funcionamento de serviços de medicina nuclear “*in vivo*”, afirma que é necessário, sempre que houver preparação e administração de radiofármacos, a utilização de luvas de procedimento e a troca delas a cada procedimento e sempre que sua integridade esteja comprometida, não havendo menção, novamente, a especificações do material da luva.

³ As disposições deste Regulamento Técnico aplicam-se a todas as Farmácias que realizam qualquer das atividades nele previstas, excluídas as farmácias que manipulam Soluções para Nutrição Parenteral, Enteral e Concentrado Polieletrólítico para Hemodiálise (CPHD)

⁴ A não ser no caso de manipulação/fracionamento de preparações estéreis contendo citostáticos, havendo necessidade da utilização de luvas estéreis cirúrgicas sem pó de látex.

2 OBJETIVOS

Essa pesquisa teve como principal objetivo simular a contaminação externa de luvas poliméricas com solução de iodeto de sódio em soro fisiológico (usada na medicina nuclear em diagnóstico e em tratamento). Analisou-se a possibilidade de permeação de radioisótopos do iodo através de luvas descartáveis e, portanto, a possibilidade de contaminação das mãos durante a manipulação. No caso de haver permeação, e, logo, contaminação, ela poderia ser quantificada e comparada com níveis de referência limites de contaminação de superfície estipulados pela IAEA. Foram analisadas luvas de três diferentes polímeros: látex, vinil e nitrilo. Como objetivo secundário, essa pesquisa visou determinar se o tempo de contaminação externa poderia influenciar na permeação de iodo, tornando válida ou não a prática de trocar de luva ao perceber a contaminação externa sob o ponto de vista de permeabilidade do nuclide. Para tal análise foi utilizada a técnica de Espectrometria de Retroespalhamento Rutherford (do inglês RBS), a qual possui grande sensibilidade para átomos massivos como o iodo.

A problemática apresentada nesse trabalho de conclusão foi idealizada pelos Físicos Andréia Caroline e Daniel Molena Seraphim, atuantes no Hospital de Clínicas de Porto Alegre na área de medicina nuclear, enquanto os métodos de abordagem do problema e aplicação dos mesmos foram dadas pelo autor sob fundamental orientação da professora Fernanda Stedile e do Daniel.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 ESPECTROSCOPIA DE RETROESPALHAMENTO RUTHERFORD - RBS

A técnica de Espectroscopia de Retroespalhamento Rutherford consiste em incidir íons de massa e energia conhecida em amostras de interesse para realização de análise composicional quantitativa. Os íons que possuem energia da ordem de mega elétron-volt (MeV), ao encontrarem os núcleos dos átomos da amostra, sofrem colisões elásticas no campo nuclear, conservando a energia e o momentum total na colisão. Ao serem detectados em um ângulo específico, esses íons retroespalhados fornecem informações sobre a massa do núcleo encontrado na colisão, tornando possível a identificação dos elementos presentes na amostra e sua quantificação. A partir disso, dado o ângulo específico de espalhamento, escolhido durante o pré-posicionamento de um detector, a medição da energia do íon após a colisão possibilitará determinar a massa do núcleo alvo. A detecção da energia de vários íons retroespalhados possibilitará a construção de um espectro de contagens em função da energia, possibilitando a análise dos elementos presentes na amostra. A configuração de análise típica

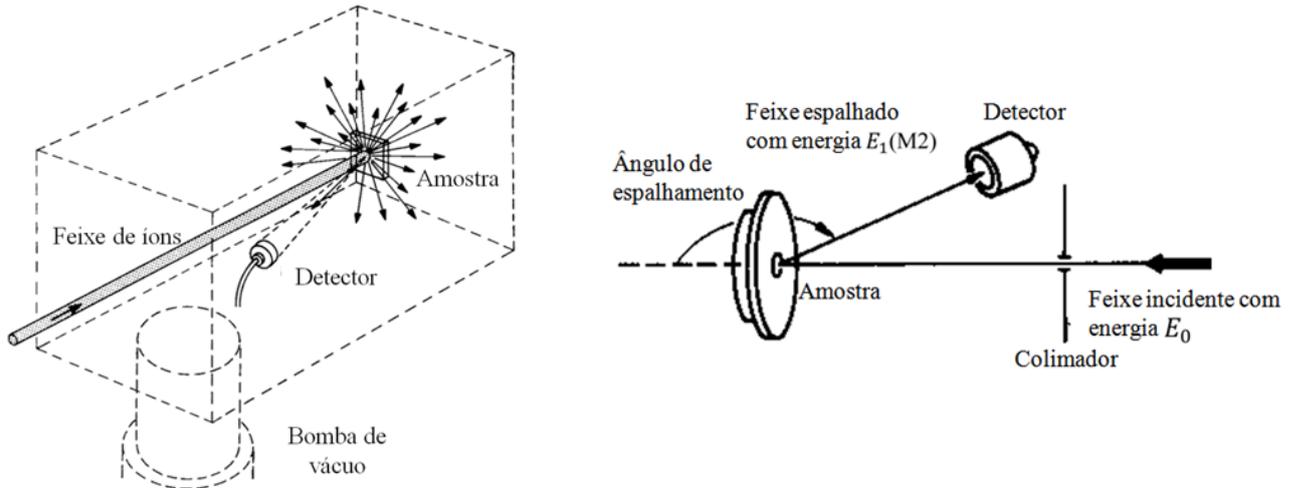


Figura 2 - Configuração típica de análise com RBS, adaptada de [17] e [21].

de RBS está mostrada na Figura 2. A análise é feita em atmosfera de aproximadamente 10^{-6} Torr [17], considerado um "vácuo" facilmente alcançável para os padrões atuais, tornando rápido o processo de troca de amostra. A técnica necessita de alto-vácuo para que os íons possam percorrer o caminho desde a fonte de íons até a câmara de análises sem interagir com outros átomos. Todas as medidas foram feitas no acelerador de íons Tandetron da HVEE de 3 MV instalado no Laboratório de Implantação Iônica (LII) do Instituto de Física da UFRGS, brevemente explicado na Figura 3. O acelerador utilizado comporta diversos tipos de processos além da técnica de RBS e também implantação dos íons. Por isso, existe mais de uma saída para o feixe.

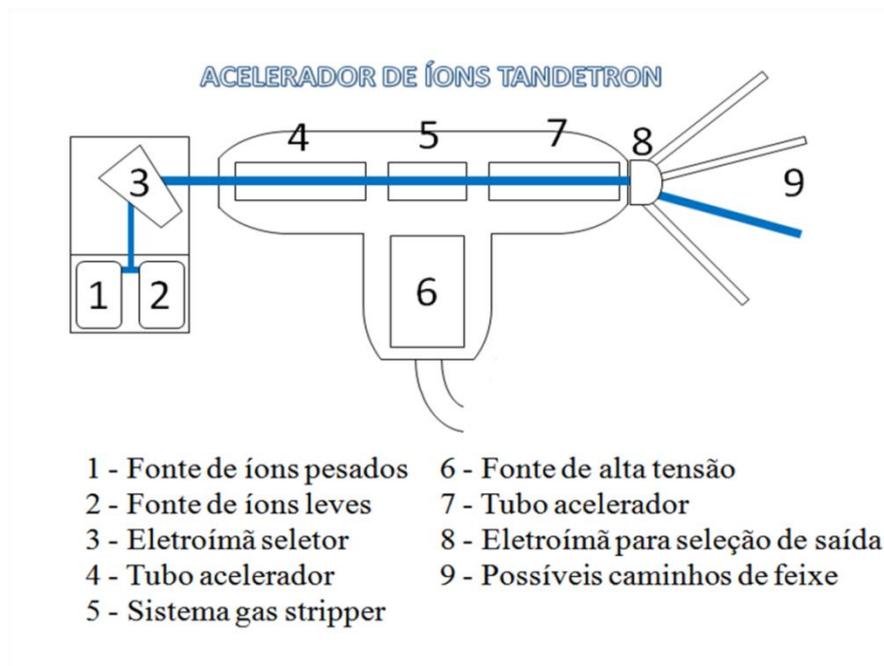


Figura 3 - Esquema de funcionamento do acelerador Tandetron do LII do Instituto de Física da UFRGS.

Para fazer a análise, utilizou-se um feixe de He^+ com 2 MeV de energia, a qual não é capaz de realizar mudanças na amostra através de reações nucleares⁵. Utilizou-se diâmetro de feixe de 2 mm, definido pela abertura do colimador. Todas as amostras foram posicionadas de forma que o feixe estivesse perpendicular ao plano da amostra. Foram utilizados, simultaneamente, dois detectores de partículas do tipo diodo por implantação iônica posicionados a 165° e a -165° em relação ao feixe incidente. A utilização de dois detectores foi importante para a obtenção de um espectro de maior qualidade, visto que a quantidade de material sondado, no caso o iodo, é baixa, gerando sinais pouco intensos e que poderiam se confundir com detecções de fundo⁶. A associação dos dois detectores tornou possível a diminuição do tempo de medida até que os espectros estivessem satisfatórios na região do sinal do iodo. Utilizou-se um pré-amplificador modelo ORTEC 142 e um amplificador ORTEC 572A para cada detector. Na Tabela 2, apresentamos as configurações de detecção.

Tabela 2 - Informações dos detectores de íons do tipo diodo e das ampliações utilizadas

Detector	Ângulo em relação ao feixe incidente	Modelo	Tensão nos detectores	Tensão nos amplificadores
1	165°	CANBERRA PP 25-10-500-AM	80V	208,8 V
2	-165°	ORTEC CU-011-025-300	80V	208,8 V

Para calibração das medidas, foi utilizada uma energia fixa de 2 MeV e três padrões de materiais conhecidos: grafite, nitreto de titânio sobre silício (TiN/Si) e óxido de silício sobre silício (SiO_2/Si). Os três materiais foram medidos independentemente, e geraram seis sinais diferentes e com energias conhecidas⁷: C, Si, O, Ti e N. Estes sinais foram utilizados para criar uma reta de calibração para cada detector. Os dados precisam ser convertidos pois os dados originais advindos dos detectores são de contagens em função de canais de detecção, sendo necessário um espectro de contagens em função da energia. Um software chamado BinAscEn, construído pelo professor Rogério Maltês do Instituto de Física foi utilizado para somar os dados de ambos os detectores e transformá-los em um único espectro através das retas de calibração de cada detector. Dessa forma os dados originais (contagens em função de canais) podem ser apresentados sob a forma de um gráfico de contagens em função da energia.

⁵ Reações nucleares com feixe de He^+ começam a aparecer entre 2 e 3 MeV, portanto, 2 MeV é o limite superior que podemos utilizar para que não haja reações nucleares no processo de medida [17].

⁶ Detecções de fundo são sinais ruidosos indesejáveis no espectro. Uma das formas de haver detecção de fundo é quando dois ou mais íon são detectados simultaneamente, gerando contagens com a soma das suas energias. Esse tipo de contagem de fundo é chamada de "pile-up" e pode ser diminuída com a diminuição da corrente de feixe.

⁷ As energias são conhecidas pois foram calculadas utilizando a equação 9, com as respectivas massas dos átomos citados.

Os sinais nos espectros dos padrões e das amostras analisadas são identificados através da equação (9) [17], que fornece a energia teórica do íon de massa M_1 espalhado após a colisão em função da massa M_2 do átomo espalhador (presente na amostra) dado um ângulo de espalhamento θ e uma energia do íon imediatamente antes da colisão E_0 .

$$E_1(M_2) = \frac{1}{E_0} \left[\frac{\sqrt{M_2^2 - M_1^2 \text{sen}^2 \theta} + M_1 \text{cos} \theta}{M_2 + M_1} \right]^2 \quad (9)$$

Além disso, o número de contagens é proporcional à seção de choque diferencial do átomo espalhador σ na colisão elástica, visto que quando maior a área de seção de choque, mais vezes o íon acelerado encontrará aquele átomo específico. Dito isso, é necessário que, no cálculo estequiométrico de uma amostra, seja levada em conta a seção de choque dada pela equação (10) [17], sendo Z_1 e Z_2 , M_1 e M_2 os números atômicos e as massas atômicas do projétil e do átomo alvo respectivamente, e a carga elementar do elétron (ou do próton), θ o ângulo de espalhamento e E_0 a energia do projétil imediatamente antes da colisão.

$$\sigma = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{4}{\text{sen}^4 \theta} \frac{\{[1 - ((M_1/M_2)\text{sen}\theta)^2]^{1/2} + \text{cos} \theta\}^2}{[1 - ((M_1/M_2)\text{sen}\theta)^2]^{1/2}} \quad (10)$$

É importante ressaltar que os íons de alta energia não são capazes de penetrar profundamente na amostra, e todos aqueles que penetram, mesmo que alguns micrômetros, perdem energia no processo e não são capazes de voltar para o detector, ou, caso consigam chegar até o detector, comporão o espectro em posições de energias menores que aquelas sondadas na superfície, devido à perda energética no processo de interação com os átomos da amostra [17]. Isso significa que, ao olharmos para a altura do sinal próxima à energia do iodo, estaremos sondando somente o iodo na superfície atingida pelos íons, ou seja, na superfície interna da luva.

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para realização da análise de proteção contra contaminação de radioisótopos do iodo foram escolhidas as luvas descritas na Tabela 3. As luvas de vinil sem pó e de látex com pó foram fornecidas pelo serviço de Medicina Nuclear do Hospital de Clínicas de Porto Alegre em virtude de que essas são luvas utilizadas no processo de manipulação de radiofármacos. As luvas de nitrilo sem pó foram disponibilizadas pelo instituto de Física da UFRGS e sempre são utilizadas nos mais diversos laboratórios dessa universidade. As luvas de látex sem pó foram compradas visando uma complementação da análise.

Preparou-se uma solução de iodeto de sódio em soro fisiológico saturada desse sal, com massa desse iodeto de sódio de $6,984(3)^8$ g em 5 mL de soro fisiológico^{9,10} (para temperatura de aproximadamente 23°C). Para a análise utilizou-se iodeto de sódio com ^{127}I , visto que esse é o único isótopo estável do iodo e, por possuir o mesmo tamanho e o mesmo número atômico, deve difundir de forma muito parecida com os seus radioisótopos.

Para simulação da contaminação externa das luvas, todas elas foram vestidas na mão esquerda, individualmente, e com o dedo indicador dessa mão, encostou-se em um vidro de relógio uniformemente molhado com 2 mL de solução de soro fisiológico saturada de iodeto de sódio durante 2 segundos, como ilustrado na foto da Figura 4. Após essa contaminação externa, cada luva foi retirada, o dedo contaminado foi recortado, invertido (a parte de dentro foi exposta para fora) e posicionado no porta amostra da câmara de RBS. Após isso, o porta amostra e a amostra foram inseridos rapidamente na câmara de RBS sob pressão de aproximadamente 10^{-6} Torr, de forma que, como a luva foi invertida, o feixe, quando acionado, incidiria sobre a parte interna da luva, exatamente na região contaminada. Cada luva teve um tempo de pré-contaminação, ou seja, um tempo de espera desde o momento de contaminação externa até o momento em que a análise de RBS fosse iniciada. Além disso, para um mesmo tipo de luva, foram feitos diferentes intervalos de tempos de espera até o início da análise com incidência de feixe, sendo o intervalo de tempo mínimo de espera de cada luva o tempo necessário até o posicionamento correto do dedo da luva e de trabalho das bombas de vácuo até a condição necessária para medida. Esses intervalos de tempo de espera foram cronometrados e chamados de intervalos de tempo de pré-contaminação, e também estão na Tabela 3.

Tabela 3- Luvas analisadas e seus diferentes tempos de espera até o início da medida com feixe de íons.

Luva	Marca	Intervalos de tempo de pré-contaminação (min) (arredondados para minutos completos)¹¹
Nitrilo sem pó	Supermax	07
		27
Vinil sem pó	Descarpack	07
		21
		60
Látex com pó	Lemgruber	21
		60
Látex sem pó	Lemgruber	11

⁸ Para medidas das massas de iodeto de sódio utilizou-se uma balança digital analítica Web Labor sp. Nesse caso, o parêntese no último valor indica que a incerteza da balança está nessa casa decimal e vale 0,0001 g.

⁹ Utilizou-se solução fisiológica da marca Arboreto com composição indicada no rótulo: 9 mg de cloreto de sódio para cada 1 mL de água purificada qsp.

¹⁰ Os volumes das soluções foram medidas usando pipetas volumétricas.

¹¹ Não foi possível estabelecer os mesmos intervalos de tempos de espera de pré-contaminação de forma padrão para todas as luvas por conta de fatores experimentais como o tempo de espera até que a pressão na câmara estivesse adequada para medida.

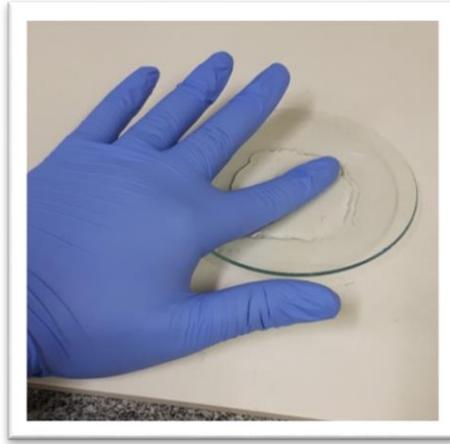


Figura 4- Foto do momento da contaminação externa da luva de nitrilo sem pó com solução saturada de iodeto de sódio.

As análises foram iniciadas através de um software previamente construído e próprio para aquisição de espectros de RBS em um computador previamente adaptado à eletrônica do sistema. Durante a análise de cada luva, aproximadamente a cada 10 minutos de medida, a posição da luva em relação ao feixe foi alterada em 2 mm na mesma linha horizontal, mantendo sempre o plano da amostra perpendicular à linha do feixe. Essas alterações de posições das luvas permitiram uma maior área de sondagem da superfície interna da luva. Manteve-se sempre o cuidado de analisar somente a parte interna correspondente às partes externas contaminadas com a solução saturada de iodeto de sódio.

O tempo de análise de cada luva foi em torno de 1 hora de medida, tempo até que os espectros apresentassem uma relação sinal/ruído satisfatória. Entretanto, para o caso das luvas de nitrilo sem pó, de látex sem pó e de vinil sem pó, teve-se o cuidado de, para o tempo mínimo de pré-contaminação conseguido, o tempo total de análise individual com feixe ser de 60 minutos cronometrados, e, portanto, os tempos totais de contaminação serem de 60 min mais o tempo de pré-contaminação. Esse cuidado foi tomado para que, ao analisar os dados, se conseguisse comparar os valores de contaminação devido o tempo total de difusão do iodo inclusive entre luvas de materiais distintos. Vale lembrar que, a princípio, a difusão do iodo através da luva não deve parar somente por estarmos medindo, e, portanto, esse tempo de aproximadamente uma hora de medida tem que ser levado em consideração durante a análise dos resultados.

Para fins de análise quantitativa, preparou-se uma solução com 0,002(2)g de iodeto de sódio em 15 mL de soro fisiológico e contaminou-se diretamente a parte interna da luva de vinil com essa solução através do mesmo processo aplicado com as outras luvas, entretanto, vestindo a luva já virada, ou seja, com a parte de dentro para fora, analisando com feixe de íons essa mesma parte interna. O tempo total de análise com feixe dessa luva também foi cronometrado e durou 60 minutos para que o sinal de iodo registrado nesse caso pudesse ser diretamente comparado com o sinal de iodo das luvas contaminadas externamente com a solução saturada.

Ao final das medidas, todas as luvas apresentaram pontos de impacto dos íons, como mostrado na Figura 5, para a luva de látex com pó com tempo de pré-contaminação de 60 min, medida por 60 minutos com feixe de íons, utilizada como exemplo. Esses pontos escuros indicam que houve um aquecimento das luvas nos pontos de impacto. Esse aquecimento não foi capaz, entretanto, de provocar furos, rasgos ou danos desse tipo nas luvas, mantendo válidos os resultados da análise.

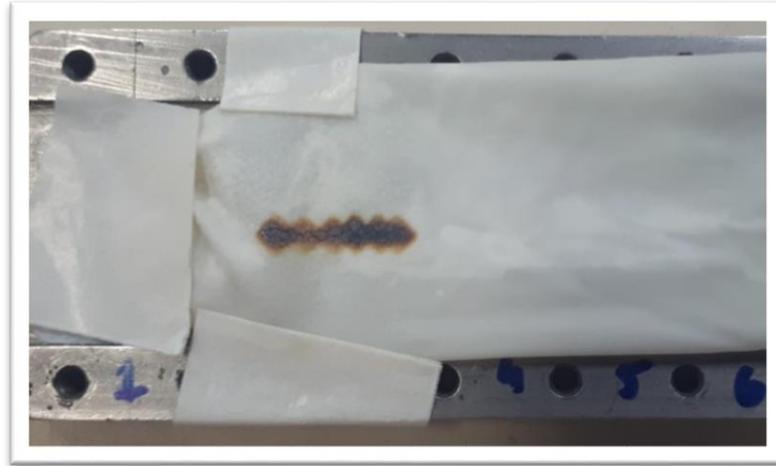


Figura 5 - Foto da luva de látex com pó presa no porta amostra após 60 minutos de análise com feixe de íons.

4 ANÁLISE

Após obtidos os espectros das luvas não contaminadas (padrões) e das luvas contaminadas com diferentes tempos de espera após contaminação até o início da medida, foram construídas as figuras 6 a 8 . Nesses espectros, é possível observar sinais de diferentes elementos, os quais fazem parte da composição da superfície interna da luva. Não houve uma investigação acerca do processo de fabricação das luvas. Entretanto, os elementos detectados devem se referir à composição do polímero, do pó (no caso das luvas com pó), ou do processo de fabricação da luva (ativadores ou catalisadores) como o zinco ou o neodímio.

Os espectros tornaram possível a análise da efetividade da proteção das luvas, visto que o sinal do iodo só será observado quando houver passagem do material para o interior da luva. É possível observar que para todos os diferentes tempos de contaminação, iodo foi detectado na parte interna das luvas de nitrilo e de vinil, indicando uma falta de proteção absoluta desses polímeros. Nos espectros das luvas de látex, não se observa sinal de iodo para nenhum tempo de pré-contaminação testado, tanto no caso das luvas sem pó quanto nas luvas com pó na parte interna. Isso indica que a luva de látex oferece uma melhor proteção em relação às outras luvas testadas.

Quanto à comparação entre a passagem de iodo, faz-se necessário o estudo quantitativo estequiométrico total das amostras ajustando curvas a todos os sinais de núclídeos detectados nos espectros. As curvas escolhidas para ajustes dos sinais observados foram sigmóides do tipo

$$f(x) = \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} + A_2 \quad (11)$$

sendo $f(x)$ as contagens, x a energia, x_0 o ponto de inflexão (energia do sinal do radionuclídeo), A_1, A_2 e p constantes atribuídas ao ponto mais alto, ao ponto mais baixo e à inclinação da curva, respectivamente. Essa sigmóide foi escolhida por descrever bem os sinais analisados, como exemplificado na Figura 9, e por fornecer exatamente os parâmetros necessários A_1 e A_2 para determinar a altura de cada sinal, em contagens, $\Delta A = A_1 - A_2$ e assim relacioná-los entre si para determinar a estequiometria do interior de uma mesma luva (uma vez conhecida a seção de choque da colisão).

Para determinar a razão (R) de iodo na superfície interna da luva em relação aos outros átomos presentes na mesma, basta dividir a altura do degrau do iodo ΔA_{iodo} dividido por sua seção de choque (σ_{iodo}), pela soma da altura de todos os sinais presentes no espectro ponderados por suas seções de choque como na equação (12), sendo a somatória em n referente à soma de cada sinal do mesmo espectro.

$$R(\%) = \frac{\Delta A_{\text{iodo}}}{\sum n \frac{\Delta A_n}{\sigma_n}} \times 100 \quad (12)$$

O resultado da aplicação da equação (12) para os espectros das diferentes luvas e seus diferentes tempos de contaminação pré-análise estão contidos na Tabela 4.

Tabela 4 Tabela de porcentagem relativa dos átomos de iodo em relação aos outros átomos da mesma superfície interna da luva em função do material e de diferentes tempos de pré-contaminação.

Luva	Tempo de pré-contaminação (min)	% *
Nitrilo sem pó	7	0,005%
	27	0,032%
Vinil sem pó	7	0,004%
	21	0,006%
	60	0,117%
Látex com pó	21	não detectado
	60	
Látex sem pó	11	não detectado

*de número de átomos de iodo em relação aos outros átomos da mesma amostra.

Supondo que a superfície interna permaneceu praticamente inalterada (com exceção da pequena quantidade de átomos que difundiram), os primeiros dois tempos da tabela indicam que houve um aumento de mais de 6 vezes na quantidade de átomos de iodo no interior da luva de nitrilo sem pó devido ao aumento de 20 minutos de espera. Para a luva de vinil sem pó, têm-se um resultado inconclusivo sobre o aumento ou não da quantidade de iodo entre os

tempos de 7 e 21 minutos, visto que a diferença é muito sutil (podendo estar inclusive dentro da incerteza experimental). Entretanto, é muito claro o aumento de iodo no interior da luva após 60 minutos de espera, visto que temos um aumento de quase 30 vezes em relação ao caso de 7 minutos de pré-contaminação.

ESPECTROS DAS LUVAS DE NITRILO SEM PÓ

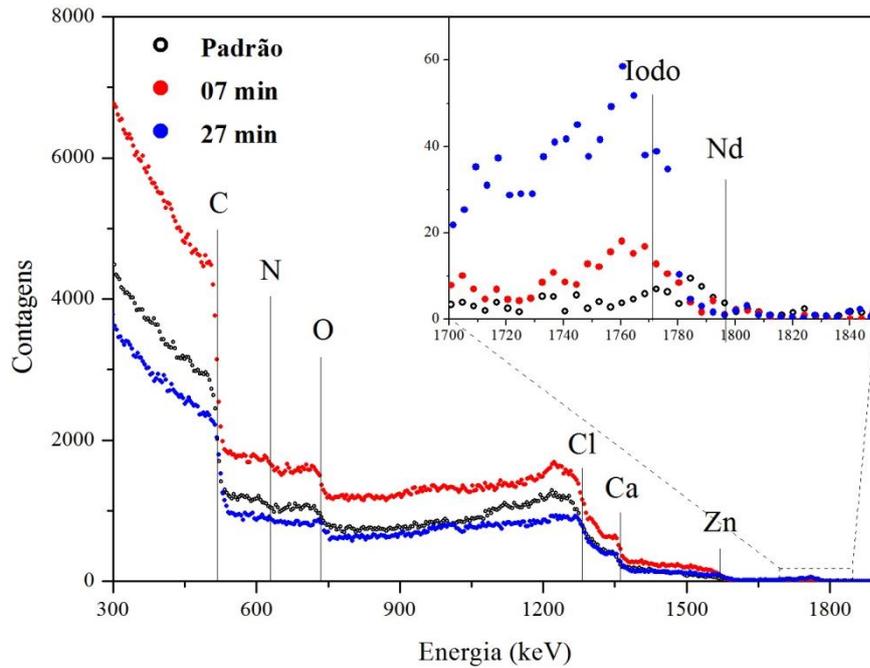


Figura 6 - Espectros das luvas de nitrilo sem pó a) padrão sem contaminação; b) com início de medida após 7 minutos de contaminação externa; c) com início de medida após 27 minutos de contaminação.

ESPECTROS DAS LUVAS DE VINIL SEM PÓ

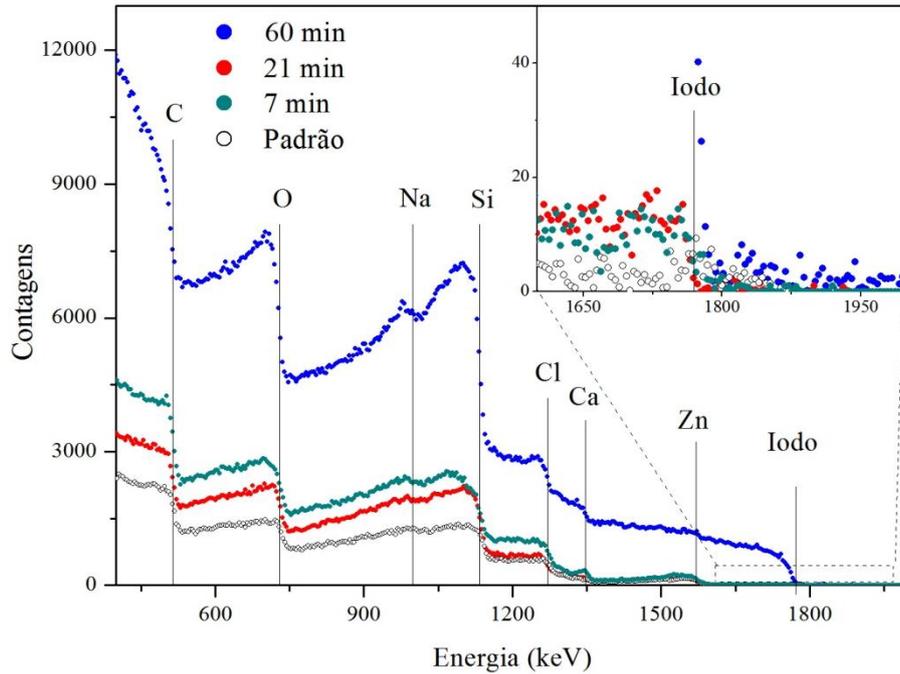


Figura 7 - Espectros das luvas de vinil sem pó a) padrão sem contaminação; b) com início de medida após 7 minutos de contaminação externa; c) com início de medida após 21 minutos de contaminação externa; d) com início de medida após 60 minutos de contaminação.

ESPECTROS DAS LUVAS DE LÁTEX COM E SEM PÓ

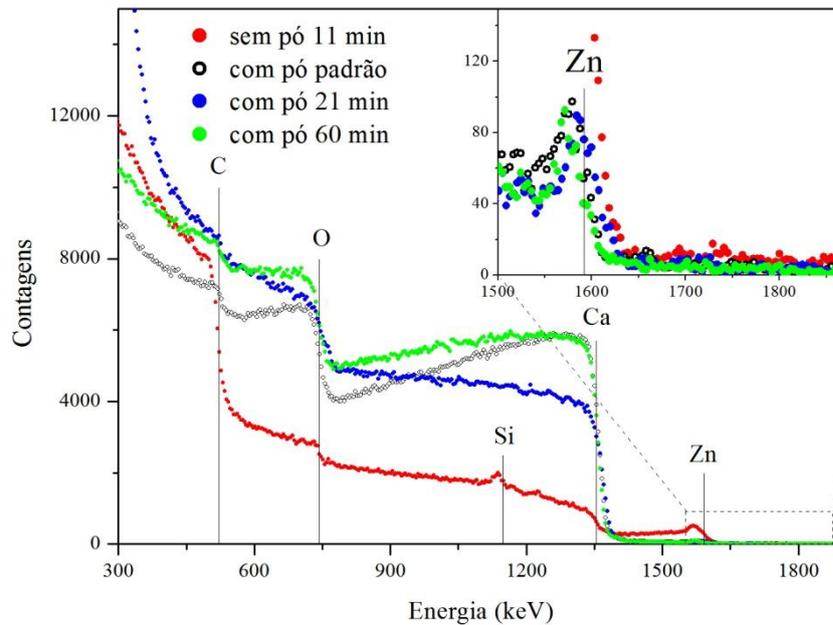


Figura 8 - Espectros das luvas de látex a) sem pó com 11 minutos de pré-contaminação; b) com pó sem contaminação alguma (padrão); c) com pó e início de medida após 21 minutos de contaminação externa; d) com pó e início de medida após 60 minutos de contaminação externa.

AJUSTE DO SINAL DE OXIGÊNIO NA LUVÁ PADRÃO DE NITRILO SEM PÓ

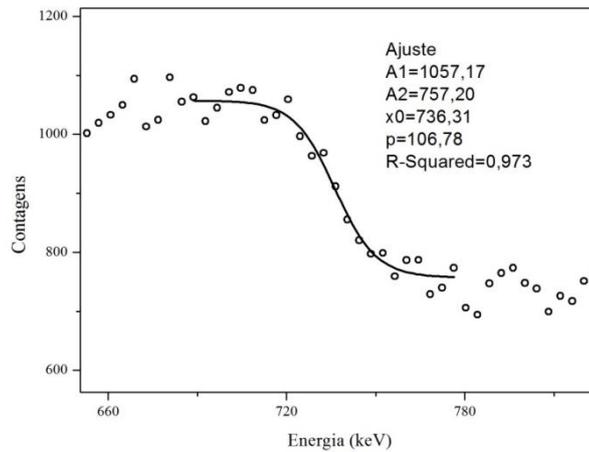


Figura 9 - Sigmoide com forma dada pela equação (9), ajustada ao sinal do oxigênio no espectro da luva padrão de nitrilo. À direita da curva encontram-se os parâmetros determinados pelo software OriginPro 8, sendo R-Squared o coeficiente de determinação que varia de 0 a 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os dados ajustados.

Para realizar uma análise quantitativa, obteve-se o espectro da luva de referência contaminada diretamente em 2 mL da solução padrão de concentração $0,1467 \text{ mg/mL}$ de solução (preparada com 0,002(2) g de iodeto de sódio em 15 mL de soro fisiológico), mostrado na Figura 10. A luva de referência foi medida com tempo total de aquisição de espectro de 60 min, e com corrente de feixe de 8 nA/cm^2 . Essas condições de medida foram as mesmas daquelas utilizadas para obtenção dos espectros das luvas de vinil e de nitrilo sem pó com 7 min de pré-contaminação. Isso nos permite analisar diretamente o ΔA_{iodo} de cada um desses dois espectros e comparar esse mesmo parâmetro da luva de referência.

ESPECTROS DA LUVÁ DE REFERÊNCIA

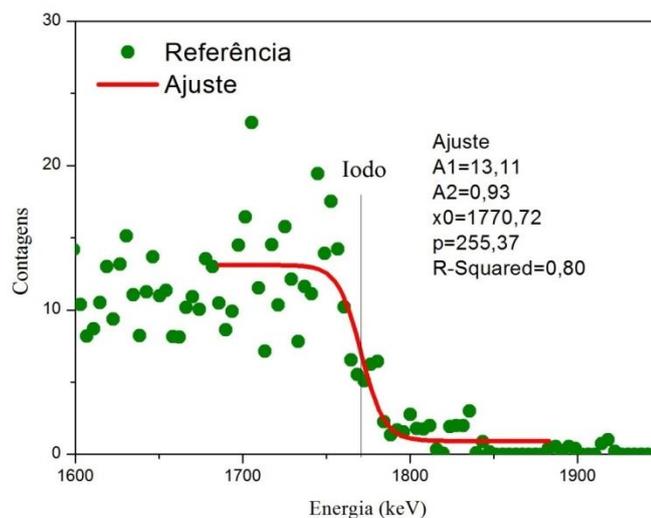


Figura 10 - Sigmoide com forma dada pela equação (11), ajustada ao sinal do iodo no espectro da luva de vinil sem pó contaminada com a solução padrão. À direita da curva encontram-se os parâmetros determinados pelo software OriginPro 8, sendo R-Squared o coeficiente de determinação que varia entre 0 e 1, indicando a porcentagem de quanto o modelo se adapta aos pontos.

As luvas de nitrilo e de vinil com pré-contaminação de 7 min foram contaminadas na parte externa com solução saturada (6,984(3) g de iodeto de sódio para 5 mL de soro fisiológico) e apresentaram sinais de iodo na parte interna com sinal de altura em contagens $\Delta A_{nitrilo} = 15,96$ e $\Delta A_{vinil} = 10,72$ respectivamente. Da mesma forma, a luva de referência apresentou $\Delta A_{ref} = 12,18$. Na prática, isso significa que a contaminação externa com solução saturada de iodeto de sódio gerou uma contaminação interna muito similar à contaminação com a solução de referência aplicada diretamente na face interna. Fazendo a divisão entre esses valores, obtêm-se que a contaminação externa da luva de nitrilo é 1,31 vezes maior que a contaminação com a solução de referência, enquanto a contaminação da luva de vinil é 0,88 vezes a contaminação com a solução de referência. Portanto, a contaminação da parte externa da luva de nitrilo deve gerar uma contaminação interna à luva equivalente a uma solução de $1,31 \times 0,0022 \text{ g} \approx 0,0029 \text{ g}$ de iodeto de sódio em 5 mL de soro fisiológico. Além disso, a contaminação da parte externa da luva de vinil deve gerar uma contaminação interna à luva equivalente à contaminação de uma solução de $0,88 \times 0,0022 \text{ g} \approx 0,0019 \text{ g}$ de iodeto de sódio em 5 mL de soro fisiológico.

Dada a concentração da solução saturada, pode-se concluir que ela tem 1,396(9) g de iodeto de sódio por mL. Seguindo a mesma lógica, a solução equivalente à contaminação devido à permeação na luva de nitrilo tem 0,00058 g de iodeto de sódio por mL de solução. Isso significa que aproximadamente 0,04% de iodo do iodeto de sódio permeia através da luva. Como a atividade é proporcional à massa de iodo, calculou-se que a atividade da contaminação na luva internamente deve ser também 0,04% da atividade da contaminação total externa.

De forma análoga, a contaminação externa com solução saturada de iodeto de sódio gera uma contaminação interna equivalente a uma contaminação com solução de 0,00038 g de iodeto de sódio por mL. Isso significa uma permeação de $0,027\% \approx 0,03\%$ de iodo. Essa proporção é aproximadamente 0,68 menor que a proporção de permeação pela luva de nitrilo analisada.

É importante ressaltar que estamos fazendo o cálculo para as luvas com período de pré-contaminação de 7 min e tempo de medida total de 60 min. A permeação do iodo através da luva, portanto, não se refere a um tempo de 7 min após a contaminação, mas sim é uma média para 67 min de contaminação, visto que o iodo não parou de permear a luva após o início da medida e, portanto, os espectros obtidos devem ser uma superposição de espectros instantâneos no tempo ao longo de 60 min após os 7 min de pré-contaminação. Isso, entretanto, não é um problema sob o ponto de vista de comparação com a realidade de um hospital, visto que, 60 minutos pode representar o período entre uma troca de luva e outra em alguns cenários de manipulação de material radioativo contaminado com iodo, como a liberação do quarto destinado a internação para pacientes submetidos a iodoterapia.

Em hospitais com serviço de medicina nuclear, como o hospital de Clínicas de Porto Alegre, é comum a manipulação, principalmente por farmacêuticos, de soluções com atividades altas o suficiente para realização de terapia e diagnóstico. A Figura 11 é a cópia de um documento recebida pelo HCPA com informações da solução de iodeto de sódio com ^{131}I

adquirido através do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Esse documento informa que a solução tem concentração (em atividade) de $3704,24 \text{ MBq/mL}$ de solução, o que é um exemplo de atividade manipulada cotidianamente nesse hospital.

CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL		
MATERIAL: IODETO DE SODIO I-131		
ATIVIDADE: 4255 MBq		
CONCENTRAÇÃO: 3704,24 MBq/mL	VOLUME: 1,15 mL	
DATA DA CALIBRAÇÃO: 12/06/2019 18:00		
FORMA QUÍMICA: Iodeto de Sodio	ATIVIDADE ESPECÍFICA: 0,00 MBq/mg	
FORMA FÍSICA:	<input checked="" type="checkbox"/> LÍQUIDO	<input type="checkbox"/> SÓLIDO <input type="checkbox"/> GASOSO
ARMAZENAMENTO:	<input type="checkbox"/> MANTER CONGELADO	<input type="checkbox"/> MANTER REFRIGERADO <input checked="" type="checkbox"/> MANTER AMBIENTE

Figura 11 - Cópia de um documento recebido pelo HCPA com especificações da solução de iodeto de sódio adquiridas através do IPEN.

Supondo que um(a) farmacêutico(a) esteja manipulando uma solução com concentração idêntica aquela descrita no documento, e uma única gota de 0,05 mL (volume de uma gota padrão considerado pela IAEA [18]) atinge a parte externa da luva corretamente vestida do indivíduo que está manipulando. Suponha também que essa gota se espalhe em uma área de aproximadamente $0,5 \text{ cm}^2$, por exemplo. Se o indivíduo não tirar essa luva nos próximos 67 min¹², levado em conta as porcentagens de permeação determinadas, o volume da gota e a área de contaminação, teremos iodo na superfície interna das luvas com atividades por área interna equivalentes às descritas na Tabela 5- Atividade por área de contaminação interna das luvas.

Tabela 5- Atividade por área de contaminação interna das luvas supondo a contaminação externa de uma gota com concentração $3704,24 \text{ MBq/mL}$ espalhada em uma área de $0,5 \text{ cm}^2$.

Luva	Atividade da contaminação interna por área (kBq/cm^2)
Nitrilo sem pó	148,17
Vinil sem pó	100,01

¹² Esse é um tempo que pode ser considerado bastante longo entre troca de luvas para essa prática, dado que no HCPA os farmacêuticos possuem o hábito de troca de luvas com grande frequência. Entretanto, esse intervalo de tempo está dentro das recomendações de troca a cada 2 horas da resolução RDC N° 67, de 8 de outubro de 2007 da ANVISA.

Para fazermos uma comparação, a Agência Internacional de Energia Atômica apresenta o valor limite de contaminação para ^{131}I em superfícies em áreas controladas, incluindo roupa de proteção, como $0,1 \text{ kBq/cm}^2$ [4]. Esse valor limite não deve aplicar-se para o interior de uma luva, como é o nosso caso, entretanto, é válido compararmos os valores e percebermos que as de atividades determinadas através dessa análise são contaminações radioativas significativas para o caso das luvas de vinil e de nitrilo.

Além disso, a Agência Internacional de Energia Atômica também apresenta, em seu guia prático para a rápida identificação de fontes radioativas e equipamentos que as contenham [18], uma estimativa para a taxa de dose devido às possíveis contaminações na pele. Para o caso de contaminação na pele com uma gota ($0,05 \text{ mL}$) de solução contendo ^{131}I , com total de 37 kBq de atividade, a taxa de dose absorvida pelo indivíduo seria de 21 mSv/h , de acordo com esse guia. A partir disso, podemos construir a Tabela 6, com a estimativa de contaminações internas às luvas analisadas e taxas de dose devido essas contaminações no caso de contaminação externa com uma gota da solução descrita na Figura 11.

Tabela 6 - Estimativa de contaminação interna e de taxa de dose devido essa contaminação após 7 minutos de pré-contaminação e 60 min de análise. Para os cálculos se utilizou a concentração da solução descrita na Figura 11.

Luva	Contaminação externa por uma gota de solução (MBq)	% Permeação	Contaminação Interna (MBq)	Taxa de Dose (mSv/h)
Nitrilo sem pó		0,04	0,07	40
Vinil sem pó	185,212	0,03	0,06	34

Na norma CNEN-NN-3.01, a Comissão Nacional de Energia Nuclear determina o limite de dose anual para taxa de dose nas mãos de indivíduos ocupacionalmente expostos (à radiação) como 500 mSv/ano . Isso significa que, ao longo de um ano de trabalho, o indivíduo atingirá o limite de dose caso atinja o total de tempo de contaminação descrito na Tabela 7.

Tabela 7 - Estimativa do limite de horas trabalhadas com luvas contaminadas por ano, até atingir o limite de 500 mSv/ano.

Luva	Limite de horas de trabalho com luvas contaminadas por ano
Nitrilo sem pó	12,5
Vinil sem pó	14,7

Isso não significaria, em hipótese alguma, que o indivíduo estaria livre para trabalhar com luvas contaminadas até atingir o limite de horas, visto que o objetivo maior da proteção

radiológica é evitar exposições desnecessárias do indivíduo à radiação ionizante, mantendo as doses de radiação tão baixas quanto razoavelmente exequível (ALARA) [14].

É possível, a partir dos resultados discutidos, construir a equação 13, a qual fornece a taxa de dose \dot{H} nas mãos, resultante de uma contaminação devido a passagem de ^{131}I das luvas de nitrilo e de vinil sem pó analisadas. Nessa equação, A é a atividade da contaminação externa em kBq , P é a razão de permeação (porcentagem de permeação de cada luva descrita na Tabela 6 dividida por 100). Nesse caso, \dot{H} terá unidade mSv/h .

$$\dot{H} = \frac{21 \text{ mSv/h}}{37 \text{ kBq}} A \times P \quad (13)$$

Para a realização de uma análise de incertezas de determinações devido o processo experimental como um todo, repetiu-se duas vezes o processo de contaminação externa da luva de vinil sem pó com solução saturada de iodeto de sódio e pré-contaminação de 7 minutos. Após isso, repetiram-se as análises com feixe de íons mantendo as mesmas condições da primeira luva analisada (chamaremos a primeira luva analisada de luva A, a segunda de luva B e a terceira de luva C), ou seja, corrente de 8 nA/cm^2 durante 60 min, e mesmas condições de tensão aplicada nos detectores e ganho dos amplificadores. No total, portanto, foram obtidos três espectros com as mesmas condições de contaminação e medida da luva de vinil sem pó. Os espectros obtidos, ajustados na região do iodo estão na Figura 12, e apresentam alturas de sinal de iodo, em contagens, de $\Delta A_A = 10,72$, $\Delta A_B = 10,00$ e $\Delta A_C = 7,38$.

A incerteza média das medidas individuais δ é dada pelo desvio padrão, calculado pela equação (14), sendo N o número total de medidas, x_i a i -ésima medida e \bar{x} a média das medidas [22].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

ESPECTROS DE TRÊS LUVAS DE VINIL SEM PÓ MEDIDAS SOB AS MESMAS CONDIÇÕES

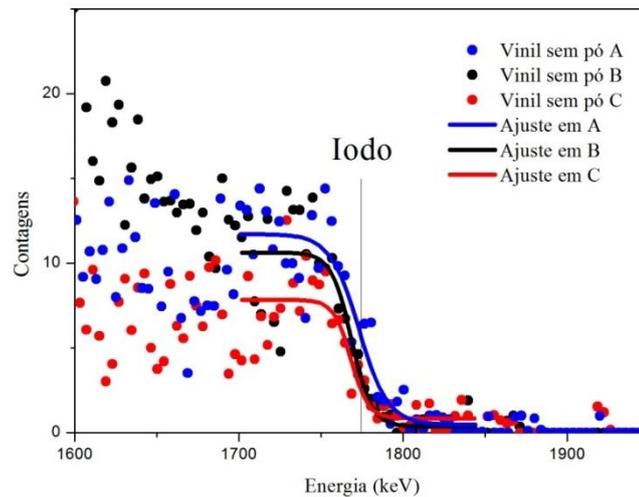


Figura 12 - Espectros de três luvas de vinil sem pó com mesmas condições de contaminação externa e de medida com feixe de íons.

Aplicando a equação (14) às três alturas encontradas nos ajustes A, B e C, encontraremos, em contagens, $\delta \approx 1,8$. Podemos tomar, portanto, 1,8 contagens como a incerteza média do sinal de iodo da luva de vinil sem pó A, utilizada para calcular a atividade da contaminação interna das luvas de vinil sem pó após 7 minutos de pré-contaminação. Dado que $\Delta A_A = 10,72 \pm 1,8$, temos uma incerteza estatística de aproximadamente 17 % para a contaminação de iodo da luva de vinil sem pó. Dado que as condições experimentais são muito parecidas, iremos extrapolar esse resultado para os sinais de iodo presentes nos espectros das luvas de nitrilo sem pó (com pré-contaminação de 7 minutos e análise com feixe durante 60 min), e estimar a mesma incerteza para os resultados de contaminação interna para esse tipo de luva.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise com Espectroscopia de Retroespalhamento Rutherford da efetividade de proteção de luvas de nitrilo sem pó, de vinil sem pó, de látex com e sem pó, determinou-se que apenas as luvas de látex, com ou sem pó, foram capazes de proteger as mãos contra contaminação de iodo radioativo. Além disso, estimou-se que, apenas uma gota de solução de iodeto de sódio com ^{131}I em soro fisiológico, com atividade típica para o serviço de Medicina Nuclear, é capaz de produzir altas taxas de dose na mão do indivíduo devido a permeação do iodo através das luvas de nitrilo e de vinil. Estimou-se que essas taxas de dose podem gerar

uma dose total anual maior do que o limite de dose para as mãos de indivíduos ocupacionalmente expostos, imposto pela CNEN.

Além disso, foi demonstrado que o tempo de contaminação tem papel importante na difusão do iodo através das luvas de nitrilo sem pó e de vinil sem pó, visto que, para a luva de nitrilo, uma espera de 20 minutos a mais gerou um aumento de 6 vezes na quantidade de iodo na parte interna da luva, enquanto que, na luva de vinil, um aumento de 53 minutos de espera aumentou em 30 vezes a quantidade de iodo na parte interna. Essa análise como um todo, portanto, justifica a prática de atenção e troca imediata da luva assim que percebidas contaminações externas de luvas.

É possível que a incidência de feixe de íons na técnica de Espectroscopia de Retroespalhamento Rutherford proporcione erros de medida, visto que a técnica proporciona um aquecimento local das luvas capaz de marcar a superfície atingida pelos íons. Esse aquecimento pode influenciar na difusão do iodo e provocar uma aceleração na mesma, visto que, fazendo uma analogia, a difusão em sólidos cristalinos é bem conhecida e depende da temperatura T com um importante fator $\propto e^{-1/T}$ [19]. Entretanto, mesmo no caso de que as atividades das contaminações internas tenham sido superestimadas, a luva de látex com ou sem pó não apresentou sinal de iodo na arte interna, mesmo no caso extremo de aumento de temperatura, e, portanto, ela é a luva que apresentou maior proteção frente à contaminação devido à difusão de iodo.

REFERÊNCIAS

- [1] Stephen F. Keevil. Physics and Medicine: a historical perspective. Disponível em [https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736\(11\)60282-1.pdf](https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736(11)60282-1.pdf), visitado em dezembro de 2019.
- [2] UFRGS, Ernest Rutherford (1871-1937), disponível em <http://www.ufrgs.br/fismed/rutherford.htm>, visitado em janeiro de 2020.
- [3] MIZRAHI, Salomon S. Mulheres na Física: Lise Meitner. *Rev. Bras. Ensino Fís.* [online], disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172005000400001, visitado em dezembro de 2019.
- [4] BAILEY, D. L. et al. (ed.). Nuclear medicine physics: a handbook for students and teachers. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014.
- [5] BUSHBERG, Jerrold T. et al. The Essential physics of medical imaging. 3rd ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- [6] IAEA, PODGORSK, E. B. (ed.). Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. Vienna, 2015.
- [7] BiodieselBR, Aplicações da Energia Nuclear: Indústria, 02 de fevereiro de 2011. Disponível em <https://www.biodieselbr.com/energia/nuclear/energia-nuclear-industria>, visitado em dezembro de 2019.
- [8] CNEN, Apostila Educativa: A História da Energia Nuclear. Disponível em <http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/historia-da-energia-nuclear.pdf>, visitado em dezembro de 2019.
- [9] BBC News, Como césio-137 em Goiânia pôs Brasil no mapa de piores acidentes radioativos do mundo, 14 de outubro de 2018. Disponível em <https://www.bbc.com/portuguese/geral-45783343>, visitado em dezembro de 2019.
- [10] National Geographic, Desastre de Chernobyl: o que aconteceu e os impactos a longo prazo, de 6 de junho de 2019, disponível em <https://www.nationalgeographicbrasil.com/2019/06/o-que-aconteceu-desastre-chernobyl-uniao-sovietica-ucrania-energia-nuclear>, visitado em dezembro de 2019.
- [11] IAEA, Notas sobre o Acidente Nuclear no Japão, de 15 de março a 01 de junho de 2011. Disponível em <http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/nota-IAEA.pdf> visitado em dezembro de 2019.
- [12] W. S. C. Williams, Nuclear and particle physics. Oxford at the Clarendon, 1991.
- [13] David Griffiths, introduction to Elementary particles, 2008.
- [14] Xavier, A.M., Moro, J.T., Heilbron, P.F.L. Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica. UFRGS/CNEN, 4ª Edição, 2014.
- [15] CNEN. Pagina Inicial, disponível em <http://www.cnen.gov.br/quem-somos>, visitado em dezembro de 2019.
- [16] THRALL, J. H.; ZIESSMAN, H. A. Medicina Nuclear. 2^o ed., 2003.

- [17] Chu, W.K., Mayer, J.W., and Nicolet, M.A. Backscattering Spectrometry, Academic Press, New York, 1978.
- [18] OIEA, Guía Práctica para la rápida identificación de fuentes radiactivas y equipos que las contienen, Proyecto RLA/9/028 (ARCAL XX), Directrices para el control de fuentes de radiación, Versão Adaptada, Dezembro de 2000.
- [19] CALLISTER, William D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- [20] GE Healthcare, Brivo NM615, disponível em http://www3.gehealthcare.com.br/pt-br/produtos/categorias/medicina_nuclear/general_purpose_cameras/brivo_nm615#tabs/tabFDDACD1F29864651A3DA116DA49A9832 , visitado em dezembro de 2019.
- [21] KU LEUVEN, Institute for nuclear and Radiation Physics, disponível em <https://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/rutherford-backscattering-spectrometry-and-ion-channeling>, visitado em dezembro de 2019.
- [22] John R. Taylor, Introdução à Análise de Erros, O estudo de Incertezas em medições Físicas. 2ª Edição, 2012.